

T  
620  
R84

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA PERUANA**  
**FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**  
**Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias**



**TESIS:**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO  
PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE  
ALIMENTOS SÓLIDOS Y PASTOSOS”**

**TRABAJO FINAL DE CARRERA PARA OPTAR EL TÍTULO  
PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**PRESENTADO POR LOS BACHILLERES:**

**ROSEMBER RAMOS PEREIRA  
ÁNGEL LUIS PAIMA AMASIFUEN**

**ASESORES:**

**ING MSc. ROGER RUIZ PAREDES  
ING. JORGE LUIS CARRANZA GONZALES**

REGISTRO N°  
283  
FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

**IQUITOS – PERU**

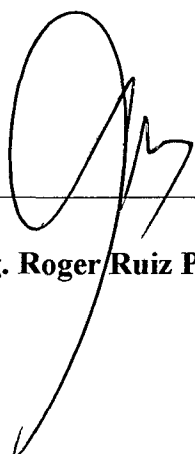
**2013**

## AUTORIZACION DE LOS ASESORES

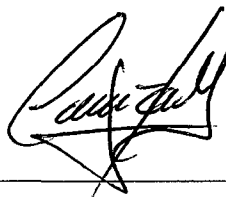
Yo, Roger Ruiz Paredes, Docente Principal del Departamento de Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana y Jorge Luis Carranza Gonzales, Docente Auxiliar del Departamento de Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana:

**INFORMAMOS:** Que los Bachilleres Rosember Ramos Pereira y Angel Luis Paima Amasifuen han trabajado bajo nuestra dirección en el proyecto contenido en la tesis titulada “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALIMENTOS SÓLIDOS Y PASTOSOS**”, y considerando que el mismo reúne los requisitos necesarios para ser presentado ante el jurado calificador, a tal efecto para la obtención del título del Ingeniero en Industrias Alimentarias.

**AUTORIZAMOS:** A los Bachilleres Bachilleres Rosember Ramos Pereira y Angel Luis Paima Amasifuen a presentar el Trabajo Final de Carrera para proceder a su sustentación cumpliendo así con la normativa vigente que regula los Grados y Titulos de la Facultad de Industrias Alimentarias en la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias.



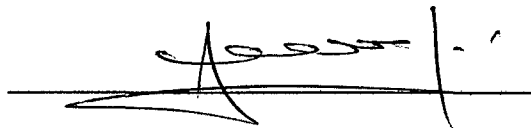
Ing. Roger Ruiz Paredes



Ing. Jorge Luis Carranza Gonzales

## MIEMBROS DEL JURADO

Estando el Jurado Calificador conformado por los siguientes miembros:

A handwritten signature in black ink, consisting of a series of loops and a vertical stroke, positioned above a horizontal line.

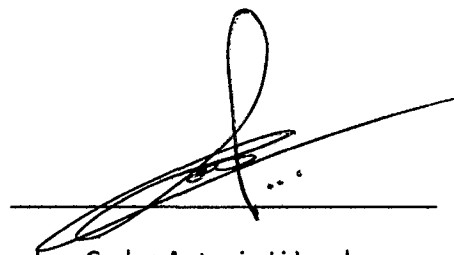
Ing. Alenguer Gerónimo Alva Arévalo

Presidente

A handwritten signature in black ink, featuring a large circular loop and several smaller strokes, positioned above a horizontal line.

Ing. Jorge Augusto Torres Luperdi

Miembro Titular

A handwritten signature in black ink, with a prominent vertical loop and a long horizontal stroke extending to the right, positioned above a horizontal line.

Ing. Carlos Antonio Li Loo kung

Miembro Titular

## DEDICATORIA

Doy gracias A Dios porque cada día estuvo y está conmigo, siendo el guía principal en mis decisiones y por ser eterna su misericordia.

A la señora Zonia Lidia Figueroa Veliz, que en todo momento estuvo a mi lado, apoyándome, brindándome su amor y confianza y el aliento a la culminación de mi profesión.

A mis padres Tercero Daniel y Elena y hermanos Clarita Augusto, Amado, Linder y Alejandro, por sus abnegado aliento de fuerza para concretar mis metas.

A mi esposa Karina Vanessa arce Figueroa, por brindarme su apoyo incondicional durante mi vida estudiantil, y a la realización de este trabajo.

A mis ángeles de la guardia, mi querido Luis Daniel , Zoe Helen y Sandro, que son la luz de mis ojos, por toda su paciencia y cariño.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco infinitamente a mis padres, a mi esposa a la señora Zonia y a mis adorados hijos por su invaluable temura en todo momento.

A mis queridos amigos de siempre Jorge Luis Carranza G. y Roger Ruiz P., por haber dado muestras de deseo de superación profesional y también en el aspecto humano.

Me faltarían palabras de agradecimiento a todos los docentes responsables de mi formación académica sin excepción alguna.

Un agradecimiento invaluable a la mujer que hizo posible que terminara esta tarea iniciada que es la persona de mi querida y adora hermana **CLARITA ISABEL PAIMA AMASIFUEN**.

## DEDICATORIA

A ti Dios Padre, por fortalecerme y guiar siempre mi camino, cuando había momentos en el cual me sentía abatido y desorientado, y por haberme premiado con unos padres maravillosos de los cuales me siento orgulloso.

A mis queridos padres, Jorge Ramos Castillo y Gladys Pereira Pacaya, por inculcarme buenos valores, y haberme apoyado incondicionalmente durante toda mi formación, tanto personal como profesional. Enseñarme el verdadero significado de una familia unida.

A mi abuelita Beatriz por seguir orientándonos en nuestro camino, mi abuelito Juan y mi tío José que velan por nosotros desde el cielo.

A mi esposa Dorila, mis hijos Kisa, Jorge y Dulce, por su amor y paciencia.

A mis hermanos: Cynthia, Serjo, Neco, Larry, Franco, Vennor y Jorge por brindarme su cariño y comprensión durante mi formación.

## AGRADECIMIENTO

Sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que permitieron que pudiera terminar el presente trabajo de investigación, son muchas, nombrare a los principales gestores:

Agradezco infinitamente a mis padres, a mi esposa y mis adorados hijos por su invaluable ternura en todo momento.

A mis asesores: Jorge Luis Carranza G. y Roger Ruiz P., por haberme dado muestras de deseo de superación profesional y también en el aspecto humano.

A todos aquellos dignos docentes, que impartieron sus conocimientos sin egoísmo ni mediocridad, durante mi formación profesional.

A todos mis compañeros de aula, que tuve el gusto de conocer, gracias por el apoyo que me brindaron en mi preparación universitaria.

A todos mis amigos Carlos Alberto, Albert, Delmer, y a los profesores Luis Arteaga y Wilder Paredes por el apoyo que siempre me han brindado.

Un agradecimiento invaluable a todos mi tía Yolanda y a mis primos:, Jany, Tessy,. Sandro y a mis demás familiares que me brindaron su cariño y estima en cada momento.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b>	i
<b>RESUMEN</b>	iv
<b>INTRODUCCIÓN</b>	v
<b>ANTECEDENTES</b>	viii
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	x

### CAPÍTULO I

<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	<b>1</b>
1.1. Propiedades de los alimentos involucradas en el presente trabajo	1
1.1.1. Temperatura	1
1.1.2. Conductividad térmica	2
1.1.3. Coeficiente convectivo de transferencia de calor	2
1.2. Ecuación general de balance de energía	3
1.3. Mecanismos básicos de la transferencia de calor	6
1.3.1. Conducción	6
1.3.2. Convección	7
1.3.3. Radiación	8
1.4. Ley de Fourier para la conducción de calor	8
1.4.1. Transferencia de calor por conducción en un sólido de sección transversal constante	9
1.4.2. Combinación de conducción y convección de calor en paredes compuestas por discos con flujo de calor transversal a las áreas circulares	10
1.4.3. Resistencias térmicas	12

### CAPÍTULO II

<b>DISEÑO DEL EQUIPO</b>	<b>14</b>
2.1. Descripción del diseño del equipo	14
2.2. Aplicación de la ecuación general de balance de energía y los mecanismos de transferencia de calor al equipo	16



2.3.	Parámetros más importantes del experimento a llevarse a cabo en el equipo	23
2.3.1.	Potencia efectiva de la resistencia eléctrica	23
2.3.2.	Conductividad térmica del acero inoxidable	24
2.3.3.	Flujo de calor a través del alimento	24
2.3.4.	Espesor del acero inoxidable	24
2.3.5.	Área del alimento transversal al flujo de calor	24
2.3.6.	Área de las caras no aisladas	24
2.4.	VARIABLES MÁS IMPORTANTES DEL EXPERIMENTO A LLEVARSE A CABO EN EL EQUIPO	25
2.4.1.	Espesor del alimento	25
2.4.2.	Temperatura fijada en el termostato	25
2.4.3.	Temperatura de la superficie superior del alimento	25
2.4.4.	Conductividad térmica del alimento	25
2.5.	Algoritmo para el cálculo de la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos	25
2.6.	Parámetros más importantes para el diseño y construcción del equipo	27
2.7.	Condiciones iniciales a considerarse en el diseño	32
2.8.	Cálculos de diseño y construcción	32

### **CAPÍTULO III**

<b>CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO</b>	<b>35</b>	
3.1.	Materiales empleados	35
3.2.	Especificación de los componentes principales del equipo	35
3.2.1.	Paralelepípedo	35
3.2.2.	Pared aislada	36
3.2.3.	Tapa aislada	36
3.2.4.	Componentes eléctricos	37
3.2.5.	Pirómetro de radiación	37
3.3.	Despiece del equipo	38
3.4.	Diagrama de instalación eléctrica	39

<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO</b>	<b>40</b>
4.1. Descripción del funcionamiento del equipo	40
4.2. Instrucciones para el cálculo de las variables de operación del equipo	41
4.3. Ensayos y pruebas de funcionamiento del equipo	45
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>ANÁLISIS DE COSTO</b>	<b>54</b>
5.1. Costo de diseño	54
5.2. Costo de construcción e instalación	54
5.3. Costo de materiales	55
5.4. Otros costos	55
5.5. Costo total	55
<b>CAPÍTULO VI</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>56</b>
6.1. Conclusiones	56
6.2. Recomendaciones	57
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>58</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>60</b>
ANEXO 1: Cálculos realizados	61
ANEXO 2: Vista completa del equipo	69
ANEXO 3: Vista del enchufe bipolar	70
ANEXO 4: Vistas de la resistencia eléctrica y el vástago del termostato	71
ANEXO 5: Vista del led, termostato, llave térmica y las portadoras de muestras	72
ANEXO 6: Realizando la medida de la temperatura superficial	73

## RESUMEN

El presente trabajo fue realizado en la Planta Piloto de Alimentos específicamente en el Laboratorio de Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias - UNAP.

El equipo empleado tiene la forma de un paralelepípedo de acero inoxidable con medidas de 50 cm × 55 cm × 55 cm construido para realizar las pruebas y determinar la conductividad térmica de varios alimentos. Este tiene una temperatura de funcionamiento de 50°C a 350 °C, la temperatura es registrada por un sensor al interior del equipo conectado aun termostato y así asegurarnos que esta no varíe y se mantenga constante durante las pruebas realizadas en la investigación.

Se emplearon diferentes materias primas para la determinación de sus conductividades térmicas como: para la azúcar blanca en un rango de temperatura de 48.44 a 55.34°C con un espesor de muestra de 3 mm la conductividad térmica fue de 0.151 a 0.380 W/m°C y en un rango de temperatura de 47.44 a 52. 49 °C con un espesor de muestra 5 mm la conductividad térmica fue de 0.231a 0.389 W/m°C , colado de plátano en un rango de temperatura de 49.34 a 49.84°C con un espesor de muestra de 3 mm la conductividad térmica fue de 0.164a 0.172 W/m°C y en un rango de temperatura de 52.54 a 53.99°C con un espesor de muestra de 5 mm la conductividad térmica fue de 0.166 a 0.181 W/m°C , jamonada de cerdo en un rango de temperatura de 48.24 a 49.64°C con un espesor de muestra de 3 mm la conductividad térmica fue de 0.148 a 0.169 W/m°C y en un rango de temperatura de 52.04 a 54.29°C con un espesor de muestra de 5 mm la conductividad térmica fue de 0.161 a 0.184 W/m°C , adicionalmente se realizó una prueba con esencia de vainilla en un rango de temperatura de 45.74 a 48.93°C para un espesor de muestra de 3 mm obteniéndose la conductividad térmica de 0.136 a 0.175 W/m°C.

Los resultados que presentan los experimentos de estas cuatro materias primas coinciden con la teoría consultada de que la conductividad térmica aumenta a medida que se incrementa la temperatura.

## INTRODUCCIÓN

Muchas veces cuando se tiene que realizar principalmente cálculos sobre transferencia de calor como por ejemplo, determinar la cantidad de calor que se requiere para calentar un alimento sólido o pastoso desde una temperatura inicial hasta una temperatura final, es muy necesario para esto conocer la conductividad térmica de dicho alimento, pues de acuerdo a la ley de Fourier este calor dependerá en gran medida del área de contacto y de la conductividad térmica del alimento, Geankoplis (1998) y Holman (1999).

En la presente investigación se ha realizado el “Diseño, construcción e instalación de un equipo para medir la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos”, para esto se hizo una revisión específica de los mecanismos básicos de la transferencia de calor y mediante la cual se determinó los parámetros y variables para el diseño, construcción y operación a llevarse a cabo en el equipo.

Cabe aclarar que una variable de diseño y construcción, es aquella que está directamente relacionada con las dimensiones del equipo, teniéndose en cuenta el proceso u operación a llevarse a cabo en el equipo. Por otro lado una variable de operación es aquella que solo interviene o se mide cuando se realiza un experimento en el equipo, teniéndose en cuenta que los parámetros de diseño y construcción en ese momento son considerados como constantes.

El equipo tiene la forma de un paralelepípedo de acero inoxidable, con dos de sus caras aisladas, una donde se colocó los controles del equipo y la otra en donde se pondrá el alimento del cual se desea determinar su conductividad térmica.

Para generar el calor, el equipo cuenta con una resistencia eléctrica la cual está en el interior del paralelepípedo, de esta manera el aire que está en el interior del paralelepípedo tiende a tener una temperatura uniforme, la dirección del flujo de calor será transversal a las áreas de las paredes interiores del paralelepípedo y al área circular ocupada por el alimento.

El hecho de tener una resistencia eléctrica como fuente de calentamiento, permite conocer con bastante exactitud cuánto es el flujo de calor que se distribuye a través de las áreas de las paredes interiores del paralelepípedo y a través del área circular ocupada por el alimento. En esto se hace aplicación directa de los mecanismos básicos de la transferencia de calor.

Adicionalmente, el equipo posee un termostato con un led indicador para fijar la temperatura que tendrá el aire interior y saber en qué momento el aire interior llegará a la temperatura fijada.

De esta forma se idealiza el experimento a llevarse a cabo en el equipo, siendo necesario conocer las formas de energía que intervienen en el proceso de calentamiento para aplicar la ecuación general de balance de energía y los mecanismos básicos de la transferencia de calor, obteniendo las ecuaciones que relacionan a los parámetros y variables que intervienen en el experimento que se lleva a cabo en el equipo y deduciendo de este modo una ecuación que permita calcular la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos.

La temperatura superficial del alimento se mide haciendo uso de un termómetro infrarrojo o pirómetro de radiación, para esto simplemente se dirige el puntero infrarrojo del termómetro sobre el área circular ocupada por el alimento.

A manera de realizar los cálculos en forma rápida en cada experimento, se ha elaborado hojas de cálculo en Excel donde se programan las ecuaciones que se deducen mediante la aplicación de la ecuación general de balance de energía y los mecanismos básicos de la transferencia de calor. Mediante estas hojas de cálculo también se puede realizar simulaciones para determinar el perfil de temperatura a través del espesor del alimento.

Al concluir la presente investigación, se logra cumplir los siguientes objetivos:

- Diseñar, construir e instalar un equipo para medir la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos.
- Aplicar la ecuación general de energía y los mecanismos básicos de la transferencia de calor para deducir una ecuación que permita calcular la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos.
- Determinar los parámetros y variables involucradas en el experimento a llevarse a cabo en el equipo.
- Determinar las variables de diseño y construcción del equipo.

## ANTECEDENTES

De acuerdo a la revisión bibliográfica efectuada, existen varios trabajos de investigación que involucran diseño y construcción de equipos, pero específicamente los trabajos similares al que se pretende realizar son:

- Martina *et al* (2004), en el Departamento de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste de la República de Argentina, han realizado un trabajo sobre “Determinación de la conductividad térmica del algarrobo para distintos contenidos de humedad, mediante un equipo de placa caliente”.
- Ochoa, Amézquita y Chejne (2005), en el Instituto de Energía de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín Colombia, han realizado un trabajo de “Recopilación de las publicaciones sobre los métodos utilizados para medir las propiedades termo-físicas de la carne”.
- Cortés y Méndez (2006), en el Laboratorio de propiedades termo-físicas del Centro Nacional de Metrología (CENAM) de la ciudad de Querétaro en México, han realizado un trabajo titulado: “Evaluación de la transferencia de calor radial por el espacio anular de la placa caliente de un aparato para medir conductividad térmica”.
- Bardales, Ruiz, Trigoso (2008), en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Iquitos-Perú, han realizado un trabajo de tesis sobre “Diseño, construcción e instalación de un equipo para medir la conductividad térmica de materiales sólidos”.
- Domínguez (2010), en el Instituto del Frío CSIC de la ciudad de Madrid en España, ha realizado un trabajo sobre “Medida simultánea de propiedades térmicas: conductividad, calor específico y calor latente”.

- Giraldo *et al* (2010), en la Universidad de Campiñas, Saó Paulo Brasil, han realizado un trabajo sobre “Propiedades termo-físicas del jugo concentrado de lulo a temperaturas por encima del punto de congelación”.



## JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la Facultad de Industrias Alimentarias (FIA) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), no cuenta con un equipo en el que se pueda medir la conductividad térmica de alimentos sólidos o pastosos. Debido a que el futuro profesional en industrias alimentarias debe estar en la capacidad de diseñar con bastante criterio equipos como marmitas, evaporadores, secadores y esterilizadores, que al ser puestos en operación permitan optimizar procesos de calentamiento o de transferencia de calor, requiere tener conocimiento de los balances de energía y los mecanismos básicos de la transferencia de calor, como resultado de la aplicación de estos conocimientos se obtienen modelos matemáticos. Pero, en el proceso de diseño, el profesional en industrias alimentarias necesita conocer la magnitud de ciertas variables que se relacionan mediante los modelos matemáticos obtenidos y que gobiernan los procesos de transferencia de calor, siendo quizás las más importantes: el flujo másico, el área de transferencia de calor, la conductividad térmica, la temperatura y el coeficiente de convección. Esto permite realizar simulaciones antes de construirse un equipo y tener una idea bien clara de cómo funcionará al ponerse en operación. Teniendo en cuenta este enfoque, es que en el presente trabajo de tesis se planteó el diseño y construcción del mencionado equipo. En el desarrollo del trabajo final de carrera, se describe en forma muy detallada todos los criterios que se ha tenido en cuenta para el diseño y construcción del equipo, además se puede observar en detalle la deducción de las ecuaciones que relacionan a los parámetros y variables más importantes del experimento a llevarse a cabo en el equipo, esto da una idea muy clara de cómo se puede aplicar los conocimientos teóricos para diseñar y construir equipos, sirviendo de referencia a los futuros profesionales en industrias alimentarias para diseñar y construir equipos semejantes.

El equipo podrá ser utilizado para realizar prácticas de laboratorio en el curso de transferencia de calor y también para realizar investigación tecnológica en lo relacionado a propiedades termo-físicas de alimentos. De esta forma se está contribuyendo a la implementación del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Industrias Alimentarias y a la formación académica del futuro profesional en industrias alimentarias.

# CAPÍTULO I

## REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.1. PROPIEDADES DE ALIMENTOS INVOLUCRADAS EN EL PRESENTE TRABAJO

#### 1.1.1. TEMPERATURA

Existen dos unidades comunes en la industria química y biológica. Ellas son grados Fahrenheit (°F) y Celsius (°C). Es muy frecuente obtener valores equivalentes de una escala a la otra. Ambas usan el punto de congelación y el punto de ebullición del agua a 1 atmósfera de presión como patrones, Bardales, Ruiz y Trigos (2008).

