

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

*Facultad de Ciencias Forestales*



**Diseño y Elaboración de un Equipo  
para la Medición de Conductividad  
Térmica en Condiciones Inestables de  
la Madera**

*Tesis para optar el Título de*  
**INGENIERO FORESTAL**

**Manuel Fairó Buendía Buendía**

Lima – Perú  
2007

## RESUMEN

Comprende el diseño y elaboración de un equipo para medir la conductividad térmica en condiciones inestables de la madera. El término “condiciones inestables” se refiere a procesos de conducción de calor en los que la temperatura varía en el tiempo así como en el espacio.

El equipo está formado básicamente por un sistema eléctrico para calentar la plancha metálica proveedora de calor, un sistema de termocuplas cobre-constantán, cuya función es la de medir la temperatura de la superficie de la madera opuesta a la fuente de calor, y un programa computarizado que recibe, analiza y almacena la información, para este fin se utilizó el software LabView 7. Este programa es el encargado de activar/desactivar a las resistencias eléctricas proveedoras de calor, mantener constante la temperatura de la plancha caliente a 40 °C, adquirir y analizar la información proveniente de la termocupla, graficar la evolución de la temperatura de la parte inferior de la madera y almacenar esta información en un hoja de cálculo.

Para la determinación de la conductividad térmica se estableció previamente la condición inicial y las condiciones de frontera que rigen el presente trabajo; se desarrolló la ecuación general de transferencia de calor, lográndose mostrar gráficamente el historial de la temperatura de la cara inferior de la muestra. Asimismo, se necesitó cuantificar el coeficiente de convección, la difusividad térmica y el calor específico de las muestras como pasos previos.

Para fines de calibración del equipo se utilizaron muestras de Cachimbo (*Cariniana domestica*) y de Ishpingo (*Amburana cearensis*). Las probetas tuvieron sección cuadrada de 30 cm. x 30 cm. y espesor variable (1,0, 2,0 y 3,0 cm). Luego de ser evaluadas, las probetas fueron recortadas a 20 cm de lado para una posterior medida. Todas estas probetas estuvieron secas al aire y tuvieron una orientación tangencial con respecto al eje longitudinal del árbol.

Se determinó el valor de la conductividad térmica por dos métodos, uno llamado directo y el otro denominado dinámico. El primero viene a ser el producto de la densidad de las muestras, el calor específico y el coeficiente de difusividad térmica; obteniéndose valores de 0,18 y 0,14 W/m.K. para las muestras de cachimbo e ishpingo respectivamente.

Para ambas especies, los valores obtenidos por el método dinámico que coinciden con los hallados directamente son las que corresponden a las muestras de 3,0 cm de espesor, siendo las muestras de 20 cm de sección las que igualan en valor a la conductividad térmica directa. Resolviéndose finalmente que las dimensiones idóneas de las muestras para fines del experimento son 20 cm x 20 cm x 3 cm.

# ÍNDICE

	Página
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR .....	3
2.2 CONDICIONES DE LA CONDUCCIÓN DEL CALOR .....	4
2.2.1 <i>Conducción en estado estable</i> .....	4
2.2.2 <i>Conducción en estado inestable</i> .....	5
2.3 ECUACIÓN GENERAL DE LA CONDUCCIÓN DE CALOR .....	5
2.4 DESARROLLO DE LA ECUACIÓN PARA UNA PLACA PLANA INFINITA .....	10
2.4.1 <i>Solución en forma adimensional</i> .....	12
2.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA MADERA .....	16
2.6 DIFUSIVIDAD TÉRMICA DE LA MADERA .....	20
2.7 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	22
2.8 SOFTWARE LABVIEW 7 .....	23
2.9 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ELECTRICIDAD .....	23
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN .....	26
3.2 MATERIALES Y EQUIPOS .....	26
3.2.1 <i>Especies</i> .....	26
3.2.2 <i>Materiales</i> .....	26
3.2.3 <i>Equipos</i> .....	28
3.3 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS .....	28
3.3.1 <i>Preparación de las muestras de madera</i> .....	28
3.3.2 <i>Preparación de la fuente caliente</i> .....	29
3.3.3 <i>Elaboración del sistema eléctrico</i> .....	29
3.3.4 <i>Tarjeta de adquisición de datos analógico-digital</i> .....	29
3.3.5 <i>Elaboración del programa computarizado</i> .....	29
3.3.6 <i>Medición de la temperatura de la muestra</i> .....	30
3.3.7 <i>Número de repeticiones</i> .....	32
3.3.8 <i>Cálculos de coeficientes térmicos</i> .....	32
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>35</b>
4.1 ESPESOR, CONTENIDO DE HUMEDAD Y DENSIDAD .....	35
4.2 PROGRAMA COMPUTARIZADO .....	36
4.3 DIAGRAMA ELÉCTRICO .....	39
4.4 TIEMPO QUE DEMORAN LAS MUESTRAS EN ALCANZAR $\Theta_{0,5}$ .....	41
4.5 VALOR DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA Y DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN .....	44
4.6 GRÁFICA DE HEISLER .....	45
4.7 CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA .....	49
4.7.1 <i>Método directo</i> .....	49
4.7.2 <i>Método dinámico</i> .....	49

<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	<b>51</b>
<b>6. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>54</b>
<b>ANEXO 1</b> .....	<b>56</b>
PRIMERO CINCO RAICES DE LA ECUACIÓN $\lambda_n \cdot \text{Tan}(\lambda_n) = C$ .....	56
<b>ANEXO 2</b> .....	<b>57</b>
TABLA DE DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA.....	57
DESARROLLO DE LA ECUACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA .....	61
GRÁFICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA .....	63
<b>ANEXO 3</b> .....	<b>65</b>
DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA, CALOR ESPECÍFICO Y COEFICIENTE DE CONVECCIÓN .....	65
<b>ANEXO 4</b> .....	<b>66</b>
FOTOS DEL INTERIOR DE LA CAJA METÁLICA CALEFACTORA .....	66
<b>ANEXO 5</b> .....	<b>67</b>
FOTOS DEL EQUIPO EN PLENO FUNCIONAMIENTO .....	67

## *Lista de cuadros*

	Página
<b>CUADRO 1</b> VALORES DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA MADERA Y OTROS MATERIALES.....	17
<b>CUADRO 2</b> VALORES DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALGUNAS ESPECIES MADERABLES .....	19
<b>CUADRO 3</b> ESPESOR, CONTENIDO DE HUMEDAD Y DENSIDAD DEL CACHIMBO .....	35
<b>CUADRO 4</b> ESPESOR, CONTENIDO DE HUMEDAD Y DENSIDAD DEL ISHPINGO .....	35
<b>CUADRO 5</b> VALORES DE $\Theta_{0,5}$ PARA CACHIMBO DE 30 CM X 30 CM Y ESPESOR VARIABLE (1,0; 2,0 Y 3,0 CM)...	41
<b>CUADRO 6</b> VALORES DE $\Theta_{0,5}$ PARA CACHIMBO DE 20 CM X 20 CM Y ESPESOR VARIABLE (1,0; 2,0 Y 3,0 CM)...	42
<b>CUADRO 7</b> VALORES DE $\Theta_{0,5}$ PARA ISHPINGO DE 30 CM X 30 CM Y ESPESOR VARIABLE (1,0; 2,0 Y 3,0 CM) .....	42
<b>CUADRO 8</b> VALORES DE $\Theta_{0,5}$ PARA ISHPINGO DE 20 CM X 20 CM Y ESPESOR VARIABLE (1,0; 2,0 Y 3,0 CM) .....	43
<b>CUADRO 9</b> VALORES EXPERIMENTALES DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA Y DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN .....	45
<b>CUADRO 10</b> VALORES DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA POR EL MÉTODO DIRECTO.....	49
<b>CUADRO 11</b> VALORES EXPERIMENTALES DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	50

## Lista de figuras

	Página
<b>FIGURA 1</b> VOLUMEN DE CONTROL PARA EL FLUJO DE CALOR EN UN CUBO ELEMENTAL (FUENTE: INCROPERA, F. 1999).....	7
<b>FIGURA 2</b> PLACA INFINITA DE ESPESOR $2L$ INMERSO RÁPIDAMENTE EN UN FLUIDO CON TEMPERATURA $T_{\infty}$ EN AMBAS CARAS: FIG. 2A. DISPOSICIÓN DE LA PLACA. FIG. 2B. PERFIL DEL CALENTAMIENTO DE LA PLACA, DESCRITA POR LA TEMPERATURA DENTRO DE LA PLACA EN EL EJE $X$ , NÓTESE LA SIMETRÍA CON RESPECTO A $X = 0$ . (FUENTE: BEJAN, A. 1993).....	10
<b>FIGURA 3</b> GRÁFICO DE HEISLER. VALORES DE $T$ EN EL EJE HORIZONTAL VS. VALORES LOGARÍTMICOS DE $\Theta$ EN EL EJE VERTICAL, PARA CADA VALOR INVERSO DEL NÚMERO DE BIOT. ....	15
<b>FIGURA 4</b> DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, USANDO EL PROGRAMA LABVIEW 7.....	37
<b>FIGURA 5</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TEMPERATURAS.....	38
<b>FIGURA 6</b> SISTEMA DE ACTIVACIÓN/DESACTIVACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DE CALEFACCIÓN .....	39
<b>FIGURA 7</b> SISTEMA ELÉCTRICO DE MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA MUESTRA .....	40
<b>FIGURA 8</b> GRÁFICA DE HEISLER PARA CACHIMBO DE 30 CM X 30 CM Y ESPESOR VARIABLE (1,0 Y 3,0 CM).....	47
<b>FIGURA 9</b> GRÁFICA DE HEISLER PARA CACHIMBO DE 20 CM X 20 CM Y ESPESOR VARIABLE (1,0 Y 3,0 CM).....	47
<b>FIGURA 10</b> GRÁFICA DE HEISLER PARA ISHPINGO DE 30 CM X 30 CM Y ESPESOR VARIABLE (1,0 Y 3,0 CM).....	48
<b>FIGURA 11</b> GRÁFICA DE HEISLER PARA ISHPINGO DE 20 CM X 20 CM Y ESPESOR VARIABLE (1,0 Y 3,0 CM).....	48

## ***1. INTRODUCCIÓN***

En la actualidad, en un mundo gobernado por la innovación y la ciencia, el conocimiento no puede solo basarse en pocos pilares, es necesario estudiar los habidos, investigar nuevos y desafiar a las dificultades. El estudio de la madera, como elemento vital en la vida humana, no es ajeno a ello y tiene que adaptarse a este vertiginoso movimiento de índole mundial. En nuestro país las diferentes investigaciones de las propiedades físicas de la madera han estado orientadas básicamente a temas importantes pero a la vez tradicionales.

Entre las propiedades físicas de la madera se encuentran las propiedades térmicas, dentro de las cuales cabe mencionar la conductividad térmica, calor específico, difusividad térmica y el coeficiente de expansión térmica, cada uno de ellos muy importantes en diversos usos de la madera.

El tema de estudio del presente trabajo es la conductividad térmica, propiedad muy importante para el uso industrial de la madera debido a los tratamientos que recibe en el proceso de fabricación de los productos acabados: tratamientos térmicos para la obtención de láminas, secado de madera, producción de tableros, y como material aislante. Sin embargo, en nuestro país son pocos los estudios realizados al respecto, encontrándose solo dos trabajos. El primero realizado por Yoza (1992) y el segundo por Chavesta (1996). Ambos trabajos fueron realizados con un equipo diseñado y construido en el Departamento de Física y Meteorología de la UNALM por Yoza (1992), el cual permitía cuantificar el calor específico y la conductividad térmica de las muestras en forma simultánea en condiciones estables o estacionarias, lo cuál implica que la temperatura en cada punto es independiente del tiempo.

El equipo diseñado y elaborado en este trabajo mide la conductividad térmica en condiciones inestables o transitorias, debido a que muchos problemas de transferencia dependen del tiempo. Dicho equipo permitirá incrementar los conocimientos de las propiedades de la madera, optimizar los procesos industriales y brindar información sobre nuevos usos. Así como también

incluir elementos de informática en el estudio de la madera y lograr la aplicación de otras ciencias básicas como las matemáticas y la física en el diario quehacer forestal.

## 2. *REVISIÓN DE LITERATURA*

### 2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

Según Mills (1994), transferencia de calor es el proceso de intercambio de energía entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que se encuentran a distintas temperaturas. Serway (1997) remarca la importancia de entender los mecanismos responsables de la transferencia de calor, como por ejemplo, la tasa transferencia entre un sistema y sus alrededores.

Incropera (1990), señala que hay tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Hay conducción dentro de un cuerpo o entre dos cuerpos que están en contacto íntimo. La convección depende del movimiento de una masa de una región del espacio a otra. La radiación es transferencia de calor por ondas electromagnéticas. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

Isachenko (1973), describe a la convección como una de las tres formas de transferencia de calor, se caracteriza porque se produce a través del desplazamiento de un fluido entre regiones con diferentes temperaturas.

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. Se incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido.

La transferencia de calor por convección se modela con la Ley del Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hAs(Ts - T \text{ inf}) \quad (1)$$

Donde:

$h$  : coeficiente de convección,  $W/m^2.K$ .

$A_s$  : área del cuerpo en contacto con el fluido,  $m^2$ .

$T_s$  : temperatura en la superficie del cuerpo,  $^{\circ}C$ .

$T_{inf}$  : temperatura del fluido lejos del cuerpo,  $^{\circ}C$ .

$T_s > T_{inf}$ .

Kreith (2001), declara que la conducción de calor es un mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos cuerpos en contacto directo sin flujo neto de materia, que tiende a igualar la temperatura dentro de cuerpo y entre los diferentes cuerpos en contacto. La conducción térmica está determinada por la Ley de Fourier.

El mismo autor manifiesta que para la materia ordinaria no sujeta a radiación directa, la conducción y la convección son los mecanismos principales de transferencia de calor, ya que la transferencia por radiación sólo representa una parte pequeña de ella, y depende de la cuarta potencia de la temperatura ( $T^4$ ), siendo importante a partir de temperaturas superiores a varios miles de Kelvin.

