

Diseño, construcción e instalación de un equipo para medir la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos

Design, construction and installation of equipment for measuring the thermal conductivity of solids and viscous food

A. Paima A.¹, R. Ramos P.¹, J. Carranza G.² y R. Ruiz P.¹

Recibido: septiembre 2013

Aceptado: noviembre 2013

RESUMEN

Para la presente investigación se realizó una revisión específica de los mecanismos básicos de la transferencia de calor que permitió determinar los parámetros y variables para el diseño, construcción y operación a llevarse a cabo en el equipo. Se empleó un equipo que tiene la forma de un paralelepípedo de acero inoxidable con medidas de 50 × 55 × 55 cm, con la tapa y lado de los controles aislados con lana de vidrio de espesor de 10 cm, construido para determinar la conductividad térmica y realizar las pruebas de varios alimentos, con una temperatura interior de funcionamiento de 50 a 350 °C, con temperatura registrada por un sensor al interior del equipo conectado a un termostato para asegurarnos que esta no varíe y se mantenga constante; la temperatura superficial del alimento se mide haciendo uso de un termómetro infrarrojo o pirómetro de radiación en la investigación. De esta forma se ha idealizado el experimento a llevarse a cabo en el equipo, obteniéndose así las ecuaciones que relacionan los parámetros y variables que intervienen en el experimento que se lleva a cabo en el equipo, deduciéndose de este modo una ecuación que permita calcular la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos. Se emplearon diferentes materias primas para la determinación de sus conductividades térmicas: para 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 de 5 mm la conductividad térmica fue de 0,231 a 0,389 W/m °C; para 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 0,164 a 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; para 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. Se elaboraron hojas de cálculo en Excel donde se han programado las ecuaciones deducidas, y mediante estas hojas de cálculo también se pueden realizar simulaciones para determinar el perfil de temperatura a través del espesor del alimento.

Palabras claves: diseño, paralelepípedo, sensor, conductividad térmica, alimento pastoso, rangos de operación, simulación.

ABSTRACT

For this research, it was made a specific review of the basic mechanisms of heat transfer allowed to determine the parameters and variables for the design, construction and operation to be carried out on

¹Facultad de Industrias Alimentarias. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP). Iquitos, Loreto, Perú

²Facultad de Industrias Alimentarias. UNAP. Nauta 5ta cuadra, Iquitos, Loreto, Perú. jl.carranzag@hotmail.com

equipment. It was employed an equipment that has the shape of a parallelepiped stainless steel measuring $50 \times 55 \times 55$ cm, with top and side controls insulated with glass wool 10 cm thick, built to determine the thermal conductivity was used and testing of various foods, with an internal operating temperature of 50-350 °C, with temperature recorded by a sensor inside the unit connected to a thermostat to ensure that this does not change and remains constantly; the surface temperature of the food is measured using an infrared thermometer or pyrometer radiation research. Thus, it was an idealized experiment to be carried out on the equipment, to obtain the equations relating to the parameters and variables involved in the experiment carried out on the equipment, deducing thus an equation to calculate the thermal conductivity of solids and pasty foods. There were used different raw materials to determine their thermal conductivities: for white sugar in a temperature range of 48,44 to 55,34 °C with a thickness of 3 mm sample was heated conductivity 0,151 to 0,380 W/m °C and in a temperature range of 47,44 to 52,49 °C with a thickness of 5 mm sample thermal conductivity was 0,231 to 0,389 W/m °C; for casting banana in a temperature range of 49,34 to 49,84 °C with a thickness of 3 mm sample was heated conductivity 0,164 to 0,172 W/m °C and a temperature range of 52,54 to 53,99 °C with a thickness of 5 mm sample thermal conductivity was 0,166 to 0,181 W/m °C; for pig ham in a temperature range of 48,24 to 49,64 °C with a thickness of 3 mm sample was heat conductivity 0,148 to 0,169 W/m °C and a temperature range of 52,04 to 54,29 °C with a thickness of 5 mm sample thermal conductivity was 0,161 to 0,184 W/m °C; additionally, a test was performed with vanilla in a temperature range of 45,74 to 48,93 °C to a thickness of 3 mm obtained sample thermal conductivity of 0,136 to 0,175 W/m °C. Excel spreadsheets are scheduled where the derived equations, and using these spreadsheets can also perform simulations to determine the temperature profile through the thickness of the food is prepared.

Key words: design, parallelepiped sensor, thermal conductivity, doughy food, operating ranges, simulation.

INTRODUCCIÓN

Muchas veces cuando se tienen 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 con 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).

Conocer las propiedades de resistencia al paso del calor, es importante para realizar los cálculos en procesos que involucren calentamiento y enfriamiento así como también para el diseño de equipos; es así que, Ochoa *et al.* (2005) en su investigación sugiere que en un alimento se debe conocer la conduc-

tividad térmica, su difusividad, el calor específico, su densidad, etc.

