



---

# EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA MEDICIÓN DE CALOR ESPECÍFICO DE UN MATERIAL

---

***GLADYS HELENA ABRIL BECERRA  
JOSE DAVID JOYA MONSALVE***

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN CEMOS  
BUCARAMANGA  
2007**

# EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA MEDICIÓN DE CALOR ESPECÍFICO DE UN MATERIAL

**GLADYS HELENA ABRIL BECERRA**  
**JOSE DAVID JOYA MONSALVE**

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y**  
**DE TELECOMUNICACIONES**  
**GRUPO DE INVESTIGACIÓN CEMOS**  
**BUCARAMANGA**  
**2007**

## **AGRADECIMIENTOS**

Especial agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, al grupo de investigación CEMOS, a nuestro director PhD CARLOS RODRIGO CORREA CELY, y nuestro codirector MI(c) OSCAR LEONARDO CADENA RODRÍGUEZ, por habernos facilitado los medios, guiado el proceso e impartido los conocimientos necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

Los Autores.

A Dios por guiar mi camino.

A mi padre José y a mi hermano Miguel quienes me acompañan desde el cielo. A mi hermano Iván. A mi madre Gladys por todo su amor, paciencia y apoyo incondicional.

A toda mi familia y amigos que de una u otra forma colaboraron para la realización de este proyecto.

***Gladys Helena Abril Becerra***

A Dios por ayudarme en esta etapa de mi vida.

A mis padres y a mi hermano por su apoyo y comprensión durante toda mi vida.

A mis amigos y a todas las personas que me acompañaron durante el desarrollo de este trabajo.

***Jose David Joya Monsalve***

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
<b>1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>2</b>
1.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES .....	2
1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR .....	3
1.2.1 Tipos de transferencia de calor .....	4
1.2.2 Flujo de calor en sólidos .....	8
1.3 CALOR ESPECÍFICO .....	11
1.3.1 Teoría y antecedentes históricos .....	11
1.3.2 Métodos para hallar el calor específico .....	13
1.4 MATERIAL DE PRUEBAS: COBRE .....	18
1.4.1 Características .....	19
1.4.2 Tipos comerciales de cobre .....	21
<b>2 EQUIPO DE MEDICIÓN .....</b>	<b>23</b>
2.1 MEDICIÓN FLUJO DE CALOR .....	23
2.1.1 Sensor de flujo de calor .....	23
2.1.2 Descripción de la tarjeta de flujo de calor .....	26
2.1.3 Consideraciones para la medición de $q$ .....	27
2.2 MEDICIÓN DE TEMPERATURA .....	28
2.2.1 Sensor de Temperatura .....	28
2.2.2 Descripción de la tarjeta de temperatura .....	32
2.2.3 Consideraciones en la medición de $T$ .....	33
2.3 ADAPTACIÓN BLUETOOTH .....	34
2.4 EQUIPO DE PRUEBAS .....	35
2.4.1 Consideraciones previas .....	35
2.4.2 Diseño de la caja de pruebas .....	36
<b>3 CÁLCULO DEL CALOR ESPECÍFICO .....</b>	<b>39</b>
3.1 MÉTODO I: LÁMINA DE COBRE EXPUESTA AL AIRE .....	41
3.2 MÉTODO II: CURVA DE CALENTAMIENTO .....	44
3.3 MÉTODO III: CURVA DE ENFRIAMIENTO .....	48
3.4 MÉTODO DESARROLLADO .....	51
3.4.1 Descripción Física del Experimento .....	51
3.4.2 Descripción Analítica del Experimento .....	54
<b>4 SOFTWARE .....</b>	<b>59</b>
4.1 FUNCIONES DEL SOFTWARE .....	59
4.1.1 Reconocimiento .....	60
4.1.2 Toma de datos .....	62
4.1.3 Análisis de datos .....	66
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
5.1 RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS .....	69
5.1.1 Protocolo de medición: .....	69
5.1.2 Experimentación .....	70
5.1.3 Análisis de los datos .....	83
<b>6 CONCLUSIONES .....</b>	<b>87</b>
<b>7 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>89</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO B .....</b>	<b>94</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALGUNOS MATERIALES .....	6
TABLA 1.2 EMISIVIDAD DE ALGUNOS MATERIALES .....	8
TABLA 1.3 ALGUNAS PROPIEDADES DEL COBRE.....	20
TABLA 1.4 CALOR ESPECÍFICO DEL COBRE PURO .....	21
TABLA 2.1 ESPECIFICACIONES DEL SENSOR DE FLUJO DE CALOR .....	25
TABLA 2.2 ESPECIFICACIONES DEL TERMISTOR.....	32
TABLA 3.1 RESULTADOS DE LAS MEDIDAS REALIZADAS CON EL MÉTODO I .....	43
TABLA 5.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LA VARIABLE $Q$ .....	83
TABLA 5.2 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LA VARIABLE $\Delta T$ .....	83
TABLA 5.3 VARIACIÓN DEL $c_p$ UTILIZANDO $Q_{PROM}$ .....	84
TABLA 5.4 VARIACIÓN DEL $c_p$ UTILIZANDO $\Delta T_{PROM}$ .....	84

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 CONDUCCIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE UNA SUPERFICIE .....	5
FIGURA 1.2 CURVA DE CALENTAMIENTO: TEMPERATURA VS TIEMPO .....	14
FIGURA 1.3 CURVAS CONSTRUIDAS CON EL MÉTODO DE ENFRIAMIENTO.....	18
FIGURA 2.1 CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN TERMISTOR .....	28
FIGURA 2.2 VISTA EXTERNA DE LA CAJA DE PRUEBAS .....	36
FIGURA 2.3 INTERIOR DE LA CAJA DE PRUEBAS .....	37
FIGURA 2.4 PIEZA MÓVIL DEL EQUIPO DE PRUEBAS .....	38
FIGURA 2.5 UBICACIÓN DE LAS TARJETAS DE ADQUISICIÓN EN LA CAJA DE PRUEBAS .....	38
FIGURA 3.1 INTERPOLACIÓN DE VALORES DE CALOR ESPECÍFICO TEÓRICOS PARA EL COBRE ENTRE 25 Y 44 [ °C ] DE TEMPERATURA.....	40
FIGURA 3.2 MASA DE LA LÁMINA DE COBRE.....	41
FIGURA 3.3 POSICIÓN DE LOS SENSORES .....	41
FIGURA 3.4 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA LÁMINA .....	42
FIGURA 3.5 VARIACIÓN DEL FLUJO DE CALOR EN LA LÁMINA .....	42
FIGURA 3.6 POSICIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA LA MEDICIÓN DE POTENCIA .....	44
FIGURA 3.7 FLUJO DE CALOR VS TIEMPO, DURANTE EL CALENTAMIENTO DE LA LÁMINA DE COBRE .....	45
FIGURA 3.8 POSICIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA .....	45
FIGURA 3.9 TEMPERATURA VS TIEMPO, DURANTE EL CALENTAMIENTO DE LA LÁMINA DE COBRE. ....	46
FIGURA 3.10 TEMPERATURA VS CALOR.....	47
FIGURA 3.11 MEDICIÓN DE TEMPERATURA CON VARIACIÓN EN LA FUENTE DE CALOR .....	48
FIGURA 3.12 TEMPERATURA VS POTENCIA .....	49
FIGURA 3.13 TEMPERATURA VS TIEMPO .....	50
FIGURA 3.14 UBICACIÓN DE LAS TARJETAS DE ADQUISICIÓN EN EL EQUIPO DE PRUEBAS .....	51
FIGURA 3.15 UBICACIÓN DE LOS SENSORES.....	52
FIGURA 3.16 UBICACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO .....	52
FIGURA 3.17 EQUIPO DE PRUEBAS DURANTE EL CALENTAMIENTO .....	53
FIGURA 3.18 DURANTE LA ADQUISICIÓN, CON EL SISTEMA DE CALENTAMIENTO AISLADO.....	54
FIGURA 3.19 RANGO UTILIZADO PARA LA OPERACIÓN DE DATOS.....	55
FIGURA 4.1 VENTANA PRINCIPAL DEL SOFTWARE DE VISUALIZACIÓN .....	60
FIGURA 4.2 ETAPA DE RECONOCIMIENTO .....	61
FIGURA 4.3 ETAPA DE TOMA DE DATOS .....	62
FIGURA 4.4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ALMACENAMIENTO DE DATOS.....	64
FIGURA 4.5 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL ALMACENAMIENTO DE DATOS.....	65
FIGURA 4.6 ESTRUCTURA DE BLOQUES DE REINICIAR .....	66
FIGURA 4.7 ANÁLISIS DE DATOS .....	67
FIGURA 4.8 ANÁLISIS DE DATOS .....	68
FIGURA 5.1 ADQUISICIÓN DE DATOS EN UN EXPERIMENTO.....	71
FIGURA 5.2 TEMPERATURA VS TIEMPO .....	72
FIGURA 5.3 FLUJO DE CALOR VS TIEMPO .....	72
FIGURA 5.4 FLUJO DE CALOR VS TIEMPO .....	73
FIGURA 5.5 TEMPERATURA VS TIEMPO .....	75
FIGURA 5.6 FLUJO DE CALOR VS TIEMPO .....	76
FIGURA 5.7 FLUJO DE CALOR VS TIEMPO .....	77
FIGURA 5.8 TEMPERATURA VS TIEMPO .....	79
FIGURA 5.9 FLUJO DE CALOR VS TIEMPO .....	80
FIGURA 5.10 FLUJO DE CALOR VS TIEMPO .....	81

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA MEDICIÓN DE CALOR ESPECÍFICO DE UN MATERIAL\*

**AUTORES:** ABRIL B. Gladys H.  
JOYA M. Jose D. \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Calor específico, Temperatura, Flujo de calor, Cobre.

**DESCRIPCIÓN:**

En el presente trabajo se propone y desarrolla un método para calcular indirectamente el calor específico de un material sólido homogéneo, a partir de la medición directa y simultánea de temperatura y flujo de calor. Para su implementación se seleccionó el cobre como material de pruebas y se utilizaron, para hacer la adquisición de los datos, dos prototipos correspondientes a tres trabajos de grado desarrollados al interior del grupo de investigación CEMOS.

Inicialmente se muestra un marco teórico con los conceptos necesarios para el desarrollo de este trabajo junto con algunas propiedades e información general del material de pruebas escogido. Seguidamente se hace un estudio de los prototipos utilizados para las mediciones, mostrando sus características y limitaciones. Luego se explican los diferentes métodos utilizados y se describe el software creado para la visualización y análisis de los datos obtenidos. Los métodos utilizados son evaluados por medio de un estudio comparativo entre los valores experimentales calculados y los referenciados en la literatura. Finalmente se muestran y analizan los resultados obtenidos con el método propuesto.

Como consecuencia del trabajo se obtiene un método diferente a los utilizados para la medición de calor específico que merece continúe su estudio para ser mejorado. Además, se dispone de una aplicación en LabVIEW que permite visualizar los datos de temperatura y flujo de calor en tiempo real, guardarlos y analizarlos para calcular el calor específico del material en prueba y su error relativo con respecto al valor teórico.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

**Director:** Carlos Rodrigo Correa C, PhD. **Codirector:** Oscar Leonardo Cadena R, MI(c).

**TITLE:** EVALUATION OF AN ALTERNATIVE METHOD TO THE MEASUREMENT OF SPECIFIC HEAT OF A MATERIAL.\*

**AUTHORS:** ABRIL B. Gladys H.  
JOYA M. Jose D.\*\*

**KEYWORDS:** Specific heat, Temperature, Heat flux, Copper.

**DESCRIPTION:**

In the present work it is proposed and developed a method to indirectly calculate the specific heat of a homogeneous solid material, from the direct and simultaneous measure of temperature and heat flux. To its implementation the copper was selected as the test material and were used, to make the corresponding measures, two prototypes corresponding to three graduate theses developed inside the research group CEMOS.

Initially it is shown a theoretical background with the concepts needed in the development of this work together with some properties and general information about the test material chosen. Subsequently it is made a study of the prototypes used to do the measure, showing its characteristics and limitations. Afterwards it is explained the different methods used and it is described a software made to visualize and analyze the obtained data. The used methods were evaluated through a comparative study between the experimental values calculated and the ones referred in the books. Finally the results obtained with the proposed method are analyzed and shown.

As a consequence of this work it is obtained a method different from the ones used to measure the specific heat that deserves its study be continued to be improved. Also, to have at one's disposal an application developed in LabVIEW that allows visualizing the temperature and heating flux data in real time, save them and analyzing them to get the specific heat of the test material and its relative error with regard to the theoretical value.

---

\* Engineer's degree work.

\*\* Faculty of Physic-Mechanical Engineerings. Electrical, Electronic Engineerings and Telecommunication's School, Electronic Engineering. **Director:** Carlos Rodrigo Correa C, PhD. **Co-director:** Oscar Leonardo Cadena R, MI(c).

## INTRODUCCIÓN

Para la construcción de máquinas o herramientas industriales se requiere estudiar las propiedades de los materiales que los componen. Estas últimas son las que definen su comportamiento y con frecuencia deben ser determinadas experimentalmente. Una forma de hacerlo es por medio de la medición directa de otras propiedades y haciendo relación entre ellas con los conceptos dados por las diferentes ciencias puras.

El **calor específico**,  $c_p$ , es una propiedad de los materiales usada principalmente en el estudio de flujos de energía en procesos termodinámicos. El  $c_p$  es la capacidad que tienen los materiales de absorción y emisión de calor [5]; es posible determinarlo a partir de la medición de las variables que lo definen. Para ello se utilizan dos tarjetas de adquisición, una de temperatura [9] y otra de flujo de calor [3], adaptadas a un módulo de transmisión *bluetooth* [2]. Estos equipos fueron diseñados y construidos al interior del grupo CEMOS<sup>1</sup>, y dan origen al presente trabajo de grado titulado "EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA MEDICIÓN DE CALOR ESPECÍFICO DE UN MATERIAL".

Con el presente proyecto se propone y desarrolla un método para calcular indirectamente el calor específico de un material sólido homogéneo, a partir de la medición directa y simultánea de temperatura y flujo de calor. Adicionalmente se verifica la técnica con un estudio comparativo de valores experimentales contra referenciados en la literatura, estos últimos, resultado del análisis obtenido con métodos aprobados por estándares internacionales.

Este documento se compone de cinco capítulos que describen el proceso y la evolución del proyecto. En el primero de ellos, se definen conceptos fundamentales para el cálculo del calor específico, esta parte es esencial por tratarse de un trabajo interdisciplinario, donde se incluyen diferentes áreas de estudio además de las abarcadas en la ingeniería electrónica. En el segundo capítulo se describe el equipo de medición, compuesto por las tarjetas de adquisición de temperatura y flujo de calor y la caja de pruebas diseñada y construida. Los prototipos son utilizados y puestos a prueba en diferentes métodos, descritos en el tercer capítulo. La visualización y registro de las variables medidas se realiza con el software desarrollado, explicado en la cuarta sección. En la última parte se realiza un análisis de los datos recolectados con el fin de probar el método propuesto y desarrollado.

---

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Electrónica, Modelado y Simulación.

# 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales necesarios para la realización del presente proyecto. Inicialmente se define el calor específico, las variables más importantes involucradas en el proceso de su obtención y se tratan los conceptos básicos de transferencia de calor. Se continúa con los antecedentes históricos, teoría y técnicas existentes utilizadas para el cálculo del calor específico. Finalizando el capítulo se realiza una descripción del material que fue seleccionado como objeto de pruebas.

## 1.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES

Las variables principales que intervienen en la definición de calor específico son:

### **Calor**

El calor es una forma de energía asociada al movimiento de las partículas que conforman la materia, se transfiere debido a gradientes o diferencias de temperatura. Puede generarse por reacciones químicas, nucleares, disipación electromagnética o mecánica. El concepto de calor está contenido en la primera ley de la termodinámica o principio de conservación de la energía: "Un cambio de la energía total (cinética, potencial e interna) es igual al trabajo realizado en la masa de control más el calor transferido a dicha masa" [5]. Esta definición se expresa mediante la ecuación 1.1:

$$dE = \delta W + \delta Q \quad [J]$$

1.1

donde:

$dE$  es el cambio de energía.

$\delta W$  es el trabajo realizado.

$\delta Q$  es el calor transferido.

### **Flujo de Calor**

La transferencia de calor es un intercambio de energía térmica que ocurre entre dos cuerpos que se encuentran a diferente temperatura. En este proceso de transferencia de energía se mide el flujo de calor o la cantidad

de calor que se transfiere a través de un área. El flujo de calor es proporcional a la diferencia de temperatura que se presenta entre los cuerpos que participan de la transferencia.

### **Temperatura**

La temperatura es un parámetro físico descriptivo y una propiedad de la materia. Indica la cantidad de energía cinética que poseen las partículas de un sistema.

### **Calor Específico**

El calor específico o capacidad calorífica específica,  $c_p$ , es la relación entre el calor y la temperatura, sujeta a la cantidad de masa del elemento estudiado. Es una magnitud propia de cada material, se define como: "La cantidad de energía, [J], necesaria para elevar la temperatura de una masa unitaria, [kg], en un grado, [K]" [12]. Esta relación se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

1.2

donde:

$Q$  es el calor aportado [J]

$c_p$  es el calor específico [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$m$  es la masa [kg]

$\Delta T$  es el cambio de temperatura [K]

## **1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR**

Es la transferencia de energía de un material o de un lugar a cierta temperatura, a otro material u otro lugar a una temperatura distinta. La interacción se mantiene hasta que las temperaturas se igualan, es decir, hasta que se alcanza el equilibrio térmico del sistema. Cuando la transferencia de calor es hacia dentro del sistema se conoce como adición de calor, según la convención de signos en sentido positivo, y cuando la transferencia de calor es hacia fuera del sistema se describe como rechazo de calor en sentido negativo. Para la ecuación 1.3, se tiene que la transferencia de calor por unidad de masa de un sistema se denota por

medio de  $q_m$ , donde  $Q$  representa la cantidad de calor transferida durante un proceso entre dos estados.

$$q_m = \frac{Q}{m} \quad [J/kg]$$

1.3

### 1.2.1 Tipos de transferencia de calor

En la literatura se utilizan diversas clasificaciones para definir los tipos de transferencia de calor [7], siendo estos:

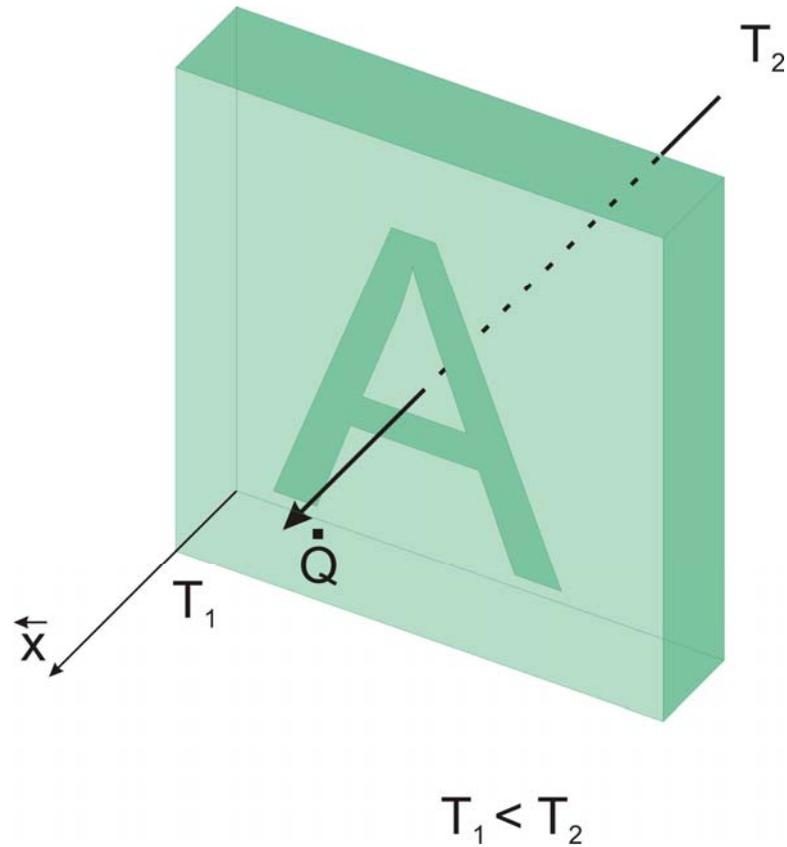
- Conducción
- Convección
- Radiación

#### **Conducción**

Es la transferencia de energía que se realiza desde partículas más energéticas de una sustancia hacia partículas adyacentes menos energéticas, debido a interacciones directas entre ellas. Este tipo de transferencia ocurre en los sólidos, líquidos y gases. En sólidos se presenta debido a la vibración de las moléculas de la estructura, mientras que en líquidos y gases ocurre debido a colisiones entre moléculas durante su movimiento aleatorio. La tasa de conducción de calor  $\dot{Q}$ , en una capa de espesor constante,  $\partial x$ , es proporcional a la diferencia de temperatura,  $\partial T$ , a través de la capa y al área transversal al flujo,  $A$ , es decir:

$$\dot{Q} = qA = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad [W]$$

1.4



**Figura 1.1 Conducción de calor a través de una superficie**  
Fuente: Autores

donde:

$\dot{Q}$  es el flujo de calor en la dirección  $\vec{x}$  [W]

$q$  es el flujo de calor [ $W/m^2$ ]

$A$  es el área transversal perpendicular al flujo de calor [ $m^2$ ]

$T$  es la temperatura dada en grados Kelvin [K]

$x$  es la coordenada en dirección del flujo [m]

$k$  es la conductividad térmica del sólido [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

La expresión anterior es conocida como Ley de Fourier de conducción de calor, e indica que la tasa de conducción de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección. El calor se transfiere en la dirección que decrece la temperatura, es decir, de la región de alta temperatura a la región de baja temperatura. La constante de proporcionalidad,  $k$ , representa la conductividad térmica del material. En la siguiente tabla se listan algunos materiales con su respectiva conductividad térmica.

Tabla 1.1 Conductividad térmica de algunos materiales

MATERIAL	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Plata	420
Cobre	400
Aluminio	240
Acero	79
Hielo	1,7
Vidrio. Hormigón	0,8
Agua	0,59
Músculo animal. Grasa	0,2
Madera. Asbestos	0,08
Filtro. Lana mineral	0,04
Aire	0,024
Vello	0,019

Fuente: Termodinámica de Cengel.

## Convección

Es la transferencia de energía que se realiza entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que se encuentra en movimiento. Cuanto mayor es el movimiento del fluido mayor es la transferencia de calor por convección, ante la ausencia de movimiento la transferencia se realiza solamente por conducción. Este tipo de transferencia de calor se presenta de manera natural o forzada. La convección forzada se da cuando el líquido es obligado o forzado a fluir por un camino determinado o sobre una superficie, y la convección natural cuando el movimiento del fluido es provocado por fuerzas de flotación debido a diferencias en las densidades por efecto de la variación de temperatura.

Debido a que no se puede determinar exactamente la cantidad de transferencia de calor por convección en un proceso, se utiliza una relación empírica que muestra la mayor aproximación posible, esta relación es conocida como la ley de enfriamiento de Newton, y se define como:

$$q_s = h_c(T_s - T_e) \quad [W]$$

1.5

donde:

$h_c$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección  $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ .

Se determina experimentalmente.

$T_s$  es la temperatura de la superficie [K]

$T_e$  es la temperatura del fluido en la corriente libre [K]

## **Radiación**

Es la energía emitida por la materia por medio de ondas electromagnéticas, por lo que a diferencia de la conducción y convección, esta no requiere de un medio para su propagación entre el sistema y sus alrededores, y en efecto es más rápida. Si la radiación se propaga como resultado de una diferencia de temperatura es llamada radiación térmica. Todo material emite radiación térmica y su intensidad depende de la temperatura a la que este se encuentre, así pues a mayor temperatura mayor radiación emite el sistema.

La radiación varía dependiendo del tipo de material, y suele considerarse como un fenómeno superficial, debido a que en algunos materiales, especialmente sólidos opacos, la emitida por las regiones internas no alcanza a llegar a la superficie y la que incide solo alcanza a penetrar unos cuantos micrones en la estructura. La superficie que mejor emite radiación, a una tasa máxima, es conocida con el nombre de cuerpo negro y es idealizada como base para representar el comportamiento de superficies reales. La relación de transferencia de calor por radiación, es conocida como la ley de Stefan-Boltzmann y se expresa como:

$$\dot{Q}_{12} = \varepsilon_1 \cdot A_1 (\sigma \cdot T_1^4 - \sigma \cdot T_2^4) \quad [W]$$

1.6

donde:

$\dot{Q}_{12}$  es el intercambio neto de energía radiante, transferencia de calor, de la superficie 1 a la superficie 2. [W]

$\varepsilon_1$  es la emisividad de la superficie 1, y representa lo cerca que se encuentra un material de aproximarse a un cuerpo negro idealizado.

$A_1$  es el área de la superficie [m<sup>2</sup>]

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann =  $5.67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$

A continuación se listan algunos materiales, con su respectivo valor de emisividad.

Tabla 1.2 Emisividad de algunos materiales

MATERIAL	TEMPERATURA [°C]	EMISIVIDAD
Agua destilada	20	0.96
Hielo	-10	0.96
Suelo húmedo	20	0.95
Suelo seco	20	0.92
Arena	20	0.90
Nieve	-10	0.85
Aluminio anodizado	100	0.55

Fuente: Extractado de Rao et al., 1990

### 1.2.2 Flujo de calor en sólidos

Como ya se ha expresado, la transferencia de calor se da en tres formas principales, por conducción, convección y radiación. Así mismo se puede definir teóricamente la distribución de flujo de calor que en general es multidimensional, es decir, en dos o tres dimensiones distintas. La conducción estacionaria multidimensional sin generación de calor se rige por la ecuación de Laplace y se desarrolla por el método de separación de variables. Para definir la conducción de calor unidimensional se usa la ley de Fourier, pero como la variación de calor en los cuerpos puede ser en las tres coordenadas es necesario definir una ecuación más general. Para medios isotrópicos, en donde la conducción es la misma en todas las direcciones, las componentes de flujo de calor en coordenadas cartesianas son:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

1.7

donde  $q_x$  es la componente de flujo de calor por unidad de área en la dirección  $x$ ,  $\partial T / \partial x$  es la derivada parcial de la temperatura respecto a  $x$  y  $k$  es la conductividad. De forma vectorial la ecuación es:

$$\mathbf{q} = -k \cdot \nabla T$$

1.8

donde  $\mathbf{q}$  es el vector de flujo de calor por conducción, y  $\nabla T$  es el gradiente del campo escalar de temperaturas. La expresión para  $\mathbf{q}$  es:

$$\mathbf{q} = \mathbf{i}q_x + \mathbf{j}q_y + \mathbf{k}q_z$$

Si la conductividad,  $k$ , es constante y no depende de la temperatura, ni de la posición, se obtiene:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q}_v'''$$

1.9

donde  $\dot{Q}_v'''$  [ $W/m^3$ ] es la velocidad de producción interna de calor o volumétrica. Cuando no hay generación de calor interno,  $\dot{Q}_v''' = 0$ , y  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

1.10

$\alpha$  se reemplaza en la ecuación 1.9, y se obtiene la ecuación de Fourier o ecuación del calor o de la difusión, 1.11, la cual rige la distribución de temperaturas en un sólido,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

1.11

donde  $\alpha$  es una propiedad termofísica del material llamada difusividad térmica. Es la relación entre la conductividad térmica, y la capacidad calorífica volumétrica. Cuanto mayor es  $\alpha$ , mayor es la velocidad con la que se propagan las variaciones de temperatura en un sólido.