## **2.2 CONDICIONES DE LA CONDUCCIÓN DEL CALOR**

### **2.2.1 CONDUCCIÓN EN ESTADO ESTABLE**

Pitts (1975), explica que existen situaciones donde la temperatura puede depender, o no del tiempo. Se dice que un sistema esta en un estado estable si la temperatura en cada punto es independiente del tiempo.

### 2.2.2 CONDUCCIÓN EN ESTADO INESTABLE

Manrique (2002), manifiesta que los procesos de conducción en los que la temperatura varía en el tiempo así como en el espacio, se llaman inestables, no estacionarios o transitorios. Poniendo como ejemplo, el caso del calentamiento y enfriamiento del techo de una habitación.

Siau (1984), afirma que el flujo inestable ocurre siempre que una muestra de madera es calentada, impregnada con un líquido o secada.

### 2.3 ECUACIÓN GENERAL DE LA CONDUCCIÓN DE CALOR

Serway (1997), manifiesta que en 1822 el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa, que hoy se conoce como Ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la energía térmica “ $q$ ” transferida en un tiempo  $\Delta t$  fluye del extremo más caliente al extremo mas frío. La tasa a la cual fluye el calor,  $q/\Delta t$  es proporcional al área de sección transversal y a la diferencia de temperatura, e inversamente proporcional al espesor:

$$\frac{q}{\Delta t} \propto \frac{A\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

Siendo conveniente utilizar el símbolo  $Q$  para representar la tasa de transferencia de energía térmica, esto significa que se toma  $Q = q / \Delta t$ . Para una placa de espesor infinitesimal  $dx$  y diferencia de temperaturas  $dT$ , la ley de conducción de calor o también llamada Ley de Fourier queda expresada de la siguiente manera.

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Donde:

$Q$  : cantidad de calor trasferido por unidad de tiempo, W.

$k$  : conductividad térmica, W/m.K.

$A$  : área perpendicular al flujo de calor,  $m^2$ .

$dT$  : diferencia de temperatura entre las superficies de la muestra,  $^{\circ}C$ .

$dx$  : distancia entre las superficies de la muestra, m.

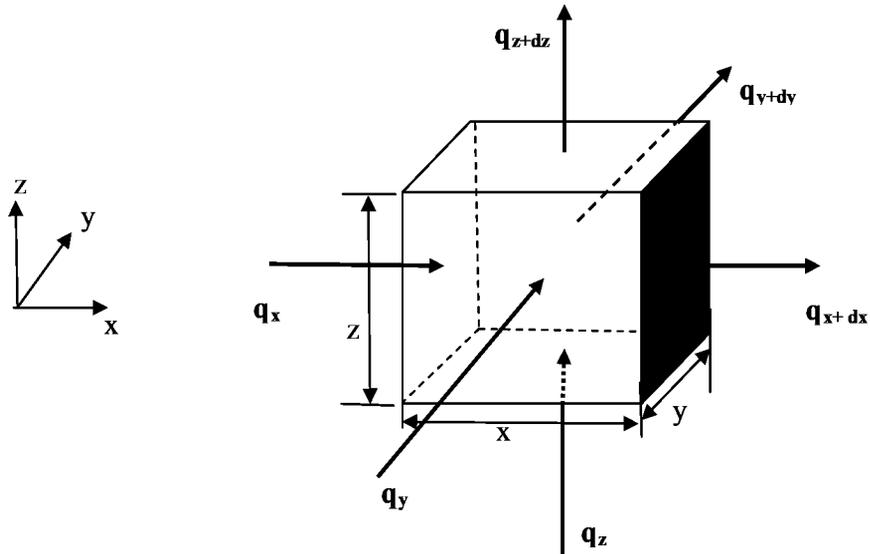
El signo menos es necesario debido a que la transferencia de energía resulta del gradiente térmico de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. La constante de proporcionalidad,  $k$ , es una propiedad de transporte conocido como conductividad térmica y su valor numérico depende del material. Los materiales con  $k$  grande son buenos conductores del calor; aquellos con  $k$  pequeña son malos conductores o aislantes.

Eckert (1972), manifiesta que la conductividad térmica es la capacidad de los materiales para dejar pasar el calor; es decir, la conductividad térmica es la capacidad de los elementos de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otros elementos cercanos. Al calentarse la materia varía el comportamiento de su estado molecular, las moléculas salen de su estado de inercia o reposo y adquieren un movimiento cinético provocado por el aumento de temperatura. Si a un elemento o cuerpo se le incrementa la temperatura por cualquier medio, se dice que la materia se calienta, este calor se desplaza desde la zona más caliente hasta el punto más alejado del foco calórico, variando su temperatura en distancia y tiempo.

Incropera (1999), indica que uno de los objetivos en un análisis de conducción es conocer la distribución de temperaturas, que representa cómo varía la temperatura con la posición en el medio. Una vez que se conoce esta distribución, el flujo de calor por conducción en cualquier punto, en el medio o en la superficie, se calcula a partir de la Ley de Fourier. Para un sólido, el conocimiento de la distribución de temperaturas sirve para comprobar la integridad estructural mediante la determinación de los esfuerzos térmicos, sus expansiones y deflexiones. La distribución de temperaturas también es útil para optimizar el espesor de un material aislante y para determinar la compatibilidad de recubrimientos o adhesivos especiales que se usen con el material.

El mismo autor señala que el método para determinar la distribución de temperaturas se basa en la ley de conservación de la energía. Consiste en definir un volumen de control

infinitesimalmente pequeño  $dx$ ,  $dy$  y  $dz$ , como se muestra en la Figura 1. Luego se debe considerar los procesos de energía que son relevantes para este volumen de control.



**Figura 1** Volumen de control para el flujo de calor en un cubo elemental (Fuente: Incropera, F. 1999)

Las velocidades de transferencia de calor por conducción perpendicular a cada una de las superficies de control en las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  se indican con los términos  $q_x$ ,  $q_y$  y  $q_z$ , respectivamente. Las velocidades de transferencia de calor por conducción en las superficies opuestas se expresan como una expansión en series de Taylor, donde:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (4)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (5)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (6)$$

La primera ecuación, al igual que las otras dos, afirma que la componente en el punto  $x+dx$  del flujo de calor es igual a su valor en el punto  $x$  más la variación direccional del flujo con respecto a  $x$  veces  $dx$ .

Dentro del medio también puede haber un término de la fuente de energía asociado con la velocidad de generación o absorción de energía térmica. Este término se representa como:

$$\dot{E}_g = \dot{q} dx dy dz \quad (7)$$

Además, pueden ocurrir cambios en la cantidad de la energía térmica interna almacenada por el material en el volumen de control. Esta energía almacenada se expresa como:

$$\dot{E}_{alm} = \rho \cdot c_{pw} \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (8)$$

El último paso en la metodología es expresar la conservación de la energía con el uso de las ecuaciones de flujo anteriores.

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm} \quad (9)$$

Al sustituir las ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación general de la difusión de calor o también conocida como ecuación del calor.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot c_{pw} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

A menudo es posible trabajar con versiones simplificadas de la ecuación anterior. Si suponemos que la constante de conductividad térmica es constante, la ecuación de calor es.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

Donde:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_{pw}} \quad \text{difusividad térmica, m}^2/\text{s}.$$

Además, si se tratase de una conducción en condiciones inestables, en un sólido infinito, suponiendo que la conductividad térmica es constante, que no hay generación interna de calor, y que las variaciones de la temperatura en las direcciones  $y, z$  son muy pequeñas, la ecuación de calor se reduce a:

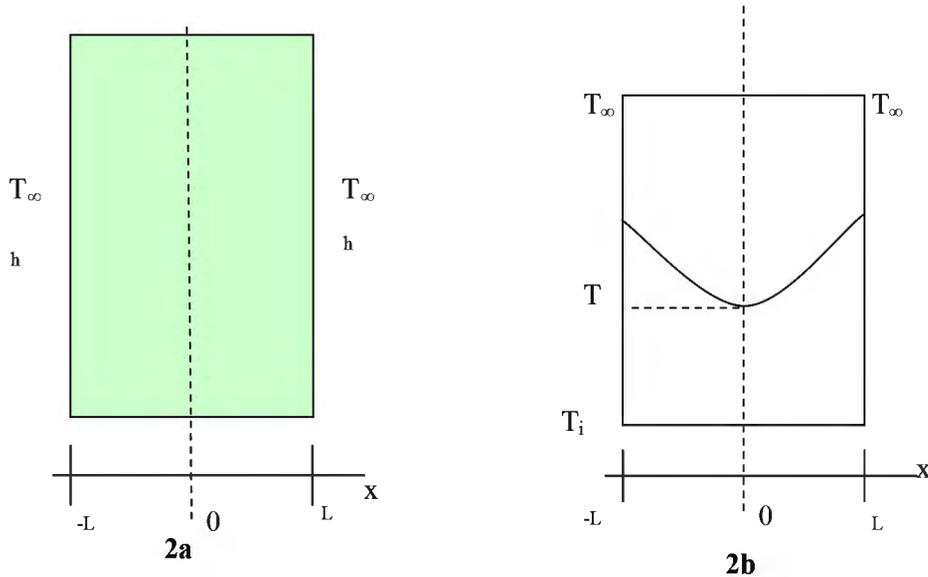
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

De esta expresión se observa que la difusividad térmica afecta la razón de cambio de la temperatura con respecto al tiempo. Así dicha razón es más rápida si el material tiene una gran difusividad térmica, y viceversa. A diferencia de la conductividad térmica  $k$  de un material, que permite o no el paso del calor por conducción, la difusividad térmica consta de tres propiedades físicas, una de transporte y dos termodinámicas: la conductividad térmica  $k$ , la densidad del material  $\rho$  y el calor específico  $c_{pw}$ . El producto  $\rho \cdot c_{pw}$  ( $J/m^3 \cdot K$ ) es un indicador de la capacidad del material para almacenar energía. Por consiguiente, las sustancias con gran densidad como los sólidos y los líquidos suelen constituir excelentes medios para almacenar energía. De lo anterior se desprende que la difusividad térmica es un indicador de la capacidad que tiene un material para conducir el calor con respecto a su capacidad para almacenar energía interna.

Incropera (1999), señala que para determinar la distribución de temperaturas en un medio es necesario resolver la forma apropiada de la ecuación de calor. Sin embargo, esta solución depende de las condiciones físicas que existan en las fronteras del medio y, si la situación depende del tiempo, también dependerá de las condiciones que exista en el medio en algún tiempo inicial; con respecto a las condiciones de frontera, hay varias posibilidades comunes que simplemente se expresan en forma matemática, como la ecuación de calor es de segundo orden en las coordenadas espaciales, deben expresarse dos condiciones de frontera para cada coordenada necesaria en la descripción del sistema, dado que la ecuación es de primer orden en el tiempo, debe especificarse una condición, denominada condición inicial; de este modo, el desarrollo de la ecuación de calor demanda una condición inicial y dos condiciones de frontera.

## 2.4 DESARROLLO DE LA ECUACIÓN PARA UNA PLACA PLANA INFINITA

La solución para el caso de una placa infinita de espesor  $2L$  se muestra en la Figura 2.



**Figura 2** Placa infinita de espesor  $2L$  inmerso rápidamente en un fluido con temperatura  $T_\infty$  en ambas caras: Fig. 2a. Disposición de la placa. Fig. 2b. Perfil del calentamiento de la placa, descrita por la temperatura dentro de la placa en el eje  $X$ , nótese la simetría con respecto a  $x = 0$ . (Fuente: Bejan, A. 1993)

Si se supone que la placa está sujeta a un proceso de calentamiento, la condición inicial puede establecerse a partir de la uniformidad inicial de la temperatura de la madera. Antes de ello es pertinente utilizar el símbolo  $\theta$ , donde  $\theta = T(x, t) - T_\infty$ , entonces la condición inicial quedaría:

$$\theta = \theta_i \quad \text{para } t = 0$$

Una de las condiciones de frontera se establece mediante la condición de simetría del flujo de calor, Figura 2b. Condición que es equivalente a duplicar el flujo de calor que llega al centro de la placa,  $x = 0$ . Luego, la primera condición de frontera queda definida como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad \text{para } x = 0$$

Para la segunda condición de frontera, se analiza el calor transportado por convección desde la fuente a la interfase, el cuál debe ser igual al calor transportado por conducción al interior de placa. Analíticamente:

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial x} = h\theta \quad \text{para } x = \pm L$$

De estas tres últimas ecuaciones se puede observar que la temperatura de la placa en cualquier posición y en cualquier instante depende de varios parámetros, en particular de:  $\theta = \theta(x, t, T_i, T_\infty, L, k, \alpha, h)$ . Dado que son muchas las variables, es más ventajoso adimensionar las ecuaciones encontradas. Esto se logra reacomodando las variables de la siguiente forma:

$$\Theta = \frac{T_m - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$

$$x^* = \frac{x}{L}$$

El tiempo adimensional  $\tau$  se denomina *número de Fourier* (En tablas simbolizado por  $F_o$ ) que, junto al número de Biot, caracteriza los problemas de conducción transitoria.

$$\tau = \frac{\alpha t}{L^2}$$

El Número de Biot representa la razón entre la resistencia a la conducción con la resistencia a la convección, que en este caso será el flujo de calor.

$$\frac{R_{conducción}}{R_{convección}} = \frac{hL}{k} \equiv Bi$$

Donde  $R$ , es la resistencia al paso del calor de acuerdo al mecanismo utilizado.

Sustituyendo estas nuevas variables en la ecuación (12), su condición inicial y sus condiciones de frontera se obtiene:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^{*2}} = \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} \quad (13)$$

Ahora en forma adimensional,  $\Theta = \Theta(x^*, \tau, Bi)$ ; es decir, la distribución adimensional de temperaturas para una placa plana es una función solamente de  $x^*$ ,  $\tau$  y  $Bi$ .

#### 2.4.1 SOLUCIÓN EN FORMA ADIMENSIONAL

De la ecuación (13) y utilizando todas las transformaciones adimensionales, tenemos la nueva condición inicial y las nuevas condiciones de frontera.