La diferencia entre el punto de ebullición del agua y el punto de fusión del hielo a 1atm es 100°C o 180°F. Por lo tanto, un cambio de 1.8°F es igual a un cambio de 1°C. En general, el valor de -273.15°C se redondea a -273.2°C y el de -459.7°F a -460°F. Para convertir de una escala a otra pueden usarse las siguientes ecuaciones:

$$T(^{\circ}\text{F}) = 32 + 1.8T(^{\circ}\text{C}) \quad (1.1)$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1}{1.8} [T(^{\circ}\text{F}) - 32] \quad (1.2)$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 460 \quad (1.3)$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (1.4)$$

### 1.1.2. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Los fundamentos de la conducción de calor se establecieron hace más de un siglo y se atribuyen generalmente a la ley de Fourier. En muchos sistemas que involucran flujo, tal como flujo de calor, flujo de fluido o flujo de electrones se ha observado que la cantidad que fluye es directamente proporcional a la fuerza impulsora e inversamente proporcional a la resistencia que se aplica al sistema, o flujo  $\propto \frac{\text{potencial}}{\text{resistencia}}$ , Bardales, Ruiz y Trigoso (2008).

En un circuito hidráulico simple, la presión en el sistema es la diferencia de potencial, y la rugosidad de la tubería es la resistencia al flujo. En un circuito eléctrico las aplicaciones más simples son expresadas en la ley de OHM: el voltaje en el circuito es el potencial y la dificultad con la que los electrones emigran por el alambre, es la resistencia. En el flujo de calor a través de una pared, el flujo se lleva a efecto por la diferencia de temperatura entre las superficies calientes y frías, en este caso la temperatura es el potencial y la conductancia es la recíproca de la resistencia al flujo de calor.

Por lo tanto se puede decir que cuanto mayor sea la conductividad térmica, mayor será la transferencia de calor. Para el presente trabajo se considera la conductividad térmica ( $k$ ) como constante, la cual puede expresarse en las siguientes unidades :  $\frac{W}{m^{\circ}C}$  ,  $\frac{W}{m K}$  ,  $\frac{Btu}{h pie^{\circ}F}$  , etc.

### 1.1.3. COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Cuando el fluido que rodea la superficie de un sólido tiene un movimiento convectivo natural o forzado, la velocidad de transferencia de calor del sólido al fluido (o viceversa) es directamente proporcional al coeficiente convectivo de transferencia de calor. Esto indica que el coeficiente convectivo es inversa mente proporcional a la resistencia al flujo de calor.

La nomenclatura del coeficiente convectivo de transferencia de calor es ( $h$ ) y sus unidades son:  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ,  $\frac{W}{m^2 K}$ ,  $\frac{Btu}{h \text{ pie}^2 \cdot ^\circ F}$ , etc.

La evaluación del coeficiente de transferencia de calor por convección es difícil debido a que la convección es una función complicada del flujo de fluidos, de las propiedades térmicas del fluido y a si mismo depende de la geometría del sistema. Su valor numérico no es uniforme sino depende del lugar donde se mida la temperatura del fluido, Bardales, Ruiz y Trigoso (2008).

Cabe aclarar que la conductividad térmica aparecerá en la ecuación de transferencia de calor, cuando la transferencia de calor se dé entre sólidos. Para el caso del coeficiente convectivo de transferencia de calor, este aparecerá cuando la transferencia de calor se dé, de un sólido hacia un fluido o viceversa. Lo que se acaba de mencionar se explicará con mayor profundidad en la sección 1.3.

## 1.2. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE ENERGÍA

Un sistema se conoce como abierto o cerrado según haya o no haya masa que atraviese los límites del sistema durante el periodo de tiempo que cubre el balance de energía, Felder, Rousseau (2005).

Un sistema intermitente resulta, por definición, cerrado, mientras que los sistemas continuos o semi-continuos son abiertos. Es posible obtener una ecuación de balance integral de energía para un sistema cerrado entre dos instantes de tiempo. Dado que la energía no puede crearse ni destruirse, los términos de generación y consumo desaparecen, quedando.

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} \quad (1.5)$$

En la ecuación integral de balance de masa para sistemas cerrados se eliminan los términos de entrada y salida, ya que por definición no hay masa que atraviese los límites de un sistema cerrado. Es posible sin embargo, que la energía se transfiera a través de los límites como calor o trabajo, de manera que los términos de la derecha de la igualdad en la ecuación (1.5) no pueden eliminarse automáticamente, tal como sucede con los balances de masa, sin embargo en la ecuación (1.5), los términos de acumulación resultan iguales al valor final de la cantidad balanceada (en este caso, la energía del sistema) menos el valor inicial de esa cantidad. En consecuencia, la ecuación (1.5) puede expresarse como:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{final del} \\ \text{sistema} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{inicial del} \\ \text{sistema} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Energía neta transferida} \\ \text{al sistema (entrada - salida)} \end{array} \right] \quad (1.6)$$

Donde:

$$\text{Energía inicial del sistema} = U_i + E_{k_i} + E_{p_i}$$

$$\text{Energía final del sistema} = U_f + E_{k_f} + E_{p_f}$$

$$\text{Energía neta transferida} = Q + W$$

Donde los subíndices  $i$  y  $f$  se refieren a los estados inicial y final del sistema. Los términos  $U$ ,  $E_k$ ,  $E_p$ ,  $W$  y  $Q$  representan la energía interna, energía cinética, energía potencial, trabajo (efectuado sobre el sistema – efectuado por el sistema) y calor (transferido al sistema – disipado por el sistema), respectivamente. Entonces, la ecuación (1.6) queda:

$$(U_f - U_i) + (E_{k_f} - E_{k_i}) + (E_{p_f} - E_{p_i}) = Q + W \quad (1.7)$$

Como puede darse cuenta la ecuación (1.7) es la forma básica de la primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado. Cuando se aplica esta ecuación a un sistema cerrado, deberán tenerse en cuenta las siguientes características.

1. La energía interna de un sistema depende casi por completo de la composición química, estado de agregación y temperatura de los materiales del sistema: por lo tanto, al no producirse cambios en la temperatura y si todos los materiales del proceso son todos ya sea sólidos, líquidos o gases ideales, entonces  $\Delta U \approx 0$
2. Si un sistema y sus alrededores se encuentran a la misma temperatura (o si el sistema se encuentra perfectamente aislado), entonces  $Q = 0$ . El sistema se denomina adiabático.
3. El trabajo sobre o por un sistema cerrado se logra por desplazamiento de sus fronteras contra una fuerza de resistencia, o por la generación de una corriente eléctrica o radiante que atraviese los límites del sistema (ejemplos del primer tipo de trabajo son el movimiento de un pistón o la rotación de un eje que atraviesa los límites del sistema).

Realizando un balance de energía en el sistema para un intervalo de tiempo que abarca de  $t$  hasta  $t + \Delta t$ , suponiendo que todos los términos de la ecuación (1.7) dependen del tiempo.

$$[U(t + \Delta t) - U(t)] + [E_k(t + \Delta t) - E_k(t)] + [E_p(t + \Delta t) - E_p(t)] = (\dot{Q} + \dot{W})\Delta t \quad (1.8)$$

Donde:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} : \text{Rapidez con la que se transfiere calor (Watts)}$$

$$\dot{W} = \frac{dW}{dt} : \text{Rapidez con la que se realiza trabajo (Watts)}$$

Dividiendo todo entre  $\Delta t$  y evaluando el límite para cuando  $\Delta t \rightarrow 0$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[U(t + \Delta t) - U(t)] + [E_k(t + \Delta t) - E_k(t)] + [E_p(t + \Delta t) - E_p(t)]}{\Delta t} = \dot{Q} + \dot{W}$$

Aplicando el principio de la primera derivada  $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} = \frac{df(x)}{dx}$  se

obtiene:

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dE_k}{dt} + \frac{dE_p}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (1.9)$$

Note que la unidad de los términos  $U$ ,  $E_k$ ,  $E_p$ ,  $W$  y  $Q$  es el Joule (J). Si los términos  $\frac{dE_k}{dt}$ ,  $\frac{dE_p}{dt}$  y  $\dot{W}$ , son cero, entonces la ecuación (1.9) queda simplificada como se muestra a continuación:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} \quad (1.10)$$

### 1.3. MECANISMOS BÁSICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor puede verificarse por medio de uno o más de los tres mecanismos de transferencia: conducción, convección y radiación.

#### 1.3.1. CONDUCCIÓN

Por este mecanismo, el calor puede ser conducido a través de sólidos, líquidos y gases. La conducción se verifica mediante la transferencia de energía cinética entre moléculas adyacentes. En un gas las moléculas más calientes, que tienen más energía y movimiento, se encargan de impartir energía a moléculas colindantes que están a niveles energéticos más bajos. Este tipo de transferencia siempre está presente, en mayor grado, en sólidos, líquidos y gases en los que existe un gradiente de temperatura.

En la conducción la energía también se transfiere por medio de electrones libres, un proceso muy importante en los sólidos metálicos. Entre los ejemplos en los que la transferencia se verifica ante todo por conducción, se cuentan la transferencia de calor a través de paredes o intercambiadores de una nevera, el tratamiento térmico en el forjado de acero, la congelación del suelo durante el invierno, etc. La fundamentación matemática de la conducción es mediante la ley de Fourier, esta se verá con detalle en la sección 1.4.

### 1.3.2. CONVECCIÓN

La transferencia de calor por convección implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Además, con frecuencia incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido. Conviene aclarar que hay una diferencia entre la transferencia de calor por convección forzada en la que se provoca el flujo de un fluido sobre una superficie sólida por medio de una bomba, un ventilador, u otro dispositivo mecánico y la convección libre o natural, en la cual un fluido más caliente o más frío que está en contacto con la superficie sólida. Esto indica que en la convección forzada el fluido está en movimiento, mientras que en la convección libre el fluido está en reposo. Entre los ejemplos de transferencia de calor por convección puede citarse la pérdida de calor en el radiador de un automóvil (un ventilador hace circular aire), un alimento caliente en un recipiente (el alimento transfiere calor a la pared interior del recipiente), Holman (1999). Imagine ahora, una tubería que contiene un líquido caliente, la rapidez de transferencia de calor por convección del líquido caliente a la pared interior del tubo puede evaluarse de la forma siguiente:

$$\hat{Q} = hA(T_L - T_S) \quad (1.11)$$

La ecuación (1.11) también se conoce como la ley de enfriamiento de Newton, donde  $\hat{Q}$  es la rapidez de transferencia de calor en Watts (W),  $A$  es el área de corte transversal normal a la dirección del flujo de calor en  $m^2$ ,  $h$  es el coeficiente convectivo de



transferencia de calor en  $W / m^2 K$ ,  $T_L$  es la temperatura del líquido caliente en K y  $T_S$  es la temperatura de la superficie interior del tubo en K .

### 1.3.3. Radiación

La radiación difiere de la conducción y la convección en cuanto a que no se requiere un medio físico para la transferencia de calor. La radiación es la transferencia de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas, de manera similar a las ondas electromagnéticas que propagan y transfieren la luz. La transferencia radiante de calor se rige por las mismas leyes que dictan el comportamiento de la transferencia de luz. Los sólidos y los líquidos tienden a absorber la radiación que está siendo transferida a través de ellos, por lo que la radiación es más importante a través del espacio o de gases. El ejemplo más ilustrativo es el transporte de calor del Sol a la tierra, Holman (1999).

## 1.4. LEY DE FOURIER PARA LA CONDUCCIÓN DE CALOR

Según Carrasco (2005), Geankoplis (1998) y Holman (1999), la rapidez de transferencia de calor por conducción para sólidos y líquidos obedece a la ley de Fourier mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.12)$$

Donde  $\hat{Q}$  es la rapidez de transferencia de calor en la dirección  $x$ , en Watts (W),  $A$  es el área de corte transversal a la dirección del flujo de calor en  $m^2$ ,  $T$  es la temperatura en K o  $^{\circ}C$ ,  $x$  la distancia en m y  $k$  es la conductividad térmica en  $W / m K$  o  $W / m ^{\circ}C$ . La cantidad  $\frac{dT}{dx}$  (K/m o  $^{\circ}C/m$ ) es el gradiente de temperatura en la dirección  $x$ .

El signo negativo de la ecuación (1.12) se incluye debido a que si el flujo de calor es positivo en determinado sentido, la temperatura disminuye en ese sentido.

#### 1.4.1. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN EN UN SÓLIDO DE SECCIÓN TRANSVERSAL CONSTANTE

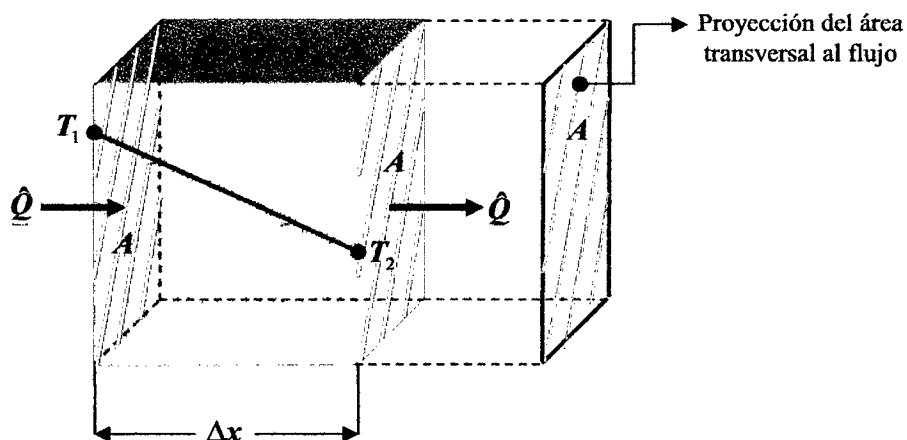
Para un sólido de pared plana con sección transversal al flujo de calor y conductividad térmica constantes, el flujo de calor por conducción se puede evaluar haciendo uso de la ecuación (1.12) y de la figura 1.1.

$$\underline{\hat{Q}} = -kA \frac{dT}{dx} \Rightarrow \underline{\hat{Q}} dx = -kA dT \Rightarrow \underline{\hat{Q}} \int_{x_1}^{x_2} dx = -kA \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\Rightarrow \underline{\hat{Q}} x \Big|_{x_1}^{x_2} = -kAT \Big|_{T_1}^{T_2} \Rightarrow \underline{\hat{Q}}(x_2 - x_1) = -kA(T_2 - T_1)$$

$$\underline{\hat{Q}} = \frac{kA}{\Delta x} (T_1 - T_2) \tag{1.13}$$

Tener en cuenta que  $T_1 > T_2$



**Figura 1.1.** Conducción de calor en un sólido de sección transversal constante

Fuente: Kern (2001) y Carrasco (2005).

#### 1.4.2. COMBINACIÓN DE CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN DE CALOR EN PAREDES COMPUESTAS POR DISCOS CON FLUJO DE CALOR TRANSVERSAL A LAS ÁREAS CIRCULARES

Ahora imagine que tiene dos paredes compuestas por dos discos, además el disco 1 está rodeado por su parte inferior por un fluido caliente y el disco 2 está rodeado por su parte superior por un fluido frío, tal como se muestra en la figura 1.2. La transferencia de calor del fluido caliente a la superficie inferior del disco 1, es por convección, entonces se puede hacer uso de la ecuación (1.11).

$$\hat{Q} = A h_{Fc} (T_{Fc} - T_1) \Rightarrow \boxed{\frac{\hat{Q}}{A h_{Fc}} = (T_{Fc} - T_1)} \quad (1.14)$$

$h_{Fc}$  : Coeficiente convectivo para el fluido caliente

La transferencia de calor de la superficie inferior a la superficie superior del disco 1, es por conducción y se puede hacer uso de la ecuación (1.13)

$$\hat{Q} = \frac{k_1 A}{L_1} (T_1 - T_2) \Rightarrow \boxed{\frac{\hat{Q} L_1}{k_1 A} = (T_1 - T_2)} \quad (1.15)$$

$k_1$  : Conductividad térmica del disco 1

De igual manera la transferencia de calor de la superficie inferior a la superficie superior del disco 2, es por conducción, por lo cual:

$$\hat{Q} = \frac{k_2 A}{L_2} (T_2 - T_3) \Rightarrow \boxed{\frac{\hat{Q} L_2}{k_2 A} = (T_2 - T_3)} \quad (1.16)$$

$k_2$  : Conductividad térmica del disco 2

La transferencia de calor de la superficie superior del disco 2 al fluido frio, es por convección, entonces:

$$\hat{Q} = A h_{ff} (T_3 - T_{ff}) \Rightarrow \frac{\hat{Q}}{A h_{ff}} = (T_3 - T_{ff}) \quad (1.17)$$

$h_{ff}$  : Coeficiente convectivo para el fluido frio

Note que la superficie superior del disco 1 coincide con la superficie inferior del disco 2.

Donde:

$T_{fc}$ ,  $T_{ff}$  : Temperaturas del fluido caliente y el fluido frio, respectivamente.

$T_1$ ,  $T_2$  : Temperaturas de las superficies inferior y superior del disco 1, respectivamente.

$T_2$ ,  $T_3$  : Temperaturas de las superficies inferior y superior del disco 2, respectivamente.

$A$  : Área de la sección transversal al flujo de calor  $\hat{Q}$ .

$k_1$ ,  $k_2$  : Conductividades térmicas de los discos 1 y 2, respectivamente.

$L_1$ ,  $L_2$  : Espesores de los discos 1 y 2, respectivamente.

Sumando las ecuaciones (1.14), (1.15), (1.16) y (1.17), se tiene:

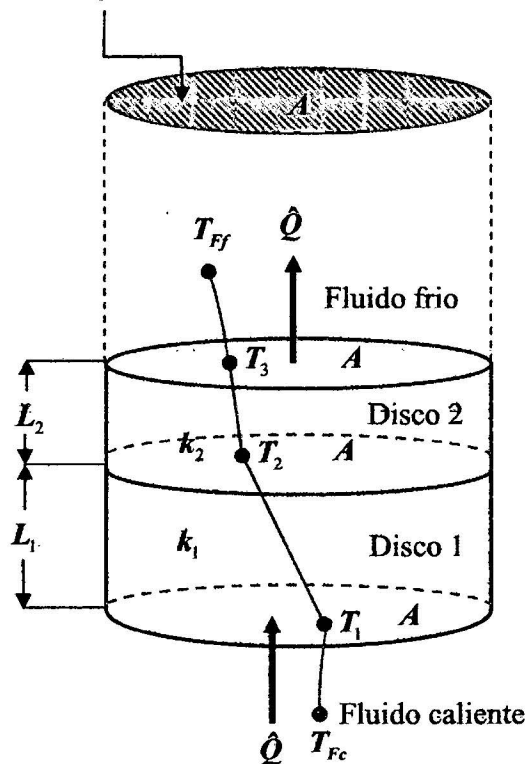
$$\frac{\hat{Q}}{A h_{fc}} + \frac{\hat{Q} L_1}{k_1 A} + \frac{\hat{Q} L_2}{k_2 A} + \frac{\hat{Q}}{A h_{ff}} = (T_{fc} = T_1) + (T_1 = T_2) + (T_2 = T_3) + (T_3 = T_{ff})$$

$$\Rightarrow \frac{\hat{Q}}{A} \left( \frac{1}{h_{fc}} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{1}{h_{ff}} \right) = T_{fc} - T_{ff}$$

Despejando  $\hat{Q}$

$$\Rightarrow \dot{Q} = \frac{T_{Fc} - T_{Ff}}{\left( \frac{1}{Ah_{Fc}} + \frac{L_1}{Ak_1} + \frac{L_2}{Ak_2} + \frac{1}{Ah_{Ff}} \right)} \quad (1.18)$$

Proyección del área circular transversal al flujo de calor



**Figura 1.2.** Esquema de la transferencia de calor por conducción y convección a través de paredes compuestas por discos.

Fuente: Geankoplis (1998) y Carrasco (2005).

### 1.4.3. RESISTENCIAS TÉRMICAS

Con respecto a la ecuación (1.18), se denominan resistencias térmicas a los

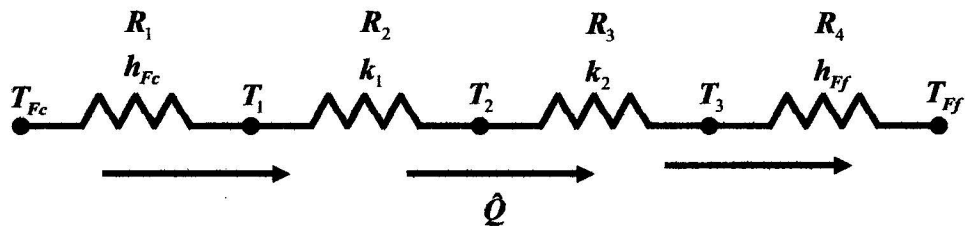
términos:  $R_1 = \frac{1}{Ah_{Fc}}$ ,  $R_2 = \frac{L_1}{Ak_1}$ ,  $R_3 = \frac{L_2}{Ak_2}$  y  $R_4 = \frac{1}{Ah_{Ff}}$ .

Cada medio ofrece una resistencia térmica al flujo de calor. Entonces la resistencia total  $\sum R$  es:

$$\sum R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (1.19)$$

Por lo tanto, el circuito térmico para la figura 1.2, es análogo a un circuito eléctrico en serie, de manera que la resistencia equivalente es igual a la sumatoria de todas las resistencias térmicas, el flujo de calor es análogo a la intensidad de la corriente eléctrica y la temperatura al potencial.