En régimen estacionario y sin generación interna, la ecuación resultante es la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

1.12

Cuando los problemas de conducción se efectúan en superficies cilíndricas o esféricas, es necesario trabajar con las coordenadas, correspondientes, aprovechando la ecuación general dada con el operador laplaciano:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \nabla^2 T + \dot{Q}_V'''$$

1.13

En muchos casos intervienen regiones adyacentes que pueden ser muy distintas. Por eso es necesario conocer las condiciones térmicas de cada una de las superficies de contacto. Se requiere que tanto el flujo de calor por unidad de área como la temperatura sean continuos. Así, las soluciones en cada región de la ecuación de conducción deben estar ligadas. Sin embargo, para problemas más complejos, frecuentemente es mejor desligar las regiones y considerarlas por aparte. Los tipos de condiciones de contorno, utilizadas en este caso, son:

- Para  $T_s$ , temperatura de la superficie, si se tiene una superficie en la coordenada  $x = L$  la condición de contorno del primer tipo o de Dirichlet es:

$$T|_{x=L} = T_s$$

1.14

- Si el flujo de calor por unidad de área de la superficie,  $q_s$ , es conocido, la condición de contorno del segundo tipo o de Neumann es:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_s$$

1.15

- Si la región adyacente es un fluido, se puede utilizar la ley de enfriamiento de Newton para describir la transferencia de calor con la condición de contorno del tercer tipo o mixta:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_c (T|_{x=L} - T_e)$$

1.16

- De la misma forma si se cede calor a los alrededores por radiación es una condición de contorno del cuarto tipo o de radiación:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \sigma F (T|_{x=L}^4 - T_e^4)$$

1.17

## 1.3 CALOR ESPECÍFICO

Para calcular el calor específico en un material, se han desarrollado diferentes teorías. Entre ellas, la más conocida por su sustento experimental, es la teoría de Dulong y Petit. En esta sección se hará una reseña del trabajo realizado por estos científicos para calcular el calor específico en un sólido. Posteriormente se presenta la calorimetría, como campo de estudio para calcular la cantidad de calor absorbido o liberado en un proceso de transferencia. Finalmente se describen algunos métodos para hallar el calor específico, resultado del desarrollo de una aplicación complementaria dada al calorímetro.

### 1.3.1 Teoría y antecedentes históricos

#### **Aporte teórico: Dulong y Petit**

En los experimentos realizados por Dulong y Petit, se encontró que el calor específico de un sólido, a temperatura ambiente, es similar para diferentes materiales, aproximadamente  $6 \text{ [cal/mol}\cdot\text{K]}$ , independientemente del tipo de elemento químico que lo constituya [4]. Este planteamiento fue interpretado, basado en la estadística clásica:

- Un sólido puede considerarse como una red cristalina donde cada átomo lleva a cabo oscilaciones armónico-simples en torno a su posición en la red en tres dimensiones.
- En un mol hay  $N_o$  átomos, cada uno tiene tres grados de libertad, por lo tanto un mol del sólido tiene  $3\cdot N_o$  grados de libertad. A cada grado se le asigna una energía total promedio  $k\cdot T$ . Entonces, la energía total interna es:

$$E = 3 \cdot N_o \cdot k \cdot T = 3 \cdot R \cdot T$$

▪ 1.18

donde:

$R$  es Constante Universal de los gases =  $8.314 \text{ [J/mol}\cdot\text{K]}$

$N_o$  es Número de Avogadro =  $6.022 \cdot 10^{23} \text{ [átomos}\cdot\text{mol}^{-1}]$

- La capacidad calorífica con volumen constante:

$$c_v = \frac{dE}{dT} = 3 \cdot R = 25 \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \right]$$

1.19

**Aporte teórico: Debye**

Sin embargo, en experimentos posteriores se demostró que con la disminución de la temperatura, las capacidades caloríficas molares varían. Así cuando disminuye la temperatura, el calor específico de los sólidos tiende a cero, y cerca del cero absoluto el calor específico varía como  $T^3$ . Debye encontró una teoría que se ajusta a los resultados experimentales. Por otro lado, Einstein consideraba los átomos del sólido como si vibraran independientemente entre sí. Realmente los átomos están fuertemente acoplados y por eso uno no puede ponerse a vibrar sin perturbar a sus vecinos y por ello a todo el sólido. Sin embargo, Debye consideró un sistema de  $3 \cdot N_0$  vibraciones acopladas y realizó una superposición de modos elásticos de vibración utilizando la cuantización de la energía de los osciladores atómicos [1]. Así, en la aproximación de Debye la energía interna de la red está dada por:

$$E = 3nRF\left(\frac{\Theta}{T}\right) \quad 1.20$$

donde:

$\Theta$  es Temperatura de Debye, en este punto los átomos de la red vibran con frecuencia máxima. Cantidad propia del tipo de sustancia que constituye al sólido [K]

$n$  es el número de moles del sólido

Luego:

$$F\left(\frac{\Theta}{T}\right) = \frac{3}{\left(\frac{\Theta}{T}\right)^3} \int_0^{\Theta/T} \frac{y^3}{e^y - 1} dy \quad 1.21$$

Derivando respecto a  $T$  de la expresión, se obtiene:

$$c_v = 3R\left(\frac{T}{\Theta}\right)^3 \int_0^{\Theta/T} \frac{y^4 * e^y}{(e^y - 1)^2} dy \quad 1.22$$

A altas temperaturas, cuando

$$T \gg \Theta, F(\Theta/T) = 1 \quad 1.23$$

El resultado es el mismo al dado por Dulong y Petit, mientras que a bajas temperaturas el calor específico es proporcional a  $T^3$ .

### **La Calorimetría**

A partir de la definición del calor específico para un material, donde se indica que se necesita inducir un proceso de transferencia de calor entre dos cuerpos que se encuentran a diferentes temperaturas, se identifican tres variables fundamentales; la masa del cuerpo, la variación de temperatura y la cantidad de calor absorbido o liberado, durante el proceso de transferencia. Al tener en cuenta que la masa y la temperatura son características que se miden directamente sobre el cuerpo de estudio, se debe considerar la forma en que se mide la cantidad de calor aportado del cuerpo a prueba. De esta tarea se encarga la calorimetría, de medir el calor en un proceso químico o físico, usando un calorímetro.

La calorimetría es una ciencia que permite encontrar la cantidad de energía que acompaña una transformación química o física en una sustancia, por medio del calor liberado o absorbido en el proceso. La herramienta usada para medir el calor de resultante de la variación es el calorímetro. El primer calorímetro fue construido en 1720 y usado para determinaciones de calor de vaporización del agua y calores específicos de diversas sustancias. El prototipo inicial impulso a los investigadores de la época a la creación de nuevos diseños de calorímetros, el resultado es la diversidad de sistemas, fenómenos y condiciones de interés, que hace difícil mantener un único modelo de calorímetro. Sin embargo los más comunes, son los calorímetros adiabáticos, calorímetros isotérmicos y los calorímetros isoperibólicos.

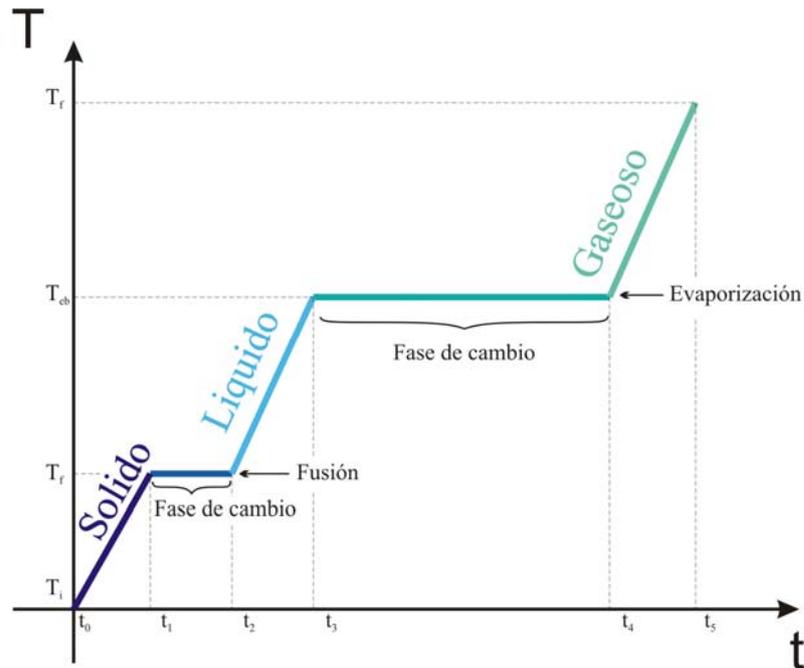
Concluyendo, se tiene que el calorímetro es una herramienta para medir el calor liberado o absorbido y además puede utilizarse para determinar el calor específico de un cuerpo. Con esta última funcionalidad ha evolucionado su diseño. Sin embargo existen otras formas de hallar el calor específico basados en diferentes métodos. Las dos mas conocidas son el método de la curva de calentamiento y el método de la curva de enfriamiento [1].

#### **1.3.2 Métodos para hallar el calor específico**

##### ***Método de la curva de calentamiento***

El método estudia la curva de calentamiento para un material en prueba. Para desarrollarlo, primero se aplica una fuente de calor controlada a un

sistema, se mide la temperatura en función del tiempo, teniendo en cuenta que el sistema no transfiera calor al medio. Así se obtiene una curva de calentamiento, en donde la pendiente y el valor suministrado a la fuente de calor, permiten hallar la cantidad de calor específico. La curva de calentamiento, figura 1.2, muestra como varía la temperatura de un material en el tiempo a medida que se le va suministrando energía, es utilizada para observar los cambios de estado del material y para medir su calor latente de fusión y calor latente de vaporización.



**Figura 1.2 Curva de calentamiento: Temperatura vs tiempo**  
Fuente: Autores

En la generación de la curva de calentamiento primero se registra como varía la temperatura del material en el tiempo. En el momento en que el material empieza a cambiar de estado sólido a líquido, la temperatura en este no cambia hasta que todo el calor latente de fusión sea suministrado. Una vez terminado el proceso, la temperatura del material sigue aumentando hasta que cambie de estado líquido a gaseoso, utilizando el calor latente de vaporización. Finalmente la temperatura se incrementa nuevamente al entrar al estado gaseoso. Para que el material pase directamente de estado sólido a gaseoso, es necesario aplicarle el calor latente de sublimación, cantidad de energía igual a la suma entre el calor latente de fusión y el de vaporización. Si la fuente de calor es constante, el calor aplicado en cada fase se obtiene por su duración y los valores de calor específico medio, el calor latente de fusión y el de vaporización, se obtienen con el calor aplicado en cada fase.

Concluyendo, el calor específico medio, para el estado sólido, se halla a partir del calor aplicado en esta primera fase y la masa del material:

$$c_{ps} = \frac{Q_1}{m \cdot (T_f - T_i)}$$

1.24

donde:

$Q_1$  es el calor aplicado [J]

$m$  es la masa del material [kg]

$c_{ps}$  es el calor específico medio del material en estado sólido [J/kg · K]

$T_f - T_i$  es el cambio de temperatura en el intervalo analizado [K]

El calor latente de fusión, necesario para el cambio de fase entre el estado sólido y el líquido, depende de la masa del material y del calor aplicado durante el proceso:

$$\Delta H_{fusión} = \frac{Q_2}{m}$$

1.25

donde:

$Q_2$  es el calor aplicado entre  $t_1$  y  $t_2$  [J]

$\Delta H_{fusión}$  es el calor latente de fusión del material [J/kg]

El calor específico medio para el estado líquido depende del calor aplicado en el intervalo entre  $t_2$  y  $t_3$ :

$$c_{pl} = \frac{Q_3}{m \cdot (T_{eb} - T_f)}$$

1.26

donde:

$Q_3$  es el calor aplicado entre  $t_2$  y  $t_3$  [J]

$c_{pl}$  es el calor específico del material en estado líquido [J/kg · K]

$T_{eb} - T_f$  es el cambio de temperatura entre  $t_2$  y  $t_3$  [K]

En la fase de cambio entre líquido y gaseoso, el calor latente de vaporización depende de la masa y del calor aplicado al material:

$$\Delta H_{vaporización} = \frac{Q_4}{m}$$

1.27

donde:

$Q_4$  es el calor aplicado entre  $t_3$  y  $t_4$  [J]

$\Delta H_{\text{vaporización}}$  es el calor latente de vaporización [J/kg]

Finalmente el calor específico medio para el estado gaseoso se halla por medio del calor aplicado en la última fase:

$$c_{pv} = \frac{Q_5}{m \cdot (T_f - T_{eb})}$$

1.28

donde:

$Q_5$  es el calor aplicado entre  $t_4$  y  $t_5$  [J]

$c_{pv}$  es el calor específico del material en estado gaseoso [J/kg · K]

$T_f - T_{eb}$  es el cambio de temperatura en la última fase [K]

### **Método de la curva de enfriamiento**

El método estudia la curva de enfriamiento del material en prueba. Se utiliza una fuente controlada de calor, el sistema al que se le va a medir el  $c_p$  y un medio más frío al cual se le va a transferir calor. Primero se fija el valor de la fuente de calor y se mide la temperatura a la que el sistema alcanza el equilibrio. Luego se aumenta su valor y se mide nuevamente la temperatura de equilibrio. El procedimiento debe tener suficientes repeticiones para obtener la curva de temperatura contra la potencia suministrada de la fuente controlada. Luego cuando se identifica la temperatura más elevada del sistema, se suprime el suministro de potencia y se realiza una medición sucesiva de la temperatura con respecto al tiempo mientras la muestra se enfría.

Para calcular el calor específico se debe hacer un cambio en las variables independientes de la ecuación. Entonces, el calor aportado por un material con referencia a la cantidad de flujo de calor transferido, se define con la siguiente ecuación:

$$Q = q \cdot A \cdot t \quad [J]$$

1.29

donde:

$Q$  es la energía aportada en forma de calor [J]

$q$  es el flujo de calor en el material [W/m<sup>2</sup>]

$A$  es el área transversal que atraviesa el flujo de calor [m<sup>2</sup>]

$t$  es el tiempo de duración de la transferencia de energía [s]

El calor aportado según la variación de energía interna de la muestra es:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [J] \quad 1.30$$

De esta forma el calor aportado en un elemento infinitesimal de tiempo es igual a:

$$\begin{aligned} \delta Q &= q \cdot A \cdot dt \\ q \cdot A \cdot dt &= m \cdot c_p \cdot dT \end{aligned} \quad 1.31$$

Conociendo que:

$$q \cdot A = P \quad [W] \quad 1.32$$

donde:

$P$  es la potencia [W]

Remplazando 1.32 en la ecuación 1.31:

$$\begin{aligned} P \cdot dt &= m \cdot c_p \cdot dT \\ \frac{dT}{dt} &= \frac{P}{m \cdot c_p} \end{aligned}$$

Se obtiene una ecuación para hallar el calor específico del material por medio de la potencia y la velocidad de cambio en el tiempo de la temperatura:

$$c_p = \frac{P}{m \cdot \frac{dT}{dt}} \left[ \frac{\frac{W}{kg \cdot K}}{\frac{s}{s}} \right] \quad 1.33$$

Según la ecuación, se debe hallar la derivada de la temperatura respecto al tiempo, y la potencia suministrada por la fuente a partir de las curvas construidas en el método, figura 1.3, Temperatura vs Potencia y Temperatura vs tiempo. Con los datos calculados y la masa del cuerpo se calcula el valor de calor específico para el material sometido a pruebas.

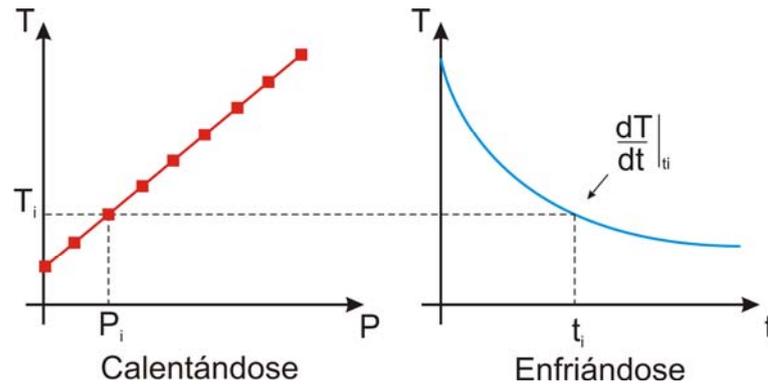


Figura 1.3 Curvas construidas con el método de enfriamiento

Fuente: Autores

### **Otros métodos existentes**

Existen otros procedimientos para la medición de calor específico, basados en los dos métodos anteriores. Entre ellos se encuentra el método de las mezclas. Consiste en mezclar, de la manera más completa posible, dos cuerpos de diferentes temperaturas y medir la resultante en la mezcla una vez ha sido alcanzado el equilibrio térmico. Con la capacidad calorífica del cuerpo mezclador y las temperaturas medidas se halla la capacidad calorífica del cuerpo mezclado [10].

El método de las mezclas es usado frecuentemente en calorimetría a causa de la simplicidad de los instrumentos que se utilizan para realizarlo, sin embargo, tiene baja precisión. El método proporciona una medida cercana al valor medio de calor específico en la proximidad de la temperatura ambiente.

## **1.4 MATERIAL DE PRUEBAS: COBRE**

El propósito general del presente proyecto es evaluar como método alternativo la medición indirecta de calor específico en un material sólido a partir de la medición simultánea y directa, de flujo de calor y de temperatura. Para ello, se parte de la definición de calor específico, donde se involucran tres variables; la masa, el delta de temperatura y el calor absorbido o liberado por el material a prueba.

Sin embargo, el problema de hallar el calor específico se hace más sencillo al seleccionar como objeto de pruebas un material cuya masa es conocida, porque se reduce a la obtención de dos cantidades, calor y variación de temperatura. El calor absorbido o liberado, de un cuerpo respecto a otro

cuerpo, se calcula a partir de la medición del flujo de calor, dada por la diferencia de temperatura entre los cuerpos. La variación de temperatura es medida durante el tiempo en que el cuerpo con mayor temperatura transfiere calor hacia el cuerpo con menor temperatura, hasta alcanzar el equilibrio térmico.

De esta forma con la medición de temperatura y flujo de calor se obtiene el calor aportado y el delta de temperatura respectivamente. Es decir, el proceso de medición se reduce a encontrar dos variables, siempre que se conozca la masa del material que se utilice en todas los experimentos. Es por ello que se selecciona un material de pruebas: el cobre, el cual se ha sido escogido por sus características físicas y químicas, fácil manejo en diferentes procesos, usado ampliamente en la industria y con amplia documentación. El cobre ha sido objeto de estudio en experimentos de calorimetría, es decir, tiene un calor específico conocido a diferentes temperaturas, por ello se puede comparar los valores calculados a partir de las pruebas de medición de flujo de calor y temperatura.

El cobre es uno de los elementos mas extendidos en la naturaleza, está clasificado en la tabla periódica como metal debido a sus propiedades. El estado sólido es característico por que la fuerza de cohesión presente es mayor que la de repulsión, provocando la disminución de los espacios intermoleculares. Los sólidos tienen cierta dureza que hace compleja la separación de sus moléculas, se caracterizan por tener forma determinada. Los metales son cuerpos simples, dotados de cierto brillo llamado metálico, son buenos conductores del calor y electricidad, en general son elementos dúctiles y maleables.

#### **1.4.1 Características**

Es un metal de color rojizo, un poco rosáceo cuando es muy puro, es inodoro. Fundido toma un matiz gris azulado. Las láminas muy delgadas son translucidas y transmiten una luz verdosa.[6].

#### ***Estado y naturaleza***

Se encuentra en la naturaleza en estado libre muy raramente, generalmente esta combinado con el oxígeno, el azufre y el ácido carbónico, la mezcla es llamada mineral. Para extraer el cobre del mineral donde se encuentra, se recurre a ciertos procesos, químicos o eléctricos, que reciben el nombre de metalurgia.

## **Propiedades**

Raramente se presenta en cristales bien formados, generalmente se encuentra en masas y placas. El cobre es un material blando, maleable y dúctil, ya que es posible transformarlo en láminas muy delgadas o hilos muy finos. La característica de la resistencia de tracción indica que el material soporta la tracción de cargas sin que se produzca rotura. También permite tratamiento térmico, temple y recocido.

La siguiente tabla menciona algunas de las características para el cobre,

**Tabla 1.3 Algunas propiedades del cobre**

<b>PROPIEDAD</b>	<b>VALOR</b>
<b>Densidad ó Masa específica</b>	8920 [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Peso atómico</b>	63,54
<b>Punto de fusión</b>	1083[°C] ó 1356 [K]
<b>Resistencia en tracción</b>	25-30 [kg/mm <sup>2</sup> ]

Fuente: Materiales Electrotécnicos Modernos de René Laurent

El cobre es un material muy importante en la industria eléctrica, debido a su valor como conductor, después de la plata es el material con mayor conductividad eléctrica, pero a diferencia de ésta su precio es menor.

### ▪ **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica del cobre es 59.6 [S/m], 96 con referencia a la conductividad relativa asignada a la plata, 100. Esta medida depende de algunas condiciones, la más importante es la pureza; es decir, la variación de la conductividad del cobre estará determinada por la mayor o menor cantidad de materias extrañas de origen mineral. El cobre afinado, cuyas impurezas han sido eliminadas, presenta una conductividad relativa de 99.95. El cobre bruto presenta valores bajos, dependiendo de la cantidad de impurezas que contiene. Otro factor que afecta la conductividad eléctrica en menor grado, es el proceso de elaboración, de este modo resulta el cobre laminado mejor conductor que el cobre fundido.

### ▪ **Calor específico y Conductividad térmica**

Posee un calor específico bajo, igual a 381 en el rango entre 2.4 [°C] y 21.6 [°C], es decir, que para elevar en un grado centígrado una masa de cobre de un kilogramo, se necesitan 381 joules. La importancia de

esta propiedad, es que el cobre, al poseer menor calor específico en comparación a otros materiales, retiene poco calor en su estructura bajo las mismas condiciones de temperatura.

Como el calor específico del cobre no es una cantidad constante, se asignan valores a distintas temperaturas:

**Tabla 1.4 Calor específico del cobre puro**

<b>TEMPERATURA [K]</b>	<b>CALOR ESPECÍFICO [J/kg K]</b>
200	356
300	385
400	397
500	412
600	417
800	433
1000	451
1200	480

Fuente: Fundamentos de transferencia de calor, Incropera

El calor específico y la conductividad térmica varían con la temperatura en menor grado para temperaturas inferiores a 300 [°C]. La conductividad térmica en los conductores eléctricos es importante, porque al no dejar pasar calor con facilidad, lo retiene en su masa, aumentando con esto su temperatura y ocasionando disminución de su conductividad eléctrica. De este modo los conductores eléctricos serán mejores, a medida que aumente la facilidad de liberar calor, es decir conducción térmica.

### 1.4.2 Tipos comerciales de cobre

Los tipos de cobre utilizados en la industria son: cobre electrolítico, cobre fundido, y cobre laminado.

El **cobre electrolítico** es el obtenido por medio de la corriente eléctrica, al descomponer un baño de sulfato de cobre, llamado electrolito. También es llamado cobre puro obtenido electrolíticamente. El proceso se denomina refinado del cobre.

El **cobre fundido**, se obtiene por fundición. Generalmente presenta una estructura no compacta y su peso específico es inferior al conocido. El cobre fundido al aire libre tiene la propiedad de absorber de él ciertos gases, especialmente el oxígeno, que quedan aprisionados entre sus

moléculas, dándole una estructura esponjosa, lo que hace disminuir su densidad.

El **cobre laminado**, es aquel que ha sido trabajado mecánicamente, sea por medio del laminador, por medio de la hilera, o por medio del martillo. Este tipo de cobre presenta una estructura más compacta, siendo su peso específico superior a otros tipos. Su dureza también aumenta con esta operación.

Finalmente se selecciona una lámina de cobre puro, con el fin de tener criterio de comparación entre los valores que se encontrarán de calor específico y los valores teóricos del cobre puro, referenciados en la literatura.

## 2 EQUIPO DE MEDICIÓN

Como se mencionó en la sección 1.4, el problema de calcular el calor específico para un sólido homogéneo de forma indirecta se reduce a la medición directa de la temperatura y el flujo de calor, siendo la masa del cuerpo a prueba una constante de valor conocido. Así se calculan las variables usando las dos tarjetas de adquisición, una para la temperatura [9] y otra para el flujo de calor [3], diseñadas y elaboradas en dos proyectos de grado anteriores, al interior del grupo CEMOS.

Es necesario conocer el funcionamiento del equipo disponible para la adquisición. Para ello, en el presente capítulo se describirán generalidades, características, parámetros físicos y condiciones de operación de los sensores y las respectivas tarjetas de adquisición. Posteriormente se dará una descripción del módulo *bluetooth* adaptado a cada dispositivo de medición para la transmisión inalámbrica de la información, implementado anteriormente en un proyecto de grado [2], al interior del grupo CEMOS. Finalizando el capítulo, se describirá el diseño realizado para el equipo de calibración y pruebas.

### 2.1 MEDICIÓN FLUJO DE CALOR

#### 2.1.1 Sensor de flujo de calor

##### **Generalidades**

Existen formas directas e indirectas para cuantificar el flujo de calor en un cuerpo. Una forma directa es el uso de un sensor de flujo de calor para la medición. Hay sensores de flujo de calor fabricados a partir de un conjunto de termocuplas que forman un arreglo de placas paralelas.

El tipo de sensor mencionado es plano y en contacto con un cuerpo, mide el gradiente de temperatura entre la cara que da al aire libre y la cara unida al cuerpo. El flujo de calor medido por este es proporcional a ese gradiente y se define como:

$$q = \frac{\lambda_s}{L_s} * \Delta T \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

2.1

donde:

$L_s$  es el ancho de la placa [m]

$\lambda_s$  es la conductividad térmica del material del que está fabricado el sensor [ $W/m \cdot K$ ]

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre superficies [K]

El interior del sensor está constituido con base en termopilas; éstas generan una tensión a la salida del sensor, proporcional a la variación de la temperatura de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V = n * C * \Delta T \quad [V] \quad 2.2$$

donde:

$n$  es el número de termopilas del sensor

$C$  es la constante de relación de Tensión [ $\mu V/K$ ]

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre superficies [K]

La expresión para el flujo de calor medido, proporcional a la tensión generada por el sensor:

$$q = \frac{\lambda_s}{L_s} * \frac{1}{n * C} * V \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad 2.3$$

Las variables de esta ecuación son parámetros físicos derivados de la construcción del sensor, entonces es posible establecer una constante de proporcionalidad. Usualmente es suministrada por el fabricante del sensor, o puede hallarse mediante un proceso de calibración.

### **Sensor Seleccionado**

Los autores del proyecto de grado referenciado [3], seleccionaron el sensor de acuerdo a ciertos requerimientos de diseño como: rango de trabajo, flexibilidad del material, precisión, sensibilidad y respuesta en el tiempo.

En primera instancia, consideraron el rango de trabajo que es definido en función de la temperatura y cuya curva relacionada es aproximadamente una recta, para garantizar una zona de trabajo lineal entre 30 [°C] y 50 [°C].

Al tener en cuenta la flexibilidad del material, estudiaron eventos como la pérdida de calor medido en la superficie del material en estudio, debido a

corrientes de convección. Esta posibilidad se redujo al seleccionar un sensor adaptable a la geometría del cuerpo a medir.

Para la selección del sensor también tuvieron en cuenta la sensibilidad, ya que resulta conveniente utilizar uno con alto grado de sensibilidad adelantándose a posibles limitaciones en el tratamiento de los datos. La sensibilidad esta determinada por el área y aumenta con el número de termopilas en el sensor.