Condición inicial

$$\Theta(x^*, 0) = 1 \quad , \quad \text{para } \tau = 0;$$

Condiciones de frontera

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x^*}(0, \tau) = 0 \quad , \quad \text{para } x^* = 0;$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x^*}(1, \tau) = -Bi \cdot \Theta(1, \tau) \quad , \quad \text{para } x^* = 1$$

Seguidamente, la solución final de la ecuación de conducción de calor se obtiene mediante el producto de dos funciones, una de las cuales es sólo función del tiempo  $t$ , y la otra solo de la distancia  $x$ . Este método es conocido como el de Separación de Variables.

$$\Theta(x^*, \tau) = X(x^*) \cdot \Psi(\tau) \quad (14)$$

Al sustituir esta expresión en la ecuación (13), y acomodando de tal manera que un lado solo dependa de  $x^*$  y el otro solo de  $\tau$  y dado que la ecuación debe verificarse para cada valor de  $x^*$  y  $\tau$ , sus dos miembros deben ser iguales a un cierto valor constante,  $-\lambda^2$ , el signo menos asegura el carácter transitorio. Entonces se tiene:

$$\frac{X''}{X} = \frac{\Psi'}{\Psi} = -\lambda^2 \quad (15)$$

Se obtuvo de este modo un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, fácilmente integrable.

Al analizar el lado izquierdo de la ecuación anterior se nota que es posible determinar que su solución general se escribe en términos de una función sinusoidal. Como se trata de una ecuación de segundo grado, debe haber dos constantes de integración. Esto se puede observar en la solución general de esta ecuación:

$$X(x^*) = C_1 \cdot \text{Sen}(\lambda x^*) + C_2 \cdot \text{Cos}(\lambda x^*) \quad (16)$$

Con lo que respecta al lado derecho de la ecuación, el cual está en función de  $\tau$ , su solución es de la siguiente forma:

$$\Psi(\tau) = \exp(-\lambda^2 \tau) \quad (17)$$

Por consiguiente, la temperatura, como una función de la distancia y el tiempo está dada por:

$$\Theta(x^*, t) = [C_1 \cdot \text{Sen}(\lambda x^*) + C_2 \cdot \text{Cos}(\lambda x^*)] \exp(-\lambda^2 \tau) \quad (18)$$

Para que la ecuación (18) sea la solución se tiene que evaluar las constantes  $C_1$  y  $C_2$  en las condiciones de frontera e inicial. Además se debe determinar el valor de la constante  $\lambda$  para completar la solución.

Aplicando la condición de frontera de simetría se tiene que la primera expresión de la ecuación no la satisface, por consiguiente no es solución. Entonces la ecuación quedaría:

$$\Theta(x^*, \tau) = C_2 \cdot \text{Cos}(\lambda x^*) \exp(-\lambda^2 \tau) \quad (19)$$

En forma similar, al aplicar ahora la segunda condición de frontera se tiene:

$$\lambda \cdot \text{Sen}(\lambda) = Bi \cdot \text{Cos}(\lambda) \quad (20)$$

Lo que es lo mismo a decir:

$$\text{Cot}(\lambda) = \frac{\lambda}{\text{Bi}}$$

La ecuación arriba escrita es del tipo *trascendental*, y existe un número infinito de valores de  $\lambda$ , conocido como valores característicos, que la satisfacen. La manera más simple de determinar los valores numéricos de  $\lambda$  es graficando la función. Para fines del presente trabajo se consideraron los valores tabulares de  $\lambda$  que existen en los libros. (Anexo 1).

Una vez determinados los valores de  $\lambda_n$ , la solución de la ecuación (19) sería:

$$\Theta = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \exp(-\lambda_n^2 \tau) \text{Cos}(\lambda_n x^*) \quad (21)$$

Las constantes  $C_n$  en esta serie infinita pueden obtenerse sustituyendo la condición inicial, es decir:

$$1 = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \text{Cos}(\lambda_n x^*) \quad (22)$$

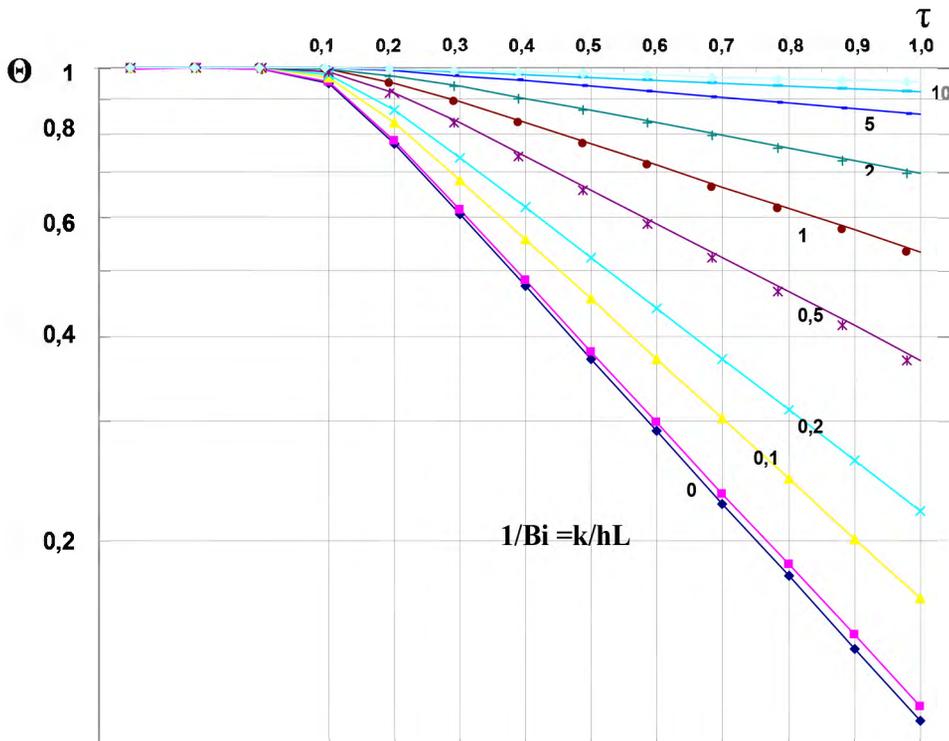
Aplicando la teoría de series de Fourier, se obtiene finalmente la solución general que permite determinar la temperatura en cualquier punto de la muestra de madera y en cualquier instante  $t$ .

Para este efecto, se hicieron los cálculos pertinentes para ciertos valores de la ecuación general. Lográndose de tal manera plotear un gráfico similar al creado por Heisler (1947) donde se aprecia el historial de la temperatura en el centro de una placa de espesor  $2L$  a una temperatura inicial  $T_i$ , que intercambia calor con un medio a temperatura  $T_{\infty}$ . Las curvas logradas en este gráfico corresponden a la inversa del número de Biot,  $1/\text{Bi}$ , las que servirán de líneas matrices dentro de las cuales se graficarán las curvas correspondientes a cada espesor de las muestras.

$$\Theta = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{Sen}(\lambda_n)}{\lambda_n + \text{Sen}(\lambda_n) \text{Cos}(\lambda_n)} \text{Cos}(\lambda_n x^*) \exp(-\lambda_n^2 \tau) \quad (23)$$

El número de Biot influye en la solución a través de los valores de  $\lambda$ . La temperatura en la muestra depende del número de Biot y del número de Fourier.

La solución de esta ecuación general, permite graficar la variación temporal de la temperatura, de cualquier punto en la dirección  $x$  de la muestra, y con ello determinar el coeficiente de conductividad térmica de la misma. Heisler (1947), sistematizó este procedimiento elaborando una serie de ábacos que permiten facilitar los cálculos respectivos.



**Figura 3** Gráfico de Heisler. Valores de  $\tau$  en el eje horizontal vs. valores logarítmicos de  $\Theta$  en el eje vertical, para cada valor inverso del Número de Biot.

## 2.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA MADERA

Forest Products Laboratory (1980), manifiesta que existen cuatro propiedades térmicas importantes en la madera: conductividad térmica, difusividad térmica, calor específico y el coeficiente de dilatación térmica.

Siau (1995), señala que la conductividad térmica es la capacidad de la madera para transferir el calor. Numéricamente es igual a la velocidad con que atraviesa el flujo de calor en watts a través de un cubo de un metro de arista cuando existe una gradiente de temperatura de 1 °C entre ambas caras.

Forest Products Laboratory (1980), afirma que la conductividad térmica de las maderas estructurales es mucho menor que la conductividad térmica de los metales y tres o cuatro veces más que la conductividad térmica de los materiales aislantes. Ejemplifica lo anterior mencionando que los valores de la conductividad térmica de maderas estructurales con un contenido de humedad de 12% están entre 0,1 y 1,4 W/m.K comparado con 216 W/m.K del aluminio y 0,039 W/m.K de la fibra de vidrio.

Kolmann (1989), señala que la madera y otros materiales celulósicos son malos conductores de calor debido a la pasividad de los electrones, como también a su alta porosidad. También es importante señalar la falta de estructuras cristalinas en su constitución, que no permiten la transferencia de energía por vibración (fonones).

La conductividad térmica en la madera es afectada por un número de factores, Criswell (1981), menciona a la densidad, el contenido de humedad y la dirección del grano. Wangaard (1968), Venkateswaran (1974), Forest Products Laboratory (1980) y Kolmann (1989), adicionan a esta lista nuevos factores, el contenido de extractivos, temperatura, ángulo de la fibra, cantidad de fibras de leño de verano y de invierno, porosidad e irregularidades estructurales tales como grietas y nudos.

Según Kolmann (1989), la conductividad térmica de la madera en la dirección radial es 5 a 10% más que en la dirección tangencial. La conductividad en la dirección longitudinal, para humedad entre 6 y 15 %, es cerca de 2,25 a 2,75 veces la conductividad a través del grano.

Kolmann (1959), menciona que la conductividad térmica en el corte radial es mayor debido a que los radios aparecen en esta dirección como fibras longitudinales, es decir como conductos de menos resistencia en el tejido leñoso. También explica que la razón de la diferencia de los valores de la conductividad térmica paralela a las fibras de la madera y las transversales se debe a su microestructura, ya que el transporte del calor por conducción se basa en el equilibrio de la energía molecular, y para ello tropieza con menores resistencias en la dirección de las largas moléculas en cadena que ortogonalmente a ellas.

En el Cuadro 1 se presentan los valores de la conductividad térmica de la madera en sus cortes paralelo y perpendicular a las fibras, así como también el valor de la conductividad térmica de otros materiales.

**Cuadro 1** Valores de la conductividad térmica de la madera y otros materiales

<b>Material</b>	<b>k (W/m.K)</b>
Madera, G = 0,45 M = 12% ⊥	0,13
Madera, G = 0,45 M = 12%	0,31
Madera, G = 0,70 M = 12% ⊥	0,18
Madera, G = 0,70 M = 12%	0,44
Sustancia de la pared celular ⊥	0,44
Sustancia de la pared celular	0,88
Agua libre	0,59
Aire (encerrado en un medio)	0,024
Tablero de partículas de mediana densidad	0,13
Tablero de asbesto-cemento	0,58
Triplay de abeto	0,12
Ladrillo simple	0,72
Concreto	0,93
Piedra, limo, arena	1,8
Vidrio	1,05
Fibra de vidrio	0,039
Poliuretano expandido	0,0023
Plata	419
Cobre	396
Aluminio	202
Acero inoxidable	16,3

*Fuente: Influence of Moisture on Physical Properties. Siau, J. 1995.*

Siau (1995), indica que la madera es un buen material aislante especialmente en la dirección perpendicular a la fibra, donde el recorrido del flujo es interrumpido por la pobre conducción del aire contenido en el lumen. La propiedad aislante de la madera tiene muchas ventajas, tales como incrementar la resistencia al fuego en comparación con los metales que se calientan rápidamente. El amplio período de tiempo requerido para cambiar la temperatura de un extremo de la madera al otro y su alta capacidad calórica lo convierten en un material ideal para paredes exteriores.

El mismo autor cita en su libro que MacLeans (1952), encontró que la proporción entre la conductividad longitudinal y la transversal es de 2,25 y 2,75 con un promedio aproximado de 2,5. Para la conductividad térmica transversal encontró los siguientes valores: 0,318 W/m.K para la sustancia seca de la pared celular, 0,401 W/m.K para agua ligada, y 0,024 W/m.K para el aire en el lumen. Determinó valores de 0,42 y 0,65 W/m.K para la sustancia de la pared celular perpendicular y paralela a las fibras longitudinales; midió 0,41 W/m.K para la sustancia de la pared celular perpendicular a las fibras longitudinales.

Kolmann (1959) y Forest Products Laboratory (1980), discuten la influencia que tiene la densidad, el contenido de humedad, la temperatura y los extractivos en la conductividad térmica, llegando a señalar que en los materiales aislantes y de construcción el coeficiente de conductividad calorífica interna crece con el peso específico aparente, debido a que en los cuerpos secos y porosos viene a ser un valor medio entre la aptitud conductora de los componentes sólidos y del aire contenido en los poros. Para un volumen de poros del 100% se alcanza un valor máximo, la conductividad térmica del aire en reposo. Pero las sustancias orgánicas aislantes suelen tener una estructura fofa, dispuesta en planos, junto a un peso específico muy bajo, con lo que los poros entre las fibras o núcleos orgánicos son mayores. La madera, además del aire, contiene siempre agua ligada coloidalmente o libre, que contribuye notablemente a la transmisión del calor, haciendo que éste se incremente a un más con el contenido de humedad en la madera. La influencia de la temperatura en la conductividad térmica es baja; la conductividad térmica se incrementa en 2 a 3 % por 10 °C. Los extractivos, también, tienen una relación directamente proporcional con la conductividad térmica.

El cuadro 2, muestra los valores de la conductividad térmica para varias especies, así como los efectos del peso específico y el contenido de humedad.