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

$$\text{flujo } \alpha = \frac{\text{potencial}}{\text{resistencia}} \text{ (Bardales et al., 2008).}$$

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 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:

$$\dot{Q} = \frac{kA}{\Delta x}(T_1 - T_2).$$

Para el presente trabajo se considera la conductividad térmica (k) como constante, la cual puede expresarse en las siguientes unidades:

$$: \frac{W}{m \text{ } ^\circ C}, \frac{w}{m \text{ } K}, \frac{Btu}{h \text{ pie } ^\circ F}, \text{ etc.}$$

La conductividad térmica de los alimentos varía con el contenido de agua en su interior como se puede apreciar en la tabla 1 (Martina *et al.*, 2004).

MATERIAL Y MÉTODO

Materia prima

Para realizar el presente trabajo se emplearon materias primas con diferente contenido de humedad en su constitución para ver la influencia de este sobre la conductividad térmica. Las materias seleccionadas son: azúcar blanca, colado de plátano, jamonada de cerdo y esencia de vainilla, todos estos productos en la presentación en que son comercializados normalmente.

Diseño del equipo

El esquema del equipo que se construyó para el presente trabajo se muestra en la figura 1. Este equipo servirá para medir la conductividad térmica de alimentos. Como se puede observar, este equipo tiene la forma de un paralelepípedo, del cual cuatro 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 colocarán las muestras de los alimentos de los que se quiera medir su conductividad térmica. También se puede observar que el equipo posee una serie de componentes que cumplen una función específica cuando se ponga en funcionamiento; estos componentes son: resistencia eléctrica, termostato, llave térmica, led indicador y enchufe bipolar (220 V).

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

Ensayo	Peso (g)	Contenido de humedad (%)	Conductib. térmica λ (Joule/seg * $^\circ C$ * m)
1	3137	0,000	0,22108
2	3250	3,602	0,24180
3	3294	5,004	0,25594
4	4114	31,144	0,28367

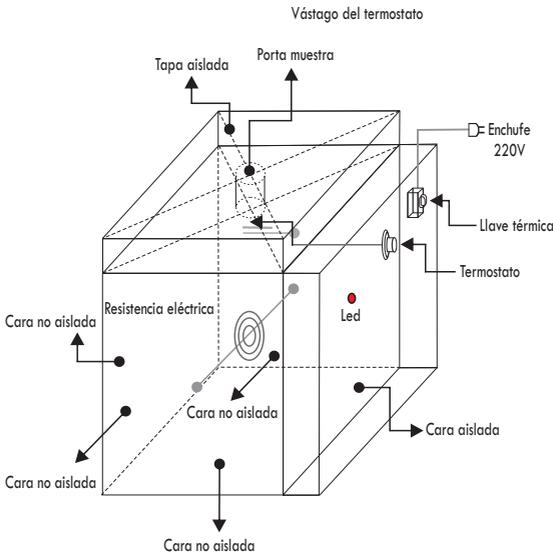


Figura 1. Esquema del diseño del equipo.

El flujo de calor será en forma unidireccional, es decir solo fluirá del interior del equipo hacia el exterior por la zona determinada para poner la muestra en estudio. En la figura 2 se presenta el esquema de la transferencia de calor por conducción y convección a través de paredes compuestas por discos según el modelo propuesto.

Para el análisis de la transferencia de calor seguiremos la dirección del flujo de calor. Este flujo de calor es unidireccional según lo estudiado por Cortés y Méndez (2006), donde el fluido caliente viene a ser el aire contenido dentro del equipo que es calentado por la resistencia eléctrica. La transferencia de calor del fluido caliente a la superficie inferior del disco 1, es por convección, entonces la ecuación que la representa es:

$$\dot{Q} = A h_{Fc} (T_{Fc} - T_1) \Rightarrow \frac{\dot{Q}}{A h_{Fc}} = (T_{Fc} - T_1) \quad (1)$$

h_{Fc} : coeficiente convectivo para el fluido caliente.

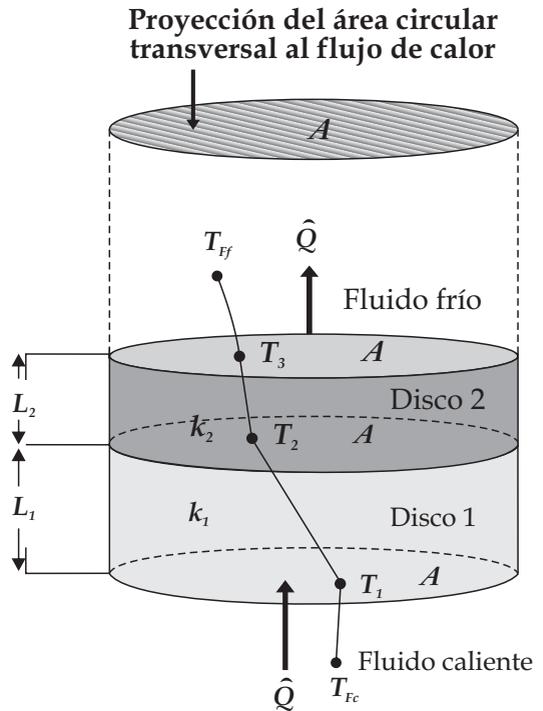


Figura 2. Esquema de la transferencia de calor por conducción y convección a través de paredes compuestas por discos.