Entonces, el circuito térmico para la figura 1.2 es:



**Figura 1.3.** Circuito térmico en serie para el caso de paredes compuestas por discos.

Si se reemplaza la ecuación (1.19) en la ecuación (1.18), se tendrá:

$$\dot{Q} = \frac{T_{Fc} - T_{Ff}}{\sum R} \quad (1.20)$$

## **CAPÍTULO II**

### **DISEÑO DEL EQUIPO**

#### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL EQUIPO**

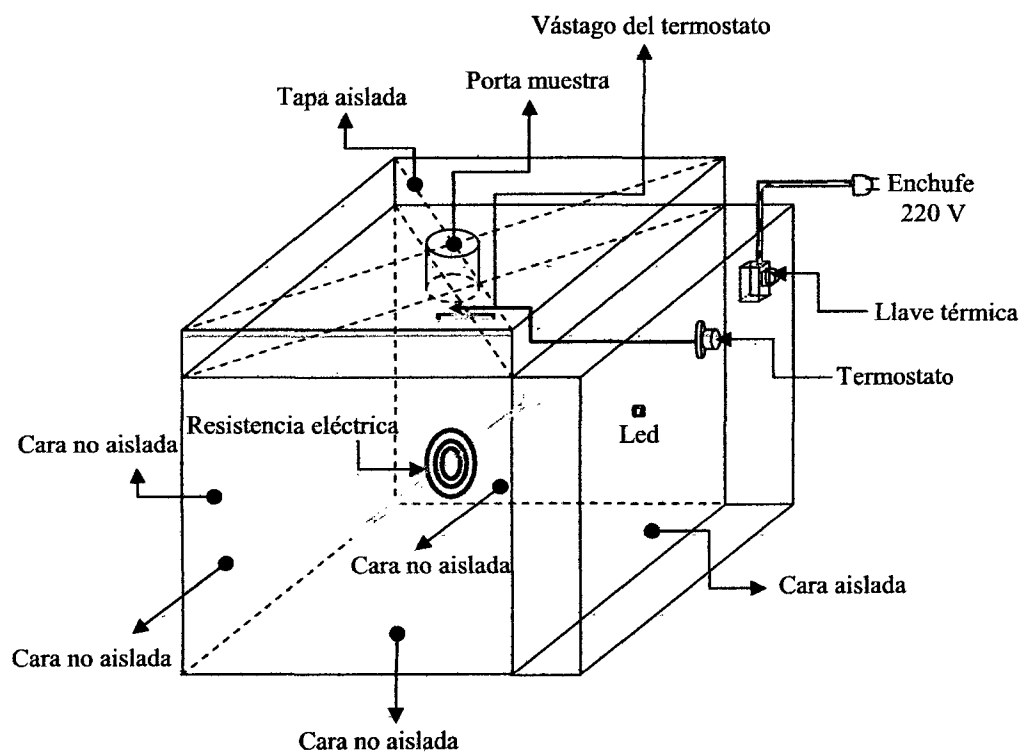
El esquema del equipo que se construyó en el presente trabajo de tesis, se muestra en la figura 2.1.

Este equipo servirá para medir la conductividad térmica de alimentos. Como se puede observar en la figura 2.1, este equipo tiene la forma de un paralelepípedo, del cual 4 de sus caras no están aisladas, una cara está aislada y en la cara de arriba cuenta con una tapa aislada la cual tiene un espacio vacío de forma cilíndrica donde se colocaran las muestras de los alimentos de los cuales se quiera medir su conductividad térmica. También se puede observar en la figura 2.1, que el equipo posee una serie de componentes que cumplen una función específica cuando se ponga en funcionamiento, estos componentes son: La resistencia eléctrica, el termostato, la llave térmica, el led indicador y el enchufe bipolar (220 V).

El experimento en el equipo se inicia calentando el aire que está dentro del mismo, para esto se fija una temperatura en el termostato a la cual se quiere medir la conductividad térmica y seguidamente se prende el equipo levantando la perilla de la llave térmica, de este modo la resistencia eléctrica se empieza a calentar lo cual se nota cuando se prende el led indicador. Al calentarse la resistencia eléctrica empieza a entregar el calor que disipa de la siguiente forma: al aire interior dentro del paralelepípedo haciendo que este varíe su temperatura y en consecuencia varíe su energía interna, a las 4 caras no aisladas del paralelepípedo y al espacio vacío de forma cilíndrica donde se colocaran las muestras de los alimentos. Se tiene en cuenta que la dirección del flujo de calor en el espacio vacío de forma cilíndrica es a través de la superficie de forma circular plana, pues la superficie lateral curva está aislada.

Cuando se llegue a la temperatura fijada en el termostato, se apagará el led indicador y por ende la resistencia eléctrica dejará de disipar calor en un instante de tiempo muy pequeño, en este instante se tiene un estado estacionario para el aire interior del paralelepípedo.

Apenas la temperatura baje una cantidad pequeña, el termostato prenderá nuevamente a la resistencia eléctrica tratando de que el aire interior se mantenga a la temperatura fijada.



**Figura 2.1.** Esquema del diseño del equipo



## 2.2. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE ENERGÍA Y LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR AL EQUIPO

Para aplicar la ecuación general de balance de energía y los mecanismos de transferencia de calor al equipo, es necesario conocer como se llevará a cabo el experimento en el equipo:

El experimento, consiste en una operación de transferencia de calor, la cual se dividirá en dos etapas que se mencionan a continuación:

### **Etapas transitoria.**

En esta etapa se produce el calentamiento del aire dentro del paralelepípedo, por medio del calor que disipa la resistencia eléctrica, desde una temperatura que normalmente puede ser igual a la del medio ambiente hasta llegar a la temperatura fijada en el termostato. Aplicando la ecuación general de balance de energía para esta etapa se tiene que: la rapidez con la que la resistencia eléctrica disipa calor, será igual a la rapidez con la que varia la energía interna del aire dentro del paralelepípedo, más la rapidez del calor a través de las cuatro caras no aisladas y más la rapidez del calor a través del cilindro con área circular transversal al flujo de calor, entonces:

$$P_R = \dot{Q}_{TCNA} + \dot{Q}_{Alimento} + M_{(aire)} C_{v(aire)} \frac{dT}{dt} \quad (2.1)$$

En donde:

$P_R$  : Potencia eléctrica (efectiva) o rapidez con la cual la resistencia eléctrica disipa calor (Watts).

$\dot{Q}_{TCNA}$  ,  $\dot{Q}_{Alimento}$  : Flujos de calor a través de las cuatro caras no aisladas y a través de la superficie de forma circular (Watts).

$M_{(aire)} C_{v(aire)} \frac{dT}{dt}$  : Rapidez con la cual varía la energía interna del aire dentro del paralelepípedo (Watts).

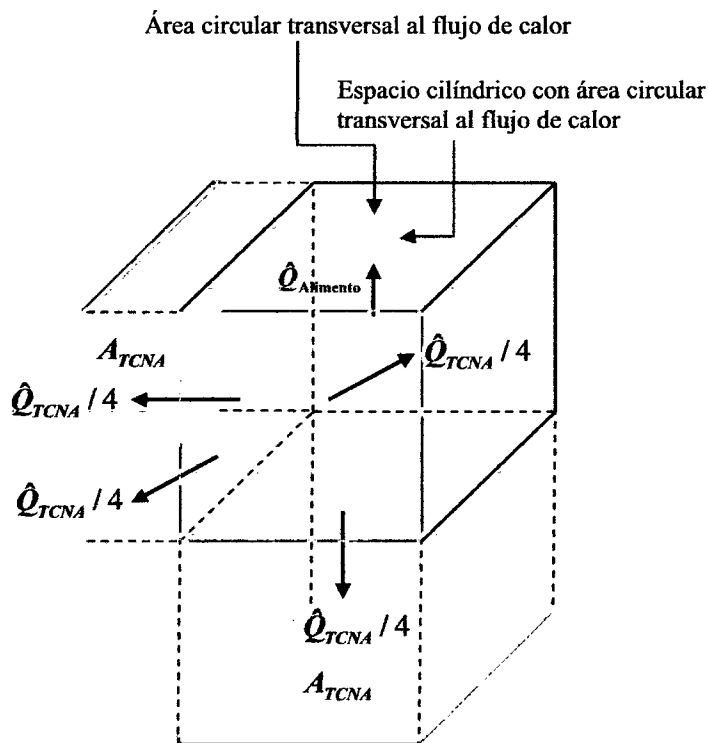
$M_{(aire)}$ ,  $C_{v(aire)}$ ,  $T$  : Masa, capacidad calórica a volumen constante y temperatura del aire dentro del paralelepípedo, respectivamente.

Como en el espacio vacío de forma cilíndrica es donde se colocará el alimento del cual se quiere medir su conductividad térmica, entonces el flujo de calor a través del espacio vacío de forma cilíndrica será igual al flujo de calor a través del alimento. Nótese que en la ecuación (2.1) existe una derivada o razón de cambio de la temperatura con respecto al tiempo, simbólicamente se representa como  $\frac{dT}{dt}$ . Esto indica que en esta etapa la temperatura del aire dentro del paralelepípedo varía con el tiempo. Esta etapa no es de mucha importancia para el experimento, porque no es en esta etapa donde se realizará la evaluación de la conductividad térmica del alimento, sin embargo no está de más describir mediante una ecuación a las variables involucradas en esta etapa.

### Etapa estable.

En esta etapa la temperatura del aire dentro del paralelepípedo será estable. Se aplica la ecuación general de energía, los mecanismos de transferencia de calor y se tiene en cuenta las figuras 2.2 y 2.3. Como la temperatura del aire interior, se mantendrá constante, entonces la derivada  $\frac{dT}{dt}$  será igual a cero y por ende la variación de la energía interna del mismo, es decir:  $M_{(aire)} C_{v(aire)} \frac{dT}{dt} = 0$ . Entonces la ecuación general de balance de energía para esta etapa estará en función de los términos  $P_R$ ,  $\hat{Q}_{TCNA}$  y  $\hat{Q}_{Alimento}$ , es decir:

$$P_R = \hat{Q}_{TCNA} + \hat{Q}_{Alimento} \quad (2.2)$$



**Figura 2.2.** Flujo de calor a través de las cuatro caras no aisladas y a través del cilindro con área circular transversal al flujo de calor.

La potencia que disipa la resistencia eléctrica se distribuirá dependiendo de las

áreas  $A_{TCNA}$  y  $A_{Alimento}$ , es decir: 
$$\dot{Q}_{Alimento} = \frac{A_{Alimento}}{A_{Alimento} + A_{TCNA}} P_R \quad (2.3)$$

Donde:

$A_{TCNA}$ ,  $A_{Alimento}$  : Área total de las cuatro caras no aisladas y de la superficie circular del alimento ( $m^2$ ).

Aplicando los mecanismos de transferencia de calor en la figura 1.6.

La transferencia de calor del aire interior del paralelepípedo (fluido caliente) a la superficie inferior de la pared de acero (disco 1) es por convección, entonces aplicando la ecuación (1.11) se obtiene:

$$\hat{Q}_{\text{Alimento}} = A_{\text{Alimento}} h_{ai} (T_{ai} - T_1) \Rightarrow \boxed{\frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}} h_{ai}} = (T_{ai} - T_1)} \quad (2.4)$$

$h_{ai}$  : Coeficiente convectivo del aire interior (fluido caliente)

La transferencia de calor de la superficie inferior a la superficie superior de la pared de acero (disco 1), es por conducción y se puede hacer uso de la ecuación (1.13)

$$\hat{Q}_{\text{Alimento}} = \frac{k_{\text{Acero}} A_{\text{Alimento}}}{e_{\text{Acero}}} (T_1 - T_2) \Rightarrow \boxed{\frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}} e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}} A_{\text{Alimento}}} = (T_1 - T_2)} \quad (2.5)$$

De la misma forma la transferencia de calor de la superficie inferior a la superficie superior de la pared del alimento (disco 2), es por conducción, entonces:

$$\hat{Q}_{\text{Alimento}} = \frac{k_{\text{Alimento}} A_{\text{Alimento}}}{e_{\text{Alimento}}} (T_2 - T_3) \Rightarrow \boxed{\frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}} e_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Alimento}} A_{\text{Alimento}}} = (T_2 - T_3)} \quad (2.6)$$

La transferencia de calor de la superficie superior del alimento (disco 2) al aire exterior (fluido frío) es por convección, entonces:

$$\hat{Q}_{\text{Alimento}} = A_{\text{Alimento}} h_{ae} (T_3 - T_{ae}) \Rightarrow \boxed{\frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}} h_{ae}} = (T_3 - T_{ae})} \quad (2.7)$$

$h_{ae}$  : Coeficiente convectivo del aire exterior (fluido frío)

Sumando las ecuaciones (2.4), (2.5), (2.6) y (2.7), se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}} h_{ai}} + \frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}} e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}} A_{\text{Alimento}}} + \frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}} e_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Alimento}} A_{\text{Alimento}}} + \frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}} h_{ae}} \\ = (T_{ai} - T_1) + (T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) + (T_3 - T_{ae}) = T_{ai} - T_{ae} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}} \left( \frac{1}{h_{ai}} \pm \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}} \pm \frac{e_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Alimento}}} \pm \frac{1}{h_{ae}} \right) = T_{ai} = T_{ae}$$

$$\boxed{\dot{Q}_{\text{Alimento}} = \frac{T_{ai} - T_{ae}}{\frac{1}{A_{\text{Alimento}}} \left( \frac{1}{h_{ai}} + \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}} + \frac{e_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Alimento}}} + \frac{1}{h_{ae}} \right)}} \quad (2.8)$$

Para evitar calcular por separado  $h_{ai}$  y  $h_{ae}$ , la ecuación (2.8), también se le puede expresar de la siguiente forma:

$$\boxed{\dot{Q}_{\text{Alimento}} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{1}{A_{\text{Alimento}}} \left( \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}} + \frac{e_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Alimento}}} \right)}} \quad (2.9)$$

Es decir en este caso se ha hecho la aplicación de los mecanismos básicos de la transferencia de calor desde  $T_1$  hasta  $T_3$ .

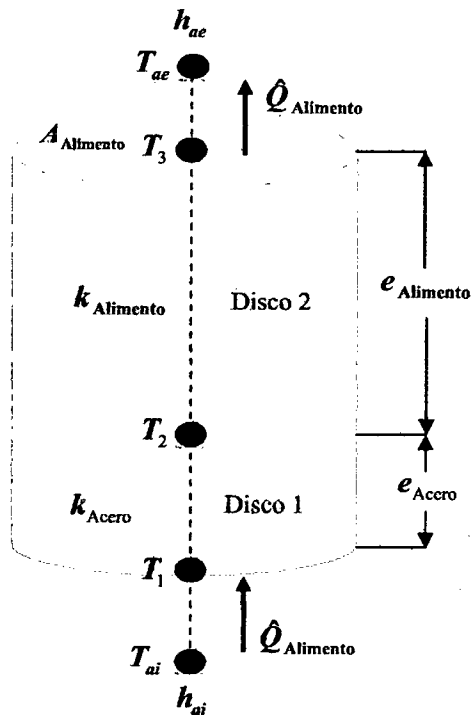
Despejando  $k_{\text{Alimento}}$  de la ecuación (2.9), se obtiene:

$$\frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}} + \frac{e_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Alimento}}} = \frac{A_{\text{Alimento}} (T_1 - T_3)}{\dot{Q}_{\text{Alimento}}} \Rightarrow \frac{e_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Alimento}}} = \frac{A_{\text{Alimento}} (T_1 - T_3)}{\dot{Q}_{\text{Alimento}}} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}$$

Invirtiéndolo a ambos miembros de la última expresión, se tiene:

$$\Rightarrow \frac{k_{\text{Alimento}}}{e_{\text{Alimento}}} = \frac{1}{\frac{A_{\text{Alimento}} (T_1 - T_3)}{\dot{Q}_{\text{Alimento}}} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}}$$

$$\boxed{k_{\text{Alimento}} = \frac{e_{\text{Alimento}}}{\frac{A_{\text{Alimento}} (T_1 - T_3)}{\dot{Q}_{\text{Alimento}}} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}}} \quad (2.10)$$



**Figura 2.3.** Flujo de calor a través del alimento.

Donde:

$k_{Alimento}$  : Conductividad térmica del alimento (W/m°C).

$\hat{Q}_{Alimento}$  : Flujo de calor a través del alimento (W).

$e_{Alimento}$  : Espesor del alimento (m).

$e_{Acero}$  : Espesor de la plancha de acero utilizada en la construcción del equipo (m).

$k_{Acero}$  : Conductividad térmica de la plancha de acero (pared de metal o disco1) utilizada en la construcción del equipo (W/m°C).

$T_1$  : Temperatura de la superficie inferior de la plancha de acero (°C).

$T_3$  : Temperatura de la superficie superior de la pared del alimento (disco 2) (°C)

La temperatura  $T_1$  se puede fijar en el termostato, pero para esto el vástago del mismo se debe colocar sobre la superficie inferior del disco 1 (ver figuras 2.2 y 2.3). La temperatura  $T_3$  se puede medir utilizando un pirómetro de radiación, basta con apuntar

sobre la superficie circular del alimento que está en contacto con el aire frío. El término  $\hat{Q}_{\text{Alimento}}$  se puede calcular haciendo uso de la ecuación (2.3). Todos los demás términos de la ecuación (2.10) deben ser conocidos o fáciles de medir. Entonces, de esta forma se ha deducido la ecuación (2.10), la cual representa el modelo matemático que permite calcular la conductividad térmica de un alimento sólido o pastoso, haciendo uso del equipo que se diseñó y construyó en el presente trabajo de tesis. Adicionalmente a manera de comprobación, se puede calcular en forma independiente las temperaturas  $T_2$  y  $T_3$  despejando de las ecuaciones (2.5) y (2.6), respectivamente.

$$\frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}} e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}} A_{\text{Alimento}}} = (T_1 - T_2). \text{ Despejando } T_2$$

$$T_2 = T_1 - \frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}} e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}} A_{\text{Alimento}}} \quad (2.11)$$

$$\frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}} e_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Alimento}} A_{\text{Alimento}}} = (T_2 - T_3). \text{ Despejando } T_3$$

$$T_3 = T_2 - \frac{\hat{Q}_{\text{Alimento}} e_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Alimento}} A_{\text{Alimento}}} \quad (2.12)$$

Entonces el circuito térmico, de la figura 2.3, desde  $T_1$  hasta  $T_3$  sería como se muestra a continuación.

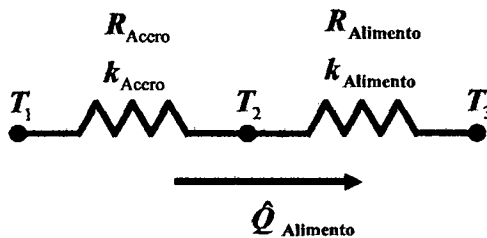


Figura 2.4. Circuito térmico para la figura 2.3.

Donde:

$R_{\text{Acero}}$  : Resistencia térmica del acero ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ).

$R_{\text{Alimento}}$  : Resistencia térmica del alimento ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ).

$$R_{\text{Acero}} = \frac{e_{\text{Acero}}}{A_{\text{Alimento}} k_{\text{Acero}}} \quad (2.13)$$

$$R_{\text{Alimento}} = \frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}} k_{\text{Alimento}}} \quad (2.14)$$

### 2.3. PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES DEL EXPERIMENTO A LLEVARSE A CABO EN EL EQUIPO

#### 2.3.1. POTENCIA EFECTIVA DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

La potencia de la resistencia eléctrica es la rapidez con la que este elemento transmite energía a un determinado medio. Toda resistencia eléctrica tiene una potencia nominal o la que se encuentra comercialmente, pero esta potencia nominal no es en realidad la potencia real que la resistencia eléctrica disipa a un determinado medio.

Para calcular la potencia real o efectiva de la resistencia eléctrica, se debe medir primeramente el Ohmiaje y el voltaje, con estos dos valores se aplica la ecuación (2.15) y se calcula la potencia real de la resistencia eléctrica, la cual se denota por  $P_R$  (Watts).

$$P_R = \frac{(V_{TR})^2}{\Omega_R} \quad (2.15)$$

Donde:

$V_{TR}$  : Voltaje de trabajo de la resistencia eléctrica (Voltios).



$\Omega_R$  : Ohmiaje de la resistencia eléctrica (Ohmios).

### **2.3.2. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL ACERO INOXIDABLE**

Se representa como  $k_{Acero}$ , esta variable se puede observar en las ecuaciones (2.5), (2.8), (2.9), (2.10), (2.11), (2.12) y (2.13)

### **2.3.3. FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DEL ALIMENTO.**

Se representa como  $\hat{Q}_{Alimento}$  y se puede calcular por medio de la ecuación (2.3).