**Cuadro 2** Valores de la conductividad térmica de algunas especies maderables

<i>Especie</i>	<i>Peso Específico</i>	<i>Conductividad Térmica (W/m.K)</i>	
		<i>Anhidro</i>	<i>Contenido de Humedad (12%)</i>
Black ash ( <i>Fraxinus americana</i> )	0,53	0,12	0,15
Bigtooth aspen ( <i>Populus grandidentata</i> )	0,41	0,01	0,12
Sweet birch ( <i>Betula lenta</i> )	0,71	0,16	0,19
Yellow birch ( <i>Betula alleghaniensis</i> )	0,66	0,15	0,18
Black cherry ( <i>Prunus cerotina</i> )	0,53	0,12	0,15
American chestnut ( <i>Castanea dentata</i> )	0,45	0,11	0,13
American elm ( <i>Ulmus americana</i> )	0,54	0,12	0,15
Hackberry ( <i>Celtis occidentalis</i> )	0,57	0,13	0,16
Magnolia ( <i>Magnolia soulangiana</i> )	0,52	0,12	0,14
Black maple ( <i>Acer nigrum</i> )	0,60	0,14	0,16
Red maple ( <i>Acer rubrum</i> )	0,56	0,13	0,15
Black oak ( <i>Quercus velutina</i> )	0,66	0,15	0,18
Baldcypress ( <i>Taxodium distichum</i> )	0,47	0,11	0,13
Eastern hemlock ( <i>Tsuga canadensis</i> )	0,42	0,10	0,12
Pitch pine ( <i>Pinus rigida</i> )	0,53	0,12	0,15
Red pine ( <i>Pinus resinosa</i> )	0,46	0,11	0,13

*Fuente: Wood as an Engineering Material, 1980.*

Yoza (1993), al medir la conductividad térmica en moena (*Aniba amazónica*) reporta que la relación promedio entre la conductividad longitudinal/radial y la longitudinal/tangencial es de 1,9 y 2,1 respectivamente. Dichos valores se encuentran en el rango inferior para maderas coníferas, lo cual podría explicarse por la diferencia anatómica entre las maderas coníferas y las tropicales.

Chavesta (1996), compara las relaciones entre los promedios de las conductividades longitudinal/radial y longitudinal/tangencial, encontrando los valores: Catahua amarilla (1,2-1,4) y quinilla colorada (1,1-1,4). Dichos valores son mucho menores a los reportados para maderas de coníferas (2,25 – 2,5) y ligeramente menores a los encontrados por Yoza (1993), afirmando que la estructura heterogénea de las latifoliadas, especialmente la presencia de poros, disminuye la conductividad térmica, además de otras inclusiones propias de cada especie.

## 2.6 DIFUSIVIDAD TÉRMICA DE LA MADERA

Forest Products Laboratory (1980), señala que la difusividad es una medida de cuan rápido un material puede absorber calor de sus alrededores y lo define como la proporción de la conductividad térmica y el producto del calor específico y la densidad.

Çengel (2003), indica la difusividad térmica como la razón entre el calor conducido dentro del material y el calor almacenado dentro del mismo, su unidad de medida es m<sup>2</sup>/s.

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho \cdot c_{pw}} \quad (24)$$

Siau (1995), indica que la difusividad térmica expresa la velocidad de cambio de la gradiente de temperatura en la dirección del flujo.

Este mismo autor señala que el valor de la difusividad puede ser determinado gráficamente, para lo cual usa los gráficos desarrollados por Heisler, pero en forma invertida, es decir construye un gráfico E vs.  $\tau$ , donde  $E = 1 - \Theta$ .

Todos los cálculos son basados para un  $E_{0,5} = 0,5$  al cual lo denomina *Temperatura del Tiempo medio* y proviene del cociente:

$$E_{0,5} = 0,5 = \frac{T_m - T_i}{T_\infty - T_i} \quad (25)$$

Donde:

$T_m$  : temperatura medida;  $T_m = (T_\infty - T_i)/2$ , °C.

$T_i$  : temperatura inicial, °C.

$T_\infty$  : temperatura infinito, °C.

También explica que todas las curvas correspondientes a  $1/Bi$ , se encuentran linealmente espaciadas en  $E_{0,5} = 0,5$ , haciendo posible a derivar una ecuación lineal que relacione el tiempo adimensional  $\tau$  y los valores del número de Biot de la siguiente manera:

$$\tau_{0,5} = 0,2 + \frac{0,7 \cdot \alpha}{h \cdot L} \quad (26)$$

Donde:

$\tau_{0,5}$  : temperatura media adimensional.

$\alpha$  : coeficiente de difusión real,  $m^2/s$ .

$L$  : espesor de la muestra, m.

$h$  : coeficiente de convección,  $W/m^2 \cdot K$ .

El valor adimensional del tiempo medio puede ser definido en términos del coeficiente de difusión real ( $\alpha$ ) y el tiempo real ( $t$ ).

$$\tau_{0,5} = t_{0,5} \frac{\alpha}{L^2}$$

Donde:

$t_{0,5}$  : tiempo medio real, en segundos.

El coeficiente de difusión aparente puede ser calculado como:

$$\alpha_a = 0,2 \frac{L^2}{t_{0,5}}$$

Sustituyendo las ecuaciones y dividiendo los términos entre  $0,2 \alpha$  se obtiene:

$$\frac{L}{\alpha_a} = \frac{L}{\alpha} + \frac{3,5}{h} \quad (27)$$

Donde:

$1/\alpha_a$  : representa la resistencia total a la difusión.

$1/\alpha$  : representa la resistencia interna.

$3,5/h.L$  : es la resistencia durante la pérdida convectiva.

Finalmente un grafico de  $L/\alpha_a$  vs.  $(L)$  para dos o más espesores de muestras da una recta cuya pendiente corresponde a  $1/\alpha$  y un intercepto de  $3,5/h$ . Haciendo posible calcular el valor de la difusividad térmica de la muestra ( $\alpha$ ) y el valor del coeficiente de convección ( $h$ ).

Wangaard (1979) declara que un valor típico de la difusividad térmica de la madera a un contenido de humedad de 12% es de  $0,161 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , mientras que el acero presenta un valor de  $12,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

## 2.7 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

En el presente trabajo se utiliza una tarjeta de adquisición de datos del tipo analógico digital National Instruments modelo DAQCard -6024E, de 16 entradas y 2 salidas, velocidad de 2000 mediciones/s, 12-bit multifunction I/O. La presente tarjeta tendrá la función de adquisición de

los datos y control del sistema de potencia. Su sistema de conexión es para una computadora tipo Notebook.

## **2.8 SOFTWARE LABVIEW 7**

National Instruments es la firma creadora y distribuidora de este software especializado en la adquisición, análisis y presentación de datos. Puede ser conectado a diversos hardwares con la finalidad de adquirir los datos que salen de ellos. Realiza una variedad amplia de medidas referidas a temperatura, voltaje, resistencia, presión, tensión, pulso, fuerza, vibración, frecuencia, periodo, sonido, luz, señales numéricas, entre otros.

El software LabView 7 tiene más de 600 funciones incorporadas para la síntesis de la señal, el análisis de frecuencia, la probabilidad, la estadística, la matemáticas, la guarnición de curva, la interpolación, la señal numérica que procesa, y más.

Después de adquirir y realizar análisis de los datos, brinda la opción de presentarlos gráficamente. La presentación de los datos abarca la visualización de los datos, la generación de informe, el almacenaje de datos, conectividad de la base de datos, la gerencia de datos, y más. El ambiente gráfico del desarrollo de LabView 7 incluye centenares de funciones incorporadas y de herramientas para la presentación de los datos, y puede agregar más funciones con las cajas de herramientas contenidas en este mismo software.

## **2.9 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ELECTRICIDAD**

Loper (1968), explica que resistencia eléctrica,  $R$ , de una sustancia, es la oposición que encuentra la corriente eléctrica durante su recorrido. Su valor viene dado en ohmios, se designa con la letra griega omega mayúscula ( $\Omega$ ), y se mide con el Óhmetro. También lo define como la propiedad de un objeto o sustancia de transformar energía eléctrica en otro tipo de energía de forma irreversible, generalmente calor.

Según Gerrish (1991), resistencia o resistor (en lenguaje técnico) es el componente electrónico diseñado para introducir una resistencia eléctrica determinada entre dos puntos de un circuito. En el caso de las planchas, calentadores, etc., las resistencias se emplean para producir calor aprovechando el Efecto Joule. Siendo frecuente utilizar la palabra resistor como sinónimo de resistencia. El mismo autor señala que el termistor es una resistencia eléctrica que varía su valor en función de la temperatura. Habiendo dos clases de termistores: NTC y PTC.

El termistor NTC (Negative Temperature Coefficient) es una resistencia variable cuyo valor va decreciendo a medida que aumenta la temperatura. Son resistencias de coeficiente de temperatura negativo, constituidas por un cuerpo semiconductor cuyo coeficiente de temperatura es elevado, es decir, su conductividad crece muy rápidamente con la temperatura. Para su fabricación se utilizan óxidos semiconductores de níquel, zinc, cobalto, etc.

El termistor PTC (Positive Temperature Coefficient) es una resistencia variable cuyo valor se ve aumentado a medida que aumenta la temperatura. Los termistores PTC se utilizan en una gran variedad de aplicaciones: limitación de corriente, sensor de temperatura, desmagnetización y para la protección contra el recalentamiento de equipos tales como motores eléctricos. También se utilizan en indicadores de nivel, para provocar retardos en circuitos, como termostatos, y como resistores de compensación.

Robinson (1984), declara que la termocupla es un transductor de la temperatura, es decir, un dispositivo que traduce una magnitud física en una señal eléctrica. Está compuesta por dos alambres de metales diferentes, los que unidos convenientemente generan entre sus extremos libres una diferencia de potencial proporcional a la diferencia de temperatura entre ellos. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, del orden de los milivolts el cuál aumenta proporcionalmente con la temperatura.

A temperaturas mayores a 0 °C, los metales unidos experimentan un fenómeno denominado termoelectricidad, el cuál es casi nulo para temperaturas de 0 °C. Para evitar la tensión de error que existe en los extremos libres de la termocupla se puede introducir estas puntas frías o de referencia en una cubeta de hielo, para reducir su temperatura a 0 °C con el fin de minimizar el fenómeno termoeléctrico.

Hay una variedad de tipos de termocuplas, dependiendo los metales utilizados para su fabricación. Las termocuplas de cobre-constantán pertenecen al tipo T, su rango de trabajo es de  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y una tensión de  $-6,181$  a  $+20,873$  mV.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN

El presente estudio se realizó en el Laboratorio de Física del Departamento de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología, Facultad de Ciencias, y en el laboratorio de Propiedades Físico-Mecánicas de la Madera del Departamento de Industrias Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

#### 3.2 MATERIALES Y EQUIPOS

##### 3.2.1 ESPECIES

Las especies elegidas para medir su conductividad térmica y con ello calibrar el equipo fueron obtenidas como donación por parte de la empresa Exportimo y del almacén del Laboratorio de Propiedades Físico- Mecánicas de la Madera.

<u>Nombre Común</u>	<u>Nombre Científico</u>	<u>Familia</u>
Cachimbo	<i>Cariniana domestica</i> Mart.	Lecythidaceae
Ishpingo	<i>Amburana cearensis</i> Allen.	Fabaceae

##### 3.2.2 MATERIALES

- Madera de Cachimbo (*Cariniana domestica*) y de Ishpingo (*Amburana cearensis*).
- Tarjeta de adquisición de datos, DAQCard -6024E.
- Programa de computación LabView 7.

- Alambres de cobre.
- Resistencias eléctricas.
- Termistor.
- Focos (Leds).
- Termocupla de cobre-constantán.
- Convertidor/Amplificador de señal con ingreso en mV, HD978TR3 Delta Ohm.
- Plancha aislante de silicio poroso (50 cm x 50 cm)
- Resistencias planas de calefacción.
- Optoacoplador.
- Plancha de aluminio.
- Fibra de vidrio.
- Plancha de tecknopor.
- Termómetros de precisión.
- Pistola de soldar.
- Cables eléctricos.
- Termo.
- Pesas.
- Cinta adhesiva.
- Silicona.
- Hielo.

### 3.2.3 EQUIPOS

- Computadora.
- Fuente eléctrica.
- Sistema de termocuplas.
- Balanza.
- Estufa eléctrica.
- Desecadores de laboratorio.
- Horno.
- Multímetro.

## 3.3 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

### 3.3.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE MADERA

Se prepararon muestras de 30 cm x 30 cm y de espesor variable: 1,0 cm, 2,0 cm y 3,0 cm teniendo al final 3 muestras de cada espesor, siendo por consiguiente 9 probetas por especie y 18 en su totalidad. Luego de terminar con las mediciones de estas muestras, las mismas fueron recortadas a 20 cm x 20 cm manteniendo sus mismos espesores, con la finalidad de evaluar el tamaño idóneo para este tipo de ensayos. La menor dimensión, la de los espesores, corresponde a la dirección del flujo de calor. Todas estas muestras fueron secadas al aire y tuvieron una orientación tangencial con respecto al eje longitudinal del árbol.

Cabe mencionar que en el momento del habilitado de las muestras se recortaron pequeñas probetas contiguas a ellas con la final de determinar su densidad y contenido de humedad.

Los cuatros lados correspondientes al espesor de las muestras fueron selladas con pintura luego de su habilitado, para evitar posibles rajaduras.

### 3.3.2 PREPARACIÓN DE LA FUENTE CALIENTE

El calor aplicado a las muestras de madera proviene de una plancha de aluminio, la cual es una caja metálica de 30 cm x 30 cm x 6 cm que en su interior contiene 2 resistencias eléctricas planas de calefacción pegadas íntimamente a la superficie interna de la misma. Para evitar pérdidas de calor, la caja metálica fue rellena con fibra de vidrio. Ver imágenes en el Anexo 4.

### 3.3.3 ELABORACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Se elaboró un sistema eléctrico que se ajuste a los objetivos del trabajo. Las funciones básicas de este sistema son: Activar y/o desactivar el paso de la energía eléctrica a las resistencias encargadas de calentar a la plancha metálica, y medir la evolución de la temperatura en la superficie de la madera contraria a la fuente caliente.

### 3.3.4 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS ANALÓGICO-DIGITAL

La tarjeta de adquisición de datos del tipo analógico-digital National Instruments modelo DAQCard -6024E, de 16 entradas y 2 salidas, velocidad de 2000 mediciones/s, 12-bit multifunction I/O tiene a su cargo la adquisición de los datos de temperatura, en voltaje, de la plancha caliente y su control para mantener la temperatura de la misma a  $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1$ . Luego tiene el control de la adquisición de los datos de temperatura de la cara fría de la muestra, con una velocidad de 1000 mediciones/segundo, los promedia y guarda en un archivo de datos. Cabe señalar que toda la adquisición será recibida en voltaje y el control de los calentadores es a través de una señal digital.