La transferencia de calor de la superficie inferior a la superficie superior del disco 1, es por conducción, entonces la ecuación que la representa es:

$$\dot{Q} = \frac{k_1 A}{L_1} (T_1 - T_2) \Rightarrow \frac{\dot{Q} L_1}{k_1 A} = (T_1 - T_2) \quad (2)$$

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:

$$\dot{Q} = \frac{k_2 A}{L_2} (T_2 - T_3) \Rightarrow \frac{\dot{Q} L_2}{k_2 A} = (T_2 - T_3) \quad (3)$$

k_2 : conductividad térmica del disco 2.

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

$$\hat{Q} = A h_{Ff} (T_3 - T_{Ff}) \Rightarrow \frac{\hat{Q}}{A h_{Ff}} = (T_3 - T_{Ff}) \quad (4)$$

h_{Ff} : coeficiente convectivo para el fluido frío.

Donde:

T_{Fc} , T_{Ff} : temperaturas del fluido caliente y el fluido frío, 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 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), (2), (3) y (4) se tiene la ecuación (5), que es la transferencia de calor para los discos superpuestos del modelo.

$$\hat{Q} = \frac{T_{Fc} - T_{Ff}}{\left(\frac{1}{A h_{Fc}} + \frac{L_1}{A k_1} + \frac{L_2}{A k_2} + \frac{1}{A h_{Ff}} \right)} \quad (5)$$

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 equipo. La rapidez con la que la resistencia eléctrica disipa calor será igual a:

$$P_R = \hat{Q}_{TCNA} + \hat{Q}_{Alimento} + M_{(aire)} C_{v(aire)} \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

Donde:

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

\hat{Q}_{TCNA} , $\hat{Q}_{Alimento}$: 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 equipo (Watts).

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

• **Etapas estable**

En esta etapa la temperatura del aire dentro del paralelepípedo será estable. 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:

$$P_R = \hat{Q}_{TCNA} + \hat{Q}_{Alimento} \quad (7)$$

Entonces, la potencia que disipa la resistencia eléctrica se distribuirá dependiendo de las áreas A_{TCNA} y $A_{Alimento}$, es decir:

$$\hat{Q}_{Alimento} = \frac{A_{Alimento}}{A_{Alimento} + A_{TCNA}} P_R \quad (8)$$

A_{TCNA} : área total de las cuatro caras no aisladas.

$A_{Alimento}$: área de la superficie circular del alimento (m^2).

La ecuación (5) también se puede expresar de la siguiente manera:

$$\hat{Q}_{Alimento} = \frac{T_{ai} - T_{ae}}{\frac{1}{A_{Alimento}} \left(\frac{1}{h_{ai}} + \frac{e_{Acero}}{k_{Acero}} + \frac{e_{Alimento}}{k_{Alimento}} + \frac{1}{h_{ae}} \right)} \quad (9)$$

Donde:

h_{ai} : coeficiente convectivo del aire en el interior del equipo.

h_{ae} : coeficiente convectivo del aire en el exterior del equipo.

Para evitar calcular por separado h_{ai} y h_{ae} , a la ecuación (9) también se la puede expresar de la siguiente forma:

$$\hat{Q}_{Alimento} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{1}{A_{Alimento}} \left(\frac{e_{Acero}}{k_{Acero}} + \frac{e_{Alimento}}{k_{Alimento}} \right)} \quad (10)$$

Despejando $k_{Alimento}$ de la ecuación (10), se obtiene:

$$k_{Alimento} = \frac{e_{Alimento}}{\frac{A_{Alimento}(T_1 - T_3)}{\hat{Q}_{Alimento}} - \frac{e_{Acero}}{k_{Acero}}} \quad (11)$$

Con las ecuaciones deducidas se ilustra el proceso a seguir para el 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 los parámetros y variables del experimento a llevarse a cabo en el equipo.

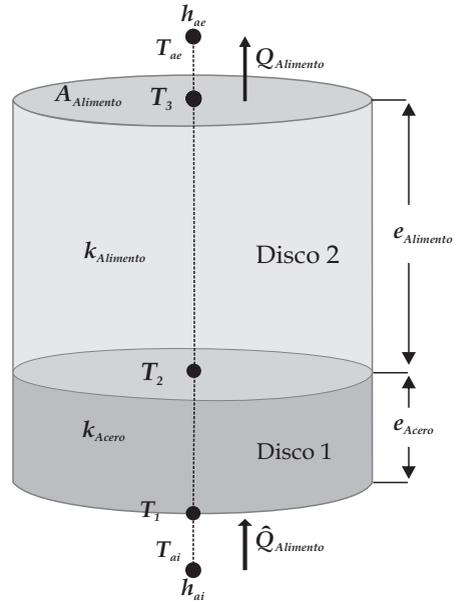


Figura 3. Flujo de calor a través del alimento.