### **2.3.4. ESPESOR DEL ACERO INOXIDABLE**

Este parámetro se denota como  $e_{Acero}$ , representa el espesor del disco 1 formado por el acero.

### **2.3.5. ÁREA DEL ALIMENTO TRANSVERSAL AL FLUJO DE CALOR**

Se denota este parámetro como  $A_{Alimento}$ , representa al área de la superficie circular que para este caso es la misma para los discos 1 y 2.

### **2.3.6. ÁREA DE LAS CARAS NO AISLADAS**

Este parámetro representa al área total de las cuatro caras no aisladas, se denota como  $A_{TCNA}$  y se puede ver en la ecuación (2.3).

## **2.4. VARIABLES MÁS IMPORTANTES DEL EXPERIMENTO A LLEVARSE A CABO EN EL EQUIPO**

### **2.4.1. ESPESOR DEL ALIMENTO**

Esta variable se denota como  $e_{\text{Alimento}}$ , representa el espesor del disco 2 formado por el alimento y se puede medir utilizando un vernier.

### **2.4.2. TEMPERATURA FIJADA EN EL TERMOSTATO**

Esta variable se representa como  $T_1$  y es la que censa el vástago del termostato. También es la que representa a la temperatura de la superficie inferior de la plancha de acero (disco 1), lo cual se muestra en la figura 2.3.

### **2.4.3. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE SUPERIOR DEL ALIMENTO**

Esta variable se representa por  $T_3$ , como se mencionó en la sección 2.3, esta se puede medir utilizando un pirómetro de radiación o termómetro infrarrojo.

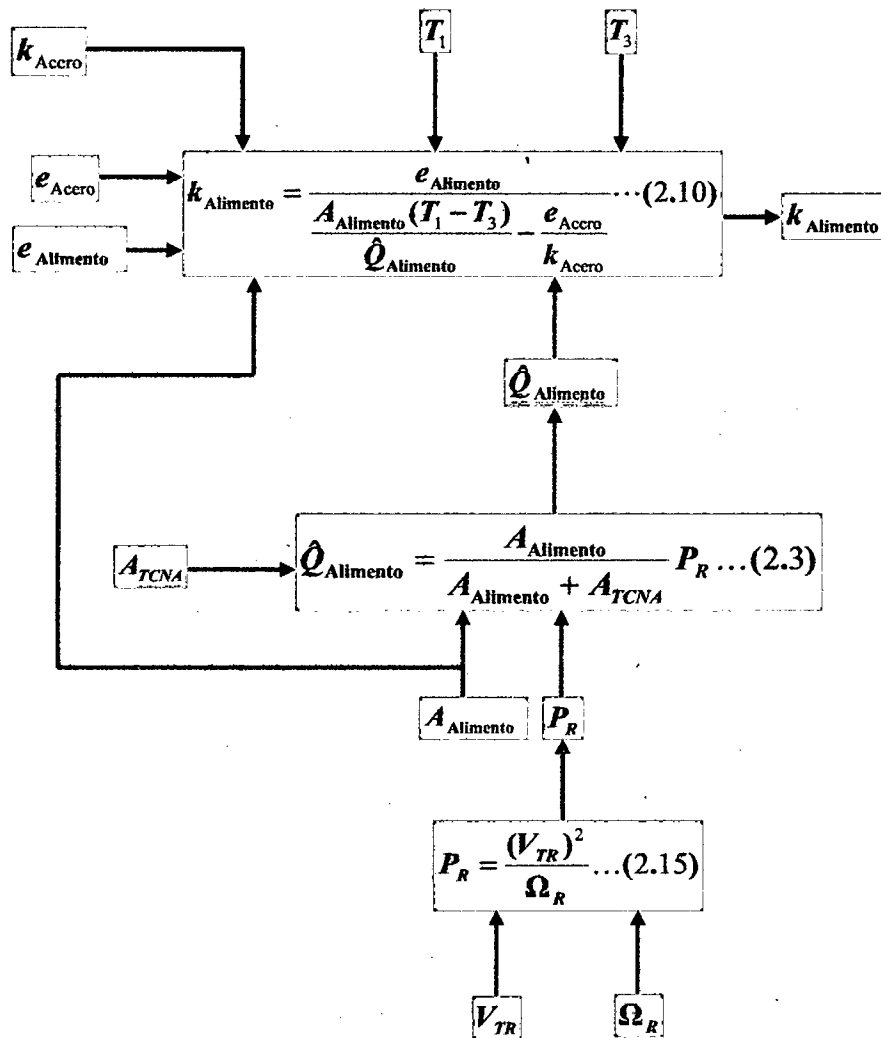
### **2.4.4. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL ALIMENTO**

Esta es la variable más importante del experimento a llevarse a cabo en el equipo. Se denota como  $k_{\text{Alimento}}$  y se puede calcular con la ecuación (2.10). Téngase en cuenta que para aplicar esta ecuación se deben conocer todos los términos que están a la derecha.

## **2.5. ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALIMENTOS SÓLIDOS Y PASTOSOS**

En esta sección se muestra el proceso de cálculo de la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos, este proceso es necesario conocer para elaborar las hojas de

cálculo en Excel, pues se hace uso de las ecuaciones donde se relacionan a los parámetros y variables del experimento a llevarse a cabo en el equipo.



**Figura 2.5.** Algoritmo para el cálculo de la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos

## 2.6. PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Los parámetros de diseño y construcción que se consideran en el presente trabajo, se refieren a las dimensiones de los componentes del equipo. Estos componentes son: el paralelepípedo (en su interior está la resistencia eléctrica), la pared aislada donde se colocan los controles (llave térmica, led indicador y termostato) y la tapa aislada que cubre el paralelepípedo y también donde se coloca la muestra del alimento del cual se va a medir su conductividad térmica.

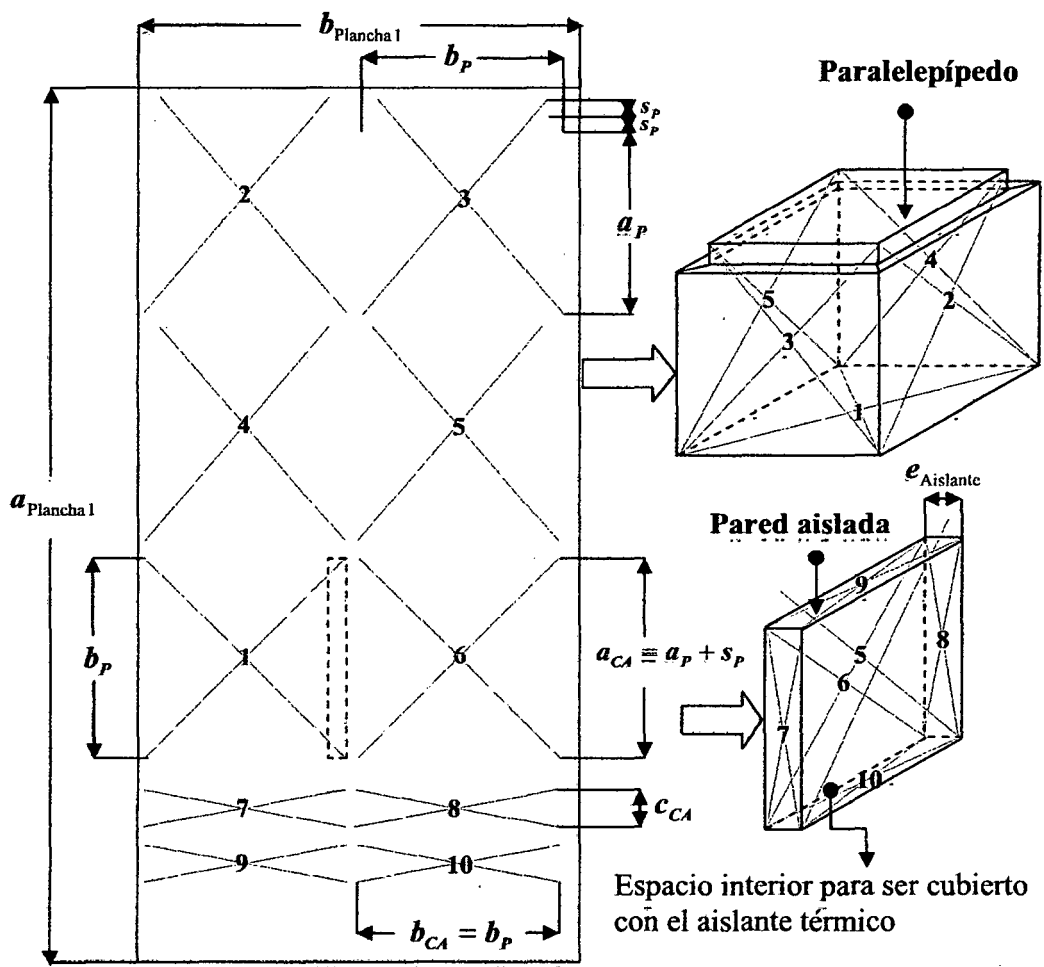
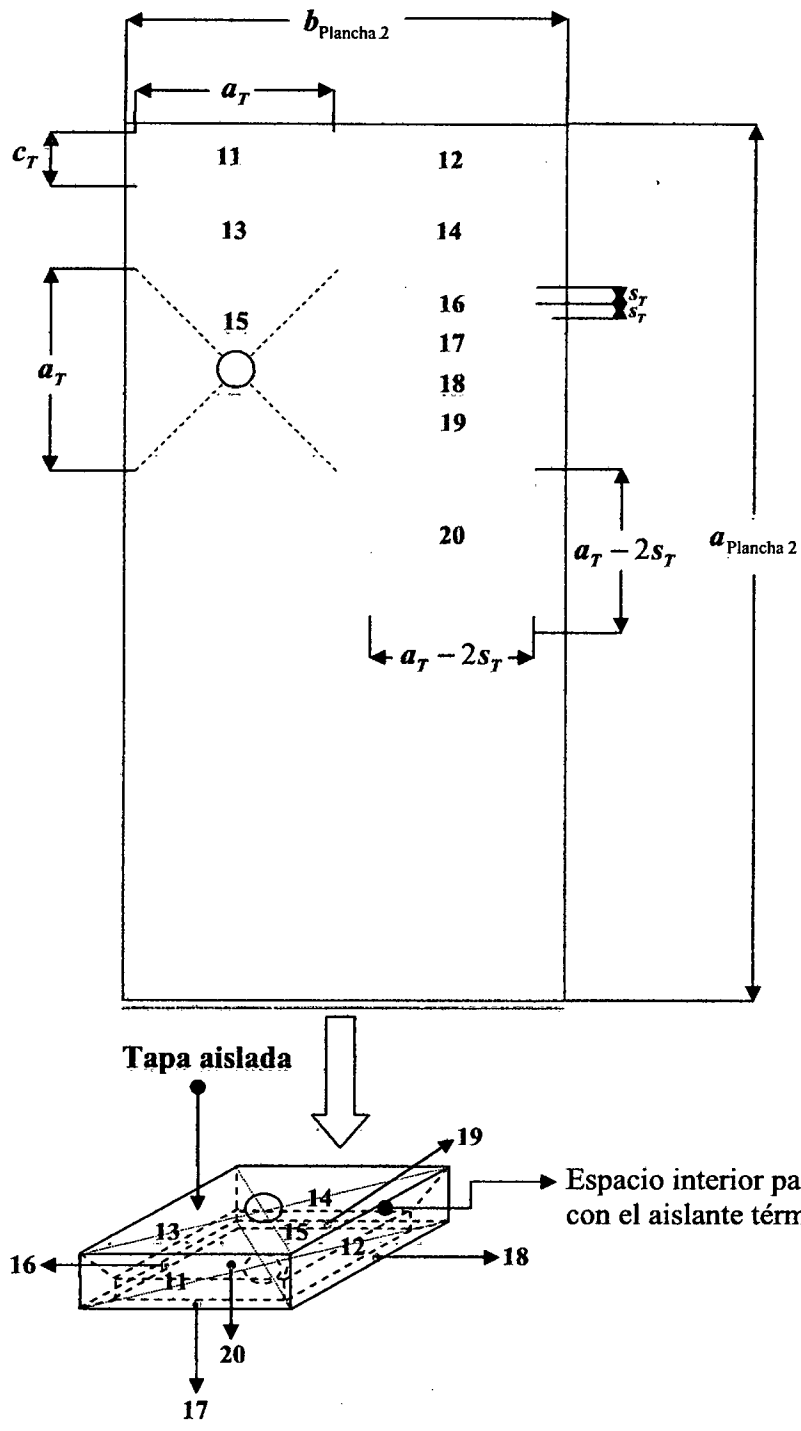


Figura 2.6. Trazos realizados en la plancha de metal 1, para determinar las dimensiones del paralelepípedo y la pared aislada.



**Figura 2.7.** Trazos realizados en la plancha de metal 2, para determinar las dimensiones de la tapa aislada.

En la figura 2.7, se muestran los trazos realizados para determinar las dimensiones del paralelepípedo y la pared aislada.

En la figura 2.8, se muestran los trazos realizados para determinar las dimensiones de la tapa aislada.

Entonces, los parámetros de diseño y construcción son:

$a_{\text{Plancha 1}}$  : Alto de la plancha de metal 1 (m, cm o mm).

$a_{\text{Plancha 2}}$  : Alto de la plancha de metal 2 (m, cm o mm).

$b_{\text{Plancha 1}}$  : Ancho de la plancha de metal 1 (m, cm o mm).

$b_{\text{Plancha 2}}$  : Ancho de la plancha de metal 2 (m, cm o mm).

$a_p$  : Alto del paralelepípedo (m, cm o mm).

$b_p$  : Ancho del paralelepípedo (m, cm o mm).

$s_p$  : Saliente del paralelepípedo (m, cm o mm).

$s_T$  : Saliente de la tapa (m, cm o mm).

$e_{\text{Aislante}}$  : Espesor del aislante térmico (lana de vidrio) (m, cm o mm).

$c_{CA} \approx e_{\text{Aislante}}$  : Profundidad de la pared aislada (m, cm o mm).

$c_T$  : Profundidad de la tapa (m, cm o mm).

$A_{\text{Pared aislada}}$  : Área de la pared aislada, transversal al flujo de calor ( $\text{m}^2$ ).

$\hat{Q}_{\text{Pared aislada}}$  : Flujo de calor a través de la pared aislada.

Se tiene en cuenta que ambas planchas de metal se encuentran comercialmente con las siguientes dimensiones: ancho = 1.2 m, alto = 2.4 m y espesor = 0.6 mm. Entonces, de las figuras 2.6 y 2.7, se puede concluir que:

$$\boxed{4s_p + 2a_p + b_p + 2c_{CA} < a_{\text{Plancha 1}} = 2.4 \text{ m}} \quad (2.16)$$

$$\boxed{2b_p < b_{\text{Plancha 1}} = 1.2 \text{ m}} \quad (2.17)$$

$$2C_T + 2a_T - 2S_T < a_{\text{Plancha 2}} = 2.4 \text{ m} \quad (2.18)$$

$$2a_T < b_{\text{Plancha 2}} = 1.2 \text{ m} \quad (2.19)$$

Para determinar el espesor del aislante térmico (lana de vidrio), se considera que la pared aislada está compuesta por tres capas: la capa 1 es de acero inoxidable y su superficie interior está en contacto con el aire caliente, es decir la temperatura de la superficie interior es aproximadamente igual a la temperatura que se fija en el termostato; la capa 2 es del aislante térmico y la capa 3 de acero inoxidable idéntica a la capa 1. La superficie exterior de la capa 3, está en contacto con el aire exterior. Se debe tratar de que el flujo de calor  $\hat{Q}_{\text{Pared aislada}}$  sea mínimo de modo que la temperatura de la superficie exterior de la capa 3, sea aproximadamente igual a la temperatura del aire exterior (temperatura ambiente). En la figura 2.8, se muestra en detalle la pared aislada si vemos de frente la sección 7 de esta pared. Entonces, si se aplica los mecanismos básicos de la transferencia de calor desde  $T_i$  hasta  $T_{ae}$  se obtiene la ecuación (2.20). La representación gráfica de la ecuación (1.40) se muestra en la figura 2.9.

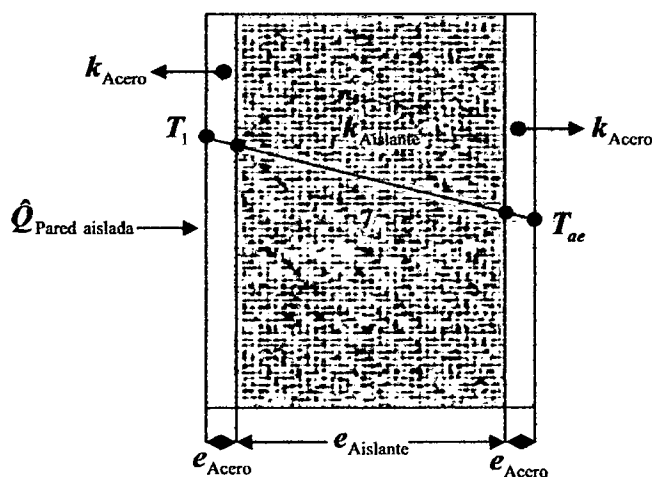
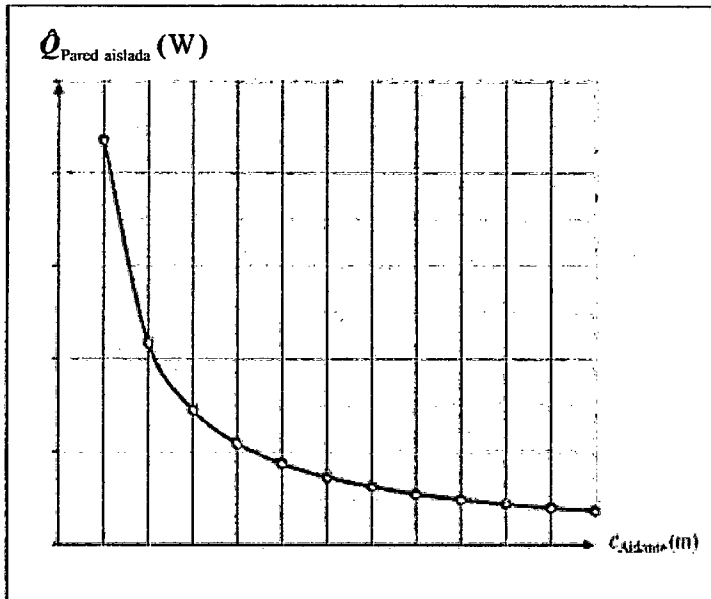


Figura 2.9. Detalle de la pared aislada.

$$\hat{Q}_{\text{Pared aislada}} = \frac{A_{\text{Pared aislada}} (T_1 - T_{ae})}{\left( \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}} + \frac{e_{\text{Aislante}}}{k_{\text{Aislante}}} + \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}} \right)}$$

$$\hat{Q}_{\text{Pared aislada}} = \frac{T_1 - T_{ae}}{\frac{1}{A_{\text{Pared aislada}}} \left( \frac{2e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}} + \frac{e_{\text{Aislante}}}{k_{\text{Aislante}}} \right)} \quad (2.20)$$



**Figura 2.9.** Representación gráfica de  $\hat{Q}_{\text{Pared aislada}}$  versus  $e_{\text{Aislante}}$ .

La ecuación (2.20), se programa en una hoja de cálculo de Excel y se debe obtener la representación gráfica de  $\hat{Q}_{\text{Pared aislada}}$  versus  $e_{\text{Aislante}}$ . En este caso por cada valor de  $e_{\text{Aislante}}$  se calcula un valor de  $\hat{Q}_{\text{Pared aislada}}$ , considerando que los demás términos de la ecuación (2.20) se mantienen constantes. Se puede observar de la ecuación (2.20) que  $\hat{Q}_{\text{Pared aislada}}$  es inversamente proporcional a  $e_{\text{Aislante}}$ , lo cual indica en la figura 2.9 que al aumentar  $e_{\text{Aislante}}$  disminuye el valor de  $\hat{Q}_{\text{Pared aislada}}$ .



## 2.7. CONDICIONES INICIALES A CONSIDERARSE EN EL DISEÑO

$a_{\text{Plancha 1}} = 2.4 \text{ m}$  : Alto de la plancha de metal 1.

$a_{\text{Plancha 2}} = 2.4 \text{ m}$  : Alto de la plancha de metal 2.

$b_{\text{Plancha 1}} = 1.2 \text{ m}$  : Ancho de la plancha de metal 1

$b_{\text{Plancha 2}} = 1.2 \text{ m}$  : Ancho de la plancha de metal 2

## 2.8. CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

En la relación (2.16), la suma de los términos que están al lado izquierdo debe ser menor que 2.4 m, es decir:  $4S_p + 2a_p + b_p + 2C_{CA} < 2.4 \text{ m}$ .