### 3.3.5 ELABORACIÓN DEL PROGRAMA COMPUTARIZADO

Con la ayuda de las diversas herramientas existente en el software denominado LabView 7, se prosigió a elaborar un programa computarizado idóneo para los fines del presente trabajo.

Este programa logra controlar automáticamente la temperatura de la fuente caliente, permitiendo que la electricidad pase a las resistencias eléctricas cuando la temperatura de la plancha metálica sea menor a la convenida, o en su defecto, dando una orden de cese del paso de electricidad hacia las resistencias.

También adquiere los datos de voltaje que logra pasar a través de la muestra de la madera. Luego de adquirir estos datos, hace las modificaciones correspondientes para lograr datos de temperaturas provenientes de la información adquirida en voltaje. La tasa con la que adquiere dichos datos es de 100 por cada segundo, los promedia y arroja un dato por segundo.

Simultáneo a la adquisición de datos, hace uso de dos graficadores para ilustrar lo que esta pasando en el experimento. Uno de los gráficos está referido al comportamiento de la temperatura de la fuente caliente, la cual debe mantenerse constante, obviamente con pequeñas alteraciones, propias de la experiencia. El otro gráfico muestra la evolución de la temperatura en la superficie de la madera opuesta a la plancha metálica caliente.

Luego de adquirir y graficar los datos, registra en una memoria las temperaturas promedio de la superficie inferior de la muestra, para su posterior uso en el cálculo de la difusividad térmica, lo cual conllevará a introducir los datos en el grafico de Heisler y finalmente hallar el valor de la conductividad térmica.

### 3.3.6 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA MUESTRA

El elemento que mide la evolución de la temperatura es un termocupla de cobre-constantán previamente calibrada y cuya ecuación de regresión fue introducida en el programa antes explicado. Esta termocupla esta conformado por dos alambres de cobre y uno de constantán, formando así una doble termocupla, una de medición y la otra de referencia a 0 °C. Los extremos libres de los alambres de cobre van hacia un amplificador de señal.

Una de la termocupla va adherida en la parte central de la superficie de la madera a evaluar, dicha superficie es la que estará en la parte fría, en contacto íntimo con la plancha aislante de silicio poroso; la otra se encuentra dentro de un termo, el cual contiene hielo, con el fin de que la termocupla este referenciada a 0 °C.

El experimento se inicia al calentar la fuente hasta una temperatura de 40 °C, lo cuál conlleva 20 minutos aproximadamente. Al alcanzar dicha temperatura, prosigue la preparación de la muestra de madera a ser evaluada. Se coloca la plancha aislante de silicio poroso sobre una superficie plana accesible a la fuente caliente, colocándose, seguidamente, la madera sobre el aislante, de tal modo que la cara que contenga la termocupla sea la que este en contacto con la plancha de silicio. Seguidamente se deja unos 15 minutos para que el sistema madera-aislante se estabilice.

Al cabo de este tiempo, se coloca rápidamente la plancha caliente sobre la madera, dando así inicio propiamente dicho al experimento. Para mejorar la eficiencia del equipo diseñado se colocan pesas sobre la plancha caliente con el fin de reducir la existencia de bolsas de aire y disminuir la resistencia de contacto. El peso total colocado fue de 80 kg.

Para el caso de las muestras de 20 cm x 20 cm se prepararon estructuras de madera semejantes a un bastidor. Éstos tenían 30 cm de lado, 3 cm de ancho y 0,2 cm menos que los espesores de las muestras. Estas estructuras rodeaban a la muestra a ser medida, evitando, de este modo, alteraciones debido a factores externos.

Para evitar posibles influencias del medio así como pérdida de calor se colocó un marco de "tecknopor" alrededor del sistema montado durante todo el tiempo que duro las medidas.

El instante que finaliza el experimento es aquel en el que se logra obtener el valor de

$\Theta_{0,5} = \frac{T_m - T_\infty}{T_i - T_\infty}$  sea mayor a 0,5. Donde  $T_m$  es la temperatura medida, es decir la temperatura

de la superficie inferior de madera,  $T_\infty$  es la temperatura constante de la plancha caliente, 40 °C. y  $T_i$  es la temperatura inicial del experimento. El tiempo en lograr  $\Theta_{0,5}$  fue determinado por la propia experiencia.

### 3.3.7 NÚMERO DE REPETICIONES

Se realizaron cuatro mediciones para cada muestra, luego se promediaron estos valores, obteniéndose un valor por cada muestra. Se agruparon los valores correspondientes a un mismo espesor y una misma especie con la finalidad de promediarlos y tener un valor promedio.

El dato experimental utilizado para los posteriores cálculos es aquel que se aproxima al valor promedio final por espesor y especie.

### 3.3.8 CÁLCULOS DE COEFICIENTES TÉRMICOS

Para la determinación del valor de la conductividad térmica se hallaron previamente los valores de la difusividad térmica y del coeficiente de convección.

#### *A) CÁLCULO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA*

La determinación de la difusividad térmica,  $\alpha$ , se basa en lo estipulado por Siau (1995) usando una nueva variable térmica adimensional  $\Theta$  igual a (1-E) y adaptando algunas de las fórmulas para el caso del presente trabajo, ver ecuación 24 a 27. Las adaptaciones realizadas consistieron básicamente en hallar las nuevas constantes de la ecuación de difusión que se ajusten al experimento realizado. Para ello se procedió a determinar los diversos valores del número de Fourier,  $\tau$ , que aparecen en el eje de las abscisas del gráfico de Heisler, lo cuál se logró intersectando el tiempo adimensional 0,5 que aparece en el eje de las ordenadas con las curvas  $1/Bi$  de dicho gráfico. Se plotearon dichos valores vs. el valor de la curva  $1/Bi$  al que le corresponde, hallándose luego de la regresión lineal las nuevas constantes. Lográndose las nuevas ecuaciones que permitirán determinar la difusividad térmica de la muestra:

Con el fin, de determinar los valores de la difusividad térmica,  $\alpha$ , y del coeficiente de convectividad,  $h$ , para muestras de dos o más espesores diferentes, la regresión se transforma en la siguiente relación:

$$\frac{L}{\alpha_a} = \frac{L}{\alpha} + \frac{1,868 \cdot \rho \cdot c_{pw}}{h} \quad (28)$$

El gráfico  $L/\alpha_a$  vs.  $(L)$  dará una recta cuya pendiente corresponderá a la inversa del valor de la difusividad térmica de las muestras.

### *B) CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN*

Luego de realizar la regresión lineal del gráfico  $L/\alpha_a$  vs.  $(L)$ . El valor del intercepto de la ecuación de esta recta será numéricamente igual a  $1,868 \cdot \rho \cdot c_{pw} / h$ , de donde se despeja y se halla el valor del coeficiente de convección,  $h$ . Pero para ello se requiere conocer el valor del calor específico,  $c_{pw}$ , de la muestra, el cuál es determinado según la ecuación que Siau (1995) brinda:

$$c_{pw} = \frac{1176 + 5859 \cdot m}{1 + m} \quad (29)$$

Donde:

$c_{pw}$  : calor específico, J/kg.K.

$m$  : contenido de humedad entre 0,05 y 0,30.

Los datos, el desarrollo de las ecuaciones, las adaptaciones de la ecuación original de Siau, y los gráficos para la determinación de la difusividad térmica se encuentran detallados en el Anexo 2.

### *C) CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA*

En el presente trabajo se determinará, el coeficiente de conductividad térmica de las muestras de madera de dos formas, primeramente en base a la ecuación (24) que permite: conocida la difusividad térmica, la densidad y el calor específico de la muestra determinar este coeficiente, de acuerdo a la siguiente relación.

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot c_{pw} \quad (30)$$

De otro lado, se determinara el coeficiente de conductividad térmica en forma dinámica. Para este fin se tiene que graficar las curvas que describan el historial de la temperatura de las

muestras, en el gráfico de Heisler, es decir formar nuevas curvas  $1/Bi$  que describan el comportamiento de la temperatura al interior de la muestra.

Para lograr graficar estas curvas se requieren valores del número de Fourier ( $\tau$ ) y la temperatura adimensional  $\Theta$ .

El programa LabView 7 registra la temperatura de la superficie de la muestra opuesta a la fuente caliente. Se determina  $\Theta$  y  $\tau$  para cada temperatura y estos datos son ploteado juntos a los valores ya establecidos para la elaboración del gráfico de Heisler.

Obteniéndose de esa manera el gráfico que incluye las curvas  $1/Bi$  estándares y las nuevas que corresponden al de las muestras. Toca determinar los valores de estas curvas, para lo cual se realiza una interpolación, lográndose el valor exacto de la curva de cada espesor de las muestras en la línea  $\Theta = 0,5$ .

El valor obtenido corresponde a  $1/Bi$  de la muestra. Pero se sabe que  $Bi = hl/k$ , por lo cuál y luego de una sustitución de valores se determina finalmente el valor de la conductividad térmica correspondiente a determinada especie.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 ESPESOR, CONTENIDO DE HUMEDAD Y DENSIDAD

En los Cuadros 3 y 4 se presentan los resultados de espesor, contenido de humedad y densidad para las muestras de las dos especies estudiadas.

**Cuadro 3** Espesor, Contenido de Humedad y Densidad del Cachimbo

<b>Muestra</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>C.H (%)</b>	<b>Densidad(g/cm<sup>3</sup>)</b>
cachimbo 1,0-A	0,0091	10,43	0,67
cachimbo 1,0-B	0,0099	10,35	0,68
cachimbo 1,0-C	0,0094	10,51	0,67
cachimbo 2,0-A	0,0192	10,68	0,68
cachimbo 2,0-B	0,0192	10,70	0,67
cachimbo 2,0-C	0,0196	10,66	0,68
cachimbo 3,0-A	0,0299	10,98	0,64
cachimbo 3,0-B	0,0298	10,99	0,63
cachimbo 3,0-C	0,0293	10,97	0,64
PROMEDIO		10,70	0,66

**Cuadro 4** Espesor, Contenido de Humedad y Densidad del Ishpingo

<b>Muestra</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>C.H (%)</b>	<b>Densidad(g/cm<sup>3</sup>)</b>
ishpingo 1,0-A	0,0103	11,77	0,59
ishpingo 1,0-B	0,0106	11,83	0,59
ishpingo 1,0-C	0,0096	12,08	0,59
ishpingo 2,0-A	0,0203	11,09	0,70
ishpingo 2,0-B	0,0199	11,15	0,63
ishpingo 2,0-C	0,0203	11,39	0,68
ishpingo 3,0-A	0,0306	11,78	0,62
ishpingo 3,0-B	0,0305	11,92	0,62
ishpingo 3,0-C	0,0308	11,89	0,62
PROMEDIO		11,66	0,63

Los resultados obtenidos (Cuadro 2 y 3) muestran que el contenido de humedad y densidad promedio para el Cachimbo es 10,7 % y 0,66 g/cm<sup>3</sup>, y para el Ishpingo es 11,66 % y 0,63 g/cm<sup>3</sup> respectivamente.

## **4.2 PROGRAMA COMPUTARIZADO**

Con la aplicación del software LabView 7 se logró elaborar un sistema idóneo para nuestro cometido, el mismo que es mostrado en la Figura 4 y 5.