Por otra parte, consideraron la respuesta en el tiempo. Aunque las variaciones en la medición de flujo de calor se den lentamente, una respuesta en el tiempo aceptable facilita el acoplamiento al sistema de comunicación y evita la aparición de retardos que puedan afectar considerablemente la medición.

El sensor que seleccionaron para el equipo de medición de flujo de calor, fue el fabricado por la empresa CAPTEC, cuyas características son:

**Tabla 2.1 Especificaciones del sensor de flujo de calor**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Área	25 [cm <sup>2</sup> ]
Rango de Trabajo	-180 [°C] hasta 200 [°C]
Rango De Entrada	-500 [kW/m <sup>2</sup> ] hasta 500 [kW/m <sup>2</sup> ]
Respuesta En El Tiempo	0.3 [s]
Sensibilidad	(7.5-11.5) [μV · (W/m <sup>2</sup> )] en el rango de trabajo (Lineal)

Fuente: Valores suministradas por el fabricante

El flujo de calor se define como la tensión medida por el sensor, dividida en la sensibilidad; es por ello la importancia de este parámetro en la medición. Para hallar un valor experimental de la sensibilidad y compararlo al suministrado por el fabricante, realizaron pruebas de calibración. En estas pruebas, utilizaron una fuente controlada de calor para comparar la potencia consumida con la potencia eléctrica suministrada al circuito. Utilizaron bombillos de tungsteno, porque limitan la potencia máxima del sistema, relacionada con el rango de entrada del sensor y el área del mismo. La potencia máxima está definida como: el valor máximo de flujo de calor medido por el sensor multiplicado por el área del sensor.

Las pruebas de calibración las realizaron con el sensor cuya sensibilidad es 10.5 [μV/(W/m<sup>2</sup>)], este es uno de los tres sensores con diferente

sensibilidad, disponibles para trabajar. El error que obtuvieron con este sensor fue inferior al 5%, lo que resulta admisible en esta aplicación. Para los otros sensores con sensibilidades de 10.8 y 11.5 [ $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ], estimaron un error cercano.

### **2.1.2 Descripción de la tarjeta de flujo de calor**

Este prototipo lo desarrollaron en diferentes etapas donde se realiza el tratamiento de los datos para su posterior visualización [3]. Las etapas son: sensado, adquisición, filtrado, conversión analógica-digital y finalmente adecuación de datos al protocolo de comunicación para realizar la transmisión a dispositivos externos.

La primera etapa corresponde a la medición del sensor; éste produce una señal de tensión proporcional al flujo de calor. La siguiente etapa, es la adquisición, en esta se lleva la tensión recibida a un nivel aceptable y se protege la señal de interferencias y de señales de modo común. En su implementación tuvieron en cuenta su alta linealidad y precisión en la ganancia, alto factor de rechazo en modo común CMRR, alto factor de rechazo a la fuente PSRR y bajo consumo de potencia. Con las pruebas que realizaron, obtuvieron confiabilidad y exactitud del 98 % en la amplificación.

En la etapa posterior correspondiente al filtrado implementaron un filtro pasa bajas de cuarto orden con configuración Sallen Key. Debido a las bajas frecuencias tratadas por el tipo de aplicación seleccionaron una frecuencia de corte de 50 [Hz].

Luego, para la conversión analógica a digital tuvieron en cuenta características como: la resolución del convertidor de 12 bits, suficiente precisión para la aplicación; la arquitectura SAR, método de aproximaciones sucesivas que utiliza menor tiempo de conversión comparado con otros métodos y mantiene constante este tiempo ante cualquier valor de entrada analógica. La velocidad de muestreo es de 50 [kHz], valor intermedio escogido porque las medidas de flujo de calor no presentan grandes variaciones en corto tiempo. En las pruebas a las que sometieron al convertidor encontraron un error promedio de 3 LSB entre los datos de entrada y los datos de salida. Este error es lo suficientemente pequeño para ser despreciado en esta aplicación.

Para transmitir a la etapa del microcontrolador utilizaron el protocolo de comunicaciones serial  $I^2C$ , caracterizado por bajo consumo de corriente, alta inmunidad al ruido, estar estandarizado en los circuitos integrados y tener un amplio rango de tensiones de alimentación. El intercambio de

datos lo configuraron a una velocidad de 100 [kbit/s], denominada *Standar Mode*. El microcontrolador realiza la recepción de los datos provenientes de la etapa de conversión analógica-digital y permite el control de flujo de datos en el sistema de comunicación, ya sea por medio de un cable serial o con los módulos de comunicación Bluetooth hacia un PC o el dispositivo final de visualización.

Para verificar el desempeño de la tarjeta realizaron pruebas de calibración sobre el dispositivo final, utilizando generadores controlados de calor, bombillos de tungsteno, los cuales disipan en forma de calor casi la totalidad de la potencia que consumen. Los datos que obtuvieron en estas pruebas las analizaron tomando las medidas de tensión dadas por el sensor y a partir de estas hallaron la potencia disipada por el bombillo. Esta la compararon con la suministrada al bombillo, y obtuvieron un error menor al 4,29 %, dato confiable comparado con los errores que reportaron de calorímetros indirectos, entre 5 % y 10 %.

La tarjeta de adquisición de flujo de calor es un dispositivo portátil, robusto ante interferencias y competitivo comparado con otros instrumentos para la medición de flujo de calor. Además el consumo de potencia es bajo, la batería que seleccionaron tiene autonomía aproximadamente de 75-100 horas, es recargable y tiene protección contra cortocircuitos.

### **2.1.3 Consideraciones para la medición de $q$**

Hay factores influyentes para lograr una correcta medición por parte del sensor de flujo de calor. Estos tienen que ver principalmente con la ubicación del sensor respecto al cuerpo a medir y a la tarjeta de adquisición. El sensor debe fijarse a la superficie del cuerpo a medir para evitar espacios o corrientes de aire. Por esto se utiliza una lámina del material de pruebas del mismo tamaño que el sensor, así una de sus caras estará en contacto directo con el material mientras que la otra estará al aire o en un medio adiabático, según sea conveniente para el método de medición. Por otra parte se recomienda mantener aislada la tarjeta de adquisición respecto del sensor, de tal forma que este último no reciba calor proveniente del dispositivo. Así mismo debe aislarse el sistema que se utilice para calentar el material de pruebas, y seleccionar el medio donde se ubique éste. El medio puede ser adiabático, es decir, que no intercambie calor con su entorno, o un foco térmico, espacio capaz de absorber calor sin cambiar sus propiedades.

Adicionalmente, hay una propiedad de los cuerpos que puede afectar la medición. La transferencia de calor o energía térmica de un sistema a

otro, ocurre siempre que los sistemas estén a diferente temperatura. Sin embargo, en la naturaleza los sistemas que parecen estar en equilibrio térmico presentan cierta transferencia de calor, lo que no permite que la medida del sensor sea nula.

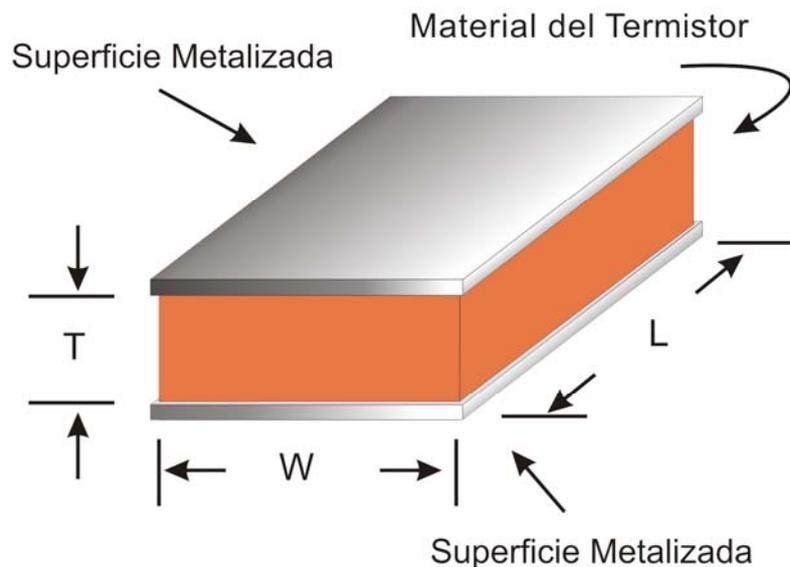
## 2.2 MEDICIÓN DE TEMPERATURA

### 2.2.1 Sensor de Temperatura

#### Generalidades

Los termistores son sensores resistivos, elaborados con materiales semiconductores que varían su resistencia con la temperatura. Estos dispositivos obedecen a la ley de Ohm en todo su rango útil de temperatura. Los termistores están clasificados según su coeficiente de temperatura como PTC, *Positive Temperature Coefficient*, si cuando aumenta la temperatura su resistencia aumenta y NTC, *Negative Temperature Coefficient*, si su resistencia disminuye.

La estructura del material utilizado en este tipo de sensores es policristalina, granulada y esta compuesta de varios componentes metal óxidos, derivados del níquel, zinc, cobalto, entre otros.



**Figura 2.1 Configuración básica de un termistor**  
Fuente: Autores

El material del termistor está metalizado tanto en la superficie superior como en la inferior para que tenga contacto eléctrico. Esto se hace por

sumergimiento o por impresión de pantalla con una tinta conductiva basada en materiales como plata y oro. La tinta es disparada a las obleas del material del termistor. Luego las obleas son cortadas con una sierra o con láser para producir chips de tamaños definidos, siendo generalmente de 1 [mm] x 1 [mm] x 0.25 [mm] de grosor. En estos dispositivos, la relación que existe entre resistencia y temperatura no es lineal y en el caso de un termistor tipo NTC es la siguiente:

$$R_T = R_0 \cdot e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad [\Omega]$$

2.4

donde  $R_0$  es la resistencia a temperatura  $T_0$  [K], que se toma generalmente a 298 [K] (25 [°C]) y  $\beta$  es la temperatura característica del material en el rango entre 2000 [K] a 5000 [K].

El funcionamiento del termistor se basa en la dependencia de las propiedades eléctricas de los semiconductores con la temperatura. Al aumentar la temperatura aumentan los portadores y de esta forma se reduce la resistencia. En la teoría de bandas del estado sólido una de las principales suposiciones es que la concentración de portadores de carga tiene una dependencia exponencial sobre la temperatura absoluta. Los portadores de carga pueden ser electrones, tipo n, o huecos, tipo p. En el último caso los electrones son atrapados por sitios fijos positivamente cargados. Así los electrones se mueven en la red haciendo que el efecto de ésta, sean portadores positivamente cargados moviéndose en el campo eléctrico, en la dirección opuesta a los electrones. Los materiales de los termistores son semiconductores de este tipo. Por otra parte, cuando el semiconductor se dopa intensamente adquiere propiedades metálicas con coeficiente de temperatura positivo.

### **Sensor Seleccionado**

Algunas de las características que los autores del proyecto de grado referenciado [9] tuvieron en cuenta para la selección del sensor de temperatura fueron las siguientes:

- Pendiente (*Slope*):

Es un indicador de la tasa de cambio de la resistencia con respecto a la temperatura. Se define como la relación entre la resistencia a una temperatura, generalmente 0 [°C], y la resistencia a otra temperatura mayor, generalmente 70 [°C].

$$\text{Slope} = \frac{R_0}{R_{70}}$$

2.5

- Alfa ( $\alpha$ ), Coeficiente de temperatura:

Es una característica del material y está definida como el porcentaje de cambio de la resistencia por grado centígrado. También es llamado coeficiente de temperatura. Para un termistor tipo NTC los valores típicos de  $\alpha$  están en el rango de -3 [%/°C] a -6 [%/°C]. Este valor es una constante del material y es independiente de la resistencia del componente a esa temperatura. El valor de  $\alpha$  no es lineal a través del rango de temperatura relevante y se puede calcular de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR}{dT} \cdot 100 \left[ \frac{\%}{^\circ\text{C}} \right]$$

2.6

- Beta ( $\beta$ ), Índice de sensibilidad:

$\beta$  es el factor exponencial conocido como el índice de sensibilidad del material del termistor. Su valor depende de la temperatura y decrece con ésta. El valor de  $\beta$  no es constante cuando se toman grandes rangos; puede considerarse como una propiedad del material del termistor que indica la relación entre la resistencia del material y la temperatura. Este es derivado de una aproximación matemática. También puede ser usado para calcular el valor de alfa en un termistor fabricado con el mismo material y depende de sus propiedades básicas.

- Característica de resistencia a potencia cero ( $R_T$ ):

La resistencia de potencia cero  $R_0$  a una temperatura  $T$ , es la resistencia medida en corriente directa, hallada a una temperatura específica, cuando la potencia disipada es despreciable, es decir, cuando cualquier disminución de la potencia resultara en un cambio máximo del 0.1 % de la resistencia.

- Constante termal de tiempo:

Es el tiempo requerido por un termistor para cambiar la temperatura de su cuerpo en un 63.2 % de un rango de temperatura específico, cuando las medidas son hechas bajo condiciones de potencia cero en ambientes térmicamente estables. Esto sirve para cuantificar su respuesta dinámica.

- Constante de disipación térmica:

Es la potencia requerida para subir la temperatura del cuerpo del termistor en un 1 [°C] en un medio de medición particular. Se expresa en unidades de [mW/°C].

Estos tres últimos factores afectan el valor de la resistencia del termistor, en consecuencia la medida de la temperatura calculada a partir de ésta.

- Tolerancia de los termistores:

Es el porcentaje de resistencia especificado, o la desviación de temperatura de los valores nominales de la curva. La tolerancia puede ser determinada como un porcentaje variable en un solo grado o como un valor de temperatura sobre un rango de esta en particular. Termistores estándar de baja precisión están típicamente especificados con un porcentaje de resistencia (+/- 5 % o +/- 10 %) a 25 [°C]. Termistores estándar de alta precisión están especificados con una tolerancia de temperatura de (+/- 0.1 [°C] o +/- 0.2 [°C]) sobre el rango de temperatura de 0 [°C] a 70 [°C].

Una ventaja de los termistores, comparados con otros sensores de temperatura, es la característica de sensibilidad que les proporciona alta resolución en la medida, debido a que la respuesta a un cambio en la temperatura del cuerpo muestra una variación entre -3 % a -6 % por cada grado [°C].

Los termistores se fabrican con diferentes materiales para cubrir un rango extenso de valores de resistencia, desde 100 [ $\Omega$ ] a 1 [M $\Omega$ ]. Este rango indica variedad en su tamaño, característica útil dependiendo de la aplicación para la que se necesite el sensor. Así mismo, la mayor resistencia y el coeficiente de temperatura, influyen en el uso de hilos largos en su elaboración para soportar cambios de temperatura.

Otro factor a tener en cuenta para los termistores es en la medición; el termistor debe mantener un nivel de potencia bajo, especialmente de corriente, para evitar el auto-calentamiento, ya que este efecto hace disminuir la resistencia y con ello se provoca error en la medición.

Con los requerimientos establecidos, seleccionaron para la tarjeta de adquisición de temperatura un termistor con las siguientes características:

Tabla 2.2 Especificaciones del termistor

PARÁMETRO	VALOR
Índice de sensibilidad ( $\beta$ )	3892 [K]
Curva Resistencia vs Temperatura	J
<i>Slope</i> ( $R_0/R_{70}$ )	18.636
Rango de trabajo	-80 [°C] hasta 135 [°C]
Resistencia a 25 [°C]	10 [kΩ]
Precisión	±0.5 [°C]
$R_T$	4.2654 [kΩ] @ 35 [°C]
Constante de disipación térmica	1 $\left[ \frac{mW}{°C} \right]$
Constante termal de tiempo	1 [s] máximo en aceite. 10 [s] máximo en aire.

Fuente: Valores suministrados por el fabricante

El sensor que seleccionaron, es un termistor de USSENSOR de tipo NTC, Coeficiente de Temperatura Negativo; esta característica indica que el sensor disminuye su resistencia a medida que aumenta la temperatura. Además este sensor posee cables aislados y un recubrimiento epóxico, cuya función es proteger el material semiconductor.

Adicionalmente, con datos teóricos suministrados por el fabricante, realizaron un modelo matemático para calcular la resistencia del sensor:

$$R = 10000 \times e^{3892 \left( \frac{1}{T+273.15} - \frac{1}{298.15} \right)} \quad [\Omega]$$

2.7

### 2.2.2 Descripción de la tarjeta de temperatura

La tarjeta de adquisición de temperatura [9] la desarrollaron en varias etapas, la primera de estas la constituye la adquisición de la señal mediante el sensor de temperatura, termistor, que produce una resistencia inversamente proporcional a la temperatura medida. En la etapa de acondicionamiento de la señal, se detectan las variaciones de resistencia del termistor con el uso de un puente de Wheatstone; este lo ajustaron para un rango de temperaturas cuya mínima medida 25 [°C] produce una salida igual a cero, hasta una máxima de 44 [°C].

La etapa de amplificación toma la señal diferencial proveniente del puente de Wheatstone. Esta etapa utiliza un amplificador de instrumentación de ganancia 5 [V/V], alimentación sencilla, con buen desempeño en señales

de baja frecuencia. Esta señal es filtrada en la etapa posterior. Debido al rango de frecuencia de trabajo utilizaron un filtro pasa bajas de cuarto orden con ganancia unitaria y frecuencia de corte igual a 19.33 [Hz]. Este filtro elimina el ruido de 60 [Hz] en -27 [dB], previniendo interferencias de señales de frecuencias superiores. A la salida del filtro termina la etapa analógica de la tarjeta. En este punto, la relación de tensión de salida con la resistencia en función de la temperatura, se expresa como:

$$T = \frac{3892}{\ln(-165451,5462(V - 3,5185488))} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad 2.8$$

La siguiente etapa es la del conversor analógico-digital y el microcontrolador. El conversor de 12 bits tiene un solo canal de entrada que recibe la señal proveniente de la etapa de filtrado y la acondiciona de modo que varíe en un rango de 0 [V] a 2.5 [V]. El conversor se comunica con el microcontrolador por medio del protocolo  $I^2C$ . El microcontrolador de 8 bits tiene capacidad para 4096 bytes de memoria flash programable y está encargado de controlar el conversor y hacer la transferencia de la información al medio de transmisión.

La exactitud de la tarjeta que construyeron la verificaron por medio de pruebas realizadas. Para ello utilizaron un termómetro patrón con certificación que respalda su funcionamiento y una bañera con control de temperatura digital. El termómetro utiliza una termocupla tipo K. Los datos que tomaron los analizaron midiendo la temperatura del agua con el termómetro patrón y con la tarjeta de adquisición, de forma que los dos sensores se mantuvieran en condiciones muy similares. Cuando compararon los datos obtenidos de la tarjeta de adquisición contra los datos del termómetro patrón encontraron un porcentaje de error menor al 3 %, trabajando en el rango de operación de la tarjeta, 25 [°C] a 44 [°C].

La tarjeta de adquisición de temperatura es un dispositivo portátil y de fácil manejo, capaz de adquirir señales de temperatura de forma directa y en tiempo real, y así mismo, realizar un registro gráfico que facilita el análisis de los datos obtenidos. Este dispositivo utiliza la misma batería que la tarjeta de adquisición de flujo de calor, de autonomía aproximada para 75-100 horas, recargable y con protección contra cortocircuitos.

### 2.2.3 Consideraciones en la medición de $T$

El termistor produce una salida de resistencia inversamente proporcional a la temperatura medida. Esta medida del sensor se afecta por varios factores como; la temperatura no controlada del medio donde se realiza la

medición, la ubicación del sensor respecto al cuerpo a medir, y a la tarjeta de adquisición. En primera instancia, se considera el medio donde se realiza la medición. Si bien el medio depende del método de experimentación utilizado, se deben conocer sus variaciones. También debe considerarse la distribución de calor en el material de pruebas, sabiendo que la temperatura será mas uniforme en un material pequeño, se debe ubicar el termistor en un punto de la lámina, donde la temperatura sea uniforme. Por otra parte, como en el caso del sensor de flujo de calor, se debe evitar que el termistor detecte una temperatura incrementada por el calentamiento de la tarjeta y/o del sistema encargado de calentar el material de pruebas. Esto indica que estos dispositivos se mantengan aislados del sensor.

## **2.3 ADAPTACIÓN BLUETOOTH**

La transmisión de los datos de la tarjeta al dispositivo de visualización, en este caso un PC, se hace utilizando tecnología bluetooth, según el proyecto de grado referenciado [2], con un módulo para la transmisión y un adaptador o antena para la recepción. El adaptador trabaja con la norma Bluetooth 2.0 y versiones anteriores, tiene un alcance de 100 [m] y permite obtener información de hasta siete módulos.

Según los autores del proyecto de grado referenciado, el módulo utiliza el protocolo de comunicación Bluetooth 1.1; una interfaz serial UART, *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*, para conexión con el microcontrolador; se alimenta con 3.6 [V] y su rango de comunicación es de 30 [m] nominal. La tasa de muestreo efectiva TME, es a 600 [muestras/s], con una transmisión a 9600 baudios sin paridad, dos tramas de 8 bits de datos, 1 bit de parada y un control de flujo encendido. El paquete de información no tiene bits de diferenciación para cada byte. Respecto al microcontrolador, el módulo está configurado en modo esclavo. Con el módulo conectado a cada tarjeta de adquisición, se realiza la transmisión de cada dato en paquetes de dos bytes. Los dos primeros bits contienen la posición del sensor; debido a que esta aplicación no necesita diferenciación sobre la posición del sensor, se permite dejar este interruptor en cualquier posición para cada una de las tarjetas. Los dos siguientes bits corresponden al tipo de tarjeta de adquisición, "00" para la tarjeta de flujo de calor [3] y "11" para la tarjeta de temperatura [9]. Los doce bits restantes son la información de la medida del sensor. La medición se hace en tiempo real.

## **2.4 EQUIPO DE PRUEBAS**

Como se ha explicado en las secciones anteriores, se necesita medir la temperatura y el flujo de calor para calcular el calor específico del cobre. Se deben tener en cuenta los fenómenos de transferencia de calor presentes, debido que estos agregan factores que afectan la medición de las variables a considerar. La importancia de cada tipo de transferencia de calor sobre el proceso, depende del método utilizado. Por esta razón se diseña y construye una caja de pruebas adaptable para controlar estos efectos, además de servir como espacio para ubicar el sistema de medición, el sistema de calentamiento y el material de pruebas. Se utiliza también para proporcionar un ambiente similar en todos los experimentos que se realicen.

### **2.4.1 Consideraciones previas**

Para facilitar la medición y generar resultados válidos, deben considerarse algunos factores sobre el diseño del dispositivo donde se realizarán las pruebas:

- Espacio donde se realiza la medición
- Ubicación de las tarjetas de adquisición
- Ubicación de los sensores
- Operación del sistema de calentamiento.

El medio donde decida ubicarse el sistema de medición debe ofrecer un ambiente muy similar para todos los experimentos que se realicen. La temperatura en el medio es importante porque puede producir variaciones en el material de pruebas. Es por esto de vital importancia el que sea un sistema abierto o cerrado. Por ejemplo, si se realiza la toma de datos dentro de un medio cerrado, la caja se aísla de la variabilidad del ambiente, como un sistema adiabático, pero si el medio es abierto se requiere que éste sea estable o con condiciones constantes.

Por otro lado, debe escogerse donde se ubicarán las tarjetas de adquisición, pues aunque estas no se exponen a altas temperaturas, el calor emitido por el sistema calentador y la lámina de cobre pueden producir calentamiento de las mismas, afectar los componentes en los prototipos y provocar errores en la transmisión.

Como ya se había mencionado, la ubicación de los sensores respecto a la lámina de cobre debe garantizar una correcta medición. Debido a la forma como mide el sensor de flujo el calor a través de sus caras, una debe estar en contacto directo con el material para evitar pérdidas de calor por

el aire, mientras la otra puede dejarse expuesta al ambiente o dentro de un sistema cerrado. Esta ubicación depende del método que se utilice en la experimentación. El sensor de temperatura se debe ubicar en un punto donde la temperatura de la lámina sea promedio comparada con el resto de su superficie.

Adicionalmente a las tarjetas y sus respectivos sensores, se debe contar con un sistema de calentamiento cuya posición debe ser variable durante la medición. Este sistema se encarga de transmitir calor a la lámina y es escogido según la facilidad de manejo en el proceso, y el menor tiempo que necesite para alcanzar cierta temperatura uniforme en el material de pruebas.

### 2.4.2 Diseño de la caja de pruebas

Con base en las consideraciones expuestas para el diseño del equipo de pruebas que garantice la toma de datos de forma correcta, segura, cómoda y práctica, se construye una caja donde se ubicarán las tarjetas de adquisición con sus respectivos sensores, el material de pruebas, y el circuito calentador.



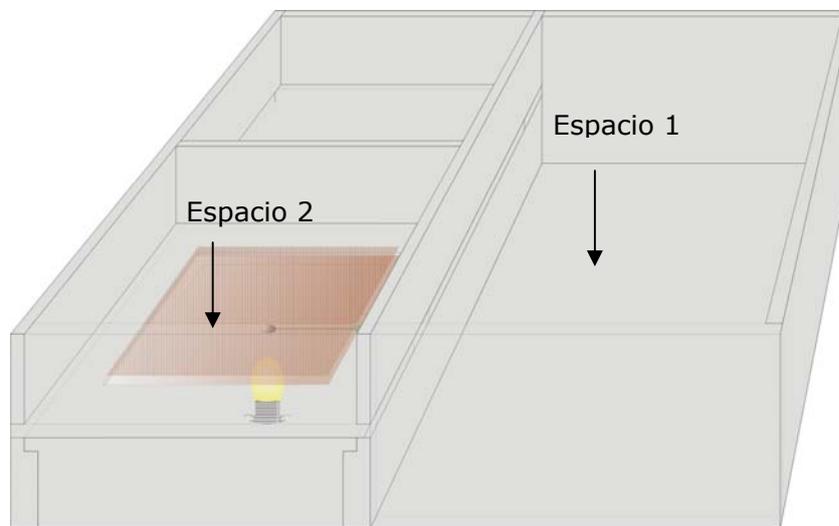
**Figura 2.2 Vista externa de la caja de pruebas**

Fuente: Autores

El sistema es flexible ya que puede ser un sistema cerrado que sirva como aislante, y de esta forma evite el intercambio de calor entre el material de prueba y el medio externo, pero también puede ser abierto. Teniendo en cuenta esta condición, se elabora una caja rectangular, en cuyo interior hay 3 compartimentos. El primero es el más amplio, allí se ubican las tarjetas de adquisición y tiene un solo nivel, el segundo y el tercero posee cada uno dos niveles. En el nivel inferior del compartimiento 2 y 3, se ubica una pieza móvil, similar a un cajón, donde se sitúa el dispositivo calentador. Este elemento móvil es construido para aislarlo de la lámina de cobre en los casos que sea necesario.

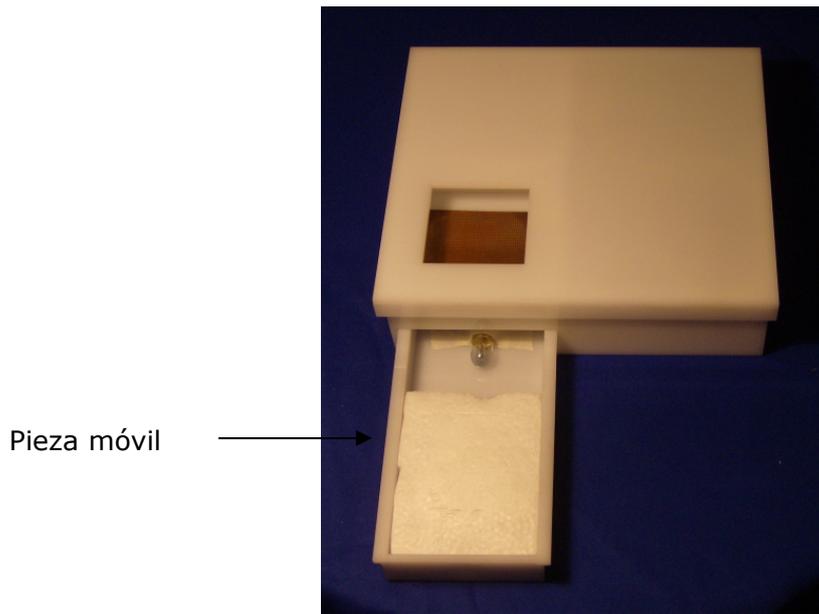
El nivel superior de los compartimentos 2 y 3 esta dispuesto así: el espacio 2 es para la lámina de cobre y los sensores de los prototipos. El sensor de temperatura esta debajo de la lámina y el sensor de flujo de calor sobre ésta, con posiciones fijas, todo sobre un marco de acrílico que separa el nivel superior e inferior de la caja. Adicionalmente, hay una tapa para toda la caja.