Dando valores a cada uno de estos términos de manera que se cumpla la desigualdad.

$$S_p = 0.05 \text{ m}, \quad a_p = 0.5 \text{ m}, \quad b_p = 0.55 \text{ m}, \quad C_{CA} \approx e_{\text{Aislante}}$$

Para determinar  $C_{CA}$ , es necesario que se calcule el espesor del aislante.

La relación (2.17) indica que el término  $2b_p$ , debe ser menor que 1.2 m, es decir:  $2b_p < 1.2 \text{ m}$ . Pero de la figura 2.6 se observa que  $b_p$  es igual a  $a_{CA} = a_p + s_p$ . Entonces  $b_p = a_{CA} = a_p + s_p = (0.5 + 0.05) \text{ m} = 0.55 \text{ m} \Rightarrow 2b_p = 1.10 \text{ m} < 1.2 \text{ m}$ .

En la relación (2.18), se tiene:  $2C_T + 2a_T - 2S_T < 2.4 \text{ m}$

De las figuras 2.6 y 2.7, se puede observar que las secciones 1 y 15 deben tener las mismas dimensiones, es decir:  $b_p = a_T = 0.55 \text{ m}$ .

También de las figuras 2.6 y 2.7, se puede observar que:  $S_p = S_T = 0.05 \text{ m}$ .  
 Considerando que  $C_T = 0.15 \text{ m}$ .

$$2C_T + 2a_T - 2S_T = 2 \times 0.15 \text{ m} + 2 \times 0.55 \text{ m} - 2 \times 0.05 \text{ m} < 2.4 \text{ m}$$

$$\Rightarrow 2C_T + 2a_T - 2S_T = 1.3 \text{ m} < 2.4 \text{ m}$$

De la relación (2.19), se tiene:  $2a_T = 2 \times 0.55 \text{ m} < 1.2 \text{ m} \Rightarrow 2a_T = 1.10 \text{ m} < 1.2 \text{ m}$

Para determinar el espesor del aislante térmico, se ha programado la ecuación (2.20) en una hoja de cálculo de Excel, de esta forma se ha realizado la simulación para obtener valores de  $\dot{Q}_{\text{Pared aislada}}$  por cada valor de  $e_{\text{Aislante}}$  (figura 2.10).

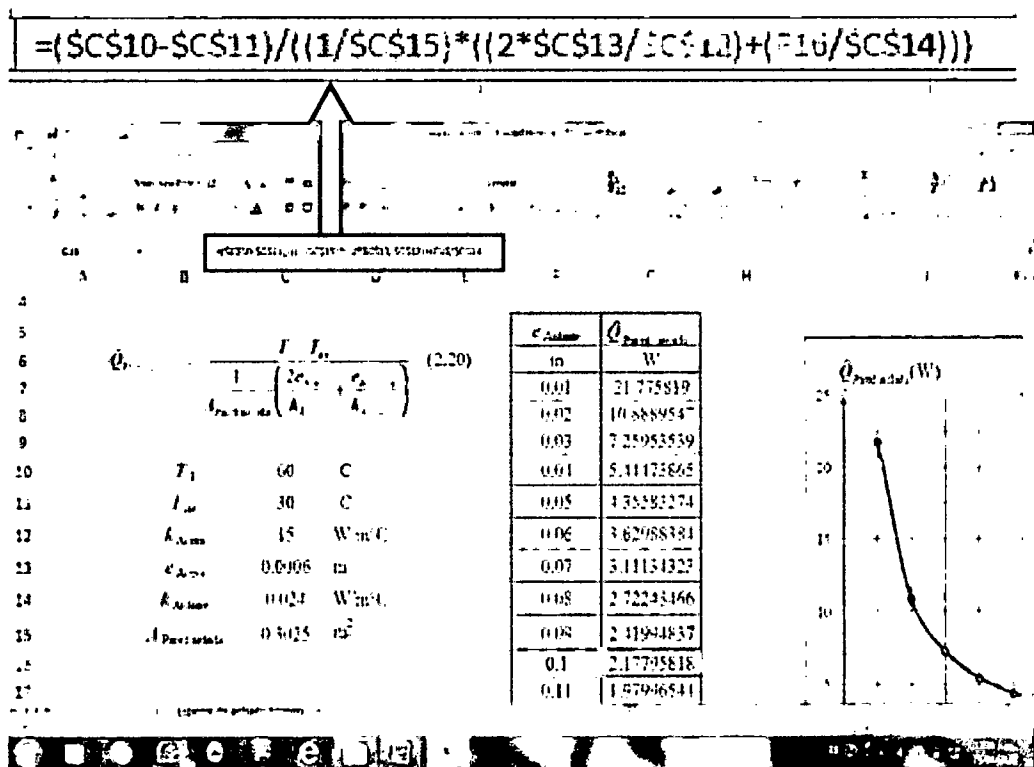


Figura 2.10. Hoja de Excel para determinar el espesor del aislante térmico.

Para aplicar la ecuación (2.20), se ha usado los siguientes valores:

$$T_1 = 60^\circ\text{C} , T_{ae} = 30^\circ\text{C}$$

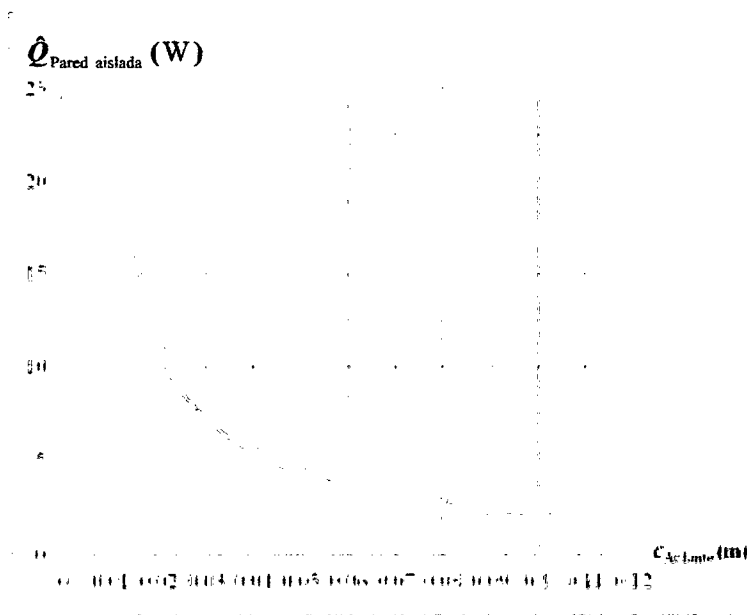
$$e_{\text{Acero}} = 0.6 \text{ mm} = 0.0006 \text{ m}$$

$$k_{\text{Acero}} = 15 \text{ W/m}^\circ\text{C}, \text{ Geankoplis (1998)}$$

$$k_{\text{Aislante}} = 0.024 \text{ W/m}^\circ\text{C}, \text{ Bardales, Ruiz y Trigos (2008)}$$

$$A_{\text{Pared aislada}} = b_p \times b_p = 0.55 \text{ m} \times 0.55 \text{ m} = 0.325 \text{ m}^2$$

En las columnas F y G de la hoja de cálculo que se muestra en la figura 2.1, se han tabulado los valores  $e_{\text{Aislante}}$  y  $\hat{Q}_{\text{Pared aislada}}$ , respectivamente. Estos valores se grafican tal como se muestra en la figura 2.11. De esta figura se determina que  $e_{\text{Aislante}} = 0.1 \text{ m}$ , entonces:  $e_{\text{Aislante}} = 0.1 \text{ m} = C_{CA}$ . A partir de 0.1 m si se aumenta el valor de  $e_{\text{Aislante}}$ , la disminución del valor de  $\hat{Q}_{\text{Pared aislada}}$  no es significativa, es decir cada vez disminuye menos.



**Figura 2.11.** Representación gráfica del flujo de calor a través de la pared aislada, versus el espesor del aislante térmico.

## **CAPÍTULO III**

### **CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO**

#### **3.1. MATERIALES EMPLEADOS**

Dos planchas de acero inoxidable ASTM N°304 (2.4 m×1.2 m×0.6 mm).

Una resistencia eléctrica.

Una llave térmica

Un termostato.

Un pirómetro de radiación.

Un foco indicador (led).

Tres metros de cable asbestado.

Dos metros de lana de vidrio.

Tres metros de cable vulcanizado.

Un enchufe bipolar.

Una tuerca de ajuste.

#### **3.2. ESPECIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO**

##### **3.2.1. PARALELEPÍPEDO**

Material: Acero inoxidable N°304.

Altura total = 0.6 m.

Frente = 0.55 m.

Fondo = 0.55 m.

Espesor de las caras = 0.6 mm.

Saliente = 0.05 m

### **3.2.2. PARED AISLADA**

Materiales: Acero inoxidable N°304 y lana de vidrio.

Altura total = 0.55 m.

Frente = 0.55 m.

Fondo = 0.1012 m.

Espesor del aislante térmico = 0.10 m

Espesor de las caras = 0.6 mm.

Aislante: Lana de vidrio

### **3.2.3. TAPA AISLADA**

Materiales: Acero inoxidable N°304 y lana de vidrio.

Altura total = 0.1512 m.

Frente = 0.55 m.

Fondo = 0.55 m.

Espesor máximo del aislante térmico = 0.15 m.

Espesor de las caras = 0.6 mm.

Aislante: Lana de vidrio

#### **Espacio para porta muestra**

Altura total = 0.15 m

Diámetro = 0.10 m

#### **Porta muestra (se ha utilizado 2)**

Altura total = 0.003 m = 3 mm

Diámetro = 0.097 m

Altura total = 0.005 m = 5 mm

Diámetro = 0.097 m

### **3.2.4. COMPONENTES ELÉCTRICOS**

#### **Resistencia eléctrica**

Marca: General electric

Voltaje = 208–240 V

Potencia = 1130–1500 W

#### **Termostato**

Rango de temperatura = 50–350 °C

#### **Cable asbestado**

Tipo: AWG N°14

#### **Cable vulcanizado**

Marca: Indeco

Tipo: AWG N°2×14

#### **Llave térmica**

Marca: LS

Capacidad máxima = 2×16 Amperios

#### **Enchufe**

Tipo: Bipolar (220V)

Capacidad máxima = 15 Amperios

### **3.2.5. PIRÓMETRO DE RADIACIÓN**

Marca: Radio Shack

Rango de medición = -25°C (-13°F) a 550°C (1022°F)

### 3.3. DESPIECE DEL EQUIPO

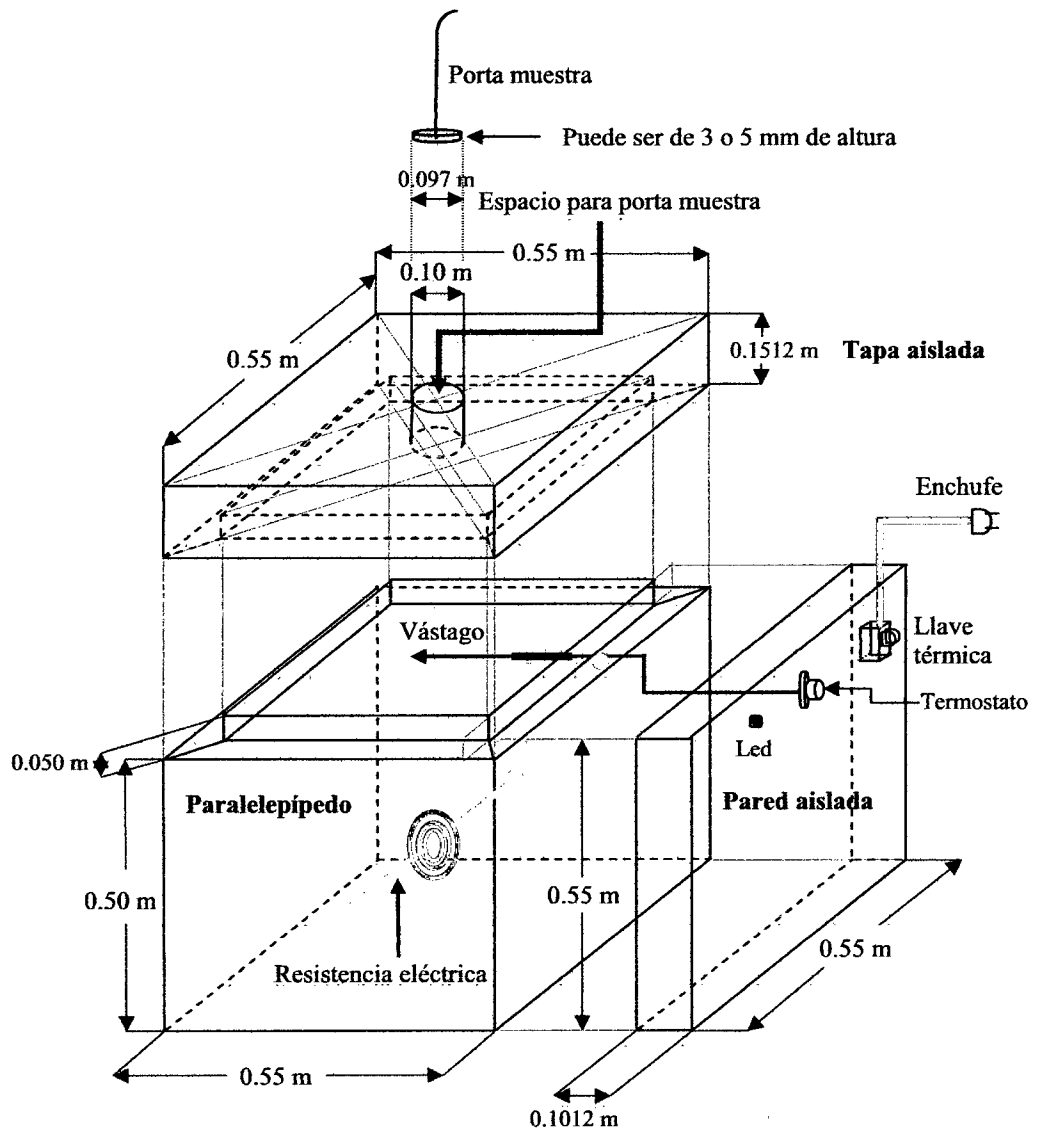


Figura 3.1. Despiece del equipo.

### 3.4. DIAGRAMA DE INSTALACIÓN ELÉCTRICA

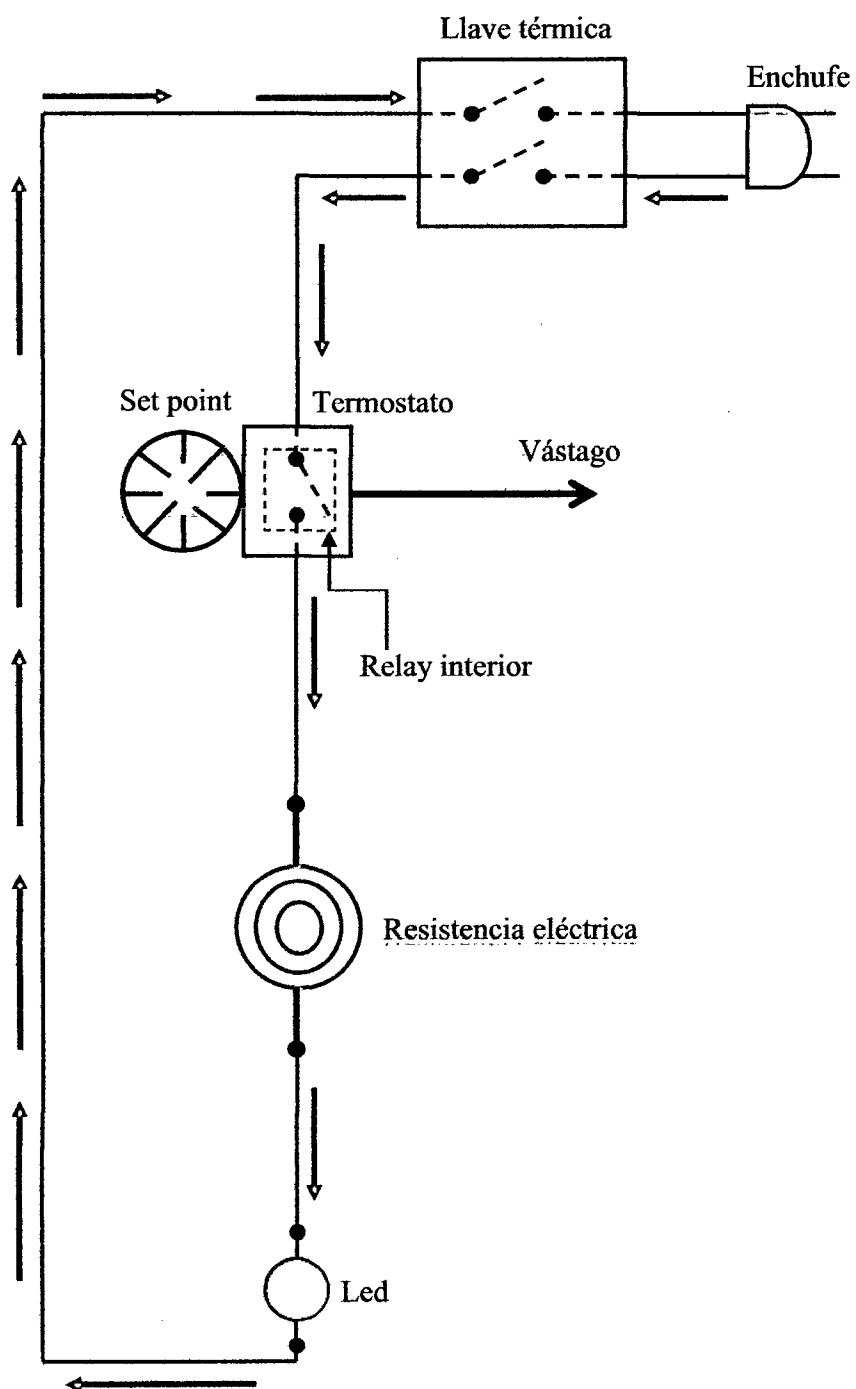


Figura 3.2. Diagrama de instalación eléctrica.



## CAPÍTULO IV

### EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

#### 4.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

- El equipo inicia su funcionamiento calentando el aire dentro del paralelepípedo. Como ejemplo, se supone que el aire interior está a 30°C y que se desea que llegue a 60°C (este valor representa  $T_1$  en la ecuación (2.10)), entonces, se fija esta última temperatura (set point) en el termostato.
- Seguidamente se coloca el porta muestra lleno con el alimento en el espacio respectivo, a continuación se conecta el enchufe bipolar del equipo a un tomacorriente y se levanta la llave térmica, haciendo que pase la corriente a la resistencia eléctrica y al led indicador. De esta forma se cierra el circuito eléctrico. El led permite observar si el circuito eléctrico está cerrado o abierto. El termostato, internamente tiene un relay (figura 3.2) que se mantiene cerrado mientras el aire interior no se llegue a la temperatura fijada en el termostato (set point). Cuando la temperatura del aire interior apenas exceda el valor del set point, el relay se abre y por ende también se abre el circuito eléctrico haciendo que la resistencia eléctrica se apague, de esta forma el led también se apaga indicando que el circuito eléctrico está abierto.
- En el este instante que el led se apague, se debe utilizar el pirómetro de radiación para hacer la medida de la temperatura de la superficie exterior del alimento (este valor representa  $T_3$  en la ecuación (2.10)).
- Después de realizar las pruebas o experimentos en el equipo se le debe apagar, para esto primeramente se baja la llave térmica y luego se desconecta el enchufe del tomacorriente al que está conectado.

## 4.2. INSTRUCCIONES PARA EL CÁLCULO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

- Para calcular  $P_R$  se aplica la ecuación (2.15). Si se desea realizar este cálculo de una manera más rápida se puede utilizar una hoja de cálculo de Excel, como se indica en la figura 4.1.
- El cálculo de  $\hat{Q}_{\text{Alimento}}$ , se realiza aplicando la ecuación (2.3). De la misma forma que para  $P_R$  el cálculo de  $\hat{Q}_{\text{Alimento}}$  se puede realizar de una manera rápida haciendo uso de la hoja de cálculo de Excel, como se indica en la figura 4.2.
- La temperatura  $T_2$ , se calcula haciendo uso de la ecuación (2.11) o también mediante la hoja de cálculo de Excel como se muestra en la figura 4.3.
- La temperatura a la cual se determina la conductividad térmica del alimento se denota como  $T_m$  y es la temperatura media entre  $T_2$  y  $T_3$ , es decir:  $T_m = \frac{T_2 + T_3}{2}$  (vease también la figura 4.4).
- El cálculo de la conductividad térmica del alimento  $k_{\text{Alimento}}$  se realiza utilizando la ecuación (2.10), o también se puede realizar haciendo uso de la hoja de cálculo de Excel como se indica en la figura 4.5.
- Los valores de  $T_m$  y  $k_{\text{Alimento}}$  se tabulan y grafican para que por medio de la regresión lineal se obtenga una ecuación de  $k_{\text{Alimento}}$  en función de la temperatura y hacerse la representación gráfica respectiva, esto se puede observar en la figura 4.6.
- Aunque el valor de  $T_3$ , se mide utilizando el pirómetro radiación, a manera de comprobar este valor se puede hacer uso de la ecuación (2.12). Pero para realizar esta comprobación, es necesario conocer los valores de cada uno de los términos que están en el miembro derecho de la ecuación (2.12).