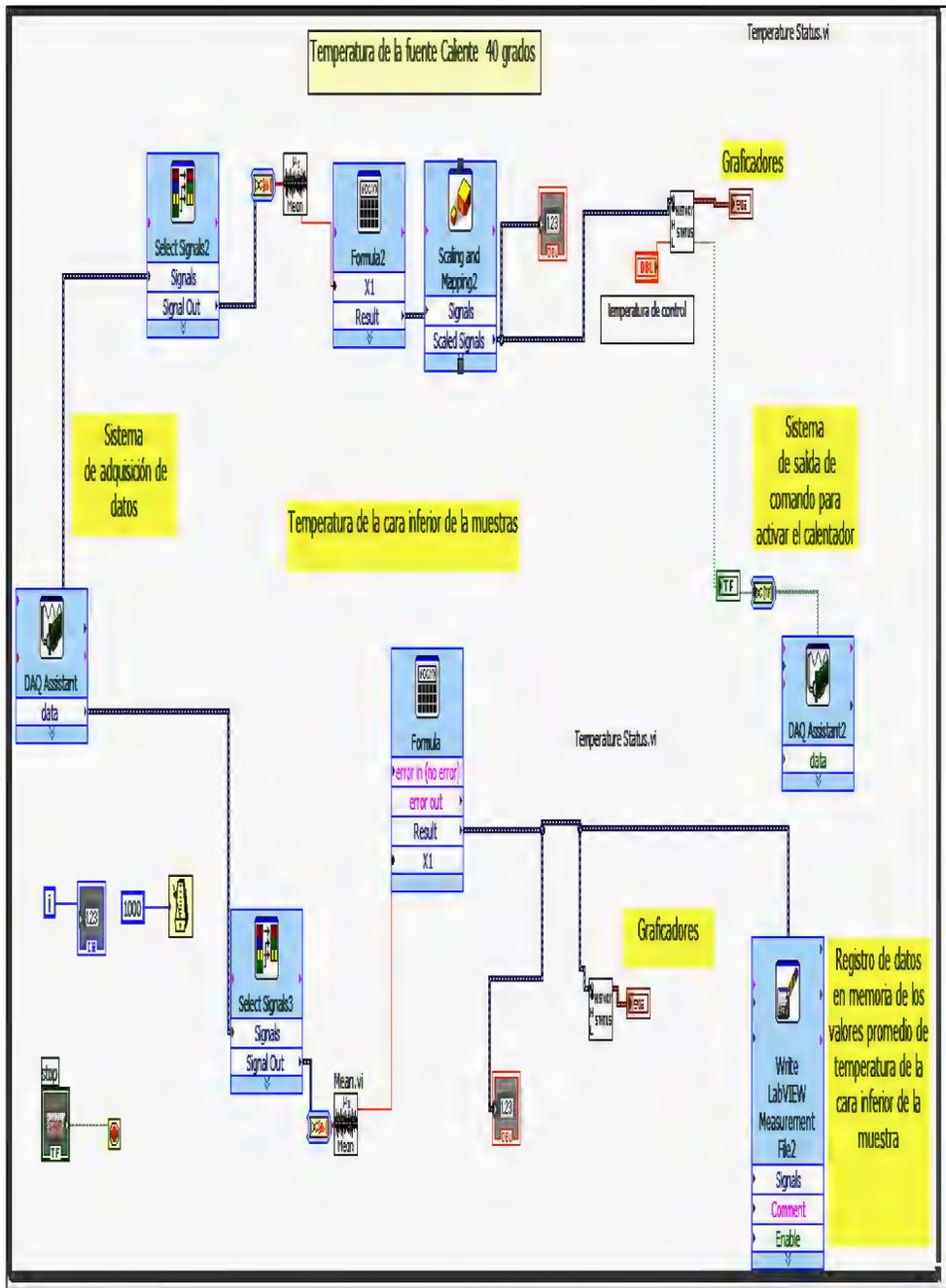
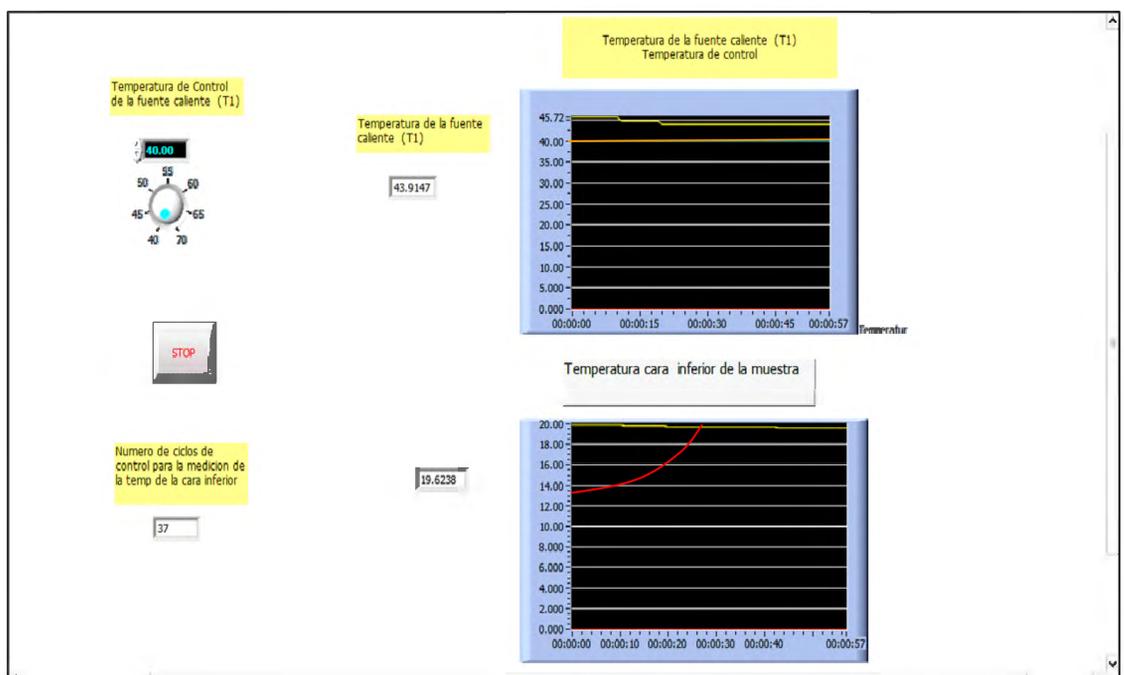


Figura 4 Diagrama de bloques del programa de adquisición de datos, usando el Programa LabView 7

Este sistema se puede dividir en dos partes. El primero se encuentra en la parte superior del gráfico, su función principal es la de activar/desactivar las resistencias eléctricas generadoras de calor.

El segundo componente, parte inferior del gráfico, es el encargado de adquirir, graficar y almacenar la información correspondiente a la evolución de la temperatura de la parte inferior de la muestra.

Ambos componentes están conectados a una tarjeta de adquisición de datos, el mismo que va conectado a la computadora.

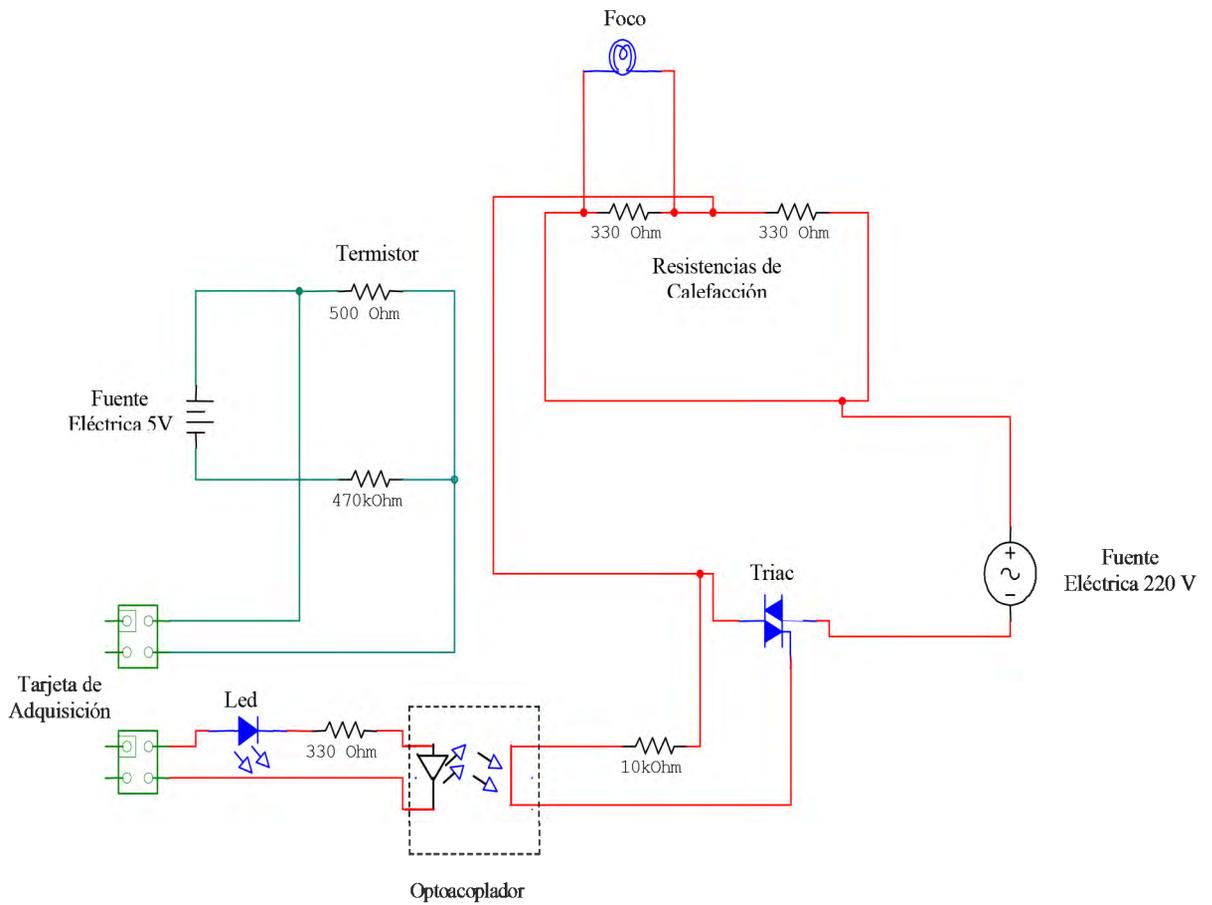


**Figura 5** Representación gráfica de las temperaturas

Esta segunda presentación muestra gráficamente el comportamiento de la temperatura de la fuente caliente, la evolución de la temperatura en la parte inferior de la muestra, así como también, el valor de la temperatura previamente definida para la plancha caliente, la cual fue convenida en  $40,0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,1$ . El recuadro más pequeño muestra el número de ciclos para la

medición de la temperatura de la cara inferior de la madera, el cual se decidió que fuese cada segundo.

### 4.3 DIAGRAMA ELÉCTRICO

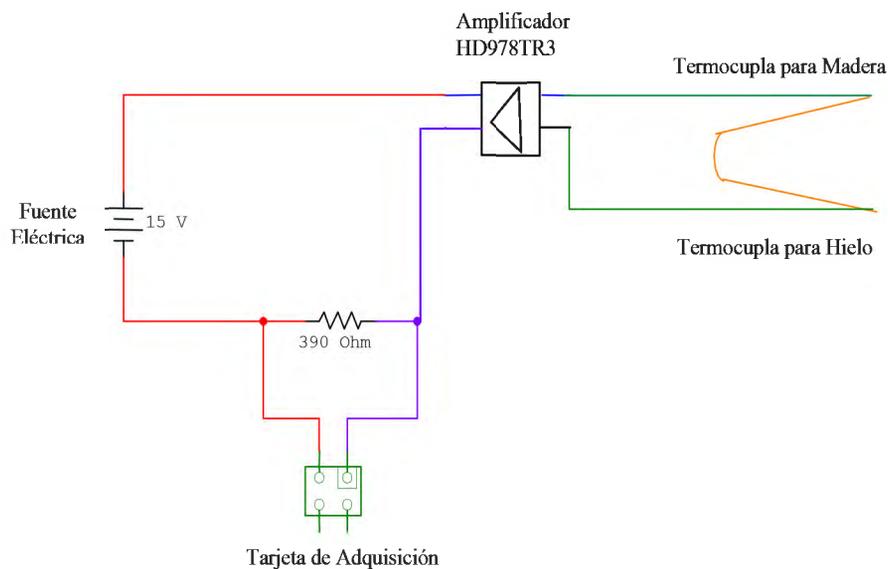


**Figura 6** Sistema de activación/desactivación de las resistencias de calefacción

Este gráfico puede ser dividido en dos partes. La primera, de color rojo, contiene a las dos resistencias eléctricas y a los demás elementos que permiten su activación/desactivación.

Esta compuesta por una fuente eléctrica, sistema de resistencia de variado ohmiaje, leds y un optoacoplador. Se trata de un sistema de potencia con 102 Watts de salida.

El otro componente esta compuesta por una fuente eléctrica y un sensor, termistor de 500 ohm y una precisión de temperatura de  $\pm 0,2$  °C. Su función es la de percibir la adquisición, ésta a la computadora, para que luego el programa computarizado mande una señal de activar/desactivar a las resistencias eléctricas generadoras de calor.



**Figura 7** Sistema eléctrico de medición de la temperatura de la muestra

Este sistema tiene como objetivo la medición de la temperatura de la muestra de madera. Está formado por una fuente eléctrica, una resistencia, un amplificador de señal y un par de

termocuplas conectadas entre sí. La señal es dirigida hacia la tarjeta de adquisición y luego ingresada a la computadora.

#### 4.4 TIEMPO QUE DEMORAN LAS MUESTRAS EN ALCANZAR $\Theta_{0,5}$

A continuación se muestra el tiempo que transcurre desde el inicio del experimento hasta cuando se obtiene el  $\Theta_{0,5} = 0,5$  y sus respectivos promedios valores. Los datos sombreados son aquellos que se acercan al dato promedio y por consecuencia fueron los utilizados para el cálculo de la conductividad térmica.  $\Theta_{0,5}$ .

**Cuadro 5** Valores de  $\Theta_{0,5}$  para Cachimbo de 30 cm x 30 cm y espesor variable (1,0; 2,0 y 3,0 cm)

<b>Muestra</b>	<b>Lectura 1</b>	<b>Lectura 2</b>	<b>Lectura 3</b>	<b>Lectura 4</b>	<b>Promedio</b>	<b>Prom.de prom.</b>
	<b>tiempo (s)</b>	<b>tiempo (s)</b>	<b>tiempo (s)</b>	<b>tiempo (s)</b>		
cachimbo 1,0cm-A	339	336	348	338	340,3	374,3
cachimbo 1,0cm-B	400	366	381	388	383,8	
cachimbo 1,0cm-C	435	406	<b>375</b>	379	398,8	
cachimbo 2,0cm-A	1465	1506	<b>1546</b>	1683	1550,0	1535,7
cachimbo 2,0cm-B	1476	1399	1375	1351	1400,3	
cachimbo 2,0cm-C	1784	1608	1576	1659	1656,8	
cachimbo 3,0cm-A	2730	<b>2678</b>	2697	2702	2701,8	2661,8
cachimbo 3,0cm-B	2639	2525	2889	2722	2693,8	
cachimbo 3,0cm-C	2566	2736	2555	2503	2590,0	

**Cuadro 6** Valores de  $\Theta_{0,5}$  para Cachimbo de 20 cm x 20 cm y espesor variable (1,0; 2,0 y 3,0 cm)

<i>Muestra</i>	<i>Lectura 1</i>	<i>Lectura 2</i>	<i>Lectura 3</i>	<i>Lectura 4</i>	<i>Promedio</i>	<i>Prom.de prom.</i>
	<i>tiempo (s)</i>	<i>tiempo (s)</i>	<i>tiempo (s)</i>	<i>tiempo (s)</i>		
cachimbo 1,0cm-A	357	354	383	<b>354</b>	362,0	354,7
cachimbo 1,0cm-B	350	365	334	349	349,5	
cachimbo 1,0cm-C	344	352	384	330	352,5	
cachimbo 2,0cm-A	1401	1365	<b>1371</b>	1324	1365,3	1375,9
cachimbo 2,0cm-B	1279	1394	1268	1289	1307,5	
cachimbo 2,0cm-C	1413	1456	1529	1422	1455,0	
cachimbo 3,0cm-A	2445	2376	2416	2394	2407,8	2531,7
cachimbo 3,0cm-B	2763	2771	2852	2585	2742,8	
cachimbo 3,0cm-C	2422	<b>2505</b>	2451	2400	2444,5	