Todas las ecuaciones se integran en un algoritmo para ser insertadas en una hoja de cálculo Excel como se muestra en la figura 4.

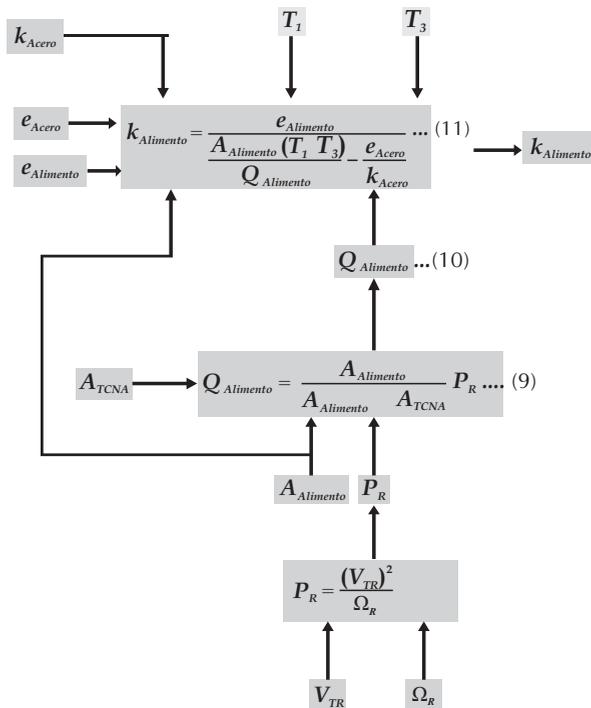


Figura 4. Algoritmo para el cálculo de la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos.

Parámetros más importantes para el diseño y construcción del equipo

Se refiere a las dimensiones del equipo y a 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.

Para determinar el espesor del aislante térmico (lana de vidrio), se considera que la pared aislada está compuesta por tres capas como se muestra en la figura 5, donde T_{ae} es la temperatura del aire exterior y en la que se aplica la ecuación (10).

$$\dot{Q}_{\text{Pared aislada}} = \frac{T_1 - T_{ae}}{\frac{1}{A_{\text{Pared aislada}} \left(\frac{2e_{\text{Acero}}}{k_{\text{Acero}}} + \frac{e_{\text{Aislante}}}{k_{\text{Aislante}}} \right)}} \quad (10)$$

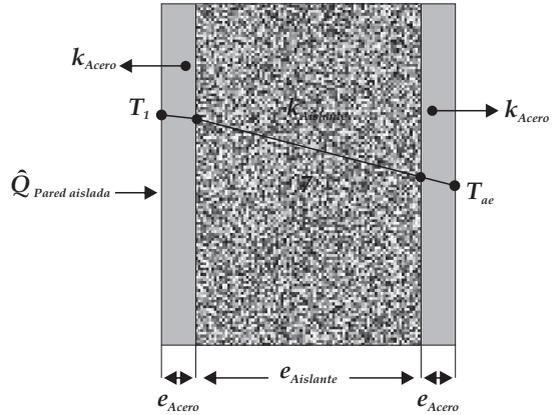


Figura 5. Detalle de la pared aislada.

Para determinar el espesor del aislante térmico, se ha programado la ecuación (10) 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_{Aislante} (figura 6).