Las tarjetas de adquisición de temperatura y flujo de calor se ubican en el espacio 1. La batería de cada tarjeta está ajustada en un soporte, elaborado en acrílico. Los soportes no están pegados al la base de la caja con el fin de dar mayor movilidad a las tarjetas. El interior de la caja de pruebas se ve como en la figura 2.3.



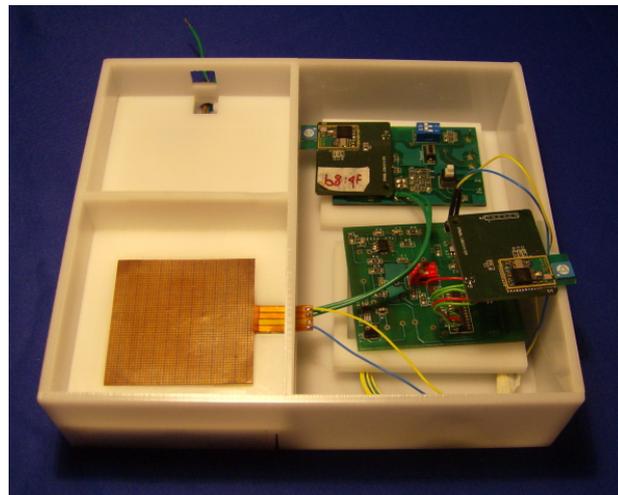
**Figura 2.3 Interior de la caja de pruebas**  
Fuente: Autores

Cuando se remueve la pieza móvil para aislar el sistema de calentamiento de la lámina de cobre, la caja de pruebas se ve como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4 Pieza móvil del equipo de pruebas**  
Fuente: Autores

Finalmente los elementos dentro de la caja de pruebas quedan como se muestra en la figura 2.5.



**Figura 2.5 Ubicación de las tarjetas de adquisición en la caja de pruebas**  
Fuente: Autores

### 3 CÁLCULO DEL CALOR ESPECÍFICO

Como ya se ha mencionado existen diferentes métodos para calcular el calor específico. Por ello es necesario manipular el equipo de pruebas para que las medidas tomadas con cada tarjeta de adquisición sean las deseadas.

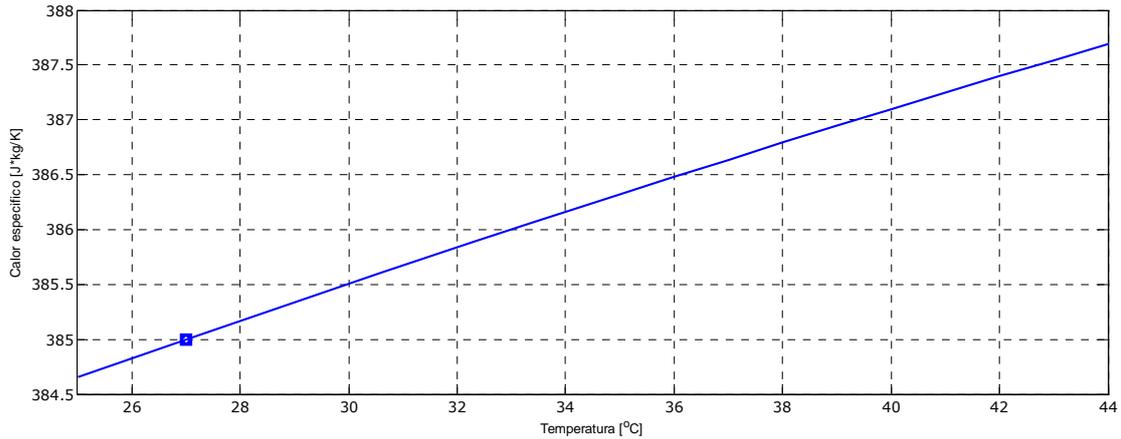
En esta sección se describe el procedimiento seguido en cada uno de los métodos y se ponen a prueba al comparar los resultados obtenidos con valores teóricos de calor específico para el cobre. Finalmente se describe el método propuesto y desarrollado en el presente trabajo considerado de mayor confiabilidad al momento de calcular el calor específico para un material.

#### ***Consideraciones para la medición***

Para realizar la medición de flujo de calor y temperatura, variables que se utilizarán en el cálculo del calor específico, es necesario conocer las condiciones de operación del sistema de medición. Principalmente se considera el rango de operación de cada tarjeta para medidas tomadas por el sensor. Para la tarjeta de flujo de calor se calculó un rango de trabajo confiable entre 6.432 [W/m<sup>2</sup>] y 914.89 [kW/m<sup>2</sup>]. La tarjeta de temperatura permite un rango de operación para su termistor entre 25 [°C] y 44 [°C].

Otra consideración sobre la operación de las tarjetas de adquisición, es la precisión que tiene cada prototipo durante la medición. En las pruebas de calibración que realizaron los autores de los proyectos referenciados, reportaron un error menor al 4.29% para la tarjeta de flujo de calor [3], y del 3% para la tarjeta de temperatura [9].

Las mediciones que se realicen se limitarán al rango de operación de la tarjeta de adquisición de temperatura, entre 25 [°C] y 44 [°C]. De esta forma, se compararán valores de calor específico calculados contra valores teóricos en este mismo rango de temperatura. Mediante interpolación se calculan los valores esperados para el calor específico del cobre, como se muestra en la figura 3.1.



**Figura 3.1 Interpolación de valores de calor específico teóricos para el cobre entre 25 y 44 [°C] de temperatura.**

Fuente: Autores

Entonces, el calor específico del cobre deberá estar entre 384.6 y 387.7 [J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>], para variaciones de temperatura de 25 [°C] a 44 [°C].

### ***Recomendaciones para la medición***

Independiente del método que se utilice para realizar las pruebas se deben considerar las condiciones para obtener datos de temperatura y flujo de calor, que al ser analizados generen datos válidos de calor específico en el cobre. Una condición relevante para el proceso es el estado del material de pruebas, la lámina de cobre. Esta debe tener un manejo antiséptico para evitar oxidación y acumulación de impurezas sobre toda la superficie, que resulte en mediciones incorrectas del flujo de calor. Por esta razón se debe limpiar la superficie de la lámina antes de la adquisición y cuantas veces sea necesario.



Figura 3.2 Masa de la lámina de cobre  
Fuente: Autores

### **3.1 MÉTODO I: LÁMINA DE COBRE EXPUESTA AL AIRE**

El método se basa en la medición de flujo de calor existente entre el material de pruebas y el aire o medio externo. Se expone una cara del sensor al aire para aprovecharlo como foco térmico, es decir, un medio con capacidad de absorber gran cantidad de calor mientras permanece invariable su temperatura.

El calentamiento de la lámina de cobre se realiza utilizando un mechero posicionado de manera que se distribuya el calor uniformemente sobre la superficie de la lámina. Una vez se ha alcanzado cierta temperatura se inicia la medición, aislando el sistema calentador del material de prueba y ubicando los sensores sobre éste, como se muestra en la figura 3.3.

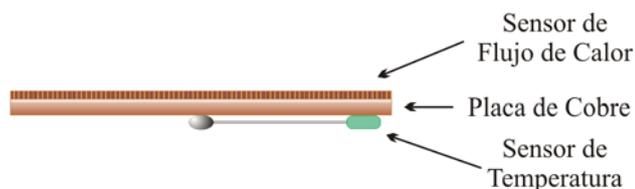
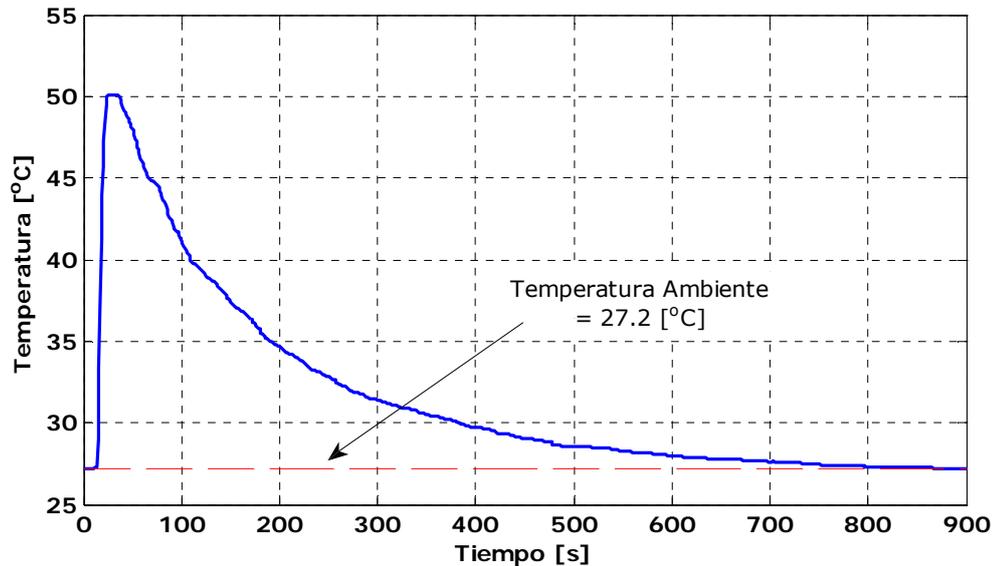
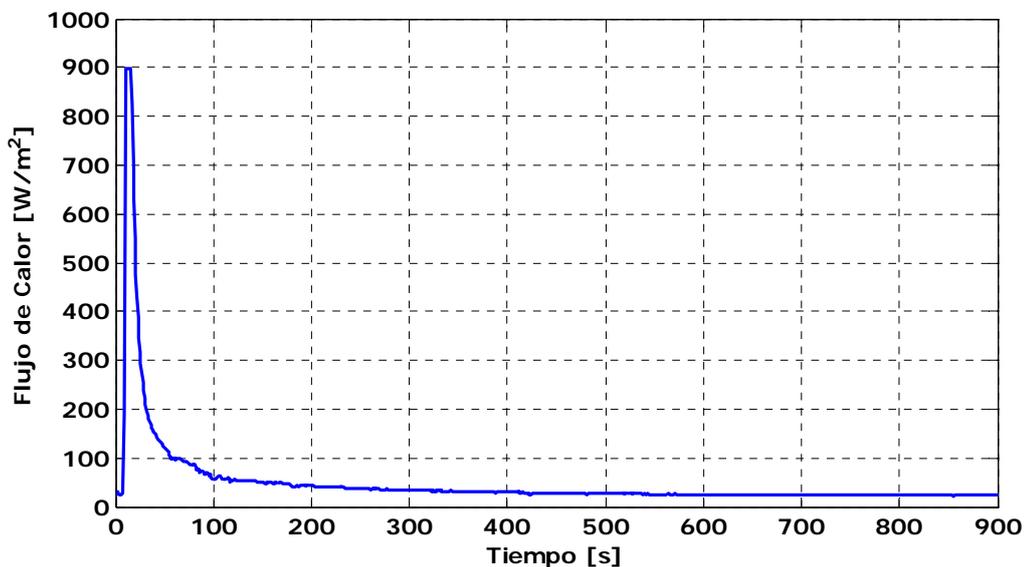


Figura 3.3 Posición de los sensores  
Fuente: Autores

La toma de datos se realiza durante el enfriamiento de la lámina, desde la máxima temperatura alcanzada durante el calentamiento, hasta llegar a la temperatura ambiente. En las gráficas mostradas a continuación, figura 3.4 y figura 3.5, se aprecia el comportamiento de la temperatura y del flujo de calor en el material durante uno de los experimentos realizados con este método.



**Figura 3.4 Variación de la temperatura en la lámina**  
Fuente: Autores



**Figura 3.5 Variación del flujo de calor en la lámina**  
Fuente: Autores

En los datos tomados con este método, al aumentar la temperatura máxima de calentamiento también aumenta la cantidad de datos iniciales que no se consideran debido al tiempo de respuesta de las tarjetas de adquisición. Es decir, cuanto mayor es la temperatura deseada, mayor es

el tiempo que necesita el sensor para acoplarse a la señal real y menor el intervalo de datos útiles. Por esta razón se fija la duración de la prueba en 900 segundos ó 15 minutos, teniendo en cuenta que es el tiempo necesario para alcanzar equilibrio térmico entre la temperatura de la lámina de cobre y el ambiente.

En el análisis de los datos, inicialmente se debe hallar el calor aportado ( $Q$ ) y la variación de temperatura ( $\Delta T$ ), en el mismo intervalo de tiempo. Para hallar  $Q$ , se aproximan las medidas de flujo de calor a una ecuación general de tipo potencial. Esta curva se multiplica por el área del sensor,  $25 \text{ cm}^2$ , y se integra en el intervalo de tiempo dado por los rangos de trabajo de los dispositivos. La variación de temperatura  $\Delta T$  es la diferencia entre las temperaturas inicial y final, durante la transferencia de calor  $Q$  de la lámina de cobre al medio.

A partir de estos valores encontrados para  $Q$  y  $\Delta T$ , y teniendo la masa del material de prueba, 8.1 gramos, se calcula el valor de calor específico para la lámina de cobre en el intervalo de temperatura analizado.

**Tabla 3.1 Resultados de las medidas realizadas con el método I**

No. de experimento	Intervalo de flujo de calor [ $\text{W/m}^2$ ]		Calor aportado $Q$ [J]	Intervalo de temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]		Delta de temperatura $\Delta T$ [K]	Calor específico $c_p$ [ $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ]	Error %
	Primero	Segundo		Primero	Segundo			
0	44,16	29,76	5,25	28,50	27,20	1,30	498,29	29,43
1	159,32	32,12	31,92	37,90	28,60	9,30	423,70	10,05
2	82,68	30,36	21,25	33,60	27,70	5,90	444,63	15,49
3	75,84	31,20	23,15	43,90	30,20	13,70	208,61	45,82
4	79,20	30,24	28,93	43,90	30,40	13,50	264,59	31,28
5	87,84	29,76	32,66	43,90	29,40	14,50	278,12	27,76
6	49,44	29,76	188,69	43,90	31,30	12,60	184,88	51,98
7	85,92	30,24	298,94	43,90	29,90	14,00	263,61	31,53
8	66,72	29,76	13,12	35,90	30,20	5,70	284,12	26,20
9	55,68	30,24	8,92	34,90	30,90	4,00	275,41	28,47
10	70,56	30,72	13,14	35,90	30,70	5,20	311,90	18,99

Fuente: Autores

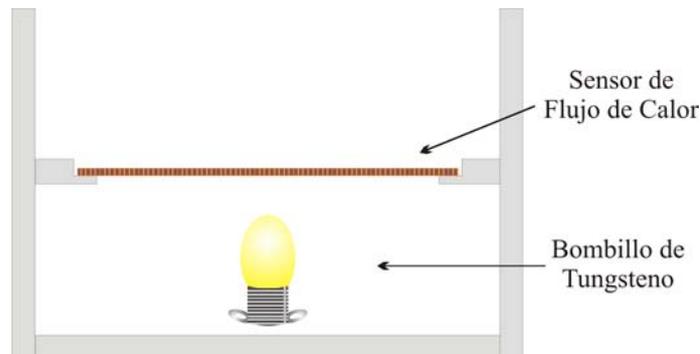
De las pruebas realizadas con este método, se obtuvo diferentes valores de calor específico. Sin embargo los datos presentan alta variabilidad, y comparados con valores dados en la literatura para el cobre a una temperatura de  $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , presentan errores entre 10.05% y 51.98%. Los resultados sugieren fallas en la conexión y mal contacto entre los sensores y la lámina de cobre.

### 3.2 MÉTODO II: CURVA DE CALENTAMIENTO

El método se realiza con base en la curva de calentamiento de un material, es decir, Temperatura vs Tiempo. Con esta curva y la potencia generada por el sistema calentador se construye la gráfica Temperatura vs Calor, y se calcula el calor específico. La curva temperatura vs tiempo se realiza durante el tiempo en que se suministra energía de forma constante.

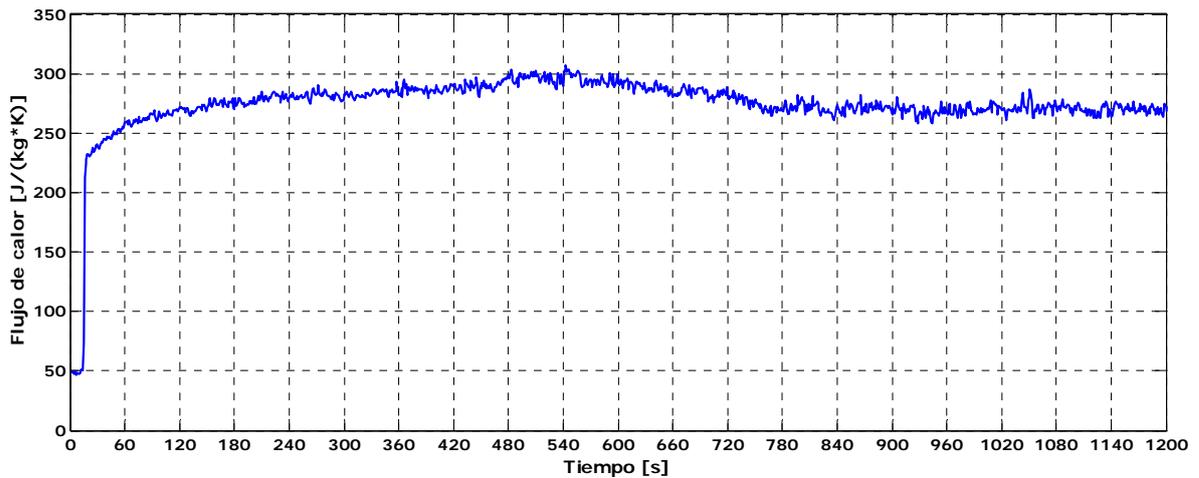
El sistema de calentamiento usado para éste método y los siguientes, es un bombillo de tungsteno, como se trabajo en el proyecto de grado referido [3]; es decir, la potencia generada por el bombillo es aproximadamente igual a la potencia absorbida por la lámina de cobre. En este caso, el bombillo de tungsteno esta alimentado con una tensión de 8 [V], y disipa en promedio una potencia de 1.45 [W].

En la adquisición de datos se verifica la utilidad del equipo de medición diseñado y construido, ya que el proceso se hace más sencillo y eficaz. Para calcular la potencia generada por la fuente de calor se utiliza el sensor de flujo de calor, cuya ubicación se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6 Posición de los elementos para la medición de potencia**  
Fuente: Autores

La gráfica 3.7 muestra los datos adquiridos de flujo de calor en una de las pruebas realizadas.



**Figura 3.7 Flujo de calor vs tiempo, durante el calentamiento de la lámina de cobre**

Fuente: Autores

Los datos de flujo de calor multiplicados por el área del sensor corresponden aproximadamente a la potencia  $P$ , generada por el bombillo. Esta potencia multiplicada por el intervalo de tiempo en el que se suministra, es equivalente a la energía cedida a la lámina de cobre, de acuerdo a:

$$Q = P \cdot \tau \quad [J]$$

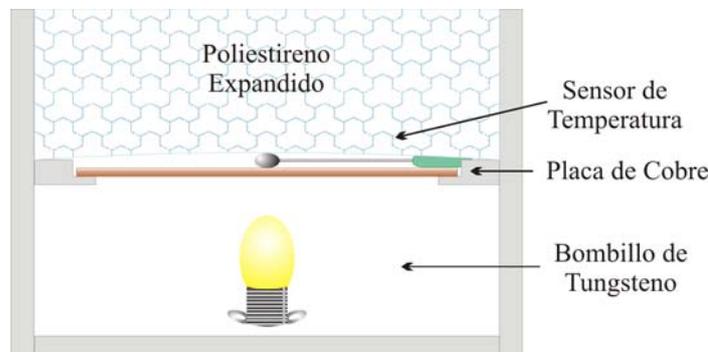
3.1

donde:

$Q$  es la energía en forma de calor aportada a la lámina de cobre [J]

$\tau$  es la duración de la transferencia de energía a la lámina de cobre [s]

Para la medición de temperatura se conecta el sistema de calentamiento y se toman datos con el termistor en contacto directo con la lámina de cobre. Para evitar que este tome la temperatura promedio del sistema de calentamiento y el material de prueba, el sensor se ubica como se muestra la figura 3.8.

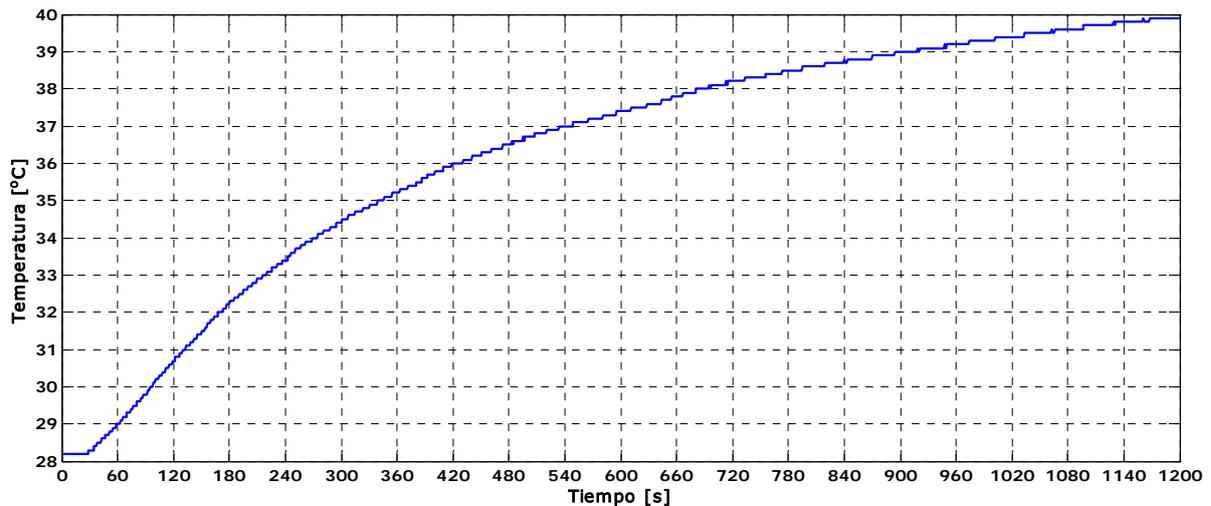


**Figura 3.8 Posición de los elementos para la medición de temperatura**

Fuente: Autores

Para evitar pérdidas en la transferencia de energía de la fuente de calor a la lámina se recomienda hacer la adquisición en un ambiente adiabático. Con este propósito se rellena el compartimiento de la caja donde se ubica la lámina de cobre con una capa de poliestireno expandido de 2 [cm] de espesor, material con baja conductividad térmica, entre 0.06 y 0.03 [W/m\*K], dependiendo de su densidad.

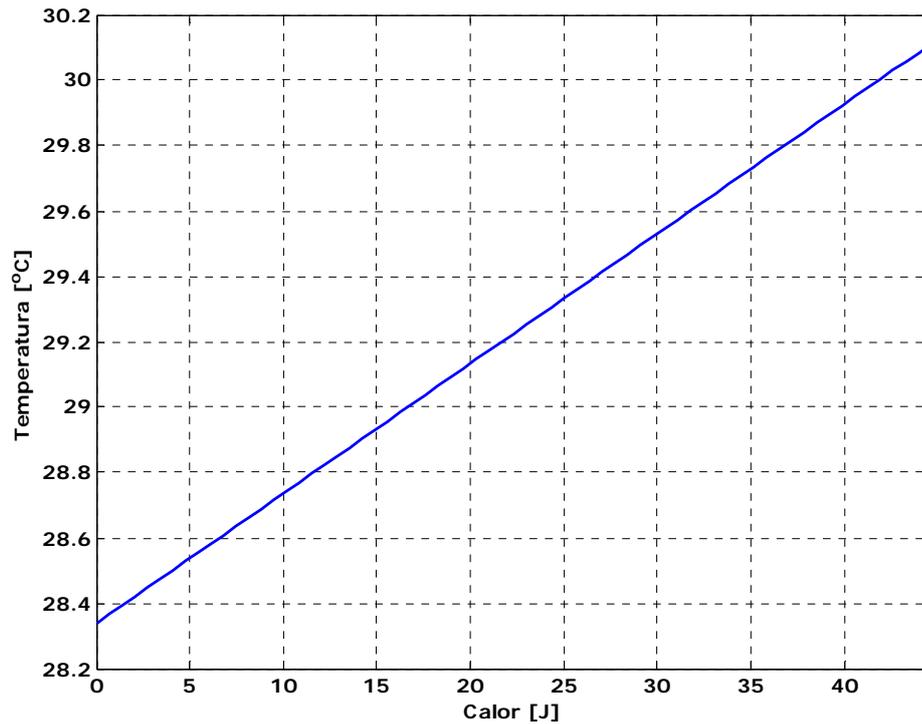
La gráfica 3.9 muestra los datos adquiridos de temperatura en una de las pruebas realizadas.



**Figura 3.9 Temperatura vs tiempo, durante el calentamiento de la lamina de cobre.**

Fuente: Autores

En el análisis de los datos se ajustan las medidas de temperatura a una línea recta. Éstos valores junto con la energía suministrada por el sistema de calentamiento permiten construir una gráfica de Temperatura vs. Calor aplicado, como se muestra en la figura 3.10.



**Figura 3.10 Temperatura vs Calor**

Fuente: Autores

A partir de la curva Temperatura vs Calor se puede calcular la cantidad de calor necesario para aumentar la temperatura de la lámina. El valor de la masa, 8.1 [g], el calor aportado,  $Q$  y la variación de temperatura,  $\Delta T$ , se reemplazan en la ecuación 1.2 para calcular el calor específico del material de pruebas.

Para el experimento mostrado, el calor calculado  $Q$  es igual a 44.64 [J] y la variación de temperatura  $\Delta T$  es igual a 1.77 [°C].

$$\bar{c}_p = \frac{44,64}{0,0081 \cdot 1,77}$$

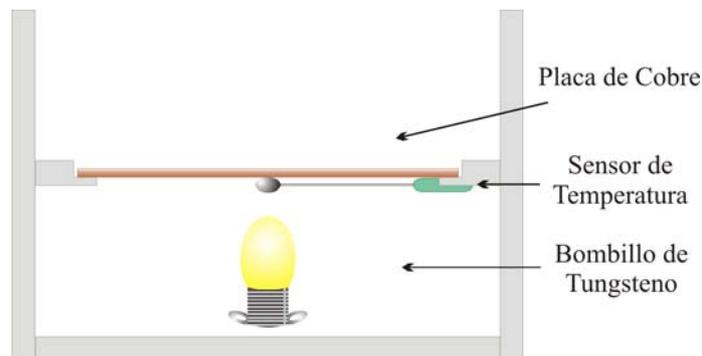
$$\bar{c}_p = 3113,6 \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Los valores encontrados utilizando este método, comparados con valores teóricos de calor específico a 27 [°C], reportan errores por encima del 500%. Otra de las razones por la que se descarta este método es que no se puede hacer una medición simultánea de temperatura y flujo de calor, condición que reduce el tiempo de operación.