**Cuadro 7** Valores de  $\Theta_{0,5}$  para Ishpingo de 30 cm x 30 cm y espesor variable (1,0; 2,0 y 3,0 cm)

<i>Muestra</i>	<i>Lectura 1</i>	<i>Lectura 2</i>	<i>Lectura 3</i>	<i>Lectura 4</i>	<i>Promedio</i>	<i>Prom.de prom.</i>
	<i>tiempo (s)</i>	<i>tiempo (s)</i>	<i>tiempo (s)</i>	<i>tiempo (s)</i>		
ishpingo 1,0cm-A	481	446	493	460	470,00	466,5
ishpingo 1,0cm-B	444	488	498	451	470,25	
ishpingo 1,0cm-C	<b>466</b>	461	459	451	459,25	
ishpingo 2,0cm-A	1458	1471	1514	<b>1431</b>	1468,50	1422,3
ishpingo 2,0cm-B	1353	1301	1349	1308	1327,75	
ishpingo 2,0cm-C	1491	1452	1446	1494	1470,75	
ishpingo 3,0cm-A	3313	3393	3428	3462	3399,00	3337,4
ishpingo 3,0cm-B	3310	3309	3264	3257	3285,00	
ishpingo 3,0cm-C	3388	3228	<b>3337</b>	3360	3328,25	

**Cuadro 8** Valores de  $\Theta_{0,5}$  para Ishpingo de 20 cm x 20 cm y espesor variable (1,0; 2,0 y 3,0 cm)

<i>Muestra</i>	<i>Lectura 1</i>	<i>Lectura 2</i>	<i>Lectura 3</i>	<i>Lectura 4</i>	<i>Promedio</i>	<i>Prom.de prom.</i>
	<i>tiempo (s)</i>	<i>tiempo (s)</i>	<i>tiempo (s)</i>	<i>tiempo (s)</i>		
ishpingo 1,0cm-A	447	463	447	447	451,00	443,42
ishpingo 1,0cm-B	<b>443</b>	444	431	435	438,25	
ishpingo 1,0cm-C	446	433	426	459	441,00	
ishpingo 2,0cm-A	1402	1395	1402	1387	1396,50	1353,4
ishpingo 2,0cm-B	1345	1349	1321	1335	1337,50	
ishpingo 2,0cm-C	1311	<b>1351</b>	1311	1332	1326,25	
ishpingo 3,0cm-A	2942	3017	2996	2954	2977,25	2969,3
ishpingo 3,0cm-B	3007	2960	2952	2966	2971,25	
ishpingo 3,0cm-C	2953	<b>2971</b>	2951	2962	2959,25	

De los cuadros se puede observar que la variación de los espesores de las muestras no guardan una relación proporcional con el tiempo que demoran en alcanzar  $\Theta_{0,5}$ .

En ambas especies y para los tres espesores, el tiempo que demoran las muestras de 20 cm x 20 cm en llegar a  $\Theta_{0,5}$  es menor de lo que demoran las muestras de 30 cm x 30 cm. Debido a esto a que el área de la plancha caliente (30 cm x 30 cm) al ser mayor que el de la muestra, hace que el flujo de calor sea continuo sobre las muestras de 20 x 20 cm, despreciándose las pérdidas de calor de los bordes de la plancha. Además que los márgenes de las muestras se encuentran mejor aislados por acción del bastidor de madera, asegurándose que la muestra reciba el calor eficientemente.

Comparando los tiempos que demoran ambas especies en alcanzar  $\Theta_{0,5}$ , se observa que las muestras de cachimbo de 1,0 cm y 3,0 cm de espesor demoran menos que sus recíprocas de ishpingo, coincidiendo con lo estipulado en la bibliografía, donde se explica que la densidad y la presencia de extractivos influyen en las propiedades térmicas de la madera. Las muestras de ishpingo al ser ligeramente menos densas que las de cachimbo tienen en su estructura más

cantidad de espacios vacíos y por consecuencia mayor cantidad de aire, el cuál es un elemento muy aislante y de baja conductividad térmica; logrando que las muestras de esta especie ofrezcan cierta resistencia al paso del calor, conllevando a un mayor tiempo de transferencia. Esta diferencia entre los tiempos es más notoria en las muestras de mayor espesor.

En el caso de las muestras de 2,0 cm de espesor se observa un comportamiento diferente, es decir, el tiempo que las muestras de cachimbo demoran en calentarse es relativamente mayor a las de ishpingo, lo cuál contradice al comportamiento esperado. Ensayos preliminares en muestras de tornillo y catahua también presentaron ciertas anomalías en mediciones de muestras de dicho espesor. Este comportamiento se debería a los efectos propios que ocasiona una fuente caliente al entrar en contacto con un cuerpo con diferente temperatura. En las muestras de 1,0 cm, dado al pequeño espesor, el calor se transmite rápidamente. En el caso de las muestras de 3,0 cm el espesor es tal que las alteraciones iniciales no afectan la variación de la temperatura en la parte inferior de la muestra, debido a que le calor fluye más lentamente. Contrario a las muestras de 2,0 cm de espesor que están expuestas a los efectos iniciales de transferencia de calor, estando el flujo influenciado por este hecho.

Analizando dicho comportamiento, se decidió realizar los demás cálculos basándose en las muestras de 1,0 y 3,0 cm de espesor, dado a que son estos espesores los que se ajustan a las condiciones asumidas en este trabajo.

#### **4.5 VALOR DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA Y DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN**

En el Cuadro 9 se muestran los valores calculados de la difusividad térmica y del coeficiente de convección de las muestras. Los datos y cálculos para determinar estos coeficientes se encuentran en el Anexo 3.

**Cuadro 9** Valores experimentales de la difusividad térmica y del coeficiente de convección

<b>Especie</b>	<b>Superficie de la muestra (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Difusividad Térmica (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Coefficiente de Convección (W/m<sup>2</sup>.K)</b>
Cachimbo	30 x 30	1,67 x 10 <sup>-7</sup>	49,15
	20 x 20	1,67 x 10 <sup>-7</sup>	51,44
Ishpingo	30 x 30	1,25 x 10 <sup>-7</sup>	61,13
	20 x 20	1,43 x 10 <sup>-7</sup>	45,15

El valor de la difusividad térmica del ishpingo es menor al del cachimbo, esto se debería a que el primero tiene mayor contenido de humedad y calor específico. Pues, según Wangaard (1979), la difusividad térmica varía inversamente con el contenido de humedad.

Sin embargo, ambos valores se encuentran muy próximos a lo que este mismo autor refiere como un valor típico de la difusividad térmica de la madera a un contenido de humedad de 12%,  $0,161 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### 4.6 GRÁFICA DE HEISLER

Se elaboraron gráficas de Heisler para los dos espesores de cada tamaño de superficie y especie, dichas gráficas contienen las curvas de  $1/Bi$  estándares. Las curvas correspondientes a las muestras se ubican entre ellas. El eje de las abscisas contiene los valores del número de

Fourier,  $\tau = \alpha t / L^2$ , que no es más que un tiempo adimensional. El eje de las ordenadas muestra los valores de  $\frac{T_m - T_\infty}{T_i - T_\infty}$ .

Todas estas gráficas muestran la evolución de la temperatura en la parte inferior de la madera. Se observa que las curvas pertenecientes a las muestras tienen el mismo comportamiento que las líneas estandarizadas, lo cuál confirma la correcta aplicación de la condición inicial y las de frontera, y por consecuencia, la correcta solución matemática para este tipo de transferencia de calor.

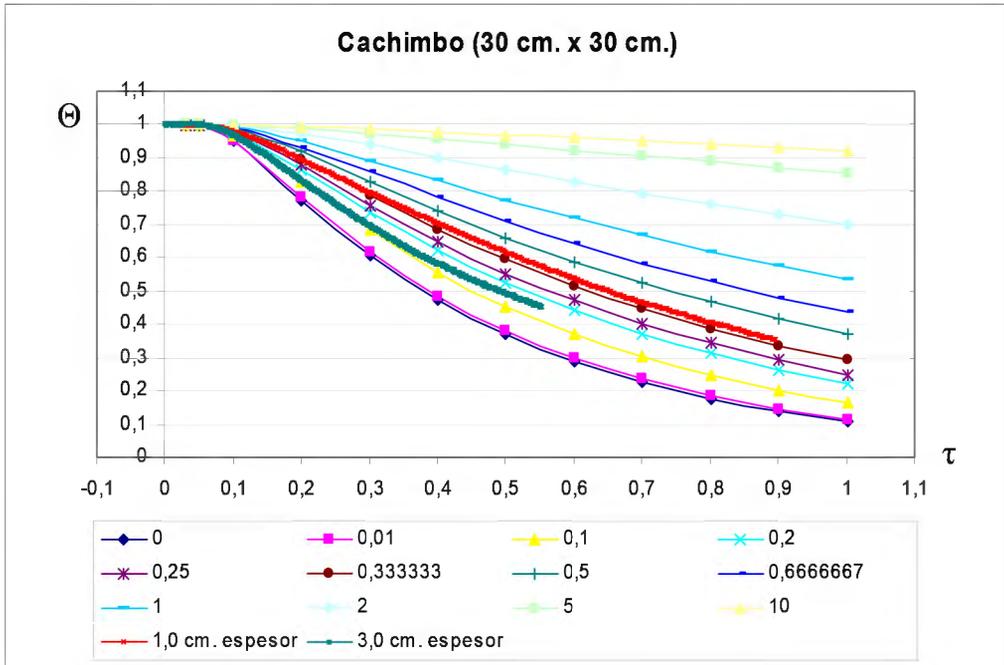
En el caso de las curvas pertenecientes a las muestras de cachimbo, se observa un comportamiento similar en las probetas de 30 x 30 cm y las de 20 x 20 cm. Las curvas pertenecientes a las muestras de 1,0 cm de espesor se ubican entre las curvas estándares  $1/Bi$  igual a 0,33 y 0,5. Las de 3 cm de espesor se ubican entre las curvas 0,1 y 0,2. Siendo el valor exacto de la curva correspondiente a la muestra, aquel que se logra por la interpolación de éstas con las curvas estándares en la línea  $\Theta = 0,5$ .

Los valores calculados para las probetas de 30 cm x 30 cm y espesor 1,0 cm y 3,0 cm son, 0,36 y 0,14 respectivamente. Para las muestras de 20 x 20 cm y espesor de 1,0 y 3,0 cm son, 0,39 y 0,12 respectivamente.

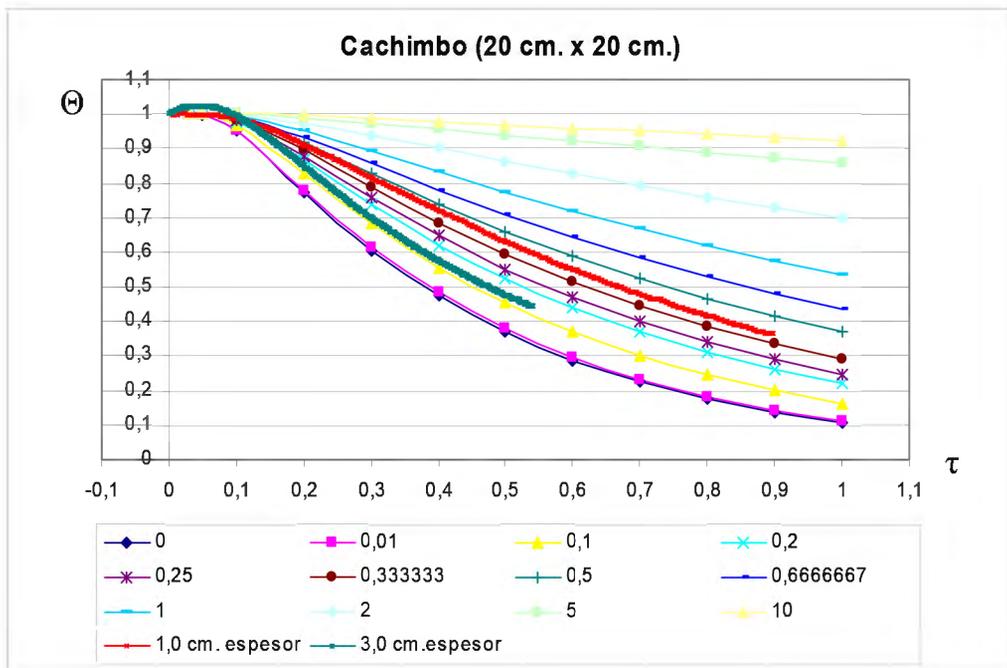
En el caso de las muestras de ishpingo, los espesores similares presentan un comportamiento muy parecido entre ellas. Siendo 0,25 y 0,08 los valores calculados para las curvas de las muestras de 30 cm x 30 cm y de 1,0 y 3,0 cm. respectivamente. Los valores calculados para las muestras de 20 cm x 20 cm y espesor de 1,0 y 3,0 cm son, 0,27 y 0,1 respectivamente.

La diferencia en los valores de las curvas pertenecientes a 1,0 y 3,0 cm se debe a que el tiempo que transcurre para que la parte inferior de la muestra alcance una temperatura dada, es mayor en las muestras de mayor espesor.