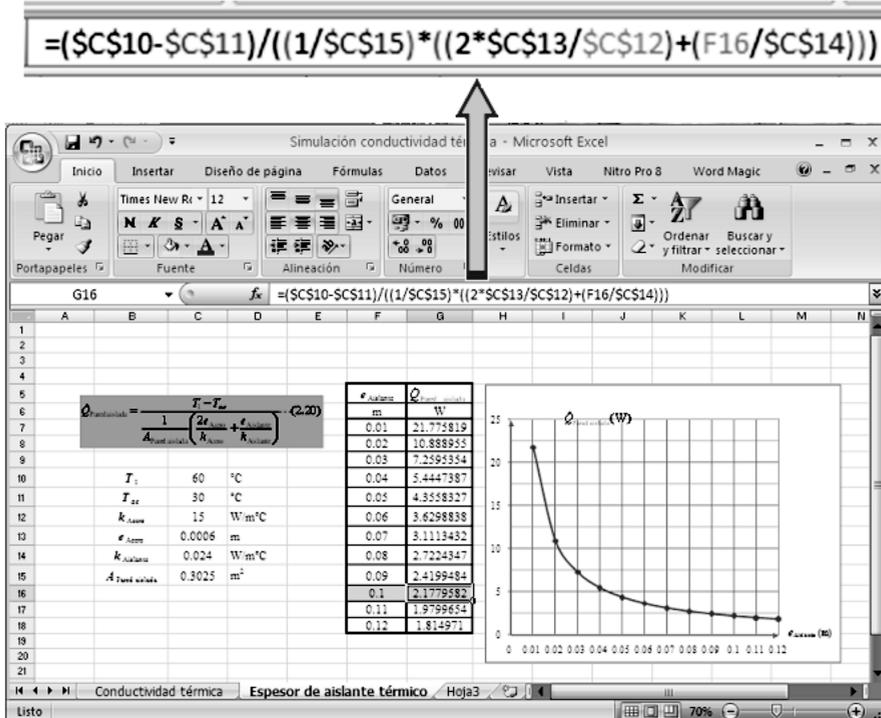


Figura 6. Hoja de Excel para determinar el espesor del aislante térmico.

Para aplicar la ecuación (10), se han usado los siguientes valores:

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

$$e_{Acero} = 0,6\text{ mm} = 0,0006\text{ m}$$

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

$$k_{Aislante} = 0,024\text{ W/m }^\circ\text{C (Bardales et al., 2008)}$$

$$A_{Pared\ aislada} = b_p \times b_p = 0,55\text{ m} \times 0,55\text{ m} = 0,325\text{ m}^2$$

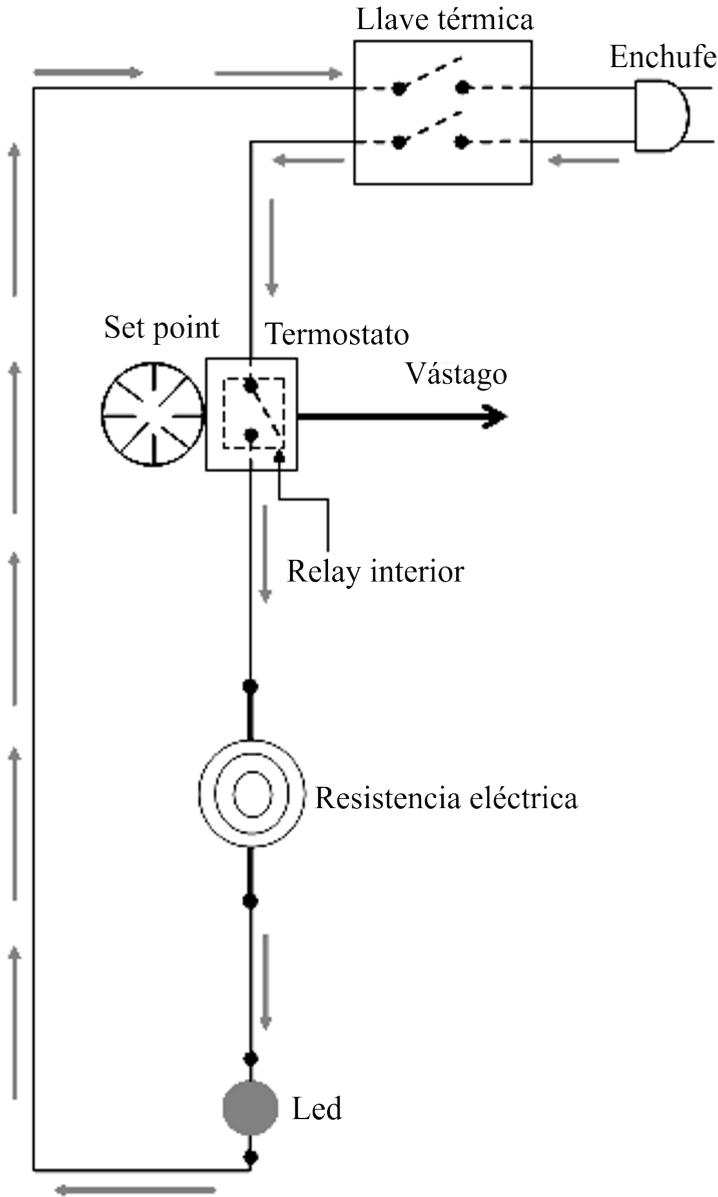


Figura 7. Diagrama eléctrico del equipo.

A continuación se presentan las hojas de cálculo Excel con las ecuaciones para determinar los valores necesarios para la investigación.

Cálculo de la potencia de la resistencia a emplear en el equipo.

	C	D	E	F	G	H	I
25	T_2	59.877315 °C		T_2	59.877315 °C		
26	T_3	50.4 °C		T_3	50.8 °C		
27	T_m	55.138658 °C		T_m	55.338658 °C		
28	k_{Alimento}	0.364 W/m°C		k_{Alimento}	0.380 W/m°C		
29							
30							
31	A_{TCNA}	1.1 m ²		Ω_R	38 Ohmios		
32	P_R	1273.6842 W		V_{TR}	220 Voltios		

Figura 8. Cálculo de P_R utilizando la hoja de cálculo de Excel.