### 3.3 MÉTODO III: CURVA DE ENFRIAMIENTO

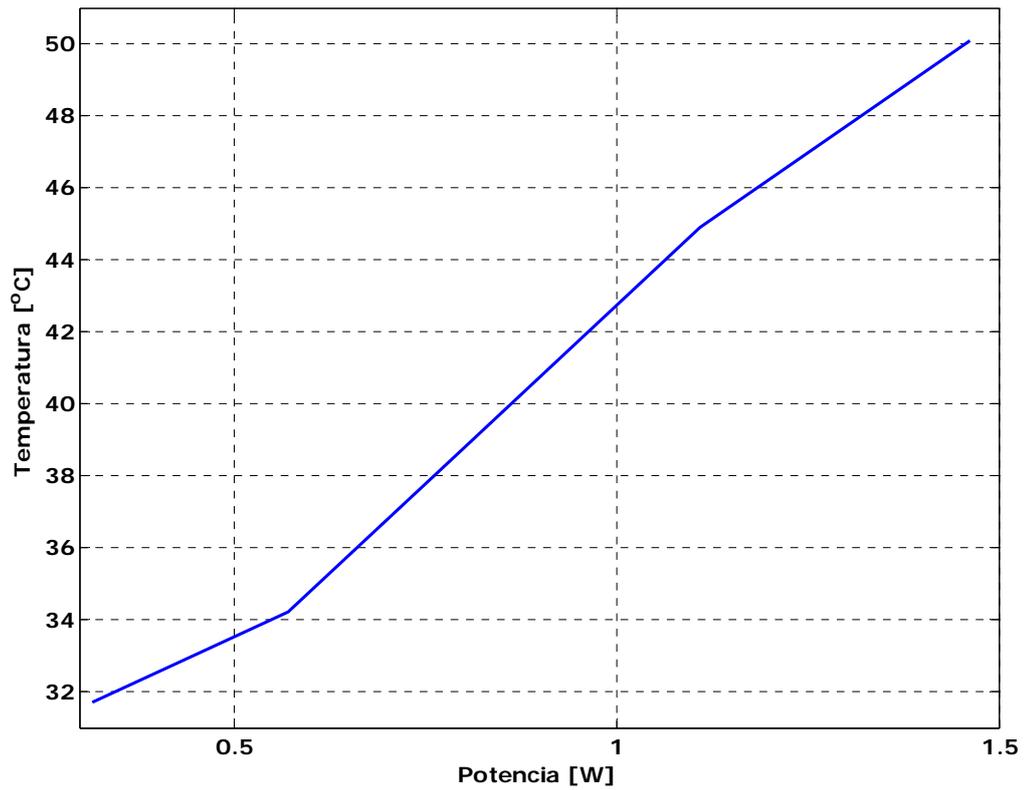
El método se realiza con base en el enfriamiento del material de pruebas donde se construyen dos gráficas: Potencia vs. Temperatura y Temperatura vs. Tiempo. Para obtener la primera curva, al igual que en el método anterior, se mide el sistema calentador de forma individual. Inicialmente se varía la potencia suministrada al sistema de calentamiento modificando la tensión de alimentación, mientras se toman datos con el sensor de flujo de calor. Luego, con los datos de flujo de calor y del mismo modo que en el método anterior, se calcula la potencia generada por el sistema de calentamiento para cada nivel de tensión.

En la siguiente etapa de medición se empieza nuevamente el calentamiento y se ubica el sensor de temperatura bajo la lámina de cobre, como se indica en la figura 3.11.



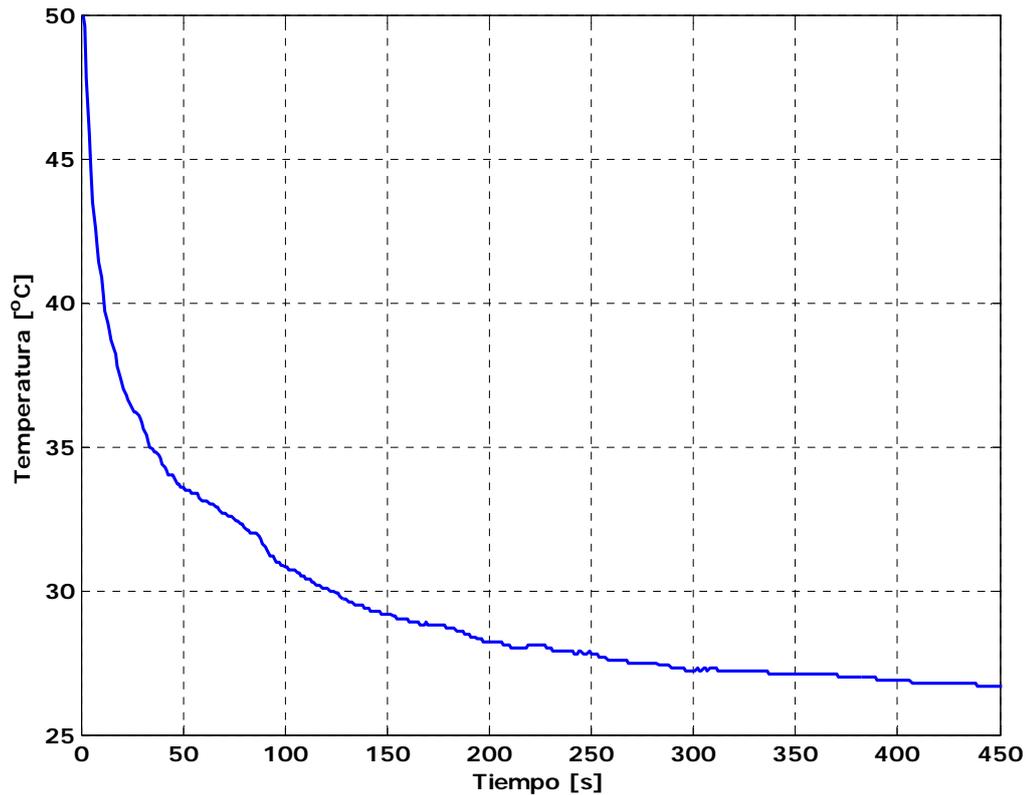
**Figura 3.11** Medición de temperatura con variación en la fuente de calor  
Fuente: Autores

En la prueba se mide la temperatura de equilibrio del sistema, lámina de cobre y medio ambiente, para cada una de las potencias encontradas en el paso anterior. Así se construye la gráfica de Temperatura vs. Potencia, figura 3.12.



**Figura 3.12 Temperatura vs Potencia**  
Fuente: Autores

Alcanzada la temperatura máxima en la lámina, se desconecta el sistema de calentamiento y se aísla de ésta, para que no se afecte la velocidad de enfriamiento, durante esta etapa se registran los datos de temperatura y con estos se construye la gráfica de Temperatura vs. Tiempo.



**Figura 3.13 Temperatura vs tiempo**

Fuente: Autores

Esta curva de temperatura se ajusta a una ecuación que se deriva para obtener su razón de cambio durante el enfriamiento de la lámina. Con esta ecuación se obtiene la razón de cambio para un instante en donde la temperatura corresponde a una de las temperaturas de equilibrio encontradas anteriormente. El valor de potencia y la razón de cambio, correspondientes al mismo valor de temperatura, son los datos que se utilizan en la ecuación 1.34 para calcular el calor específico. De uno de los experimentos se toman los datos como ejemplo:

$$c_p = \frac{P|_{T_1}}{m \cdot \left. \frac{dT}{dt} \right|_{T_1}}$$

$$c_p = \frac{0.571}{0.0081 \cdot 0.086}$$

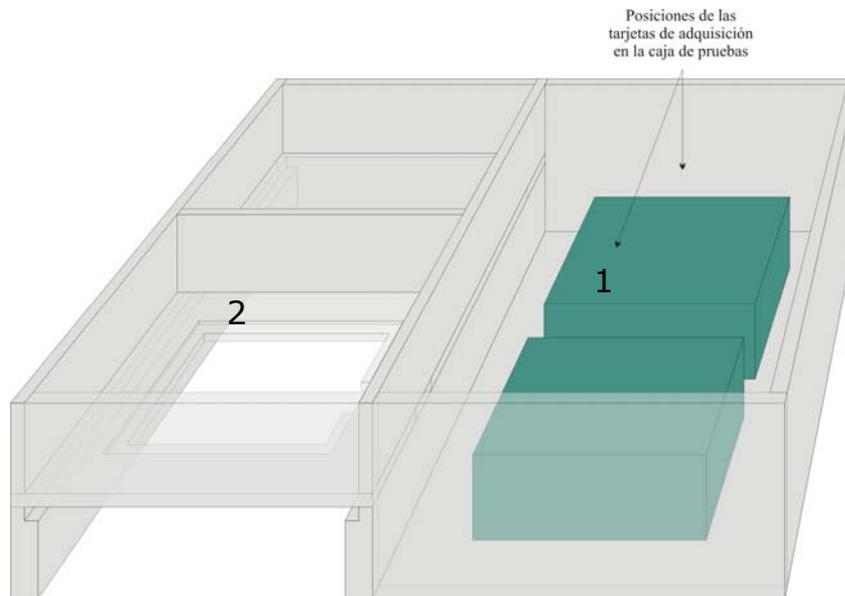
$$c_p = 819.7 \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

En este método se encuentran valores de calor específico que presentan errores superiores a 300%. Además, y al igual que el método anterior, se descarta porque no se reduce tiempo de procedimiento, al no realizar la medición de forma simultánea.

### 3.4 MÉTODO DESARROLLADO

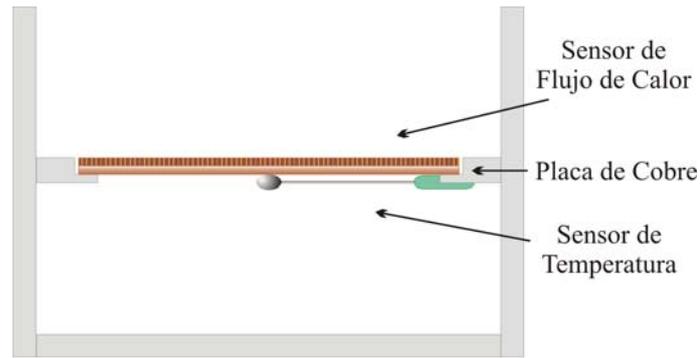
#### 3.4.1 Descripción Física del Experimento

En este método la toma de datos de temperatura y de flujo de calor se realiza de forma simultánea; por esta razón, se mantienen los sensores de las tarjetas de adquisición en la misma posición durante todo el experimento. La disposición del equipo de medición se observa en la figura 3.14.



**Figura 3.14 Ubicación de las tarjetas de adquisición en el equipo de pruebas**  
Fuente: Autores

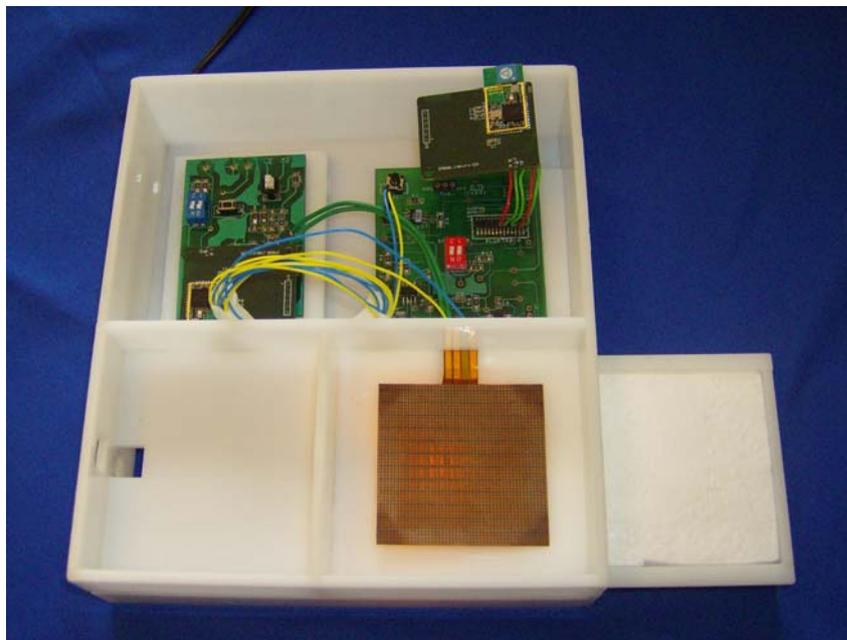
Al igual que en los otros experimentos el manejo de la lámina de cobre se hace de forma antiséptica, de tal forma que ésta no acumule impurezas que afecten la toma de datos y la medición sea lo más acertada posible. Este manejo cuidadoso del material de pruebas implica el uso de guantes para evitar el contacto con la piel y las secreciones propias de esta. Para la eliminación de impurezas, como rastros de óxido o grasa, se realiza un proceso que incluye pulido, lavado, y limpiado con alcohol. Luego de este procedimiento se verifica la masa de la lámina y se ubica en la caja de pruebas en el compartimiento número 2, de forma que el sensor de temperatura quede debajo de esta y el sensor de flujo de calor queda encima, fijo, cubriendo toda la lámina. Esta configuración se muestra en la gráfica 3.15.



**Figura 3.15 Ubicación de los sensores**

Fuente: Autores

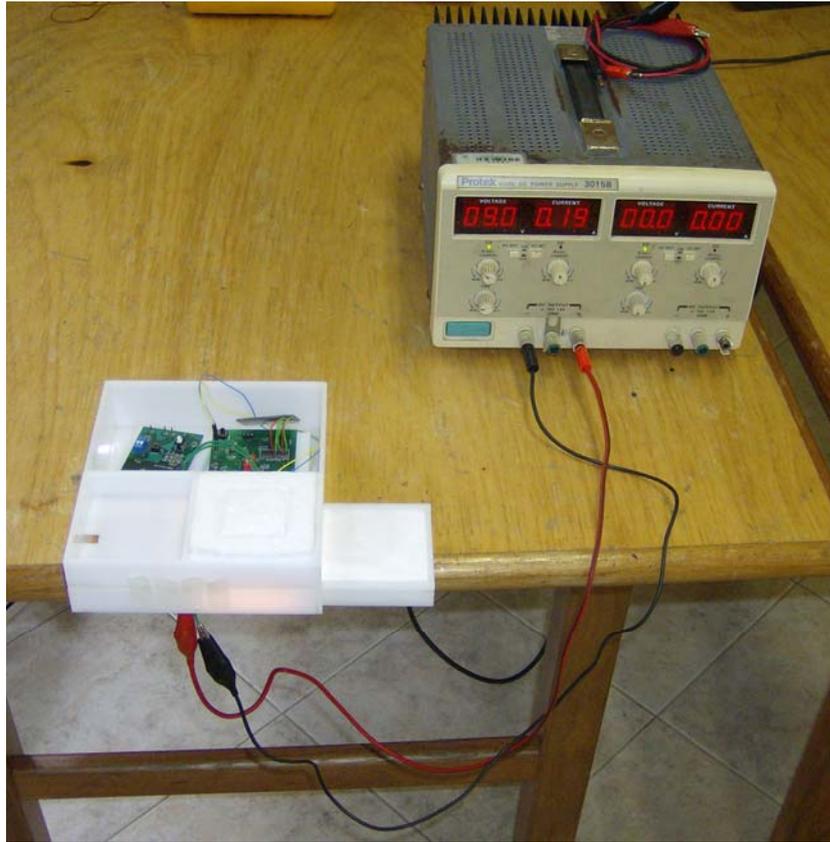
Seguidamente se posiciona el sistema de calentamiento, el cual está ubicado en la pieza móvil del equipo de pruebas. En este método, el sistema de calentamiento está alimentado a una tensión de 9 [V], que genera una potencia igual a 1.71 [W] a una temperatura de 71 [°C]. Se utiliza esta tensión de alimentación, y no una mayor, para que el calentamiento de la lámina se realice lentamente y la distribución de temperatura sobre su superficie sea uniforme. Finalmente se introduce el bombillo de tungsteno como se muestra en la figura 3.16 y se inicia el proceso de calentamiento.



**Figura 3.16 Ubicación del sistema de calentamiento**

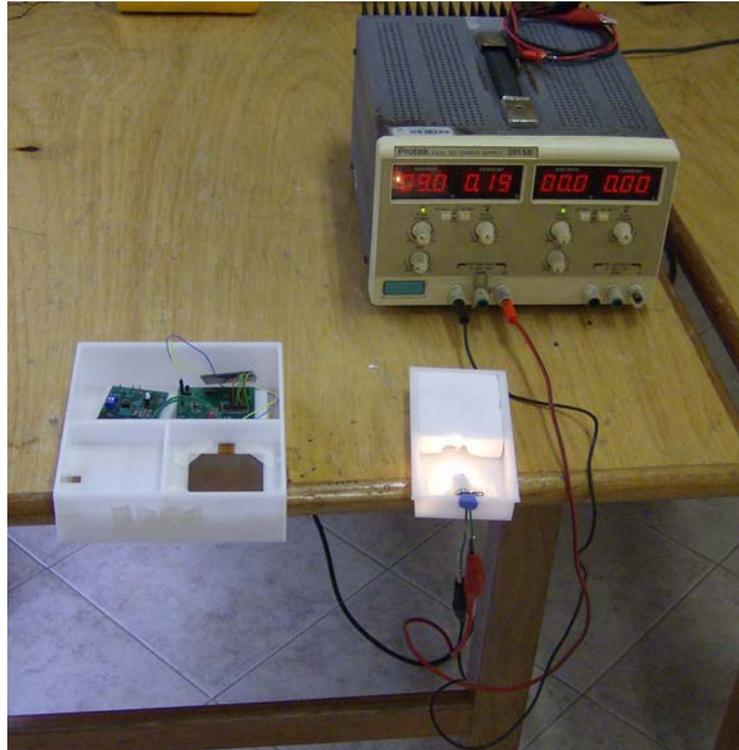
Fuente: Autores

Durante el proceso de calentamiento, el equipo de pruebas se ve como en la figura 3.17.



**Figura 3.17** Equipo de pruebas durante el calentamiento  
Fuente: Autores

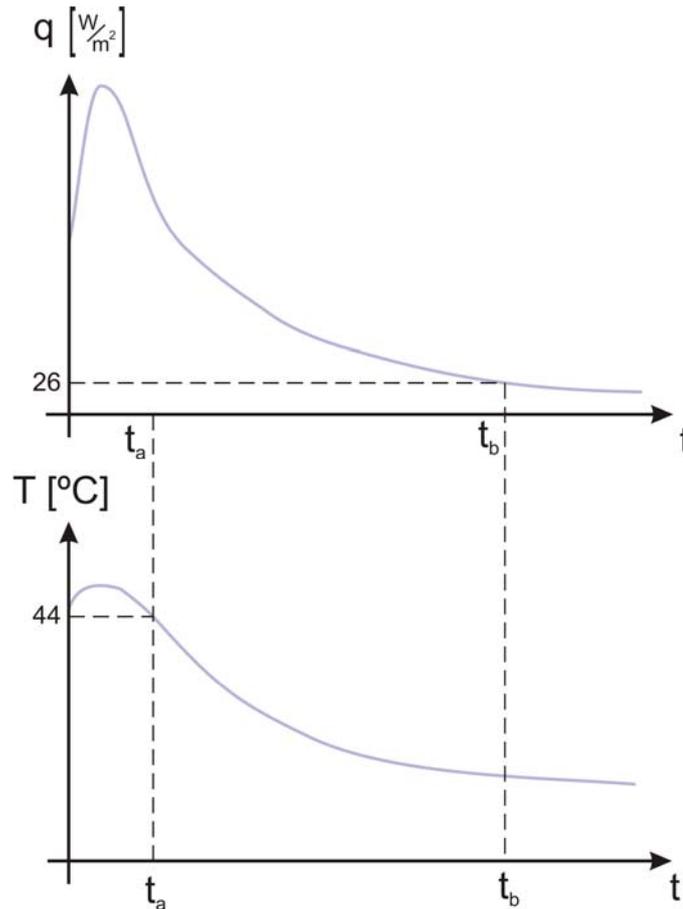
El calentamiento del material de pruebas se realiza hasta alcanzar  $46\text{ [}^\circ\text{C]}$  de temperatura. A partir de este punto el software empieza automáticamente a guardar los datos medidos por las tarjetas de adquisición; al mismo tiempo debe aislarse cuidadosamente el sistema de calentamiento, para evitar que éste afecte las medidas tomadas, ver figura 3.18. La toma de datos se realiza a una frecuencia de  $1\text{ [Hz]}$  y se extiende en un periodo de  $1200\text{ [s]}$ , alcanzado este tiempo se detiene la toma de datos de manera automática y se finaliza el proceso de medición.



**Figura 3.18 Durante la adquisición, con el sistema de calentamiento aislado**  
Fuente: Autores

### 3.4.2 Descripción Analítica del Experimento

De la toma de datos se obtienen tres vectores; tiempo, temperatura y flujo de calor. De estos se selecciona un rango para analizar, acotado por dos medidas. El intervalo de interés debe incluir temperaturas inferiores a  $44[^\circ\text{C}]$  y medidas de flujo de calor superiores a  $26 [\text{W}/\text{m}^2]$ . Este rango es más amplio que el dado por las tarjetas para facilitar el ajuste de los datos de flujo de calor a una curva de tipo potencial. El intervalo mencionado se obtiene como se muestra en la figura 3.19.



**Figura 3.19 Rango utilizado para la operación de datos**  
Fuente: Autores

La aproximación resultante sirve para estudiar el comportamiento de los datos, y disminuir el efecto de variaciones inesperadas como corrientes de aire. El vector de flujo de calor se ajusta a una ecuación potencial de la forma:

$$y = ax^b$$

3.2

donde:

$x$  es el tiempo,  $x = t$

$y$  es el flujo de calor,  $y = q$

Se linealiza la ecuación de la siguiente forma:

$$y = ax^b$$

$$\log(y) = \log(a \cdot x^b)$$

La ecuación linealizada es:

$$\log(y) = \log(a) + b \log(x) \quad 3.3$$

para,

$$Y = \log(y)$$

$$A = \log(a)$$

$$B = b$$

$$X = \log(x)$$

Resulta:

$$Y = A + B \cdot X \quad 3.4$$

Se obtiene la ecuación de una recta, por el método de mínimos cuadrados:

$$A = \frac{\sum Y_i - b \sum X_i}{n} \quad 3.5$$

$$B = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad 3.6$$

donde,

$$a = 10^A \quad 3.7$$

$$b = B \quad 3.8$$

Reemplazando las ecuaciones 3.5 y 3.6 en las ecuaciones 3.7 y 3.8:

$$a = 10^{\frac{\sum Y_i - B \sum X_i}{n}} \quad 3.9$$

$$b = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad 3.10$$

Entonces,

$$q = a \cdot t^b \text{ para } [t_a, t_b] \quad 3.11$$

donde la constante  $a$  tiene unidades en  $\left[ \frac{W}{m^2} / s^b \right]$ .

Con la ecuación obtenida y la gráfica de las medidas de temperatura se determina un intervalo de tiempo,  $t_a$  y  $t_b$ , siendo estos valores enteros límites de la integración. Para este rango  $t_a$  es el tiempo en que la temperatura medida se ubica por debajo de 44 [°C] y  $t_b$  es el tiempo en que el flujo de calor medido disminuye hasta el valor promedio temperatura ambiente, 23 [W/m<sup>2</sup>], mas el valor mínimo amplificado por la tarjeta, 6.43 [W/m<sup>2</sup>], es decir, hasta alcanzar 29.43 [W/m<sup>2</sup>]. La ecuación obtenida de flujo de calor se multiplican por el área del sensor y se integra como:

$$Q = s \int_{t_a}^{t_b} q \cdot dt \quad [J]$$

3.12

donde:

$Q$  es el calor aportado por la placa de cobre [J]

$q$  es el flujo de calor [W/m<sup>2</sup>]

$s$  es el área de la superficie que atraviesa el flujo de calor [m<sup>2</sup>]

$t_a$  es el tiempo para el cual la temperatura es menor de 44 [°C]

$t_b$  es el tiempo para el cual el flujo de calor es mayor a 29.43 [W/m<sup>2</sup>]

En el vector de temperatura se toman las medidas correspondientes a los valores límite del intervalo definido para obtener la variación de temperatura en la lámina:

$$\begin{aligned} n_a &= t_a \\ n_b &= t_b \\ \Delta T &= T[n_a] - T[n_b] \\ \Delta T &= T_a - T_b \quad [K] \end{aligned}$$

3.13

donde:

$\Delta T$  es la variación de temperatura en la placa de cobre [K]

$T_a$  es la temperatura de la placa en el tiempo  $t_a$  [°C]

$T_b$  es la temperatura de la placa en el tiempo  $t_b$  [°C]

Finalmente, con el valor de cantidad de calor liberado  $Q$  y la variación de temperatura  $\Delta T$ , se obtiene el calor específico del cobre según la ecuación 1.2, para un intervalo de temperatura entre  $T_a$  y  $T_b$ . Donde la masa de la lámina de cobre es  $m=0.007958$  [kg],.

$$\bar{c}_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

De este modo se calcularán los valores de calor específico a partir de las medidas de temperatura y flujo de calor, realizadas con el método propuesto y desarrollado.

## 4 SOFTWARE

La instrumentación electrónica involucra el manejo de los equipos electrónicos para el uso en mediciones. Este campo se aplica en el sensado y procesamiento de la información proveniente de variables físicas y químicas, a partir de las cuales se realiza el monitoreo y control de procesos. La primera etapa es realizada por las tarjetas de adquisición de temperatura [9] y flujo de calor [3], cada una adaptada a un módulo de transmisión bluetooth [2]. La segunda etapa se desarrolla con el uso de la herramienta gráfica de programación, LabVIEW<sup>2</sup>.

En este capítulo se describe el software desarrollado para la visualización e interpretación de los datos correspondientes a la medición de flujo de calor y temperatura, variables que son medidas simultáneamente. Este software también tiene la función de realizar el cálculo del calor específico.

Se hizo uso de la herramienta LabView versión 7.1, para diseñar una aplicación con capacidad de leer medidas de flujo de calor y de temperatura. Este software es compatible con *Windows 2000/NT 4.0 Service Pack 6* o versiones posteriores a */XP*. Sin embargo, el programa de visualización utiliza una función de descubrimiento de dispositivos bluetooth, indispensable para la configuración del software y que requiere el uso de controladores de *Windows XP Service Pack 2*. Estos paquetes, "*Enumerador Bluetooth de Microsoft*" y el "*Broadcom Ultimate Low Cost Bluetooth 2.0+EDR USB Dongle*", hacen posible la comunicación desde dispositivos bluetooth al PC.

La estructura de los datos enviados por transmisión bluetooth es la misma utilizada en trabajos precedentes [2], donde se adaptó el módulo bluetooth al dispositivo de temperatura y al de flujo de calor.

### 4.1 FUNCIONES DEL SOFTWARE

El programa creado consta de tres partes principales, **RECONOCIMIENTO, TOMA DE DATOS y ANÁLISIS.**

La primera parte, el RECONOCIMIENTO, tiene como funciones principales:

- Detectar los dispositivos bluetooth activos en el rango visible del receptor-transmisor.
- Guardar las direcciones de los módulos seleccionados para el proceso medición.

---

<sup>2</sup> **Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench**

La segunda parte, denominada TOMA DE DATOS, tiene las siguientes funciones:

- Sincronizar los dispositivos detectados con el PC para realizar la transmisión de información.
- Visualizar las medidas tanto gráfica como numéricamente.
- Guardar las medidas de los sensores por un periodo de 1200 segundos.