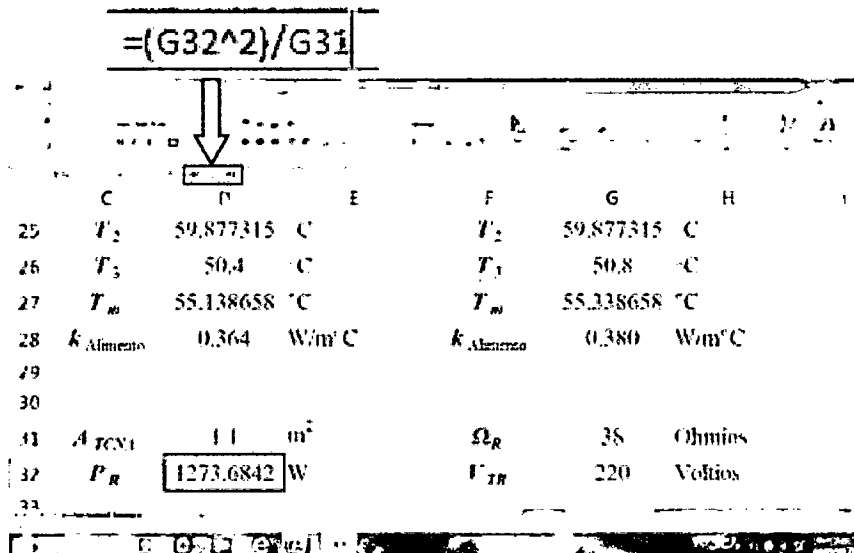


Figura 4.1. Cálculo de  $P_R$  utilizando la hoja de cálculo de Excel.

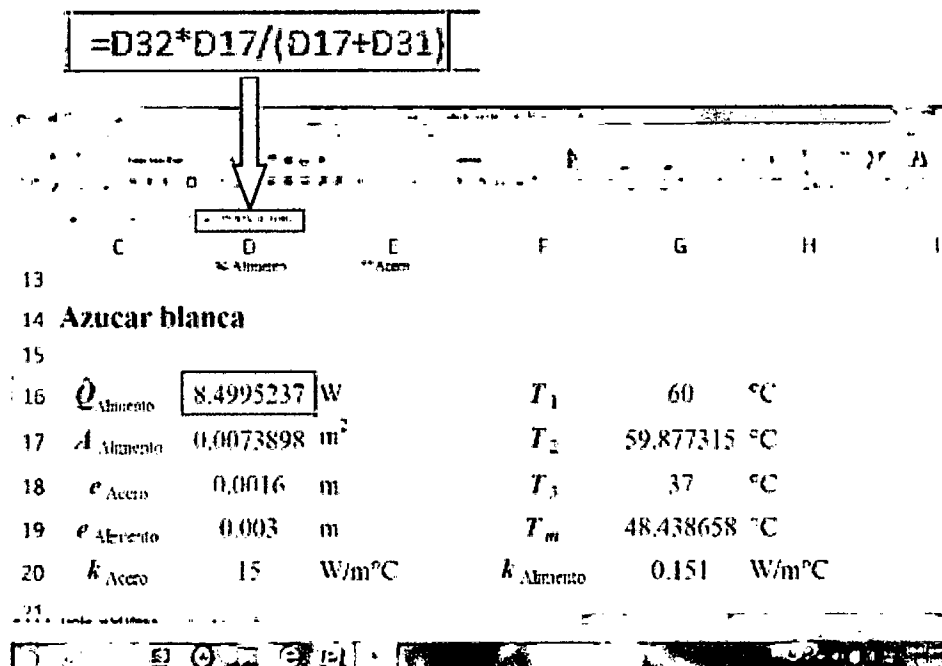


Figura 4.2. Cálculo de  $\dot{Q}_{Alimento}$  utilizando la hoja de cálculo de Excel.

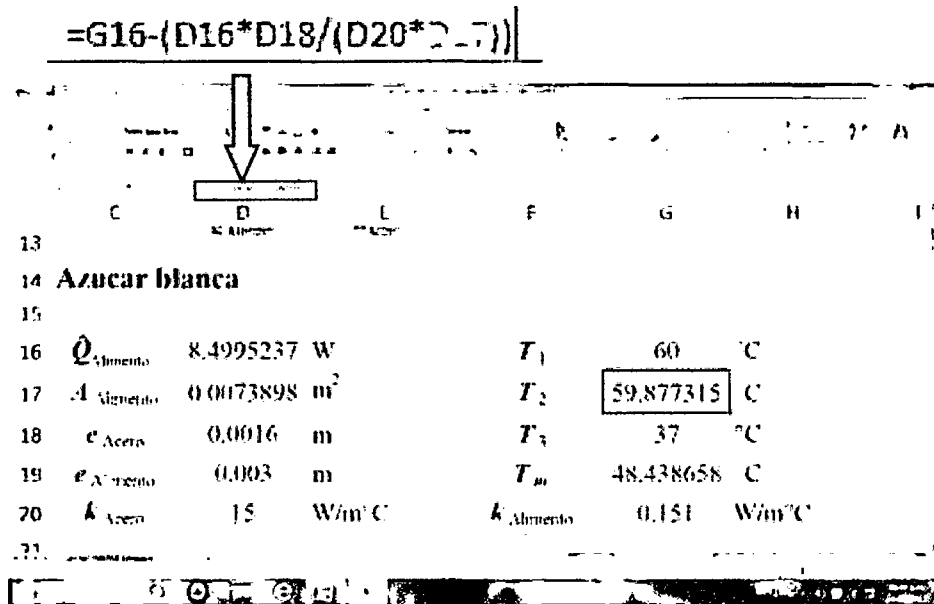


Figura 4.3. Cálculo de  $T_2$  utilizando la hoja de cálculo de Excel.

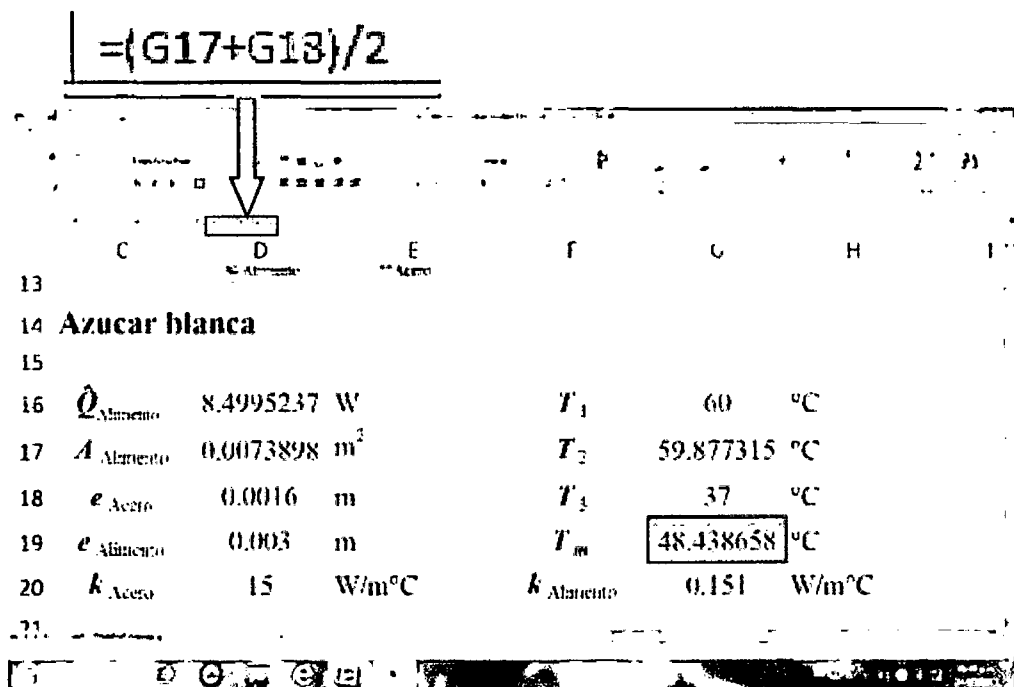


Figura 4.4. Cálculo de  $T_m$  utilizando la hoja de cálculo de Excel.

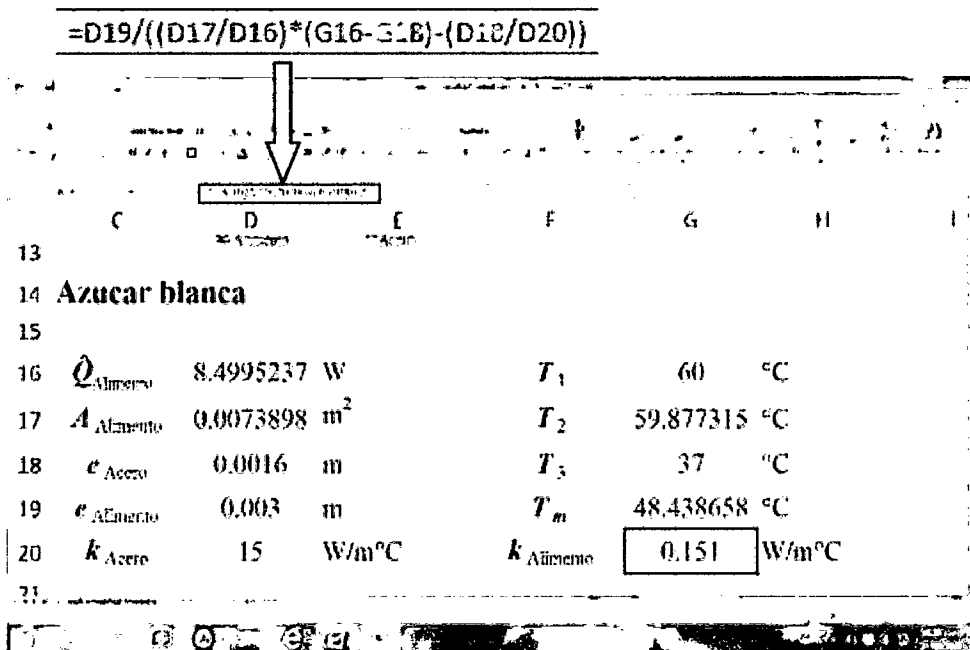


Figura 4.5. Cálculo de  $k_{Alimento}$  utilizando la hoja de cálculo de Excel.

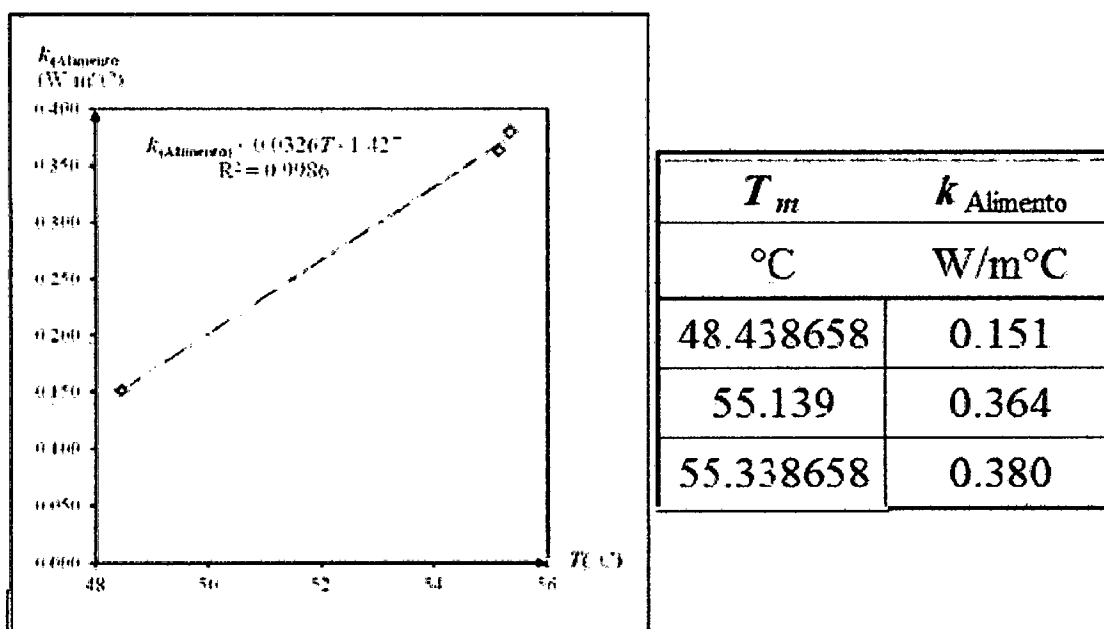


Figura 4.6. Representación gráfica de  $k_{Alimento}$  en función de la temperatura  $T$ .

### 4.3. ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

Se han efectuado siete pruebas, realizándose las siguientes mediciones:

#### Cuadro N° 01: Mediciones para la primera prueba

Alimento utilizado: Azúcar blanca

$T_1$ °C	$T_2$ °C	$T_3$ °C	$T_m$ °C	$e_{\text{Alimento}}$ mm	$k_{\text{Alimento}}$ W/m°C
60	59.877315	37	48.438658	3	0.151
60	59.877315	50.4	55.138658	3	0.364
60	59.877315	50.8	55.338658	3	0.380

#### Cuadro N° 02: Mediciones para la segunda prueba

Alimento utilizado: Azúcar blanca

$T_1$ °C	$T_2$ °C	$T_3$ °C	$T_m$ °C	$e_{\text{Alimento}}$ mm	$k_{\text{Alimento}}$ W/m°C
60	59.877315	35	47.438658	5	0.231
60	59.877315	44.8	52.338658	5	0.381
60	59.877315	45.1	52.488658	5	0.389

#### Cuadro N° 03: Mediciones para la tercera prueba

Alimento utilizado: Colado de plátano

$T_1$ °C	$T_2$ °C	$T_3$ °C	$T_m$ °C	$e_{\text{Alimento}}$ mm	$k_{\text{Alimento}}$ W/m°C
60	59.877315	38.8	49.338658	3	0.164
60	59.877315	39.6	49.738658	3	0.170
60	59.877315	39.8	49.838658	3	0.172

**Cuadro N° 04: Mediciones para la cuarta prueba**

Alimento utilizado: Colado de plátano

$T_1$ °C	$T_2$ °C	$T_3$ °C	$T_m$ °C	$e_{\text{Alimento}}$ mm	$k_{\text{Alimento}}$ W/m°C
70	69.877315	35.2	52.538658	5	0.166
70	69.877315	36.7	53.288658	5	0.173
70	69.877315	38.1	53.988658	5	0.181

**Cuadro N° 05: Mediciones para la quinta prueba**

Alimento utilizado: Jamonada de cerdo

$T_1$ °C	$T_2$ °C	$T_3$ °C	$T_m$ °C	$e_{\text{Alimento}}$ mm	$k_{\text{Alimento}}$ W/m°C
60	59.877315	36.6	48.238658	3	0.148
60	59.877315	37.2	48.538658	3	0.152
60	59.877315	39.4	49.838658	3	0.169

**Cuadro N° 06: Mediciones para la sexta prueba**

Alimento utilizado: Jamonada de cerdo

$T_1$ °C	$T_2$ °C	$T_3$ °C	$T_m$ °C	$e_{\text{Alimento}}$ mm	$k_{\text{Alimento}}$ W/m°C
70	69.877315	34.2	52.038658	5	0.161
70	69.877315	36.5	53.188658	5	0.172
70	69.877315	38.7	54.288658	5	0.184

**Cuadro N° 07: Mediciones para la séptima prueba**

Alimento utilizado: Esencia de vainilla

$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_m$	$e_{\text{Alimento}}$	$k_{\text{Alimento}}$
°C	°C	°C	°C	mm	W/m°C
60	59.877315	31.6	45.731892	5	0.136
60	59.877315	38.4	49.131892	5	0.178
60	59.877315	38	48.931892	5	0.175

Para todas las pruebas realizadas, los valores de  $V_{TR}$ ,  $\Omega_R$ ,  $P_R$ ,  $\hat{Q}_{\text{Alimento}}$ ,  $A_{\text{Alimento}}$ ,  $A_{TCNA}$ ,  $e_{\text{Acero}}$  y  $k_{\text{Acero}}$  fueron:

$$V_{TR} = 220 \text{ V}, \Omega_R = 38 \text{ Ohmios}, e_{\text{Acero}} = 0.0016 \text{ m} = 1.6 \text{ mm}, k_{\text{Acero}} = 15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Haciendo uso de la ecuación (1.35) para calcular  $P_R$

$$P_R = \frac{(220)^2}{38} = 1273.6842 \text{ W}$$

$$A_{\text{Alimento}} = \frac{\pi}{4} d_{\text{pm}}^2 = \frac{\pi}{4} \times (0.097 \text{ m})^2 = 0.0073898 \text{ m}^2$$

$d_{\text{pm}}$  : Diámetro de la porta muestra.

$$A_{TCNA} = 4 \times 0.55 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} = 1.1 \text{ m}^2$$

Aplicando la ecuación (2.3) para calcular  $\hat{Q}_{\text{Alimento}}$

$$\hat{Q}_{\text{Alimento}} = \frac{A_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}} + A_{TCNA}} P_R = \frac{0.0073898}{0.0073898 + 1.1} \times 1273.6842 = 8.4995237 \text{ W}$$



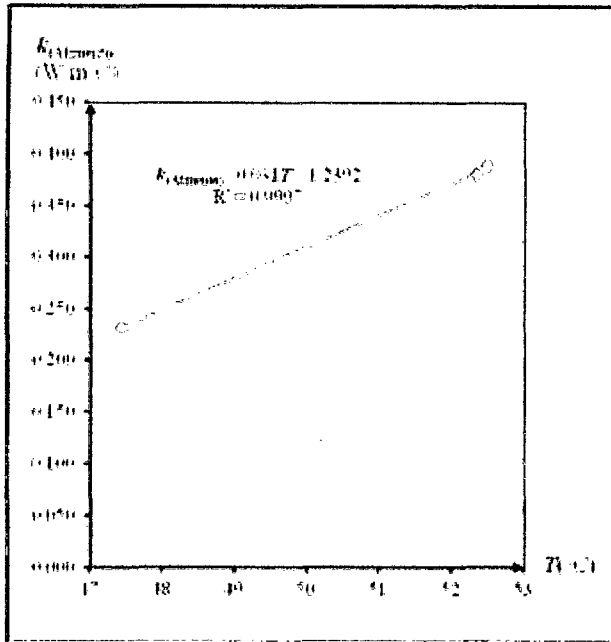


Figura 4.7. Representación gráfica de  $k_{\text{Alimento}}$  en función de la temperatura  $T$ , correspondiente a la segunda prueba.