$=D32*D17/(D17+D31)$

	C	D	E	F	G	H	I
13		Alimento	Acero				
14		Azúcar blanca					
15							
16	$\dot{Q}_{\text{Alimento}}$	8.4995237 W		T_1	60 °C		
17	A_{Alimento}	0.0073898 m ²		T_2	59.877315 °C		
18	e_{Acero}	0.0016 m		T_3	37 °C		
19	e_{Alimento}	0.003 m		T_m	48.438658 °C		
20	k_{Acero}	15 W/m°C		k_{Alimento}	0.151 W/m°C		
21							

Figura 9. Cálculo de $\dot{Q}_{\text{Alimento}}$ utilizando la hoja de cálculo de Excel.

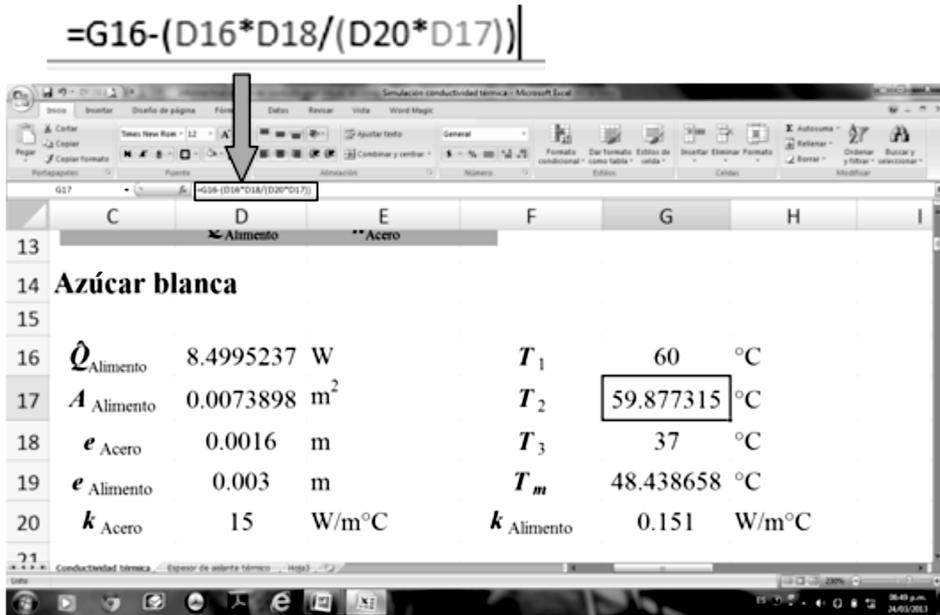


Figura 10. Cálculo de T_2 utilizando la hoja de cálculo de Excel.

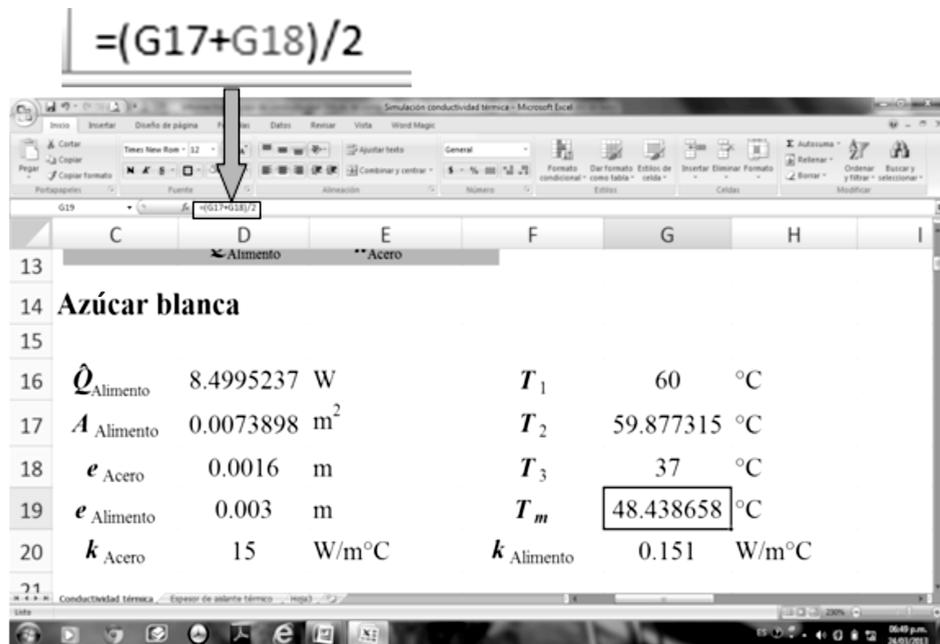


Figura 11. Cálculo de T_m utilizando la hoja de cálculo de Excel.