La tercera parte, ANÁLISIS, tiene las siguientes funciones:

- Editar los datos medidos, de acuerdo al rango de trabajo de las tarjetas de adquisición.
- Estimar una medida para el calor específico, en el rango de temperatura considerado.

En la figura 4.1 se muestra la pestaña de presentación del software con el nombre de los autores y los botones, de RECONOCIMIENTO y TOMA DE DATOS. Cada uno de estos botones conduce a una etapa del programa.



Figura 4.1 Ventana principal del software de visualización  
Fuente: Autores

#### 4.1.1 Reconocimiento

En la fase de reconocimiento se hace uso de librerías y funciones disponibles en LabView 7.1 para la detección de los módulos bluetooth adaptados a las tarjetas de flujo de calor y temperatura, y para la configuración y apertura de los puertos en el PC. La función principal usada para el reconocimiento de los dispositivos es *Bluetooth Discover*. A través de ésta se obtienen los nombres y las direcciones de hasta 7 dispositivos bluetooth, ubicados dentro del rango de alcance del receptor-transmisor. Esta función también permite saber si existen errores en la comunicación y realizar modificaciones en el tiempo utilizado para hacer la búsqueda de los dispositivos. Por defecto esta configurado para 10,000 [ms]. La figura 4.2 muestra la etapa de reconocimiento de los dispositivos bluetooth del software diseñado.



**Figura 4.2 Etapa de Reconocimiento**

Fuente: Autores

El componente visual esta conformado de tres secciones. En la primera se explica la función de esta etapa e incluye las direcciones posibles de los módulos utilizados. En la segunda sección se encuentra el símbolo bluetooth, utilizado como un indicador visual animado en el proceso de detección de dispositivos. La tercera sección es una tabla compuesta de

dos columnas, donde se listan los nombres y las direcciones de los dispositivos que han sido identificados en el rango de cobertura. En esta se escogen una a una las tarjetas de adquisición que se van a utilizar con el botón Seleccionar. Luego de la selección se oprime el botón Guardar, y con este se genera internamente un archivo de texto llamado **Dispositivos.txt** con las direcciones físicas de los módulos.

La etapa de RECONOCIMIENTO puede obviarse cuando se utilizan los mismos módulos bluetooth en todas las sesiones de medición, de lo contrario, se debe realizar cuando se intercambien los módulos en las tarjetas, y/o se cambie la ubicación del archivo de direcciones.

#### 4.1.2 Toma de datos

Terminado el reconocimiento de los dispositivos el programa regresa a la ventana principal, donde se oprime el botón TOMA DE DATOS y se pasa a la segunda etapa de la aplicación, mostrada en la figura 4.3.

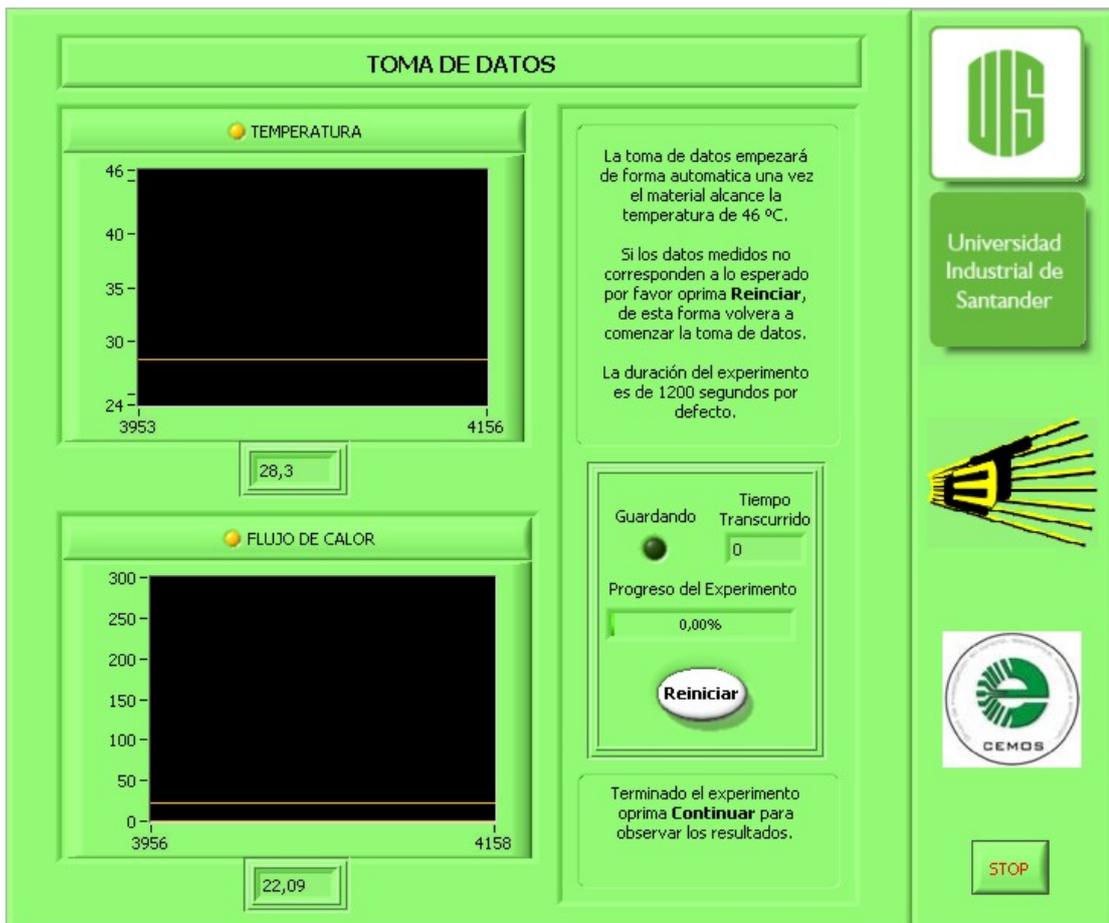


Figura 4.3 Etapa de Toma de datos  
Fuente: Autores

La ventana se encuentra dividida en dos partes principales. En la primera parte se encuentran las gráficas de los datos de temperatura y flujo de calor. Cada gráfica tiene una señal visible, un led en la parte superior, que indica si la tarjeta de adquisición se encuentra activa y un indicador numérico en la parte inferior para el valor medido por el sensor.

En la segunda parte de la ventana hay un cuadro de texto donde se dan indicaciones sobre cómo realizar el registro de datos. También cuenta con una sección de control y visualización, un led que se activa durante el registro de datos, un contador para llevar el tiempo transcurrido y una barra de estado para mostrar el progreso del experimento. Además, en esta parte está el botón Reiniciar, el cual permite borrar los datos guardados anteriormente y repetir el proceso si es necesario. Al final de la segunda parte hay un cuadro de texto indicando que al finalizar la adquisición de datos se debe oprimir el botón Continuar y de ese modo se pasa a la siguiente etapa. Este botón se hace visible una vez se han terminado de registrar los datos.

En la etapa de TOMA DE DATOS, debido a que las medidas son mostradas en tiempo real, es necesario configurar los puertos y hacer la conexión de las tarjetas de adquisición con el PC. Para lograr esto se utilizan los *subVIs*<sup>3</sup> dados por LabVIEW para la comunicación bluetooth. Entre estas librerías se encuentran: *Bluetooth RFCOMM Service Discovery*, *Bluetooth Open Connection*, *Bluetooth Read* y *Bluetooth Close Connection*. Además de estas se dispone de un *subVI* creado en el trabajo de grado de adaptación a transmisión bluetooth de las tarjetas de adquisición [2]. Esta función organiza los bytes que envían las tarjetas de adquisición según su jerarquía, de esta forma se evitan errores en la lectura de los datos leídos por el programa.

### ***Diagrama de flujo de la función Guardar Datos***

La estructura implementada en la etapa TOMA DE DATOS, para el almacenamiento de información, se muestra en la figura 4.4.

---

<sup>3</sup> En LabVIEW los programas son llamados VIs, Virtual Instruments, porque estos simulan un panel frontal para que el usuario interactúe y una ventana de diagrama de bloques. Un SubVI es un instrumento virtual dentro del VI con su propio panel frontal y su propio diagrama de bloques.

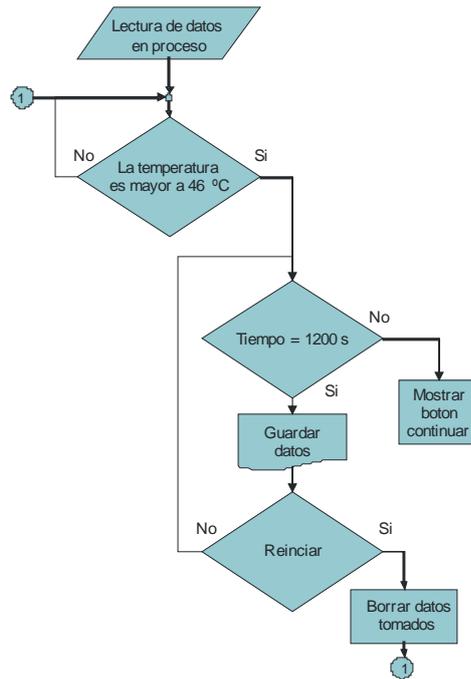


Figura 4.4 Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos  
Fuente: Autores

### ***Diagrama de bloques de la función Guardar datos***

El diagrama de bloques en LabVIEW para la función guardar datos se muestra en la figura 4.5.

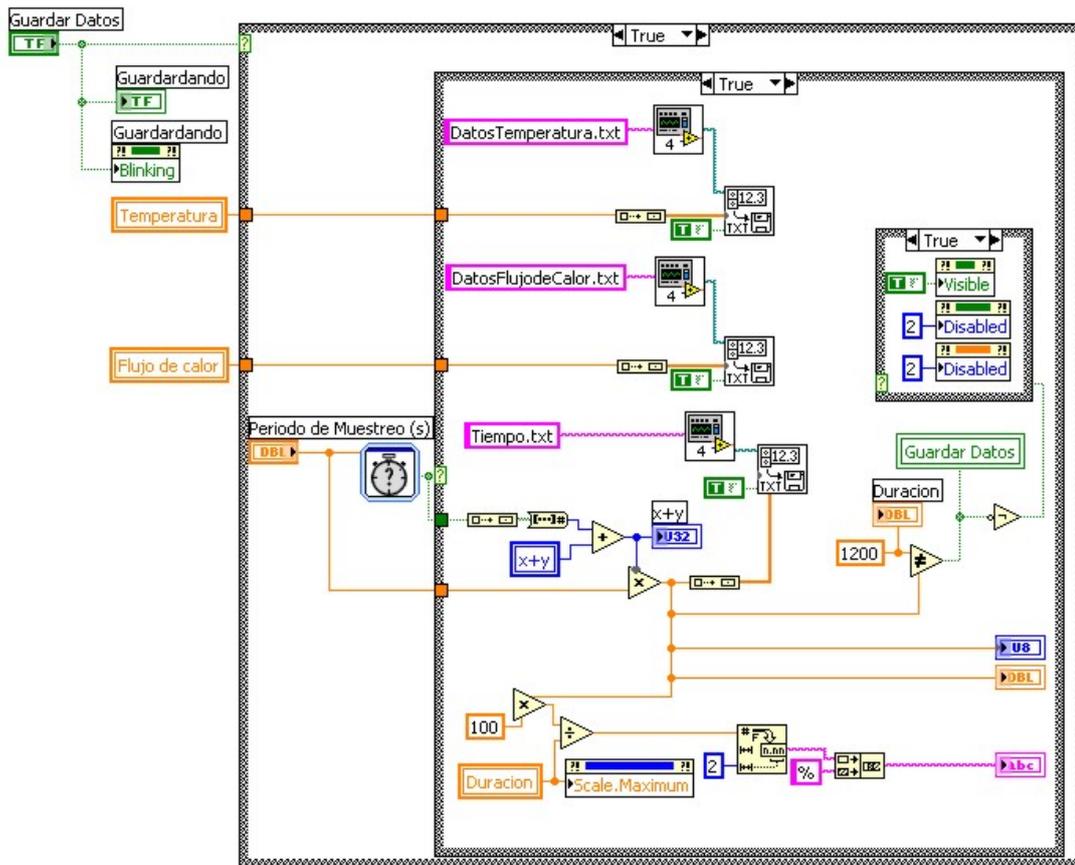
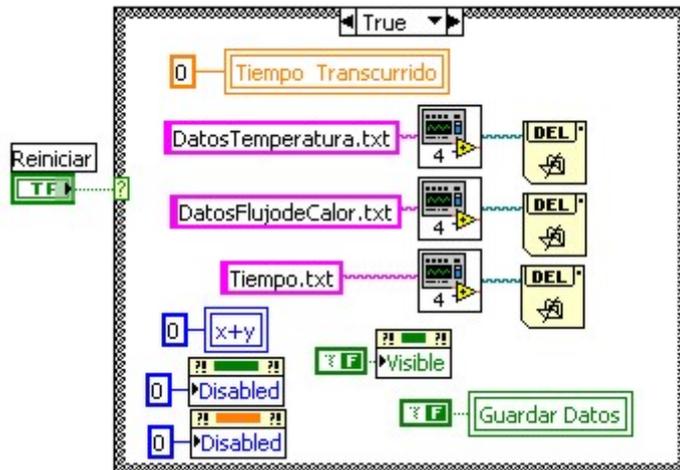


Figura 4.5 Diagrama de bloques para el almacenamiento de datos  
Fuente: Autores

Durante el proceso de medición de temperatura y flujo de calor se visualizan estas variables con un indicador numérico y de forma gráfica. Sin embargo, el registro de datos solo se activa una vez halla alcanzado el material de pruebas una temperatura de  $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Una vez esto sucede se activa internamente la variable llamada Guardar Datos y con esta el proceso. Al mismo tiempo, la función *Elapsed Time* empieza a generar pulsos de una frecuencia definida por el periodo de muestreo, por defecto  $1\text{ [s]}$ . Estos pulsos permiten guardar los datos medidos, cada segundo, en dos archivos de texto, **DatosTemperatura.txt** y **DatosFlujodeCalor.txt**, al tiempo que se lleva un contador cuyos datos son guardados en el archivo **Tiempo.txt**.

Las variables de salida de este bloque son los indicadores mencionados anteriormente, el tiempo transcurrido y una barra de progreso del experimento, controladas por el contador. De éste también depende la duración de la función guardar datos, ya que esta finaliza una vez el tiempo transcurrido se iguala a  $1200\text{ [s]}$ . Consecutivo a esto, se deshabilitan los indicadores Tiempo Transcurrido y Led Guardando, y se hace visible el botón Continuar.

Por otro lado, cuando se oprime el botón Reiniciar se termina el proceso de guardar datos. Se reinicia y se habilita el Tiempo Transcurrido, el led Guardando, se hace invisible el botón Continuar y borra los archivos de texto donde se habían guardado los datos. De esta forma el registro de datos puede repetirse una vez se alcancen los 46 [°C] de temperatura nuevamente. La figura 4.6 muestra la estructura de bloques controlada por la variable Reiniciar:



**Figura 4.6 Estructura de bloques de Reiniciar**  
Fuente: Autores

Al definir la duración del experimento y hacer que el registro de datos se realice automáticamente cuando se sobrepasa un valor de temperatura de la medición, se busca unificar las condiciones para registrar los datos en todos los experimentos.

### 4.1.3 Análisis de datos

Una vez termina la recopilación de datos en la ventana Toma de Datos se hace visible el botón Continuar. Éste es el que permite pasar a la siguiente etapa del software, el Análisis de Datos, como se muestra en la figura 4.7.

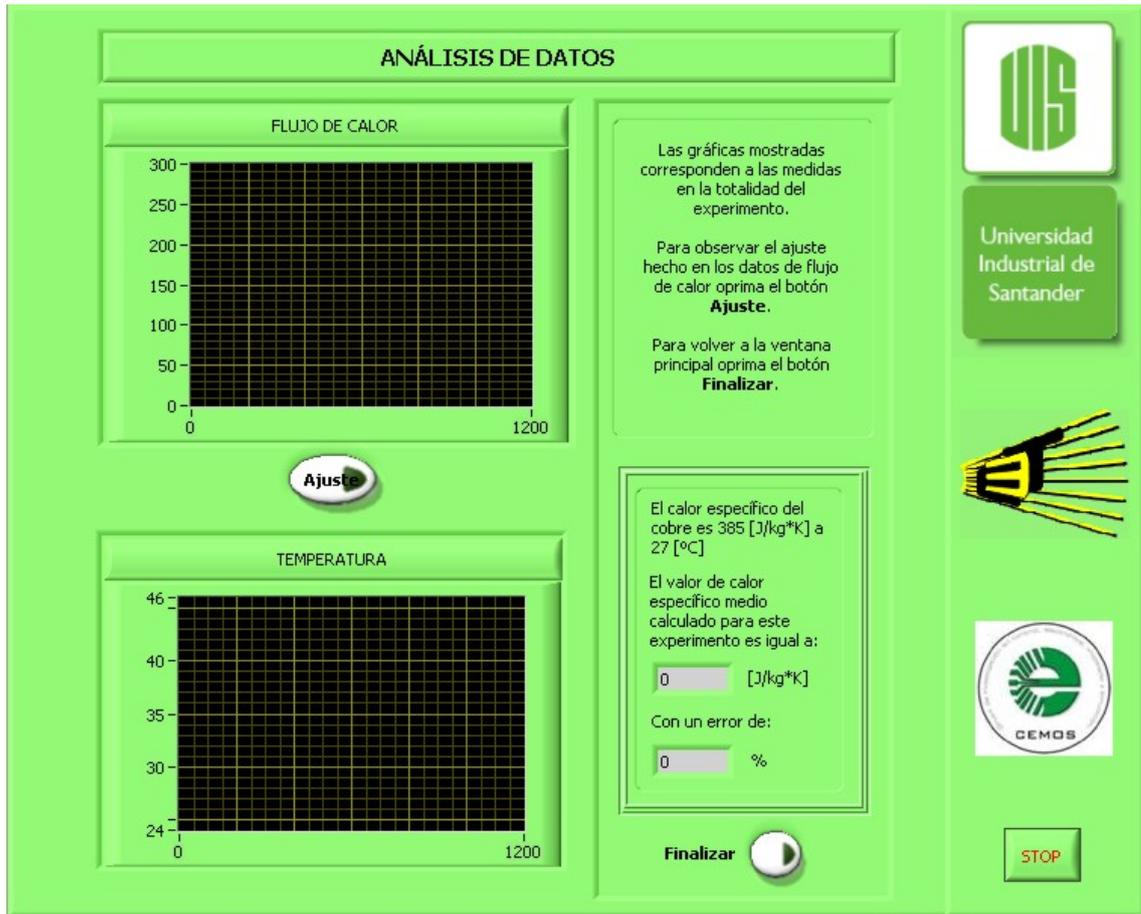


Figura 4.7 Análisis de datos

Fuente: Autores

Al activarse esta sección el software lee los tres vectores guardados como archivos de texto. Seguidamente discrimina los datos en cada uno de estos para tomar solamente los que se encuentran dentro del intervalo establecido para el ajuste a la curva.

Esta ventana, al igual que en la anterior etapa, esta dividida en dos partes principales. En la primera se encuentran las gráficas de las medidas de temperatura y flujo de calor tomadas en el experimento. Junto con estas está el botón Ajuste, el cual, al ser activado muestra, en la gráfica de flujo de calor, el ajuste hecho analíticamente. La segunda parte contiene un texto explicatorio de la ventana y una sección de visualización de resultados. Aquí es donde se da el valor del calor específico medio hallado en el experimento, junto con el error en porcentaje comparado con el valor referido en la literatura. Esta parte también contiene el botón Finalizar, que al ser oprimido hace que el software se devuelva a la ventana principal.

Finalmente, para permitir el cálculo del calor específico de una muestra de material diferente a la lámina de cobre, se tiene acceso a la última

ventana del programa denominada Configuración, figura 4.8. Para ingresar en esta se debe presionar el botón Configuración existente en la ventana principal del programa. En esta es posible cambiar el valor del calor específico del material de pruebas, la duración total del experimento, el intervalo de análisis, entre otros. De esta forma se obtiene un programa flexible a cambios, con la posibilidad de adaptarse para calcular el calor específico medio de un material sólido diferente al cobre.

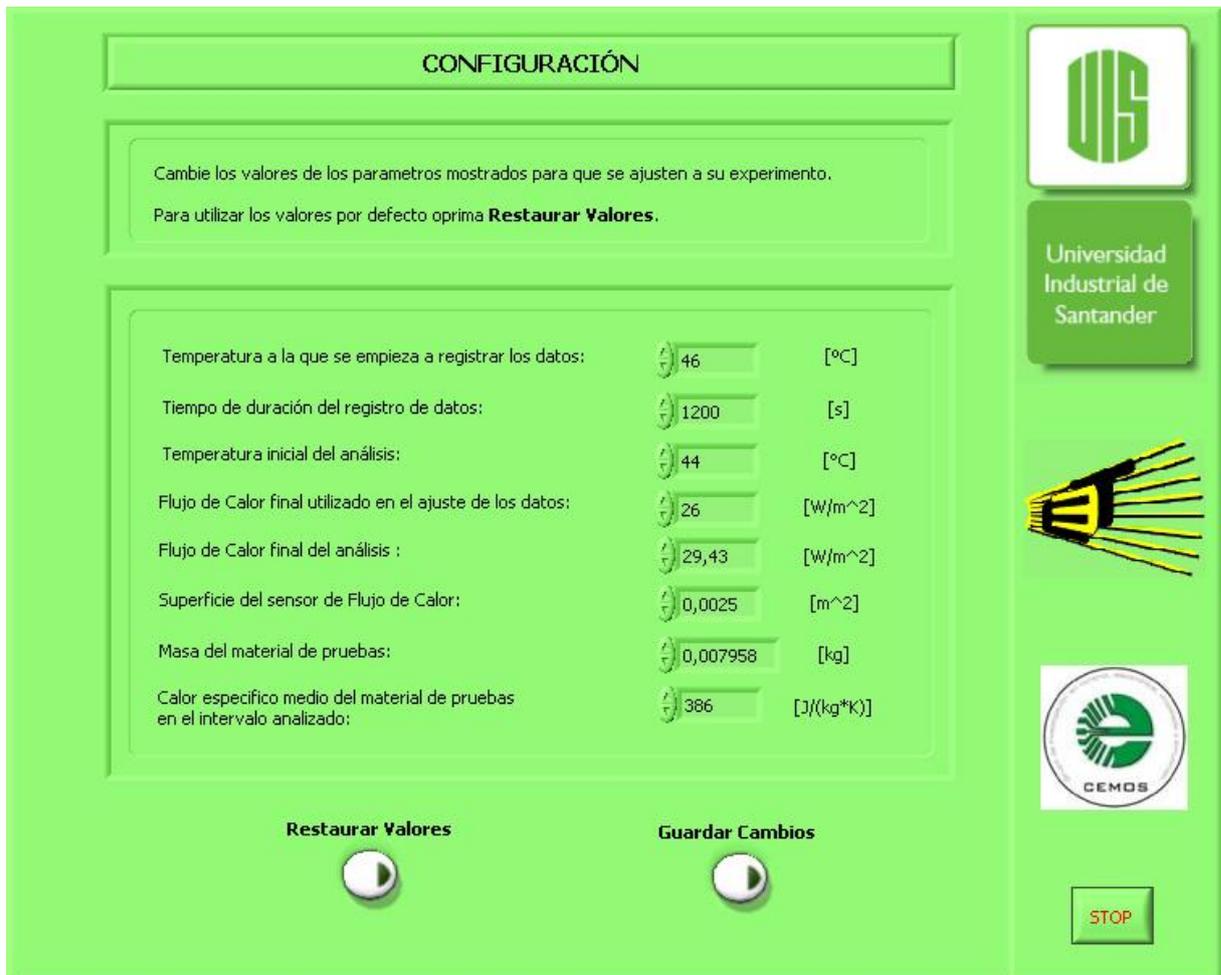


Figura 4.8 Análisis de datos

Fuente: Autores

## 5 RESULTADOS

En este capítulo se describe el procedimiento para hacer uniforme la recolección de los datos. Para ello se presenta un protocolo de medición. Luego se ilustran tres de los 38 experimentos realizados con el método propuesto, con diferentes magnitudes de error. Posteriormente se hace un análisis del efecto de la variación en los factores que definen el calor específico, utilizando medidas de estadística, y se comparan los valores de  $c_p$  obtenidos contra los referenciados en la literatura.

### **5.1 RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS**

En esta etapa se establece un protocolo de medición para hacer la recolección de los datos, en cada experimento, de forma uniforme y con ello evitar errores sistemáticos en las medidas adquiridas. Para seguir el protocolo propuesto, en conjunto con el equipo de medición, se necesitan los siguientes elementos:

- Guantes
- Detergente
- Algodón
- Papel absorbente
- Alcohol isopropílico
- Lija de agua No. 500

Cada elemento listado cumple su función en la preparación del equipo para realizar la adquisición de los datos. A continuación se describe el procedimiento a seguir previo a cada experimento.

#### **5.1.1 Protocolo de medición:**

- Lave previamente los guantes que va a utilizar para manipular el material de pruebas, lámina de cobre.
- Seque los guantes y póngaselos.
- Con algodón humedecido en alcohol isopropílico, limpie el área de ubicación de los sensores.
- Ubique los sensores dentro de la caja de pruebas.
- Lave la lámina con agua y detergente.

- Pula la lámina de cobre por ambas caras con lija de agua, de forma que se elimine el óxido sobre la superficie y esta obtenga un color rosado.
- Lave nuevamente la lámina con agua y detergente.
- Seque la lámina con el papel absorbente.
- Con algodón humedecido en alcohol, limpie la lámina por ambas caras.
- Una vez se evapore el alcohol excedente de la lámina ubíquela en la caja de pruebas.
- Coloque el sensor de flujo de calor sobre la lámina cubriéndola en su totalidad.
- Fije el sensor de flujo de calor a la caja de pruebas pegando sus puntas. Esto puede realizarse utilizando cinta de enmascarar.
- Quítese los guantes.
- Conecte el sistema de calentamiento a la fuente de alimentación y fije su valor a 9 [V].
- Ubique el sistema de calentamiento dentro de la caja, de forma que el bombillo este justo debajo del material de pruebas.
- Encienda el sistema de calentamiento.
- Cuando la temperatura sobrepasa los 46 [°C] el software empieza automáticamente a registrar los datos dados por las tarjetas de adquisición. Entonces, retire de la caja de pruebas el sistema de calentamiento ubicado dentro de la pieza móvil y desconéctelo.
- Espere a que finalice la toma de datos.

### **5.1.2 Experimentación**

En esta fase se realizaron 38 experimentos utilizando el método propuesto y desarrollado, considerando para cada uno el protocolo de medición descrito en la sección anterior. La cantidad de la muestra se aceptó debido a que la variación en los datos se mantuvo. Entre cada prueba se dejó

cierto tiempo, para no recalentar la lámina, el material y los sensores de temperatura y flujo de calor.

En cada experimento, como se explicó en el tercer capítulo, se mide temperatura, flujo de calor, y tiempo en el que se adquiere cada dato, ver figura 5.1. Con estos datos almacenados en tres vectores se obtiene: el calor transferido, y el diferencial de temperatura. Esta información se encuentran en la Tabla I, Anexo A.