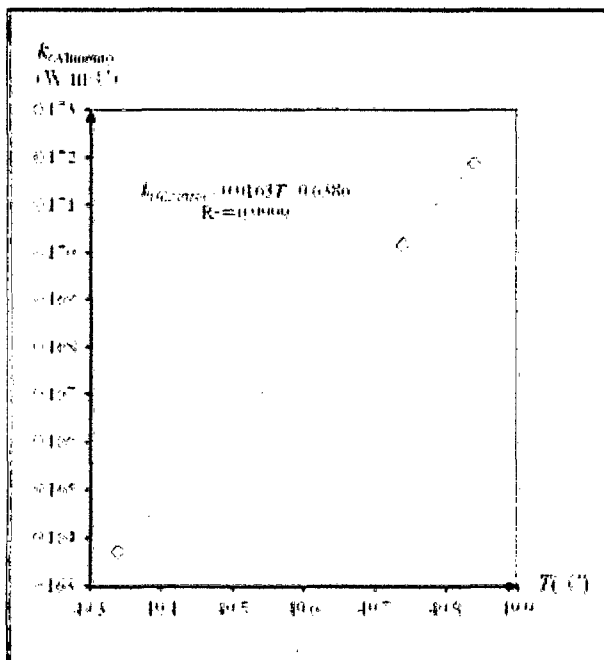
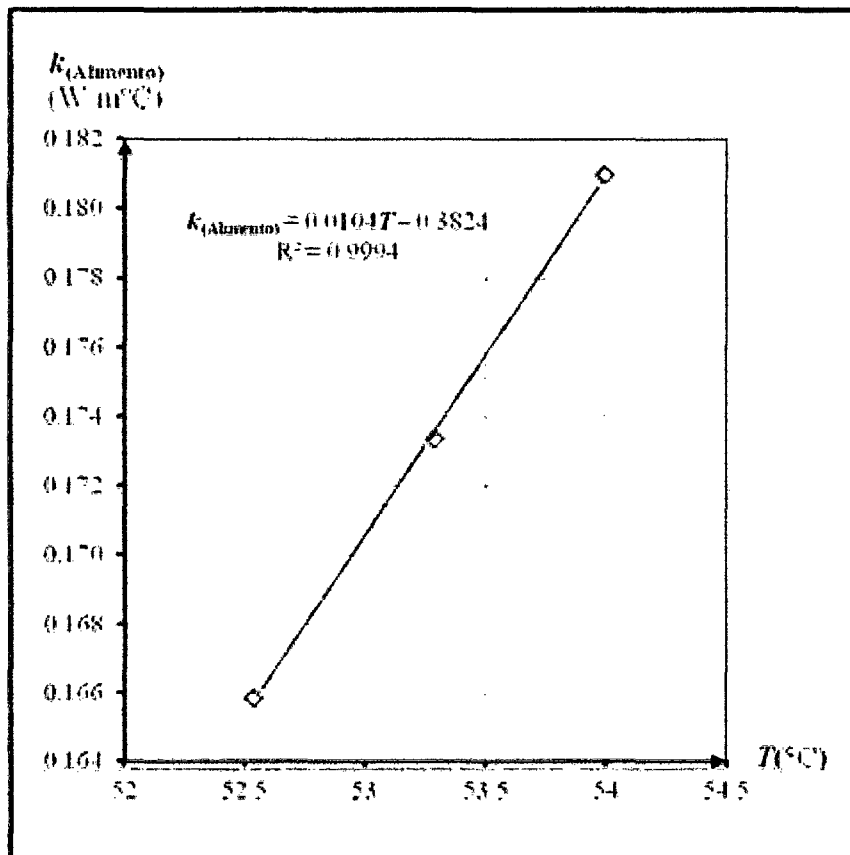


Figura 4.8. Representación gráfica de  $k_{\text{Alimento}}$  en función de la temperatura  $T$ , correspondiente a la tercera prueba.

La tercera y cuarta prueba se han realizado utilizando colado de plátano.

De la tercera prueba se obtuvo la ecuación  $k_{\text{Alimento}} = 0.0163T - 0.6386$ , para un intervalo de temperatura de 49.338658 a 49.838658 °C (figura 4.8).

De la cuarta prueba se obtuvo la ecuación  $k_{\text{Alimento}} = 0.0104T - 0.3824$ , para un intervalo de temperatura de 52.538658 a 53.988658 °C (figura 4.9).

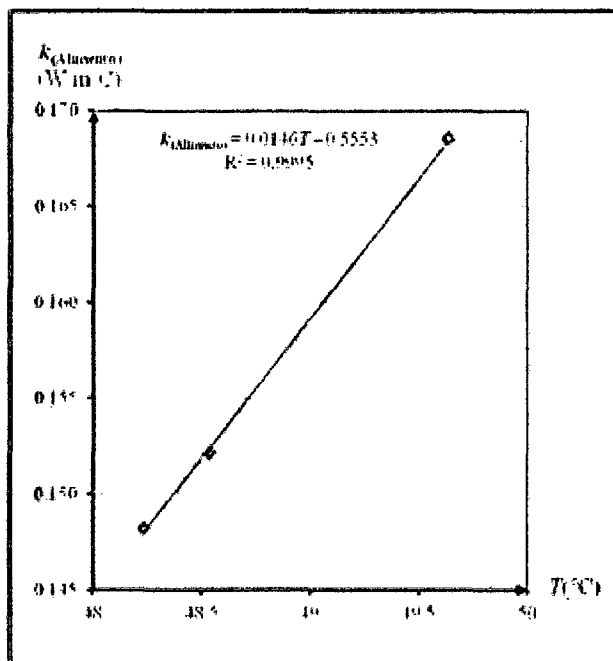


**Figura 4.9.** Representación gráfica de  $k_{\text{Alimento}}$  en función de la temperatura  $T$ , correspondiente a la cuarta prueba.

La cuarta y quinta prueba se han realizado utilizando jamonada de cerdo.

De la quinta prueba se obtuvo la ecuación  $k_{\text{Alimento}} = 0.0146T - 0.5553$ , para un intervalo de temperatura de 48.238658 a 49.638658 °C (figura 4.10).

De la sexta prueba se obtuvo la ecuación  $k_{\text{Alimento}} = 0.0103T - 0.3769$ , para un intervalo de temperatura de 52.038658 a 54.288658 °C (figura 4.11).



**Figura 4.10.** Representación gráfica de  $k_{\text{Alimento}}$  en función de la temperatura  $T$ , correspondiente a la quinta prueba.

Se puede observar de la quinta y sexta prueba, que la ecuación  $k_{\text{Alimento}} = 0.0103T - 0.3769$ , permite calcular el valor de  $k_{\text{Alimento}}$  para un intervalo de temperatura mayor que la ecuación  $k_{\text{Alimento}} = 0.0146T - 0.5553$ . Es decir, si desearíamos calcular el valor de  $k_{\text{Alimento}}$  a 53.5°C, se remplazaría el valor de esta temperatura en la ecuación  $k_{\text{Alimento}} = 0.0146T - 0.5553$ , es decir:

$$k_{\text{Alimento}} = 0.0146 \times 53.5 - 0.5553 = 0.2258 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

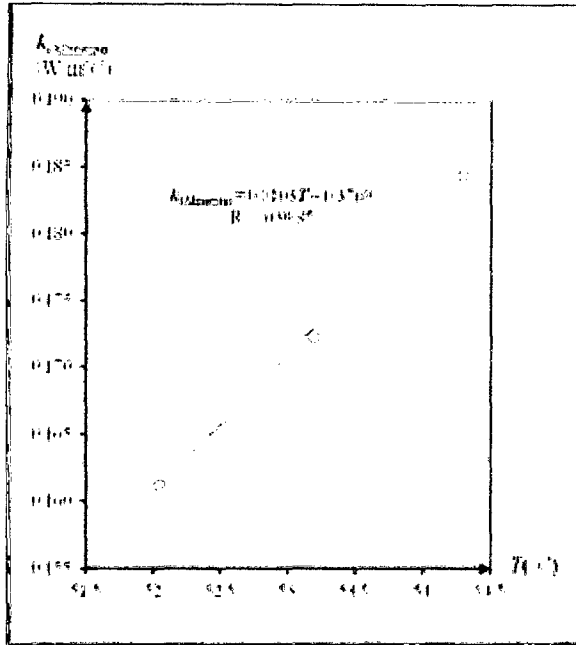


Figura 4.11. Representación gráfica de  $k_{\text{Alimento}}$  en función de la temperatura  $T$ , correspondiente a la sexta prueba.

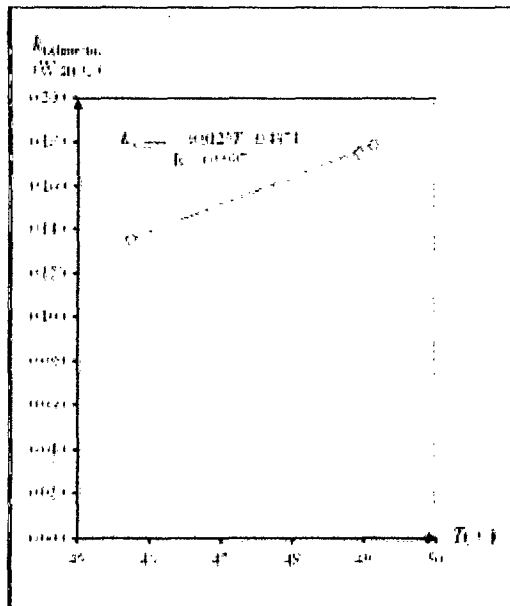
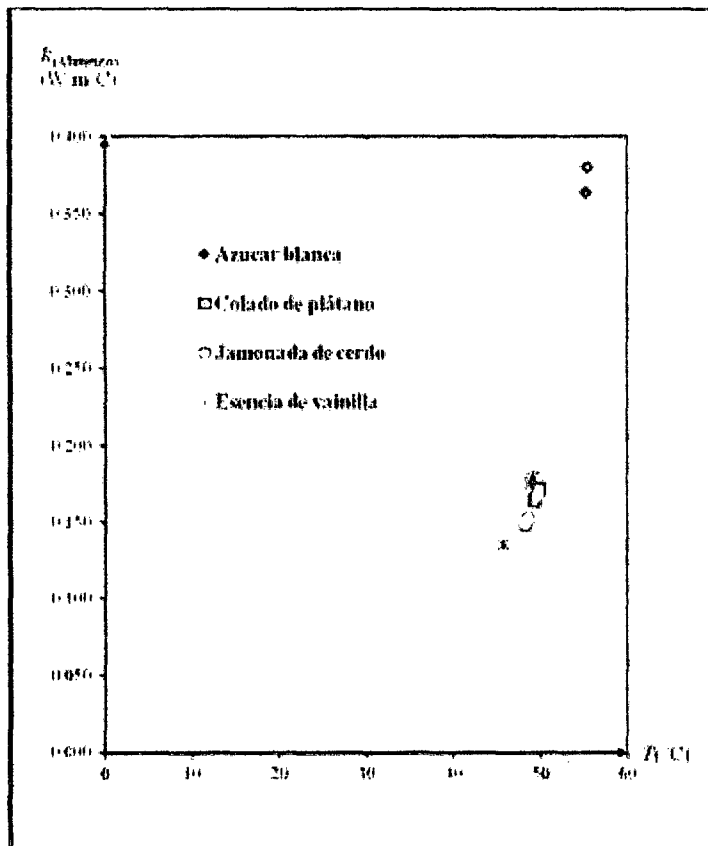


Figura 4.12. Representación gráfica de  $k_{\text{Alimento}}$  en función de la temperatura  $T$ , correspondiente a la séptima prueba.

Para las siete pruebas que se realizaron, se puede observar que la conductividad térmica de los alimentos, es del orden  $10^{-1}$  en las unidades  $W/m^{\circ}C$ . Esto se puede comparar con los resultados de otras investigaciones, las cuales se muestran en las tablas 1 y 2. Además, se puede observar en los resultados de las siete pruebas que  $R^2$  es bien cercano a 1, es decir  $R^2 \cong 1$ . Esto indica el tremendo grado de correlación entre la conductividad térmica  $k_{\text{Alimento}}$  y la temperatura  $T$ , al realizarse la regresión lineal. Si se compara cuál de los alimentos utilizados en los experimentos tiene la conductividad térmica más alta, se observa que la azúcar blanca ocupa el primer lugar (figura 4.13), estando en el último lugar la esencia de vainilla. Esto indica que la conductividad térmica para alimentos sigue el siguiente orden: sólidos, pastosos y líquidos.



**Figura 4.13.** Comparación de la conductividad térmica como función de la temperatura, para los alimentos utilizados en el presente trabajo.

Tabla 1: Conductividad térmica del algarrobo para diferentes contenidos de humedad.

Ensayo N°	Peso (g)	Contenido de Humedad (%)	Conductiv Térmica $\lambda$ (Joule/seg $^{\circ}$ C. $\cdot$ m)
1	3137	0.900	0.22108
2	3253	3.602	0.21180
3	3294	5.994	0.27594
4	4114	31.244	0.29367

Tabla 1: valores característicos de la muestra [1].

Fuente: Martina , et al (2004).

Tabla 2: Conductividad térmica para muestras de carne de cerdo.

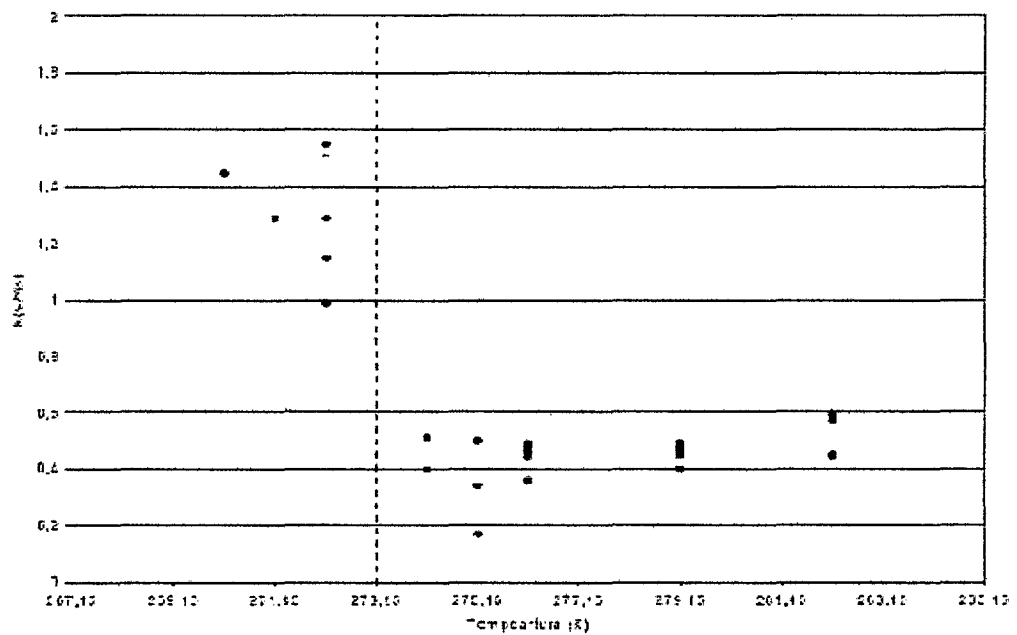


Figura 2 Valores Conductividad Térmica para muestras de cerdo  
 Figure 2. Thermal Conductivity data for pork meat

Fuente: Ochoa , Amézquita y Chejne (2005).

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS DE COSTO

#### 5.1. COSTO DE DISEÑO

**Cuadro N° 08: Costo de diseño**

SERVICIO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Diseño del equipo	1	150	150
Consultoría y asesoramiento especializado en el desarrollo del informe final	-	1200	1200
Consultoría y asesoramiento especializado en informática (elaboración de hojas de cálculos en Excel)	-	150	150
<b>TOTAL</b>			<b>1500</b>

#### 5.2. COSTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN

**Cuadro N° 09: Costo de construcción e instalación**

SERVICIO	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Mano de obra de la construcción del equipo (incluye pernos)	350	350
Instalaciones eléctricas	100	100
Pruebas de funcionamiento del equipo	150	150
<b>TOTAL</b>		<b>600</b>

### 5.3. COSTO DE MATERIALES

**Cuadro N° 10: Costo de materiales**

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Plancha de acero inoxidable ASTM N°304	2	740	1480
Resistencia eléctrica	1	80	80
Llave térmica (2×16 Amperios)	1	25	25
Termostato	1	100	100
Pirómetro de radiación	1	369	369
Foco indicador (led)	1	2	2
Cable asbestado	3 m	3	9
Lana de vidrio	2 m	25	50
Cable vulcanizado (AWG N°2×14)	3 m	4	12
Enchufe bipolar (220 V)	1	5	5
Tuerca de ajuste	1	3	3
<b>TOTAL</b>			<b>2135</b>

### 5.4. OTROS COSTOS

**Cuadro N° 11: Otros costos**

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Impresiones del informe final	10	25	250
Encuadernados	10	20	200
Pasajes y otros gastos	-	300	300
<b>TOTAL</b>			<b>750</b>

### 5.5. COSTO TOTAL

$$C \text{ TOTAL (S.)} = 1500 + 600 + 2135 + 750 = 4985$$



## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- Se diseñó, construyó e instaló un equipo para medir la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos.
- Se aplicó la ecuación general de balance energía y los mecanismos básicos de la transferencia de calor obteniéndose las ecuaciones que relacionan a los parámetros y variables más importantes involucradas en el experimento que se lleva a cabo en el equipo, deduciéndose de este modo una ecuación que permite calcular la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos.
- Se determinó los parámetros y variables más importantes involucradas en el experimento llevado a cabo en el equipo. Esto permitió desarrollar un proceso (algoritmo), para el cálculo de la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos.
- Se ha desarrollado un algoritmo de cálculo donde se puede notar claramente todo el proceso de cálculo de la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos. Mediante este algoritmo se ha elaborado las hojas de cálculo en Excel, de manera que el cálculo de la conductividad térmica se haga de una manera rápida al momento de llevarse a cabo el experimento en el equipo.
- Se muestran los resultados y cálculos que se realizaron en las siete pruebas del equipo, utilizando diferentes alimentos, de lo cual se concluye que la ecuación

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{e_{\text{Alimento}}}{\frac{A_{\text{Alimento}} (T_1 - T_3)}{\hat{Q}_{\text{Alimento}}} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}} \quad \text{deducida en la sección 1.6, es válida para}$$

calcular la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos (modelo

matemático), pues los valores experimentales son del mismo orden que los que se obtienen mediante esta ecuación.

- Se determinó el costo total para el equipo, de esta manera se tendrá una referencia de cuánto costaría construir un equipo similar.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Realizar siempre una inspección para ver si la resistencia eléctrica está funcionando correctamente, esto se puede realizar utilizando un medidor de voltaje y ohmioje para calcular la potencia real con la ecuación  $P_R = \frac{(V_{TR})^2}{\Omega_R}$  y compararla con la potencia nominal. También con el medidor de voltaje se puede verificar si en las paredes del equipo no hay continuidad eléctrica, es decir probar si algún cable que conecta a la resistencia eléctrica o al termostato está haciendo tierra, esto se debe realizar con el fin de evitar accidentes.
- Realizar otros estudios a intervalos de temperaturas más bajas a las que se trabajó en los experimentos. Esto con el fin de obtener ecuaciones que relacionen a la conductividad térmica con la temperatura.
- Realizar otros estudios en el equipo, variando la potencia de la resistencia eléctrica.
- Se recomienda que cuando se instale el equipo en el mencionado laboratorio, éste deberá conectarse a un tomacorriente de uso exclusivo del equipo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Bardales E A, Ruiz R, Trigoso E S (2008). “Diseño, construcción e instalación de un equipo para medir la conductividad térmica de materiales sólidos”. Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Iquitos-Perú.
- Carrasco L. (2005). Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa. Editorial San Marcos. Primera edición.
- Cortés L y Méndez E. (2006). “Evaluación de la transferencia de calor radial por el espacio anular de la placa caliente de un aparato para medir conductividad térmica”. Laboratorio de propiedades termo-físicas del Centro Nacional de Metrología (CENAM) de la ciudad de Querétaro en México.
- Domínguez M. (2010). “Medida simultánea de propiedades térmicas: conductividad, calor específico y calor latente”. Instituto del Frío CSIC de la ciudad de Madrid en España.
- Felder R M, Rousseau R W. (2005). Principios elementales de los procesos químicos. Editorial Limusa Wiley. Tercera edición.
- Geankoplis C J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Compañía Editorial Continental S.A. (CECSA). Tercera edición.
- Giraldo G, et al. (2010). Propiedades termo-físicas del jugo concentrado de lulo a temperaturas por encima del punto de congelación. Universidad de Campiñas, Saó Paulo Brasil.
- Holman J P. (1999). Transferencia de calor. Compañía Editorial Continental S.A. (CECSA). Decima reimpresión.

- Kern D. (2001). Procesos de transferencia de calor. Editorial Mc Graw Hill. Trigésima edición.
- Martina P, et al. (2004). Determinación de la conductividad térmica del algarrobo para distintos contenidos de humedad, mediante un equipo de placa caliente. Universidad Nacional del Nordeste de la República de Argentina.
- Ochoa O, Amézquita A y Chejne F. (2005). Recopilación de las publicaciones sobre los métodos utilizados para medir las propiedades termo-físicas de la carne. Instituto de Energía de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín-Colombia.

**ANEXO**

ANEXO 1: Cálculos realizados.

## PRIMERA PRUEBA

Cálculo de  $T_m$  y  $k_{\text{Alimento}}$

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315^\circ\text{C} \\ T_3 = 37^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 37)^\circ\text{C}}{2} = 48.438658^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}} (T_1 - T_3)} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{15}} = \frac{\frac{0.003}{0.0073898 \times (60 - 37)} - \frac{0.0016}{8.4995237}}{15} = 0.151 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315^\circ\text{C} \\ T_3 = 50.4^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 50.4)^\circ\text{C}}{2} = 55.138658^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}} (T_1 - T_3)} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{15}} = \frac{\frac{0.003}{0.0073898 \times (60 - 50.4)} - \frac{0.0016}{8.4995237}}{15} = 0.364 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315^\circ\text{C} \\ T_3 = 50.8^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 50.8)^\circ\text{C}}{2} = 55.338658^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{\frac{0.003}{0.0073898 \times (60 - 50.8)}}{\frac{8.4995237}{15}} = 0.380 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

La ecuación que relaciona  $k_{\text{Alimento}}$  y la temperatura  $T$ , como resultado de la regresión lineal, se muestra en la figura 4.6.