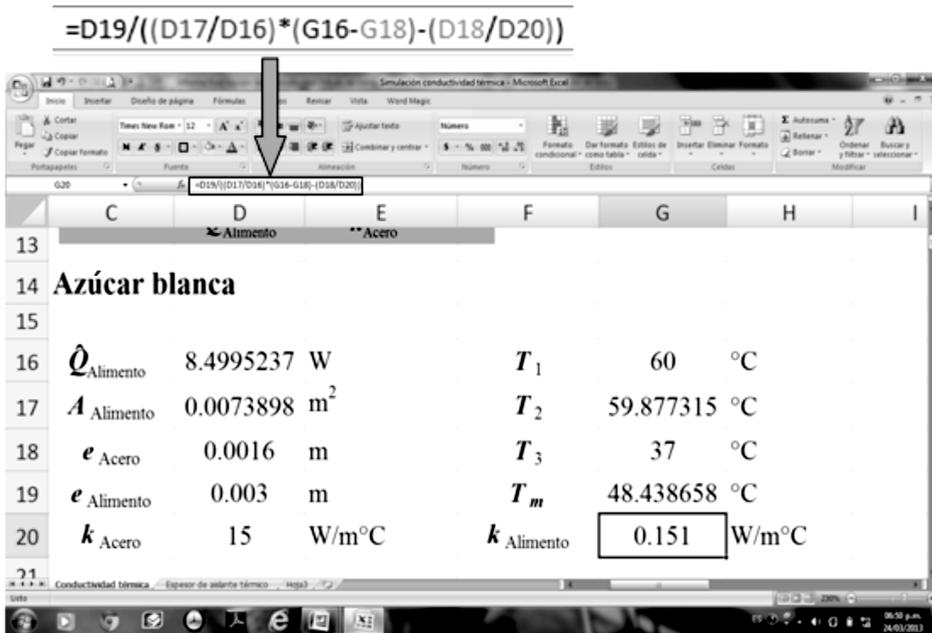
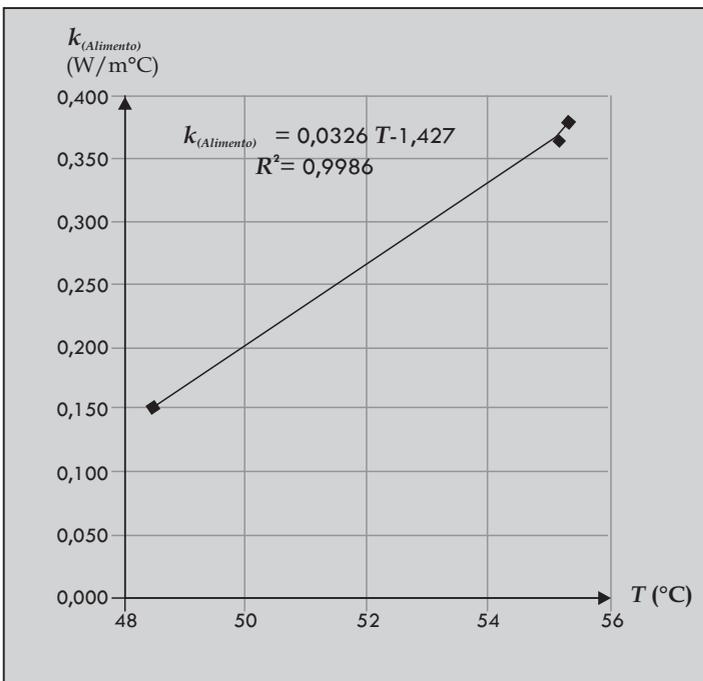


Figura 12. Cálculo de $k_{Alimento}$ utilizando la hoja de cálculo de Excel.



T_m	$k_{Alimento}$
°C	W/m °C
48,438658	0,151
55,139	0,364
55,338658	0,380

Figura 13. Representación gráfica de $k_{Alimento}$ en función de la temperatura T .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han efectuado siete pruebas, realizándose las siguientes mediciones:

Tabla 2. Mediciones para la primera prueba.

Alimento utilizado: azúcar blanca

T_1	T_2	T_3	T_m	e_{Alimento}	k_{Alimento}
°C	°C	°C	°C	mm	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

Tabla 3. Mediciones para la segunda prueba.

Alimento utilizado: azúcar blanca

T_1	T_2	T_3	T_m	e_{Alimento}	k_{Alimento}
°C	°C	°C	°C	mm	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

Tabla 4. Mediciones para la tercera prueba.

Alimento utilizado: colado de plátano

T_1	T_2	T_3	T_m	e_{Alimento}	k_{Alimento}
°C	°C	°C	°C	mm	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

Tabla 5. Mediciones para la cuarta prueba.

Alimento utilizado: colado de plátano

T_1	T_2	T_3	T_m	e_{Alimento}	k_{Alimento}
°C	°C	°C	°C	mm	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

Tabla 6. Mediciones para la quinta prueba.

Alimento utilizado: jamonada de cerdo

T_1	T_2	T_3	T_m	e_{Alimento}	k_{Alimento}
°C	°C	°C	°C	mm	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

Tabla 7. Mediciones para la sexta prueba.