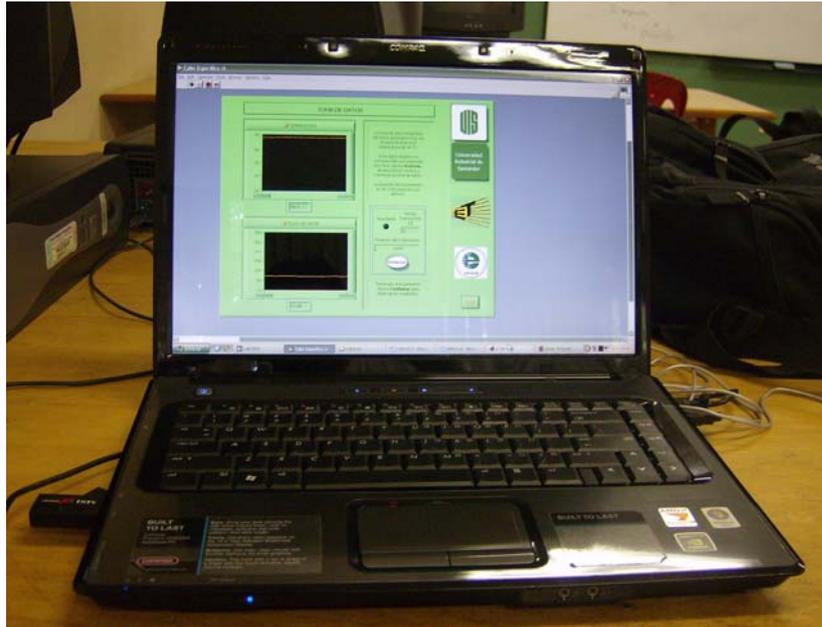


Figura 5.1 Adquisición de datos en un experimento  
Fuente: Autores

## Ejemplos

A continuación se explica el procedimiento para calcular el calor específico en el cobre utilizando tres ejemplos que presentan diferente magnitud de error, de acuerdo al método propuesto y desarrollado.

### Experimento #13

Los datos de temperatura y flujo de calor registrados se muestran en la figura 5.1 y 5.2. En azul los medidos y en rojo los correspondientes al intervalo dado por las tarjetas de adquisición, donde se realiza el ajuste. El primer intervalo es de 7 a 225 [s]. Es decir,  $t_a = 7$  [s].

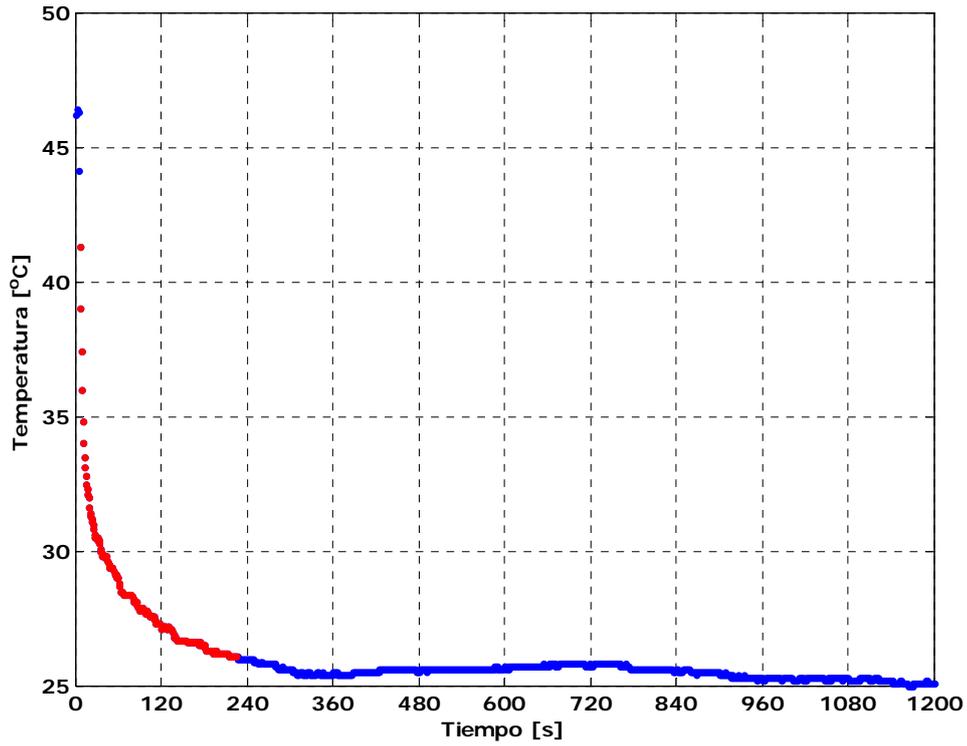


Figura 5.2 Temperatura vs tiempo

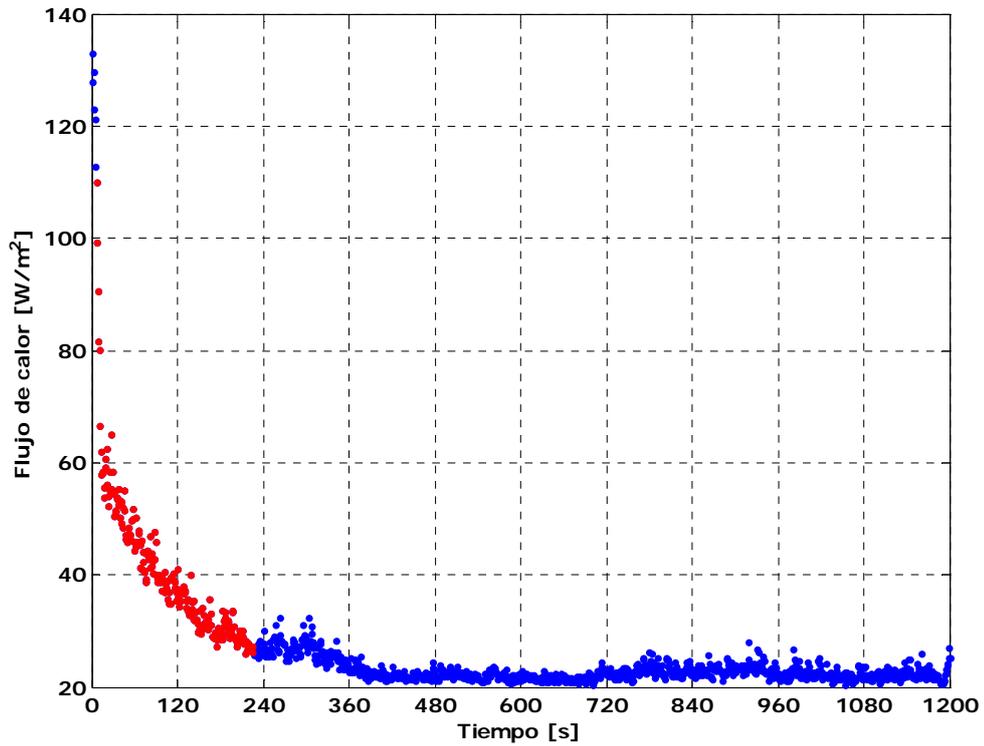


Figura 5.3 Flujo de calor vs tiempo

Los datos se ajustan a una función potencial de la forma  $y = a \cdot x^b$ , obteniendo la siguiente ecuación:

$$q = a \cdot t^b \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$q = 170.74 \cdot t^{-0.328}$$

Al evaluar los datos en la ecuación resultante, se genera la figura 5.3.

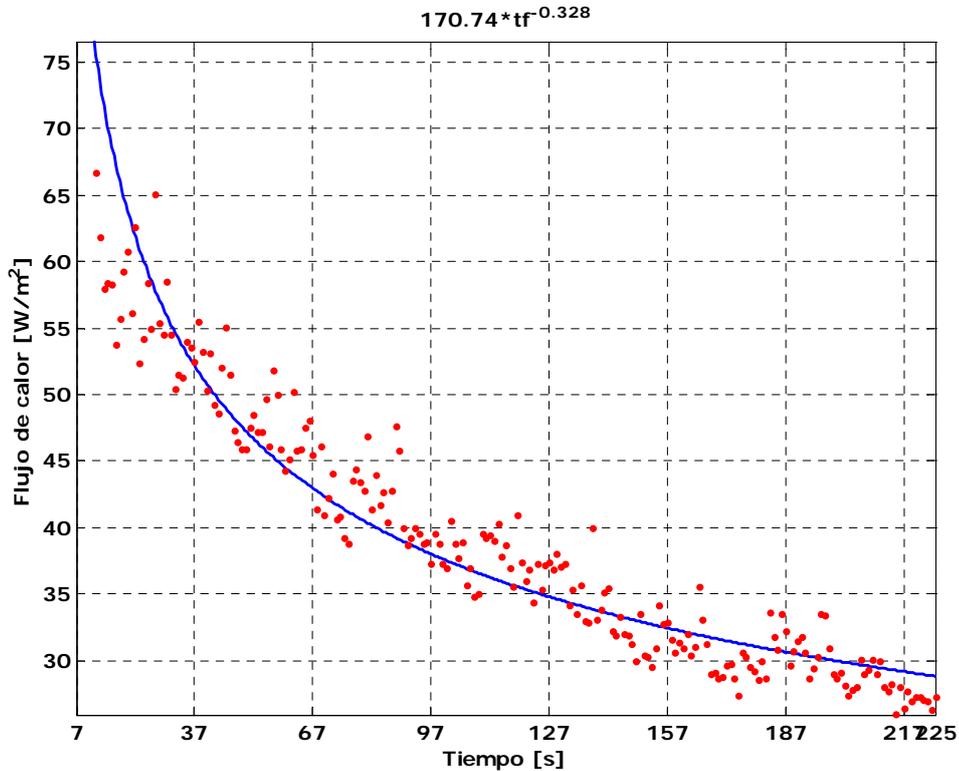


Figura 5.4 Flujo de calor vs tiempo

El coeficiente de Pearson es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables. Se halla a partir de la curva de ajuste resultante:

$$r = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{(n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2)(n(\sum Y_i^2) - (\sum Y_i)^2)}}$$

5.1

$$r = -0.963$$

La medida de  $r$  varía entre -1 y 1. Cuando la correlación es negativa indica que mientras un factor crece el otro decrece. Y la magnitud superior a 0.7, sugiere que la correlación es significativa, es decir, se trata de un buen ajuste.

La ecuación para el flujo de calor, también se utiliza para hallar el tiempo límite del intervalo de estudio,  $t_b$ , despejando  $t$  cuando el flujo es,  $q = 29.43 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .

$$\begin{aligned}
 q &= 170.74 \cdot t^{-0.328} \\
 \frac{q}{170.74} &= t^{-0.328} \\
 \ln\left(\frac{q}{170.74}\right) &= -0.328 \cdot \ln t \\
 \frac{\ln\left(\frac{q}{170.74}\right)}{-0.328} &= \ln t \\
 \frac{\ln\left(\frac{q}{170.74}\right)}{-0.328} &= t \\
 t &= 211.743 \quad [s]
 \end{aligned}$$

Se toma la parte entera del tiempo hallado:  $t_b = 211 \quad [s]$ . La ecuación del flujo se integra en el intervalo de tiempo definido para  $t_a$  y  $t_b$ , luego se multiplica por el área del sensor,  $0.0025 \quad [m^2]$ .

$$\begin{aligned}
 Q &= s \int_{t_a}^{t_b} 170.74 \cdot t^{-0.328} \cdot dt \\
 Q &= 0.0025 \int_7^{211} 170.74 \cdot t^{-0.328} \cdot dt \\
 Q &= 20.79 \quad [J]
 \end{aligned}$$

Donde:

$s$  es el área del sensor  $[m^2]$

El  $\Delta T$  se obtiene restando al valor de temperatura medido para el tiempo  $t_a$  el valor de temperatura para el tiempo  $t_b$ :

$$\begin{aligned}
 \Delta T &= T(t_a) - T(t_b) \\
 \Delta T &= T(7) - T(211) \\
 \Delta T &= 41.3 - 26.2 \\
 \Delta T &= 15.1 \quad [K]
 \end{aligned}$$

Con las variables calculadas, y la masa de la lámina de cobre se obtiene el calor específico promedio:

$$\begin{aligned} \overline{c_p} &= \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \\ \overline{c_p} &= \frac{20.79}{0.007958 \cdot 15.1} \\ \overline{c_p} &= 173.012 \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] \end{aligned}$$

Al comparar esta medida con el calor específico teórico,  $c_p=386 \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ :

$$\begin{aligned} e_{rel} &= \frac{c_{pT} - c_{pM}}{c_{pT}} \\ e_{rel} &= \frac{386 - 173.012}{386} \\ error &= 55.2\% \end{aligned}$$

## Experimento #27

Los datos de temperatura y flujo de calor registrados se muestran en la figura 5.5 y 5.6. En azul los medidos y en rojo los correspondientes al intervalo dado por las tarjetas de adquisición, donde se realiza el ajuste. El primer intervalo es de 59 a 530 [s]. Es decir,  $t_a=59$  [s].

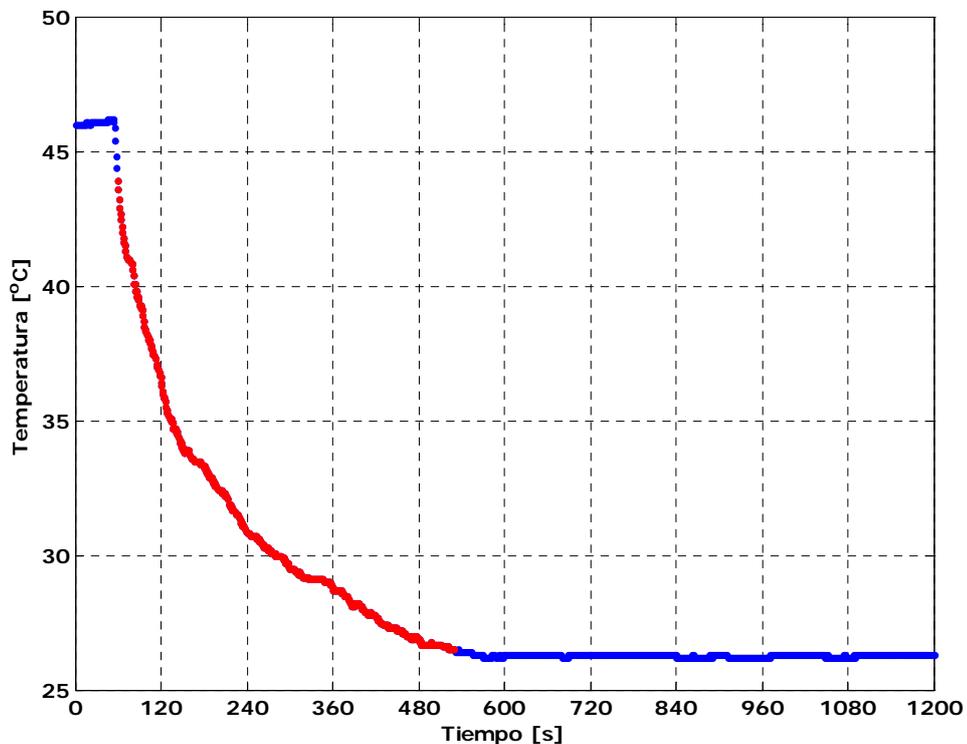


Figura 5.5 Temperatura vs tiempo

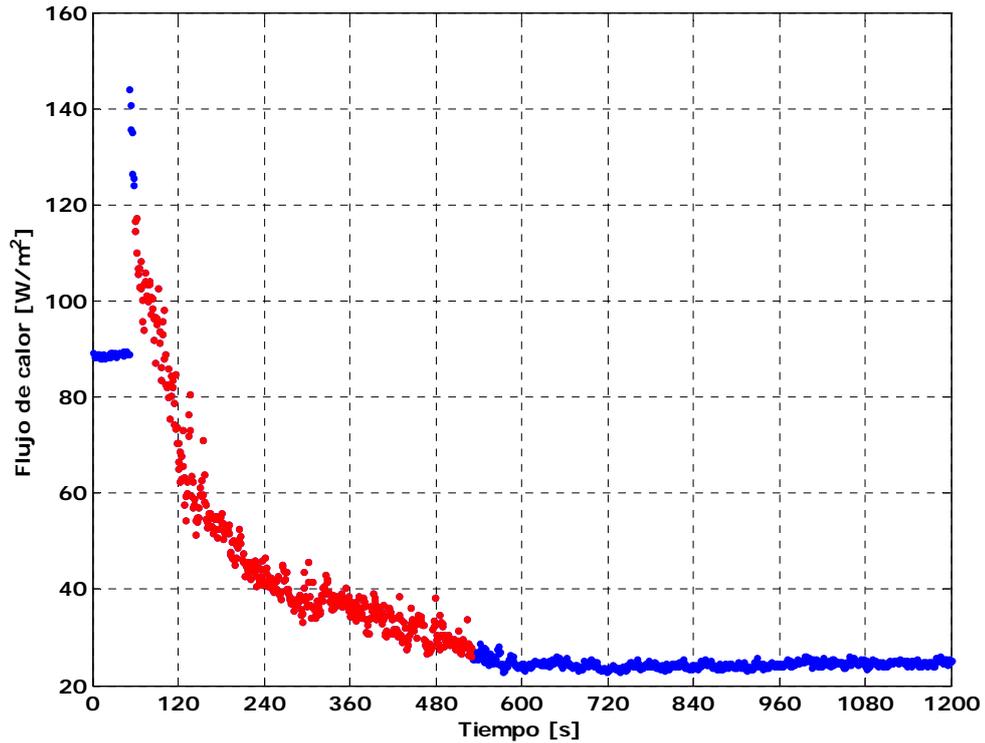


Figura 5.6 Flujo de calor vs tiempo

Los datos se ajustan a una función potencial de la forma  $y = a \cdot x^b$ , obteniendo la siguiente ecuación:

$$q = a \cdot t^b \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$
$$q = 1448.6 \cdot t^{-0.631}$$

Al evaluar los datos en la ecuación resultante, se genera la figura 5.7.

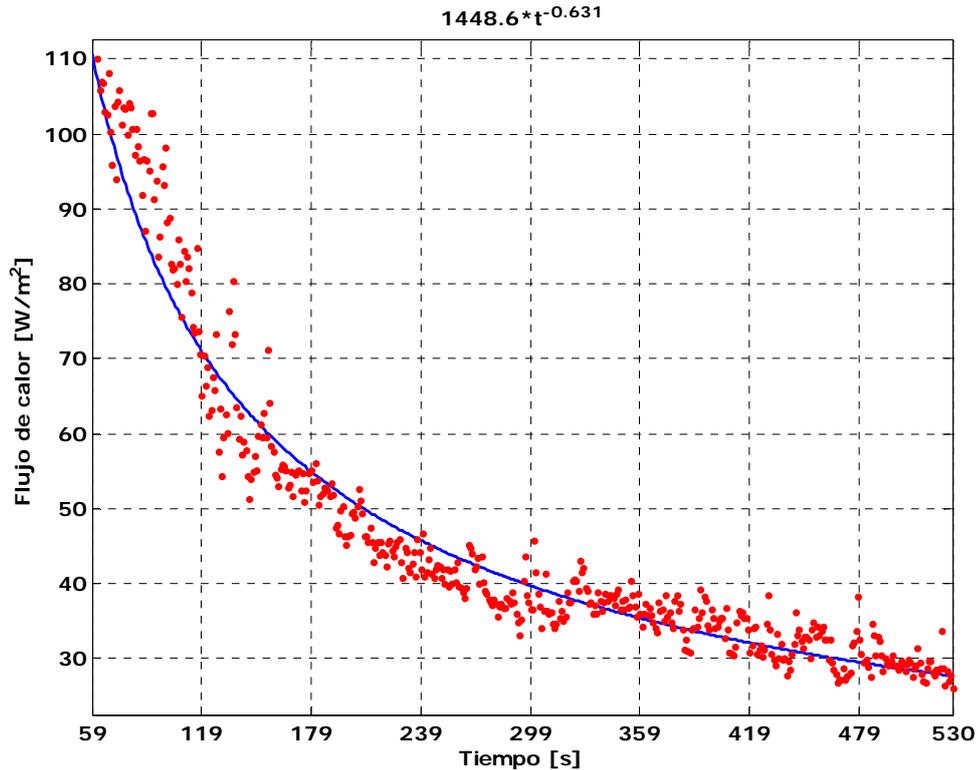


Figura 5.7 Flujo de calor vs tiempo

De la curva resultante en el ajuste, se halla el coeficiente de correlación de Pearson:

$$r = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{(n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2)(n(\sum Y_i^2) - (\sum Y_i)^2)}}$$

5.2

$$r = -0.977$$

La magnitud del coeficiente indica un buen ajuste.

La ecuación para el flujo de calor, también se utiliza para hallar el tiempo límite del intervalo de estudio,  $t_b$ , despejando  $t$  cuando el flujo es mínimo,  $q = 29.43 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .

$$q = 1448.6 \cdot t^{-0.631}$$

$$\frac{q}{1448.6} = t^{-0.631}$$

$$\ln\left(\frac{q}{1448.6}\right) = -0.631 \cdot \ln t$$

$$\frac{\ln\left(\frac{q}{1448.6}\right)}{-0.631} = \ln t$$

$$\ell^{\frac{\ln\left(\frac{q}{1448.6}\right)}{-0.631}} = t$$

$$t = 481.025 \quad [s]$$

Se toma la parte entera del tiempo hallado:  $t_b = 481 \quad [s]$ . La ecuación del flujo se integra en el intervalo de tiempo definido para  $t_a$  y  $t_b$ , luego se multiplica por el área del sensor,  $0.0025 \quad [m^2]$ .

$$Q = s \int_{t_a}^{t_b} 1448.6 \cdot t^{-0.631} \cdot dt$$

$$Q = 0.0025 \int_{59}^{481} 1448.6 \cdot t^{-0.631} \cdot dt$$

$$Q = 51.687 \quad [J]$$

El  $\Delta T$  se obtiene restando al valor de temperatura medido para el tiempo  $t_a$  el valor de temperatura para el tiempo  $t_b$ :

$$\Delta T = T(t_a) - T(t_b)$$

$$\Delta T = T(59) - T(481)$$

$$\Delta T = 43.9 - 26.9$$

$$\Delta T = 17 \quad [K]$$

Con los datos hallados, y la masa de la lámina de cobre se obtiene el calor específico:

$$\overline{c_p} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

$$\overline{c_p} = \frac{51.687}{0.007958 \cdot 17}$$

$$\overline{c_p} = 382.056 \quad \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Al comparar esta medida con el calor específico teórico,  $c_p = 386 \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ :

$$e_{rel} = \frac{c_{pT} - c_{pM}}{c_{pT}}$$

$$e_{rel} = \frac{386 - 382.056}{386}$$
$$error = 1\%$$

### Experimento #38

Los datos de temperatura y flujo de calor registrados se muestran en la figura 5.8 y 5.9. En azul los medidos y en rojo los correspondientes al intervalo dado por las tarjetas de adquisición, donde se realiza el ajuste. El primer intervalo es de 293 a 733 [s]. Es decir,  $t_a = 293$  [s].

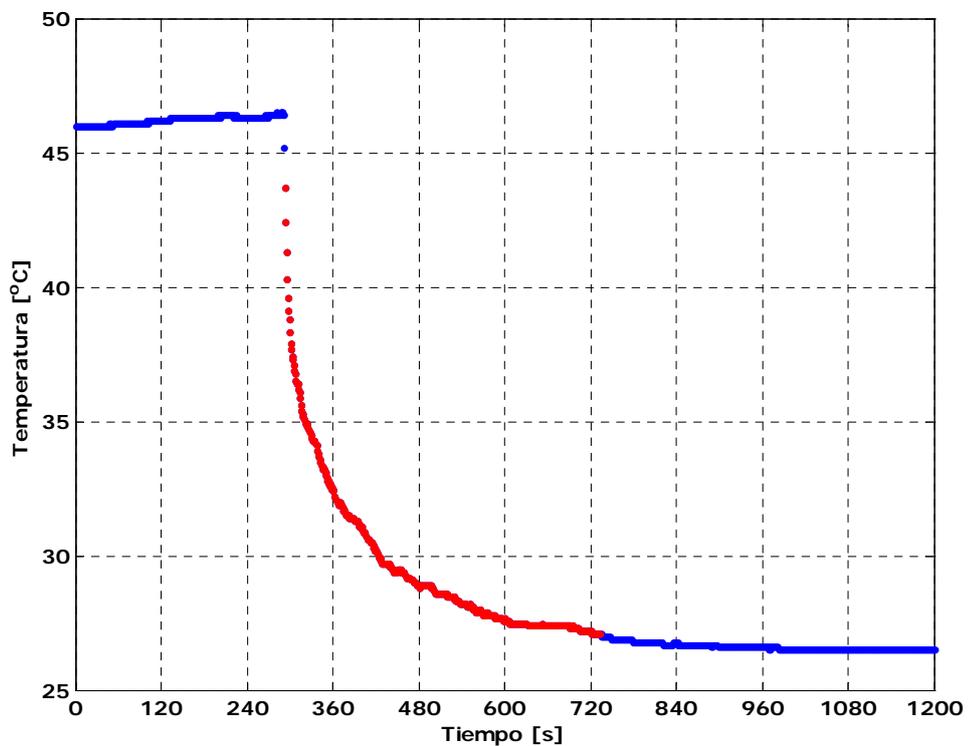


Figura 5.8 Temperatura vs tiempo

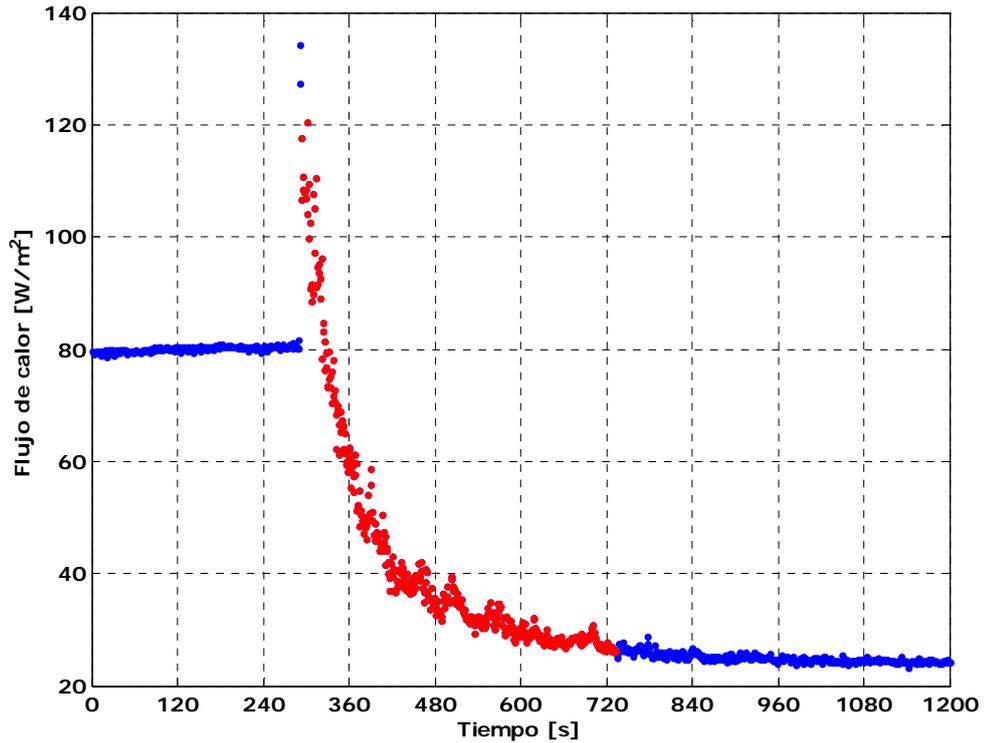


Figura 5.9 Flujo de calor vs tiempo

Los datos se ajustan a una función potencial de la forma  $y = a \cdot x^b$ , obteniendo la siguiente ecuación:

$$q = a \cdot t^b \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$
$$q = 176 \cdot 10^3 \cdot t^{-1.357}$$

Al evaluar los datos en la ecuación resultante, se genera la figura 5.10.