## SEGUNDA PRUEBA

### Cálculo de $T_m$ y $k_{\text{Alimento}}$

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 35 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 35) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 47.438658 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{\frac{0.005}{0.0073898 \times (60 - 35)}}{\frac{8.4995237}{15}} = 0.231 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 44.8 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 44.8) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 52.338658 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{\frac{0.005}{0.0073898 \times (60 - 44.8)}}{\frac{8.4995237}{15}} = 0.381 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315^\circ\text{C} \\ T_3 = 45.1^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 45.1)^\circ\text{C}}{2} = 52.488658^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{\frac{0.005}{0.0073898 \times (60 - 45.1)}}{\frac{8.4995237}{15}} = 0.389 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

### TERCERA PRUEBA

Cálculo de  $T_m$  y  $k_{\text{Alimento}}$

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315^\circ\text{C} \\ T_3 = 38.8^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 38.8)^\circ\text{C}}{2} = 49.338658^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{\frac{0.003}{0.0073898 \times (60 - 38.8)}}{\frac{8.4995237}{15}} = 0.164 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315^\circ\text{C} \\ T_3 = 39.6^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 39.6)^\circ\text{C}}{2} = 49.738658^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{\frac{0.003}{0.0073898 \times (60 - 39.6)}}{\frac{8.4995237}{15}} = 0.170 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---



$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 39.8 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 39.8) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 49.838658 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{\frac{0.003}{0.0073898 \times (60 - 39.8)} - \frac{0.0016}{15}}{\frac{8.4995237}{15}} = 0.172 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

## CUARTA PRUEBA

Cálculo de  $T_m$  y  $k_{\text{Alimento}}$

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 69.877315 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 35.2 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(69.877315 + 35.2) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 52.538658 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{\frac{0.005}{0.0073898 \times (70 - 35.2)} - \frac{0.0016}{15}}{\frac{8.4995237}{15}} = 0.166 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 69.877315 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 36.7 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(69.877315 + 36.7) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 53.288658 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{\frac{0.005}{0.0073898 \times (70 - 36.7)} - \frac{0.0016}{15}}{\frac{8.4995237}{15}} = 0.173 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 69.877315 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 38.1 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(69.877315 + 38.1) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 53.988658 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{0.005}{\frac{0.0073898 \times (70 - 38.1)}{8.4995237} - \frac{0.0016}{15}} = 0.181 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

## QUINTA PRUEBA

**Cálculo de  $T_m$  y  $k_{\text{Alimento}}$**

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 36.6 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 36.6) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 48.238658 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{0.003}{\frac{0.0073898 \times (60 - 36.6)}{8.4995237} - \frac{0.0016}{15}} = 0.148 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 37.2 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 37.2) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 48.538658 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{e_{\text{Alimento}}}{\frac{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}{\dot{Q}_{\text{Alimento}}} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{0.003}{\frac{0.0073898 \times (60 - 37.2)}{8.4995237} - \frac{0.0016}{15}} = 0.152 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.877315^\circ\text{C} \\ T_3 = 39.4^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.877315 + 39.4)^\circ\text{C}}{2} = 49.638658^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{e_{\text{Alimento}}}{\frac{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}{\dot{Q}_{\text{Alimento}}} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{0.003}{\frac{0.0073898 \times (60 - 39.4)}{8.4995237} - \frac{0.0016}{15}} = 0.169 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

## SEXTA PRUEBA

Cálculo de  $T_m$  y  $k_{\text{Alimento}}$

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 69.877315^\circ\text{C} \\ T_3 = 34.2^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(69.877315 + 34.2)^\circ\text{C}}{2} = 52.038658^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{e_{\text{Alimento}}}{\frac{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}{\dot{Q}_{\text{Alimento}}} - \frac{e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{0.005}{\frac{0.0073898 \times (70 - 34.2)}{8.4995237} - \frac{0.0016}{15}} = 0.161 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 69.877315^\circ\text{C} \\ T_3 = 36.5^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(69.877315 + 36.5)^\circ\text{C}}{2} = 53.188658^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{0.005}{\frac{0.0073898 \times (70 - 36.5)}{8.4995237} - \frac{0.0016}{15}} = 0.172 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 69.877315 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 38.7 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(69.877315 + 38.7) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 54.288658 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{0.005}{\frac{0.0073898 \times (70 - 38.7)}{8.4995237} - \frac{0.0016}{15}} = 0.184 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

---

## SÉPTIMA PRUEBA

Cálculo de  $T_m$  y  $k_{\text{Alimento}}$

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.863785 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 31.6 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.863785 + 31.6) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 45.731892 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{0.003}{\frac{0.0073898 \times (60 - 31.6)}{8.4995237} - \frac{0.0016}{15}} = 0.136 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.863785 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 38.4 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.863785 + 38.4) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 49.131892 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{0.003}{\frac{0.0073898 \times (60 - 38.4)}{8.4995237} - \frac{0.0016}{15}} = 0.178 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$


---

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 59.863785 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 = 38 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_m = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{(59.863785 + 38) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 48.931892 \text{ }^\circ\text{C}$$

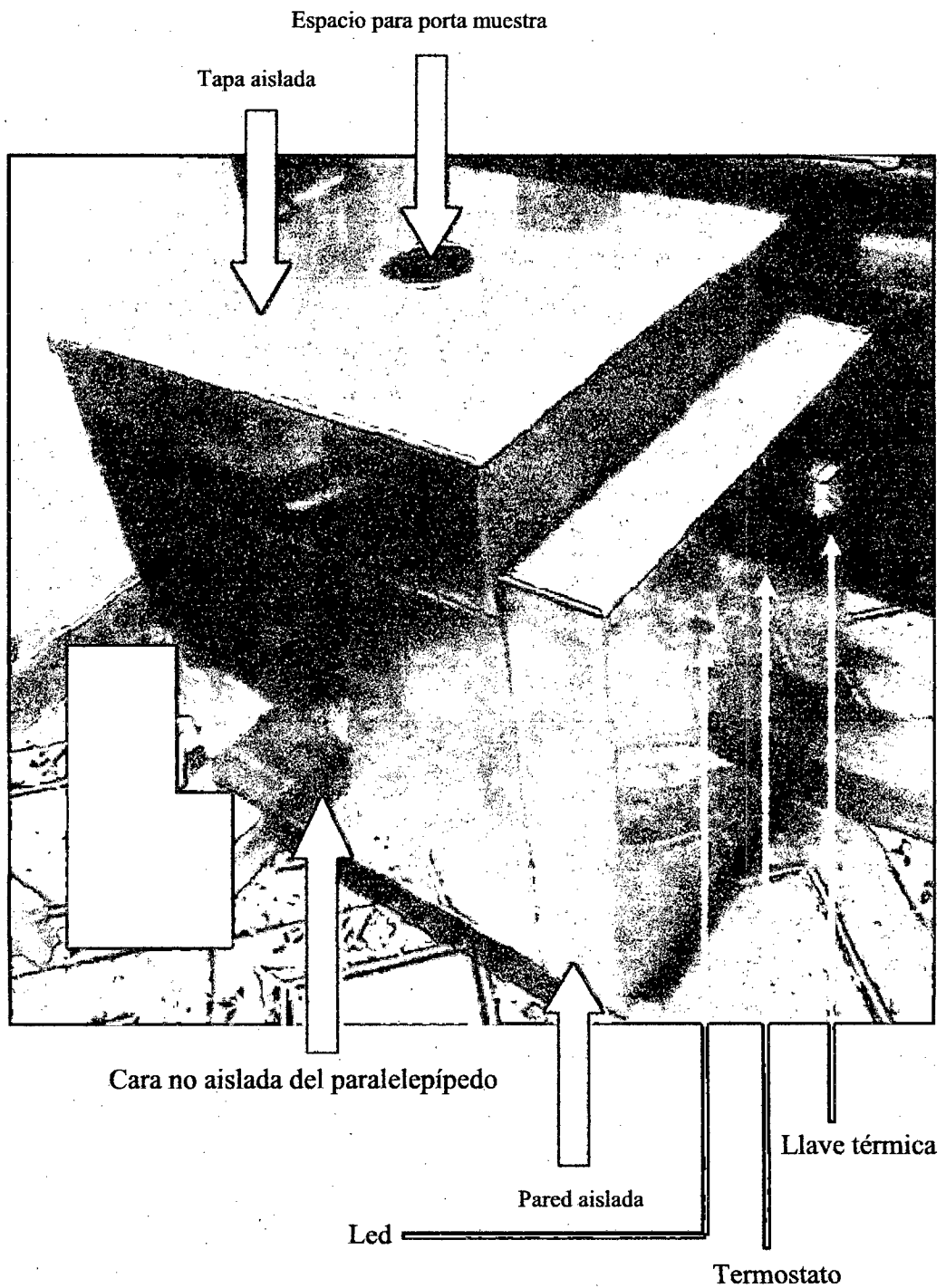
Aplicando la ecuación (2.10)

$$k_{\text{Alimento}} = \frac{\frac{e_{\text{Alimento}}}{A_{\text{Alimento}}(T_1 - T_3)}}{\frac{\dot{Q}_{\text{Alimento}}}{k_{\text{Acero}}}} = \frac{0.003}{\frac{0.0073898 \times (60 - 38)}{8.4995237} - \frac{0.0016}{15}} = 0.175 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

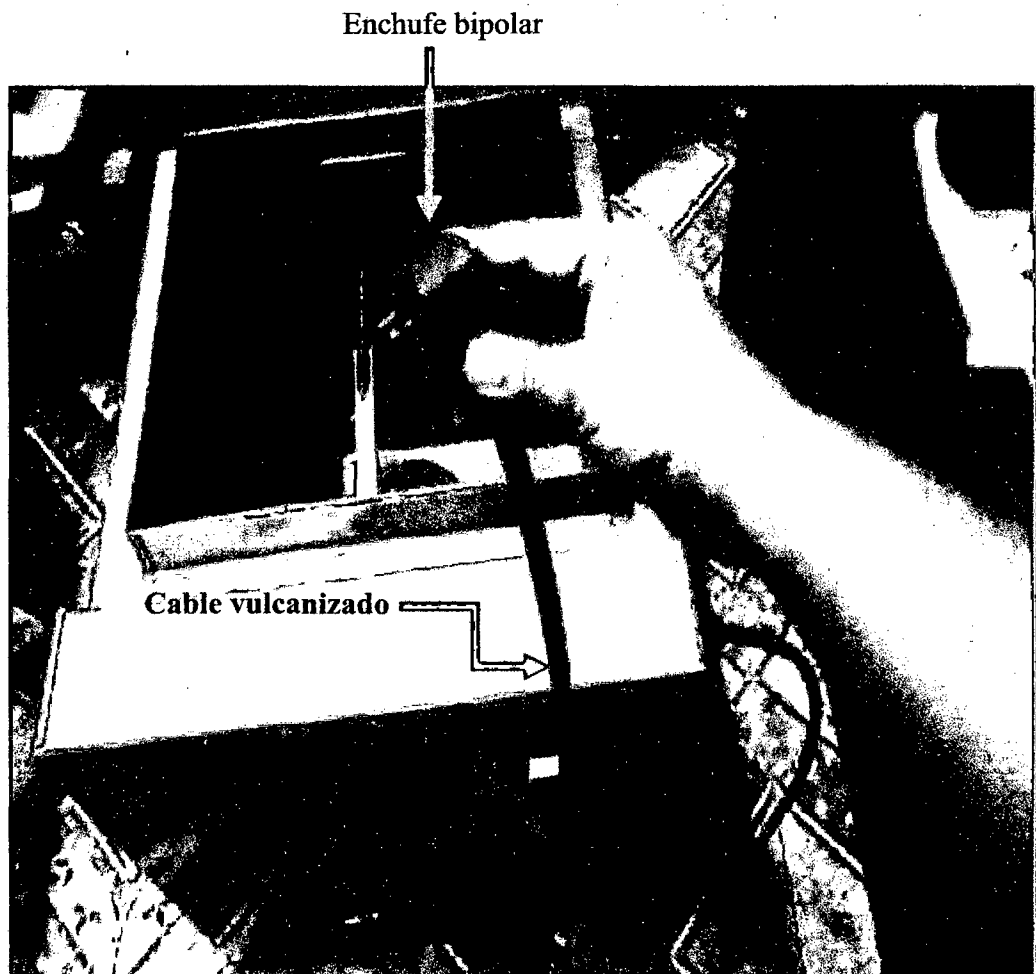

---

La séptima prueba se realizó utilizando esencia de vainilla, la ecuación que se obtuvo de  $k_{\text{Alimento}}$  en función de la temperatura  $T$  es:  $k_{\text{Alimento}} = 0.0125T - 0.4374$ , para un intervalo de temperatura de 45.731892 a 49.131892  $^\circ\text{C}$ . Por ejemplo, el valor de  $k_{\text{Alimento}}$  a 48  $^\circ\text{C}$ , se calcularía:  $k_{\text{Alimento}} = 0.0125 \times 48 - 0.4374 = 0.1626 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ . De este modo, se podría evaluar el valor de  $k_{\text{Alimento}}$  para cualquier valor de  $T$  dentro del intervalo [45.731892 a 49.131892  $^\circ\text{C}$ ].

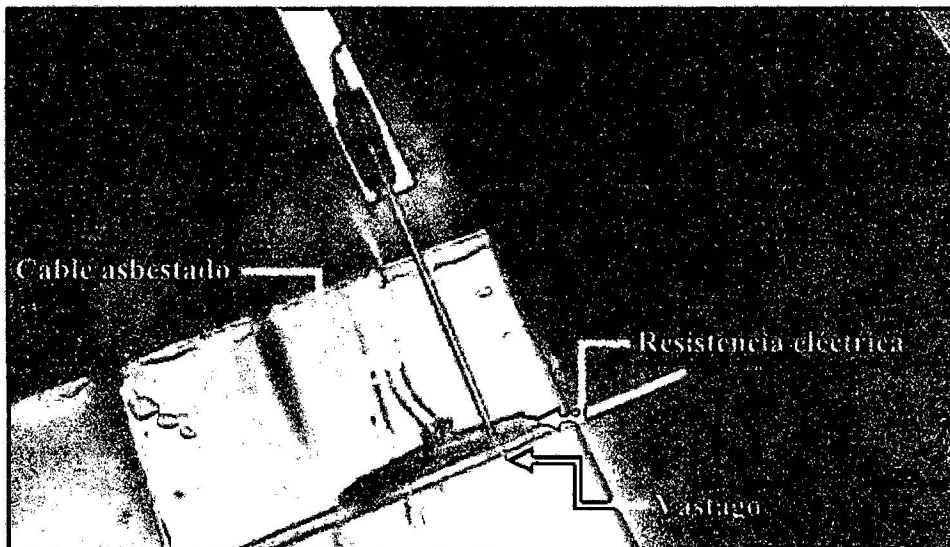
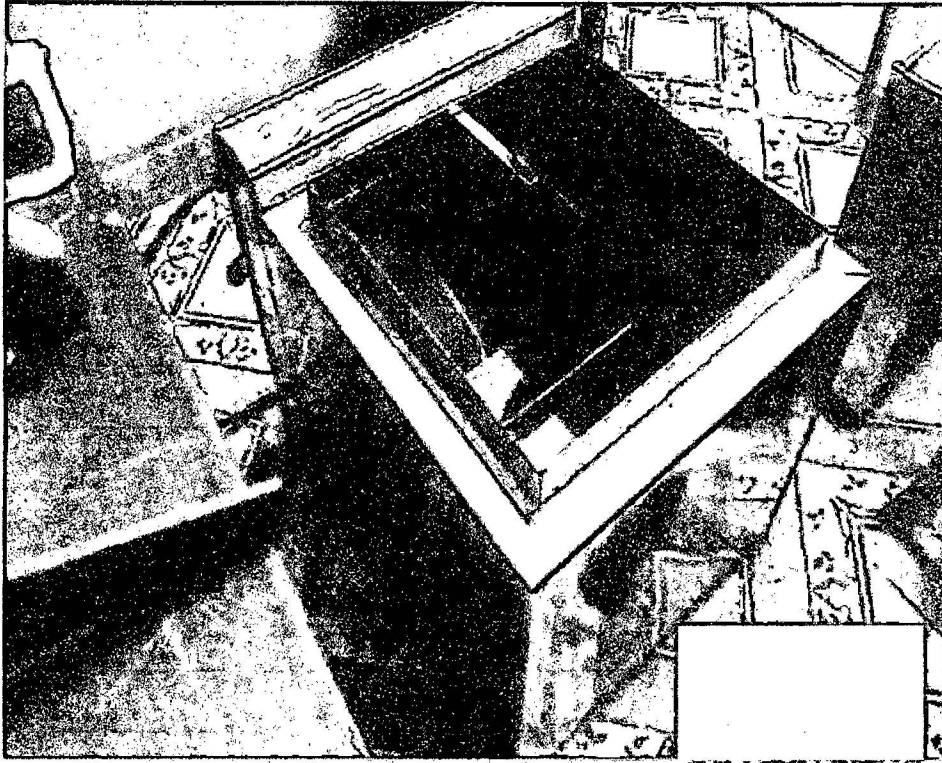
ANEXO 2: Vista completa del equipo.



ANEXO 3: Vista del enchufe bipolar.

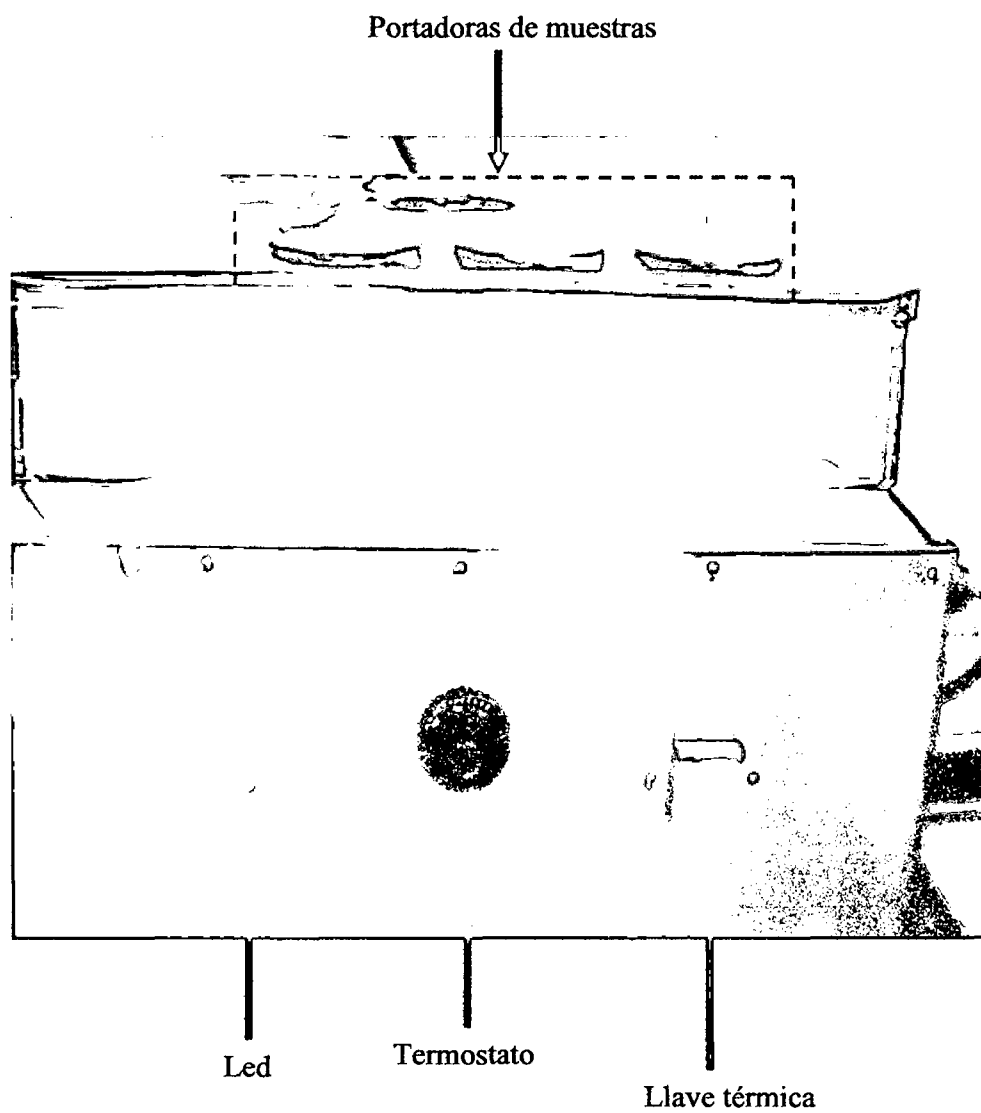


ANEXO 4: Vistas de la resistencia eléctrica y el vástago del termostato.





ANEXO 5: Vista del led, termostato, llave térmica y las portadoras de muestras.



ANEXO 6: Realizando la medida de la temperatura superficial.