Alimento utilizado: jamonada de cerdo

T_1	T_2	T_3	T_m	e_{Alimento}	k_{Alimento}
°C	°C	°C	°C	mm	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

Tabla 8. Mediciones para la séptima prueba.

Alimento utilizado: esencia de vainilla

T_1	T_2	T_3	T_m	e_{Alimento}	k_{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

En las pruebas que se realizaron, las T_m (temperaturas de operación para medir las conductividades térmicas) estuvieron dentro de un rango de 47,44 °C a 54,29 °C, excediendo en 4,29 °C lo propuesto por Domínguez (2010), quien precisa que para mejores resultados la temperatura no debe ser mayor de 50 °C. También se puede observar que la conductividad térmica de los alimentos es del orden de 10^{-1} en las unidades $W/m\ ^\circ C$. Esto se puede comparar con los resultados de otras investigaciones, como por ejemplo con los de la tabla 1. 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 $k_{Alimento}$ 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 el azúcar blanca ocupa el primer lugar, estando en el último lugar la esencia de vainilla.

Esto muestra que la conductividad térmica para alimentos sigue el siguiente orden: sólidos, pastosos y líquidos; similar conclusión obtuvo Giraldo et al. (2010) para el jugo de lulo, donde los factores que influyen más son la temperatura y, principalmente el contenido de agua.

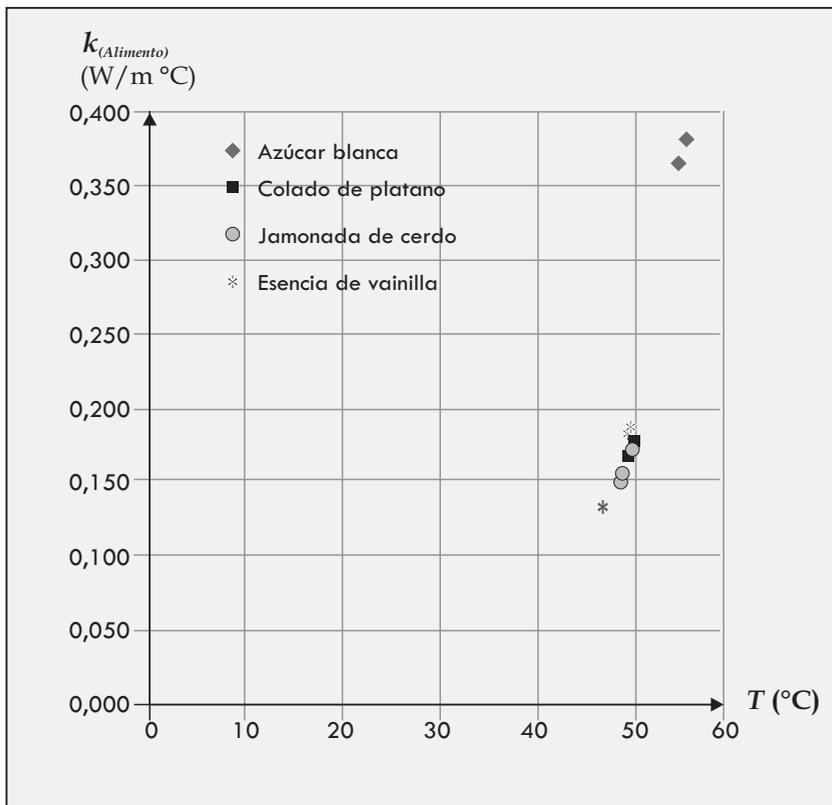


Figura 14. Comparación de la conductividad térmica como función de la temperatura, para los alimentos utilizados en el presente trabajo.

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 de energía y los mecanismos básicos de la transferencia de calor, obteniéndose las ecuaciones que relacionan a los parámetros y variables más importantes involucrados en el experimento que se lleva a cabo en el equipo, deduciéndose una ecuación y un algoritmo que permite calcular la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos con el empleo de las hojas de cálculo Excel.

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 (11) deducida 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.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), Facultad de Industrias Alimentarias (FIA), Laboratorio de Ingeniería de Alimentos, por el apoyo brindado para efectuar este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bardales EA, Ruiz R, Trigo ES. 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.
- Cortés L, 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 Termofísicas 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, España.
- Geankoplis CJ. 1998. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Compañía Editorial Continental S.A. (CECSA). Tercera edición.
- Giraldo GI, Gabas AL, Nicoletti VR, Telis J. 2010. Propiedades termofísicas del jugo concentrado de lulo a temperaturas por encima del punto de congelación. Universidad de Campiñas, Sao Paulo Brasil.
- Holman JP. 1999. Transferencia de calor. Compañía Editorial Continental S. A. (CECSA). Décima reimpresión.
- Martina P, Aeberhard MR, Corace JJ, Ventín A, Aeberhard A. 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 Argentina.
- Ochoa O, Amézquita A, Chejne F. 2005. Recopilación de las publicaciones sobre los métodos utilizados para medir las propiedades termofísicas de la carne. Instituto de Energía de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.