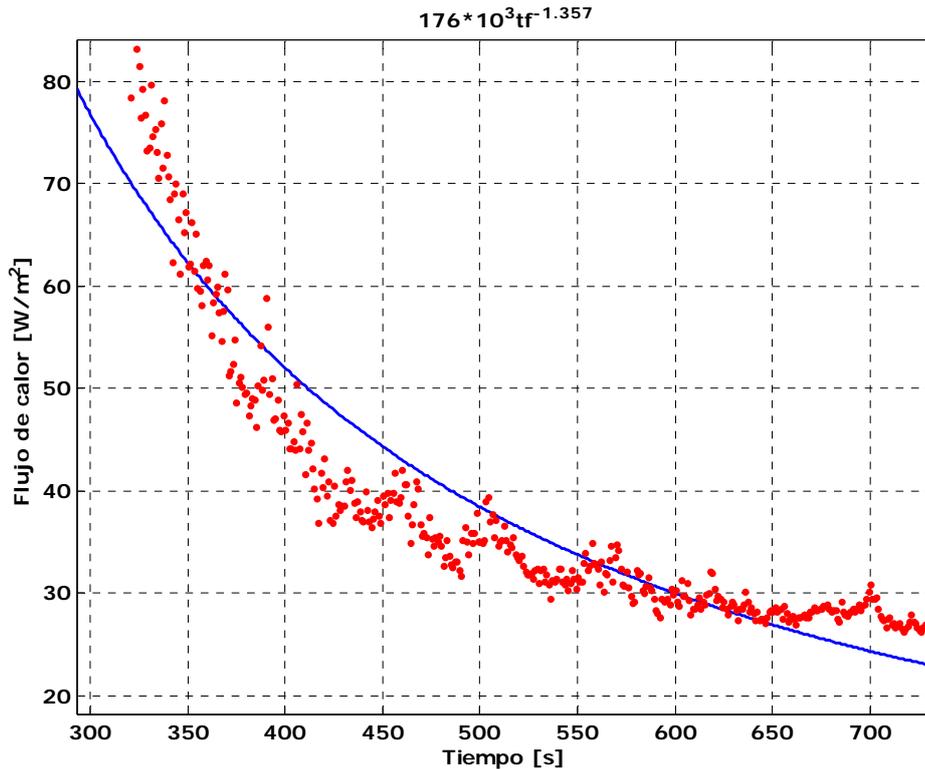


Figura 5.10 Flujo de calor vs tiempo

De la curva resultante en el ajuste, se halla el coeficiente de correlación de Pearson:

$$r = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{(n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2)(n(\sum Y_i^2) - (\sum Y_i)^2)}}$$

5.3

$$r = -0.935$$

El coeficiente indica un buen ajuste, pero inferior al obtenido en los ejemplos ilustrados anteriormente.

La ecuación para el flujo de calor, también se utiliza para hallar el tiempo límite del intervalo de estudio,  $t_b$ , despejando  $t$  cuando el flujo es mínimo,  $q = 29.43 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .

$$q = 176 * 10^3 \cdot t^{-1.357}$$

$$\frac{q}{176 * 10^3} = t^{-1.357}$$

$$\ln\left(\frac{q}{176 * 10^3}\right) = -1.357 \cdot \ln t$$

$$\frac{\ln\left(\frac{q}{176 \cdot 10^3}\right)}{-1.357} = \ln t$$

$$\ell^{\frac{\ln\left(\frac{q}{176 \cdot 10^3}\right)}{-1.357}} = t$$

$$t = 608.292 \quad [s]$$

Se toma la parte entera del tiempo hallado:  $t_b = 608 \quad [s]$ . La ecuación del flujo se integra en el intervalo de tiempo definido para  $t_a$  y  $t_b$ , luego se multiplica por el área del sensor,  $0.0025 \text{ [m}^2\text{]}$ .

$$Q = s \int_{t_a}^{t_b} 176 \cdot 10^3 \cdot t^{-1.357} \cdot dt$$

$$Q = 0.0025 \int_{293}^{608} 176 \cdot 10^3 \cdot t^{-1.357} \cdot dt$$

$$Q = 37.323 \quad [J]$$

El  $\Delta T$  se obtiene restando al valor de temperatura medido para el tiempo  $t_a$  el valor de temperatura para el tiempo  $t_b$ :

$$\Delta T = T(t_a) - T(t_b)$$

$$\Delta T = T(293) - T(608)$$

$$\Delta T = 43.7 - 27.5$$

$$\Delta T = 16.2 \quad [K]$$

Con los datos hallados, y la masa de la lámina de cobre se obtiene el calor específico:

$$\overline{c_p} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

$$\overline{c_p} = \frac{37.323}{0.007958 \cdot 16.2}$$

$$\overline{c_p} = 289.510 \quad \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Al comparar esta medida con el calor específico teórico,  $c_p = 386 \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$ :

$$e_{rel} = \frac{c_{pT} - c_{pM}}{c_{pT}}$$

$$e_{rel} = \frac{386 - 289.510}{386}$$

$$error = 25\%$$

### 5.1.3 Análisis de los datos

En cada experimento se calculó un valor para el calor específico, sin embargo, como se mostró en los ejemplos, al compararse con el valor teórico se genera un error entre el 1 y el 55.2%. Esta variación es grande, si se tiene en cuenta que todos los experimentos fueron realizados con las mismas consideraciones y siguiendo un protocolo de medición. Es por ello que el análisis de datos de esta sección estudia el origen de esta variación.

Inicialmente se tratan los datos calculados para el calor aportado y la variación de temperatura. Con  $Q$  y  $\Delta T$  de cada experimento, haciendo uso de la herramienta de estadística descriptiva del programa Excel, se obtienen las siguientes tablas:

- La variación del calor,  $Q$  [J]

Tabla 5.1 Estadística descriptiva de la variable  $Q$

Media	43,493
Error típico	1,603
Mediana	45,064
Desviación estándar	9,879
Varianza de la muestra	97,595
Rango	42,173
Mínimo	20,790
Máximo	62,963

- La variación del diferencial de temperatura  $\Delta T$  [°C]

Tabla 5.2 Estadística descriptiva de la variable  $\Delta T$

Media	16,108
Error típico	0,125
Mediana	16,2
Moda	16,2
Desviación estándar	0,771
Varianza de la muestra	0,595
Rango	4,5
Mínimo	12,5
Máximo	17

Para cada variable,  $Q$  y  $\Delta T$ , se muestran las medidas de tendencia central o distribución de los datos en esta zona. También esta la desviación estándar, grado de dispersión de los datos respecto al valor central, cuanto menor sea, mayor será el agrupamiento de los datos alrededor de la media.

De acuerdo a la información en las tablas, se presenta mayor variación en el calor comparado con la temperatura. Por tanto es conveniente estudiar el efecto de cada una de estas variables sobre el calor específico para determinar cual medida provoca mayor error. Para realizar este análisis, primero se fija un factor, tomando la media, con ésta se calcula el calor específico para cada experimento y se repite el procedimiento para el otro factor. La información resultante esta contenida en la Tabla II, Anexo A, y se resume en las siguientes tablas:

- Variación del  $c_p$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ], tomando el valor promedio del calor,  $Q=43.493$  [J], para el cálculo del calor específico.

**Tabla 5.3 Variación del  $c_p$  utilizando  $Q_{prom}$**

<b>Media</b>	340,176
<b>Error típico</b>	3,0896
<b>Mediana</b>	337,365
<b>Moda</b>	337,365
<b>Desviación estándar</b>	19,045
<b>Varianza de la muestra</b>	362,723
<b>Rango</b>	115,736
<b>Mínimo</b>	321,489
<b>Máximo</b>	437,225

- Variación del  $c_p$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ], tomando el valor promedio de la diferencia de temperatura,  $\Delta T=16.108$  [K], en el cálculo del calor específico.

**Tabla 5.4 Variación del  $c_p$  utilizando  $\Delta T_{prom}$**

<b>Media</b>	339,292
<b>Error típico</b>	12,502
<b>Mediana</b>	351,544
<b>Desviación estándar</b>	77,067
<b>Varianza de la muestra</b>	5939,3395
<b>Rango</b>	328,994
<b>Mínimo</b>	162,185
<b>Máximo</b>	491,179

La desviación para el calor específico es mayor al tomar un promedio del  $\Delta T$ , esto sugiere que la variación de  $Q$  introduce más dispersión en los

valores de calor específico calculados, resultado que también es crítico en el error del  $c_p$  experimental con respecto al teórico.

Así mismo se evalúa la variación del calor  $Q$  en cada experimento a partir de un valor teórico. El  $Q_T$  se calcula con el valor promedio de  $\Delta T=16.108$ , la masa de la lámina  $m=0.007958$  [kg], y el valor teórico de calor específico para el cobre,  $c_{pT}=386$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ] a 33 [ $^{\circ}C$ ]. El  $c_p$  mencionado, es el valor medio en el rango estimado para temperaturas entre 25 y 44 [ $^{\circ}C$ ].

$$Q_T = c_{pT} \cdot \Delta T_{prom} \cdot m \quad [J] \quad 5.4$$

$$Q_T = 49.48 \quad [J]$$

El error relativo a partir de este es:

$$e_{rel} = \frac{Q_T - Q_M}{Q_T} \quad 5.5$$

Donde  $Q_M$ , es el calor calculado de la integración de la curva ajustada para las medidas de flujo de calor, en cada experimento.

El error de cada aproximación, utilizando  $Q$  ó  $\Delta T$  promedio de todos los experimentos, se calcula respecto al calor específico teórico,  $c_{pT}=386$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ], de la siguiente forma:

$$e_{rel} = \frac{c_{pT} - c_{paprox}}{c_{pT}} \quad 5.6$$

De el error obtenido utilizando la ecuación 1.2 y el obtenido con el  $Q$  promedio, el último es menor y esta dentro del rango tolerable para la aplicación, comparado con el error generado con el uso de otros métodos de calorimetría. La variación que presenta es de 6.233 y 16.733%. Con media de 12.57%.

Por último se estudia el efecto del tercer factor en la ecuación del calor específico, la variación de la masa del material.

- Variación de la masa

Al modificar la masa del material de pruebas, lámina de cobre, en una milésima de gramo la variación resultante para el  $c_p$  es:

$$c_p \pm 0.042 \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Por ello es aconsejable medir la masa del material en una balanza de alta precisión. Los datos obtenidos con esta variación, se encuentran en la Tabla III, Anexo A.

Adicionalmente se realizó un conjunto de experimentos para calcular el calor específico del polimetacrilato de metilo, más conocido como acrílico. Los resultados de estas pruebas se encuentran en el Anexo B.

## 6 CONCLUSIONES

Se propuso y desarrolló un método alternativo para calcular indirectamente el calor específico de un sólido homogéneo, a partir de la medición directa y simultánea de temperatura y flujo de calor, variables obtenidas utilizando tarjetas de adquisición diseñadas y construídas en trabajos previos al interior del grupo CEMOS.

El método propuesto fue evaluado comparando los valores experimentales obtenidos con el  $c_p$  del cobre igual a  $386 \text{ [J*kg}^{-1}\text{*K}^{-1}\text{]}$ , calculado para el rango de trabajo entre  $25$  y  $44 \text{ [}^\circ\text{C]}$ , con base en calores específicos a diferentes temperaturas reportados en la literatura.

Se diseñó un experimento con base en la ecuación que relaciona la masa, la variación de temperatura y el calor transferido de un material, para definir su calor específico. El  $\Delta T$  se calcula con los datos de la tarjeta de temperatura y el  $Q$  a partir de los datos de la tarjeta de flujo de calor, adquiridos simultáneamente según lo indica la ecuación del  $c_p$ .

Se diseñó y construyó una caja de pruebas con tres compartimientos para ubicar, los sensores y sus respectivas tarjetas de adquisición, la lámina de cobre y el sistema de calentamiento. Adicionalmente permite aislar este último del resto de la caja de manera que no afecte la medición al influir sobre la velocidad de enfriamiento del material de pruebas.

Los tres primeros métodos analizados presentaron diferentes errores por lo que fueron descartados. El origen de este error es principalmente debido a: la alta velocidad de calentamiento en comparación con el intervalo de temperaturas analizado que impide que la distribución de calor en toda la estructura de la lámina de cobre sea uniforme; la dificultad para reproducir el experimento de manera precisa debido a la manipulación del material de pruebas en el momento de iniciar la medición; la baja confiabilidad de la linealización hecha a los datos a causa del pequeño intervalo de trabajo comparado con el usado en curvas de calentamiento; y la dependencia de la velocidad de enfriamiento con respecto a la temperatura de referencia a la que se toman las pruebas.

El método propuesto constituye un primer acercamiento a la medición del calor específico de un sólido por medio de la medición directa de temperatura y flujo de calor. De esta manera se simplifica el procedimiento propuesto por otros métodos al hacer uso de un sensor de flujo de calor como herramienta para medir el calor aportado por el material de pruebas y un sensor de temperatura para medir el cambio de temperatura producido en el material por esta cantidad de calor.

Para la evaluación del método propuesto se realizaron 38 experimentos siguiendo el protocolo establecido para la medición, variando un factor de la ecuación del  $c_p$  cada vez. Se encontró que el error es afectado en mayor proporción por los valores de  $Q$  calculados. Para contrarrestar este efecto se toma el valor medio de  $Q$  de la muestra experimental, obteniendo un error en el cálculo del calor específico variable entre 6.233% y 16.713%.

El error resultante con el método propuesto es afectado por los siguientes factores: la variabilidad de los datos de flujo de calor, producida por los cambios de temperatura repentinos ocurridos sobre la cara del sensor expuesta al aire; el tiempo en que tarda el sensor de flujo de calor en estabilizarse; y la manipulación humana sobre la medición que genera errores sistemáticos sobre el experimento.

Se creó un software que permite reconocer las tarjetas de adquisición por medio de sus módulos bluetooth, muestra en tiempo real los datos medidos, y los analiza con registros que se han guardado. Los datos también pueden estudiarse utilizando otras herramientas. La aplicación desarrollada también permite modificar parámetros como, el área del sensor de flujo de calor y el intervalo de temperatura de trabajo, para encontrar el  $c_p$  de otro material diferente al cobre.

## **7 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO**

Para que sea posible realizar un análisis más amplio de los datos adquiridos con los prototipos, es necesario ampliar su rango de trabajo, especialmente el utilizado por la tarjeta de adquisición de temperatura. En el caso de esta tarjeta, se puede reconfigurar el amplificador de instrumentación y el filtro para obtener mayor rango de medición, al aplicar métodos como el basado en la curva de calentamiento.

Se recomienda hacer un estudio con materiales de pruebas de diferentes valores de calor específico. Esto con el fin de corroborar si el equipo responde mejor en materiales con conductividad térmica menor a la del cobre, al permitir mayor tiempo para que el sensor de flujo de calor alcance su estabilidad.

Realizar un recalibración de las tarjetas de adquisición de temperatura y flujo de calor.

## REFERENCIAS

- [1]. ALLEN, H.S y MAXWELL, R.S. *A text book of heat*. 1948.
- [2]. AMAYA, Carlos y ARDILA, Rodríguez. *Monitorización en tiempo real de un sistema de calorimetría directa*. Tesis de grado. Bucaramanga: UIS, 2007.
- [3]. CADENA, Oscar y GARCÍA, Guillermo. *Diseño y construcción de un prototipo para la medición de flujo de calor en pacientes en estado post-operatorio mediante calorimetría directa: Método de sensado por flujo de calor*. Tesis de grado. Bucaramanga: UIS, 2006.
- [4]. EDSER, Edwin. *Heat for advanced students*. 1950.
- [5]. HOWELL, Jhon R. BUCKIUS, Richard O. *Principios de Termodinámica para Ingeniería*. 2º edición. 1990.
- [6]. LAURENT, René. *Materiales electrotécnicos modernos*.
- [7]. MILLS, Anthony F. *Transferencia de Calor*. 1997
- [8]. MORENO, Wilfrido. *Aplicaciones al Diseño y Análisis de Experimentos*. Bucaramanga: UIS 1993.
- [9]. ORTIZ, Álvaro y VALDERRAMA, León. *Diseño y construcción de un prototipo para la medición de flujo de calor en pacientes en estado post-operatorio mediante calorimetría directa: Método de variación de temperatura*. Tesis de grado. Bucaramanga: UIS, 2006.
- [10]. SHOMAKER, David P. *Experiments in physical chemistry*. 2º edition.
- [11]. TICINESE, Alberto L. PALENCIA, Alfonso A. *Tecnología de los Materiales Eléctricos*. 1º edición. Buenos Aires: 1945.
- [12]. VAN WYLEN, Gordon. *Fundamentos de termodinámica*. 2º edición 1993.
- [13]. ZEMANSKY, Mark W. *Calor y Termodinámica*. 4ta edición 1961.

## ANEXO A

Tabla I Datos medidos y calculados

# Exp	Tiempo[s]		Flujo de calor [ $W/m^2$ ]		Temperatura [ $^{\circ}C$ ]		Calor [J]	Dif [ $^{\circ}C$ ]
	$t_a$	$t_b$	$q(t_a)$	$q(t_b)$	$T(t_a)$	$T(t_b)$	Q	$\Delta T$
1	18	442	122,241	29,456	42,8	26,6	48,699	16,2
2	11	428	148,387	29,439	43,9	27,4	49,120	16,5
3	9	424	181,669	29,463	43,7	26,7	51,424	17,0
4	12	462	149,165	29,444	43,7	26,9	53,160	16,8
5	14	400	153,400	29,435	43,6	27,8	47,415	15,8
6	14	417	174,537	29,462	43,7	27,5	51,710	16,2
7	15	418	181,308	29,447	43,7	27,5	52,833	16,2
8	14	453	117,369	29,443	43,5	27,5	48,544	16,0
9	9	454	173,781	29,436	43,6	26,8	53,915	16,8
10	5	328	117,311	29,450	43,3	26,5	33,874	16,8
11	11	319	116,776	29,431	42,3	26,4	34,298	15,9
12	7	277	152,833	29,475	43,0	26,7	32,101	16,3
13	7	211	90,135	29,464	41,3	26,2	20,790	15,1
14	4	217	98,980	29,470	39,3	26,8	21,529	12,5
15	8	327	186,078	29,454	43,0	26,9	40,454	16,1
16	7	399	172,316	29,454	43,5	26,5	46,823	17,0
17	5	351	168,782	29,452	42,8	26,6	40,273	16,2
18	6	324	136,661	29,457	42,6	27,1	35,447	15,5
19	5	302	169,803	29,460	43,6	27,5	35,121	16,1
20	4	265	115,526	29,466	43,4	26,9	27,241	16,5
21	7	401	133,072	29,450	43,6	26,6	43,343	17,0
22	8	386	151,917	29,430	43,4	27,0	43,986	16,4
23	10	314	155,917	29,459	42,7	27,1	37,222	15,6
24	10	489	186,427	29,441	43,7	27,1	59,620	16,6
25	8	322	128,232	29,447	43,2	27,4	35,126	15,8
26	10	301	112,495	29,448	43,0	27,2	31,909	15,8
27	59	481	110,593	29,431	43,9	26,9	51,687	17,0
28	84	444	110,687	29,477	43,8	28,3	46,141	15,5
29	96	417	105,599	29,480	43,6	27,7	41,054	15,9
30	86	441	80,687	29,447	43,7	27,8	39,432	15,9
31	183	658	79,855	29,437	43,9	27,0	54,004	16,9
32	117	714	73,826	29,445	43,7	27,2	62,963	16,5
33	66	472	117,127	29,452	43,9	27,6	51,720	16,3
34	78	534	95,166	29,459	43,3	27,5	53,199	15,8
35	103	483	117,839	29,468	43,7	27,8	50,830	15,9
36	33	400	133,070	29,448	43,2	27,4	46,702	15,8
37	693	1017	87,429	29,458	43,7	28,0	41,706	15,7
38	293	608	79,276	29,449	43,7	27,5	37,323	16,2

Tabla II Calor específico de  $Q_{prom}$  y de  $\Delta T_{prom}$ 

# Exp	Calor [J] Q	Dif [°C] $\Delta T$	$C_p(Q_p)$ [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	% error <sub>t</sub>	$C_p(\Delta T_p)$ [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	% error <sub>t</sub>
1	48,699	16,2	337,365	12,600	380,090	1,531
2	49,120	16,5	331,231	14,189	383,379	0,679
3	51,424	17,0	321,489	16,713	401,362	3,980
4	53,160	16,8	325,317	15,721	414,910	7,490
5	47,415	15,8	345,906	10,387	370,071	4,127
6	51,710	16,2	337,365	12,600	403,591	4,557
7	52,833	16,2	337,365	12,600	412,358	6,828
8	48,544	16,0	341,582	11,507	378,882	1,844
9	53,915	16,8	325,317	15,721	420,806	9,017
10	33,874	16,8	325,317	15,721	264,382	31,507
11	34,298	15,9	343,731	10,951	267,692	30,650
12	32,101	16,3	335,296	13,136	250,544	35,092
13	20,790	15,1	361,942	6,233	162,266	57,962
14	21,529	12,5	437,225	13,271	168,034	56,468
15	40,454	16,1	339,461	12,057	315,742	18,202
16	46,823	17,0	321,489	16,713	365,453	5,323
17	40,273	16,2	337,365	12,600	314,327	18,568
18	35,447	15,5	352,601	8,653	276,662	28,326
19	35,121	16,1	339,461	12,057	274,115	28,986
20	27,241	16,5	331,231	14,189	212,618	44,918
21	43,343	17,0	321,489	16,713	338,291	12,360
22	43,986	16,4	333,251	13,666	343,309	11,060
23	37,222	15,6	350,341	9,238	290,516	24,737
24	59,620	16,6	329,236	14,706	465,334	20,553
25	35,126	15,8	345,906	10,387	274,155	28,975
26	31,909	15,8	345,906	10,387	249,047	35,480
27	51,687	17,0	321,489	16,713	403,413	4,511
28	46,141	15,5	352,601	8,653	360,128	6,703
29	41,054	15,9	343,731	10,951	320,423	16,989
30	39,432	15,9	343,731	10,951	307,766	20,268
31	54,004	16,9	323,392	16,220	421,502	9,197
32	62,963	16,5	331,231	14,189	491,423	27,312
33	51,720	16,3	335,296	13,136	403,670	4,578
34	53,199	15,8	345,906	10,387	415,216	7,569
35	50,830	15,9	343,731	10,951	396,723	2,778
36	46,702	15,8	345,906	10,387	364,504	5,569
37	41,706	15,7	348,109	9,816	325,510	15,671
38	37,323	16,2	337,365	12,600	291,308	24,532

Tabla V Calor específico sin y con variación de la masa

#EXP	Calor [J] Q	Dif [°C] $\Delta T$	$C_p$ [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	% error <sub>t</sub>	$C_p$ [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] $C_p(x+m)$	% error <sub>t</sub>	dif(cp)
1	48,699	16,2	377,743	2,139	377,696	2,151	0,047
2	49,120	16,5	374,085	3,087	374,038	3,099	0,047
3	51,424	17,0	380,114	1,525	380,066	1,537	0,048
4	53,160	16,8	397,622	3,011	397,572	2,998	0,050
5	47,415	15,8	377,097	2,306	377,050	2,319	0,047
6	51,710	16,2	401,100	3,912	401,050	3,899	0,050
7	52,833	16,2	409,812	6,169	409,761	6,156	0,051
8	48,544	16,0	381,250	1,231	381,202	1,243	0,048
9	53,915	16,8	403,272	4,475	403,222	4,462	0,051
10	33,874	16,8	253,366	34,361	253,335	34,369	0,032
11	34,298	15,9	271,059	29,777	271,025	29,786	0,034
12	32,101	16,3	247,470	35,889	247,439	35,897	0,031
13	20,790	15,1	173,012	55,178	172,990	55,184	0,022
14	21,529	12,5	216,427	43,931	216,400	43,938	0,027
15	40,454	16,1	315,742	18,202	315,702	18,212	0,040
16	46,823	17,0	346,106	10,335	346,062	10,347	0,043
17	40,273	16,2	312,387	19,071	312,348	19,081	0,039
18	35,447	15,5	287,372	25,551	287,336	25,561	0,036
19	35,121	16,1	274,115	28,986	274,080	28,995	0,034
20	27,241	16,5	207,464	46,253	207,437	46,260	0,026
21	43,343	17,0	320,381	17,000	320,341	17,010	0,040
22	43,986	16,4	337,029	12,687	336,986	12,698	0,042
23	37,222	15,6	299,827	22,325	299,790	22,334	0,038
24	59,620	16,6	451,318	16,922	451,261	16,907	0,057
25	35,126	15,8	279,360	27,627	279,325	27,636	0,035
26	31,909	15,8	253,776	34,255	253,744	34,263	0,032
27	51,687	17,0	382,056	1,022	382,008	1,034	0,048
28	46,141	15,5	374,069	3,091	374,022	3,103	0,047
29	41,054	15,9	324,454	15,945	324,413	15,955	0,041
30	39,432	15,9	311,638	19,265	311,598	19,275	0,039
31	54,004	16,9	401,549	4,028	401,499	4,015	0,050
32	62,963	16,5	479,510	24,225	479,450	24,210	0,060
33	51,720	16,3	398,717	3,294	398,667	3,281	0,050
34	53,199	15,8	423,100	9,611	423,047	9,598	0,053
35	50,830	15,9	401,713	4,071	401,663	4,058	0,050
36	46,702	15,8	371,425	3,776	371,379	3,788	0,047
37	41,706	15,7	333,804	13,522	333,762	13,533	0,042
38	37,323	16,2	289,510	24,998	289,473	25,007	0,036

## ANEXO B

En esta sección se presentan los resultados de un conjunto de experimentos realizados para la medición del calor específico en el polimetacrilato de metilo, más conocido como acrílico. El PMMA es un termoplástico amorfo, transparente e incoloro, duro, rígido pero quebradizo y sensible a la entalla. Tiene una buena resistencia a la abrasión y a los rayos UV, una excelente claridad pero una resistencia débil a las temperaturas.

En la Tabla I se muestra algunas propiedades térmicas del polimetacrilato de metilo.

Tabla IV Algunas propiedades térmicas del PMMA

Propiedades Térmicas	
Calor Específico	1400-1500 [J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> ]
Coefficiente de Expansión Térmica	70-77 10 <sup>-6</sup> [K <sup>-1</sup> ]
Conductividad Térmica a 23 [°C]	0,17-0,19 [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Temperatura Máxima de Utilización	50 a 90 [°C]
Temperatura Mínima de Utilización	-40 [°C]
Temperatura de Deflección en Caliente	105 [°C] a -0.45MPa
Temperatura de Deflección en Frío	95 [°C] a -1.8MPa

Como se observa en la tabla anterior el calor específico del acrílico varía entre 1400 y 1500 [J K<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>], esto indica que se necesita suministrar esta medida en calor para incrementar la temperatura del material en un grado, es decir, se necesita 3.6 veces más calor que el utilizado para el cobre. Para realizar las pruebas se utilizó una lamina de acrílico, cuya masa es  $m=0.007519$  [kg].



Figura 0.1 Masa de la lámina de polimetacrilato de metilo

Los experimentos realizados se desarrollaron de la misma forma que la utilizada en las pruebas del cobre, teniendo en cuenta el protocolo de medición y con las mismas consideraciones para cada prueba.

De los tres experimentos realizados se obtuvo:

**Tabla VI Datos medidos y calculados**

#EXP	ta	tb	Flujo(ta)	Flujo(tb)	T(ta)	T(tb)
1	20,000	905,000	236,516	29,440	43,900	25,700
2	19,000	781,000	142,081	29,446	43,600	25,800
3	61,000	737,000	129,625	29,434	42,800	26,500
			<b>Q</b>	<b>DeltaT</b>	<b>Cp</b>	<b>%Error</b>
			120,820	18,200	882,894	36,936
			88,023	17,800	657,683	53,023
			85,090	16,300	694,276	50,409

En la tabla se observa que el error obtenido oscila entre 36.9 y 53.02%.