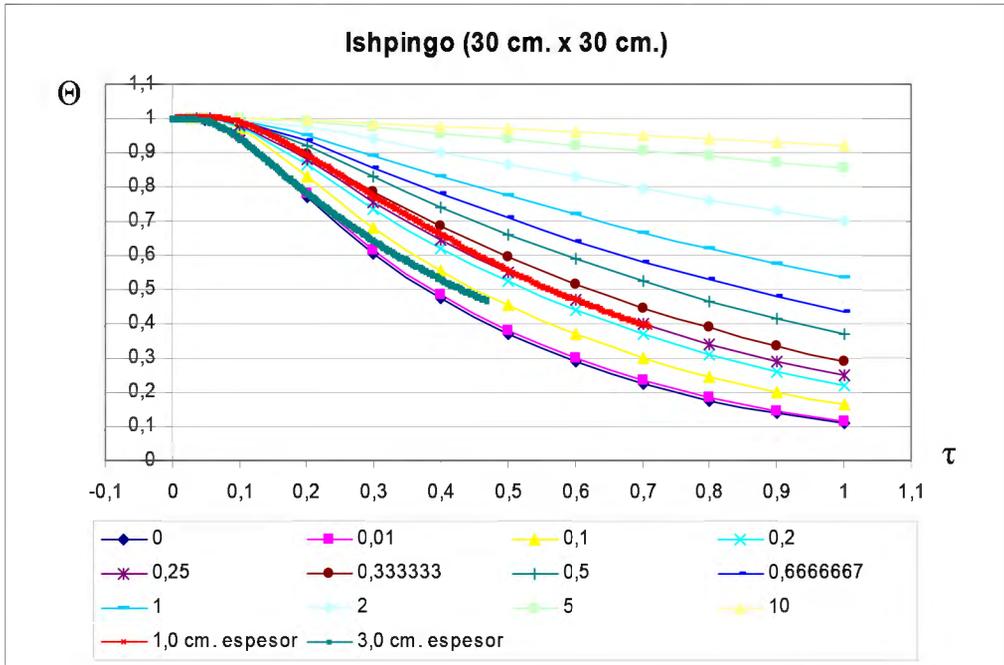
Las figuras del 8 al 11 muestran las curvas que describen la evolución de la temperatura en la parte inferior de las muestras.



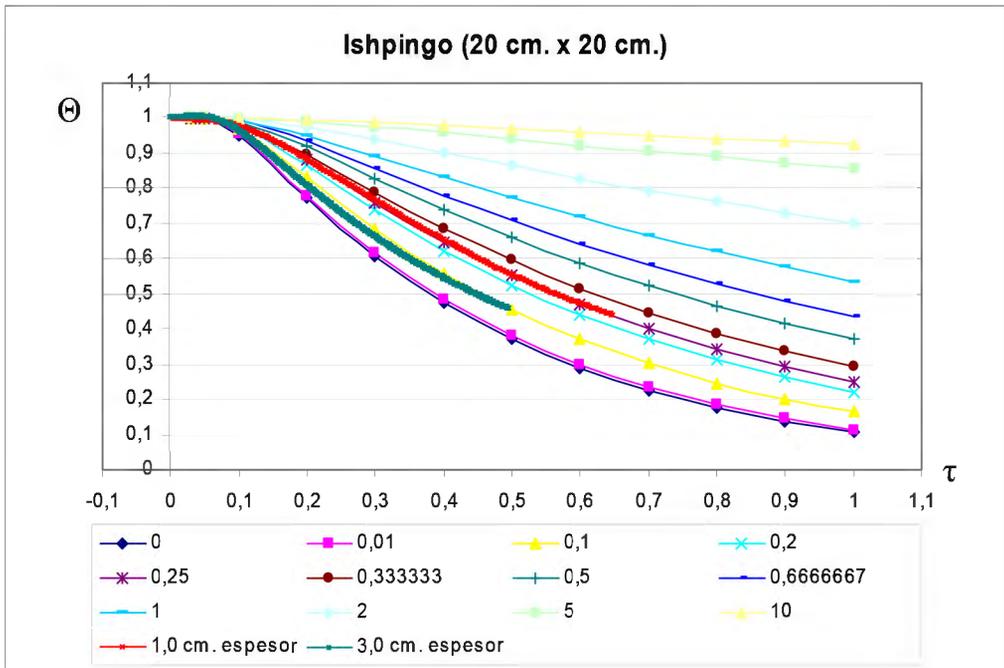
**Figura 8** Gráfica de Heisler para Cachimbo de 30 cm x 30 cm y espesor variable (1,0 y 3,0 cm)



**Figura 9** Gráfica de Heisler para Cachimbo de 20 cm x 20 cm y espesor variable (1,0 y 3,0 cm)



**Figura 10** Gráfica de Heisler para Ishpingo de 30 cm x 30 cm y espesor variable (1,0 y 3,0 cm)



**Figura 11** Gráfica de Heisler para Ishpingo de 20 cm x 20 cm y espesor variable (1,0 y 3,0 cm)

## 4.7 CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

### 4.7.1 MÉTODO DIRECTO

En base a la ecuación (30), el valor de la conductividad térmica esta dado por el producto de la difusividad térmica, la densidad de la muestra y el calor específico. Tal como se muestra en el Cuadro 10.

**Cuadro 10** Valores de la conductividad térmica por el método directo

<i>Especie</i>	<i>Superficie de la muestra (cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Difus. Térmica (m<sup>2</sup>/s)</i>	<i>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Calor Específico (J/kg.K)</i>	<i>Conduc. Térmica (W/m.K)</i>
Cachimbo	30 x 30	1,67 x 10 <sup>-7</sup>	663,80	1628,64	0,180
	20 x 20	1,67 x 10 <sup>-7</sup>	663,80	1628,64	0,180
Ishpingo	30 x 30	1,25 x 10 <sup>-7</sup>	625,25	1666,52	0,147
	20 x 20	1,43 x 10 <sup>-7</sup>	625,25	1666,52	0,149

El valor de la conductividad térmica obtenido por el método directo del cachimbo es 0,18 W/m.K, el cuál es muy similar a lo que estipula la bibliografía para especies de la misma densidad, lo mismo sucede con el ishpingo, cuya conductividad obtenida es 0,14 W/m.K.

### 4.7.2 MÉTODO DINÁMICO

Luego de calcular los valores de las curvas pertenecientes a las muestras dentro del gráfico de Heisler se prosigue con el cálculo de la conductividad térmica. Este valor es calculado de la siguiente manera:

$$\frac{1}{Bi} = \frac{k}{h.L}$$

Donde:

1/Bi: valor de la curva correspondiente a cada espesor.

h : coeficiente de convección, W/m<sup>2</sup>.K.

$L$  : espesor de la muestra, m.

$k$  : conductividad térmica, W/m.K.

**Cuadro 11** Valores experimentales de la conductividad térmica

<i>Especie</i>	<i>Superficie (cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Espesor (m)</i>	<i>h (W/m<sup>2</sup>.K)</i>	<i>1/Bi</i>	<i>k (W/m.K)</i>
Cachimbo	30 x 30	0,0098	49,15	0,36	0,172
		0,0302	49,15	0,14	0,191
	20 x 20	0,0094	51,43	0,39	0,189
		0,0296	51,4	0,12	0,183
Ishpingo	30 x 30	0,0102	61,13	0,25	0,156
		0,0308	61,13	0,08	0,141
	20 x 20	0,0106	45,15	0,27	0,132
		0,0308	45,15	0,10	0,146

Mediante el método dinámico se obtuvieron valores variados para la conductividad térmica, aunque todos ellos cercanos a los valores obtenidos por el método directo.

En el caso del cachimbo, las muestras de 20 cm x 20 cm son las que coinciden con el valor directo. En el caso del ishpingo, las muestras de 3,0 cm, en ambas secciones, son las coinciden con su similar determinado por el método directo.

La diferencia de los valores de la conductividad térmica del cachimbo y del ishpingo, 0,18 y 0,14 W/m.K. respectivamente, se deben básicamente a la relativa mayor densidad que presenta la primera especie mencionada, así como a la abundante presencia de cristales de oxalato en su estructura microscópica.

## 5. *CONCLUSIONES*

1. El equipo diseñado y construido para el presente trabajo, permite determinar satisfactoriamente las constante de conductividad térmica de muestras de madera, en condiciones de laboratorio, con una precisión del orden del 10%. Sin embargo, se requiere mejorar el sistema de calentamiento y su placa, a fin de que la transferencia convectiva de calor sea optima.
2. El uso de silicio poroso como material aislante se explica por el denominado “efecto espejo” que éste cumple en el experimento. Dado a que el flujo de calor al interior de la muestra describe un comportamiento simétrico con respecto a la línea central de la muestra, el aislante reemplaza a la otra mitad de la muestra, permitiendo medir la temperatura en lo que sería esta línea central de la muestra, pero que por efectos del aislante constituye la superficie inferior de la muestra.
3. La condición inicial, las condiciones de frontera y la solución matemática de la transferencia de calor asumidas para el presente trabajo son las correctas.
4. El programa LabView 7 constituye una herramienta muy importante en el funcionamiento del equipo. Logra la adquisición, análisis, presentación y registro de la información en archivos de Excel, haciéndolo fácilmente manipulable para posteriores cálculos.
5. Para el cálculo de la difusividad térmica y del coeficiente de convección se requiere como mínimo muestras de dos o más espesores. Teniendo estos valores, solo se requiere de un espesor para calcular el valor de la conductividad térmica.
6. Existe una buena consistencia entre las medidas obtenidas de la conductividad térmica por el método directo y el método dinámico, en especial con muestras de dimensiones de 20 x 20 x 3 cm.

7. Las muestras de 3,0 cm. de espesor son las que mejor responden a este experimento, por lo cuál se convierten en el espesor recomendado para efectos del equipo.
8. Las muestras de 20 cm de lado son las que brindan resultados óptimos. Éstos al ser de menor área que la plancha caliente y con la protección del bastidor de madera, reciben el calor de una manera más eficiente, despreciando las influencias del entorno.
9. La conductividad térmica en la madera depende directamente de la densidad, contenido de humedad, cantidad y calidad de extractivos. Las mediciones obtenidas con el equipo corroboran estas hipótesis.

## **6. RECOMENDACIONES**

1. Diseñar, dentro del programa LabView 7, una manera de referenciar la termocupla con respecto a 0 °C, con la finalidad de prescindir del recipiente conteniendo hielo.
2. El espesor de la superficie de la plancha caliente debe ser lo mas delgado posible, para evitar alteraciones en su temperatura al momento de entrar en contacto con la madera y mejorar el flujo convectivo.
3. La aplicación de la plancha caliente sobre la muestra debe ser lo más rápido posible, pues de lo contrario se iría en contra de las condiciones definidas para el experimento.
4. Realizar mediciones de conductividad térmica en otras especies, considerando los tipos de corte con respecto al eje longitudinal del árbol: corte tangencial, radial y transversal. De tal manera que se pueda apreciar el comportamiento del equipo frente a la anisotropía propia de la madera.
5. Dado a la importancia que tiene la humedad en el valor de la conductividad térmica, se recomienda realizar mediciones de probetas a diferentes contenidos de humedad.

## *BIBLIOGRAFÍA*

1. Bejan, Abrian. 1993. Heat Transfer. MT: McGraw-Hill. 173p.
2. Çengel Yunus A. 2003. Transferencia de Calor. US: McGraw-Hill. 150p.
3. Criswell, M.; Vanderbilt, D. 1981. Wood as a Structural Material. US: The Pennsylvania State University. p. 46-52.
4. Chavesta, M. 1996. Determinación del Calor Específico y de la Conductividad Térmica en dos Especies Forestales. Tesis Mg. Sc. Lima, PE, UNALM.
5. Eckert, E. 1972. Analysis of Heat and Mass Transfer. JP: McGraw-Hill. 285p.
6. Forest Products Laboratory. 1980. The Encyclopedia of Wood. US: Sterling Publishing. p. 59-61.
7. Guerrish, H. 1991. Fundamentos de Electricidad. MX: Limusa. p.21-57.
8. Incropera, F. 1999. Fundamentos de Transferencia de Calor. MX. Limusa. 839p.
9. Isachenko, V. 1973. Transferencia de Calor. RU: Editorial Marcombo. p.19-457.
10. Kolmann, F. 1959. Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones. ES: Springer-Verlag. V. 1, p. 544-576.
11. Kolmann, F. 1989. Principles of Wood Science and Technology. US. Springer-Verlag. V. 1, p. 240-257.
12. Kreith, F. 2001. Principios de Transferencia de Calor. MX: Thomson Learning. p. 1-288.
13. Loper, O. 1968. Introducción a la Electricidad y a la Electrónica. MX: Editorial Diana. p. 45-68.
14. Manrique, J. 2002. Transferencia de Calor. MX: Oxford University Press. 304p.
15. Mills, A. 1994. Transferencia de Calor. ES: McGraw-Hill. 281 p.

16. Pitts, D. 1975. Teoría y Problemas de Transferencia de Calor.US: McGraw-Hill. 268p.
17. Robinson, V. 1984. Conceptos sobre Electricidad. MX: Editorial Diana. p. 37-65.
18. Serway, R. 1997. Física. MX: McGraw- Hill. V.1, p. 554-577.
19. Siau, J. 1984. Transport Process in Wood.DE: Springer-Verlag. p. 132-222.
20. Siau, J. 1995. Wood: Influence of Moisture on Physical Properties.US: Department of Wood Science and Forest Products Virginia Polytechnic Institute and State University. p. 86-188.
21. Venkateswaran, A. 1974. A Note on the Relationship between Electrical Properties and Thermal Conductivity of Woods.US: Wood Science and Technology. V.8, p. 50-55.
22. Wangaard, F. 1979. Wood: Its Structure and Properties. US: The Pennsylvania State University. V. 1, p.46-52.
23. Wangaard, F. 1968. Heat Transmissity of Southern Pine Wood, Plywood, Fiberboard and particleboard. Louisiana, US: The Pennsylvania State University. 57p.
24. Wakefield. W. 1951. Canadian Woods. Their Properties and Uses. CA: Minister of Supply and Sevices. p. 90-92.
25. Yoza, L. 1993. Conductividad Térmica en Madera de Moena (*Aniba amazónica* Meiz). Revista Forestal del Perú. 20 (2). p. 71-77.

## ANEXO I

PRIMERO CINCO RAICES DE LA ECUACIÓN  $\lambda_n \cdot \text{Tan}(\lambda_n) = C$

$C$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$
0.000	0.0000	3.1416	6.2832	9.4248	12.5664
0.002	0.0447	3.1422	6.2835	9.4250	12.5665
0.004	0.0632	3.1429	6.2838	9.4252	12.5667
0.006	0.0774	3.1435	6.2841	9.4254	12.5668
0.008	0.0893	3.1441	6.2845	9.4256	12.5670
0.010	0.998	3.1448	6.2848	9.4258	12.5672
0.020	0.1410	3.1479	6.2864	9.4269	12.5680
0.040	0.1987	3.1543	6.2895	9.4290	12.5696
0.060	0.2425	3.1606	6.2927	9.4311	12.5711
0.080	0.2791	3.1668	6.2959	9.4333	12.5727
0.100	0.3111	3.1731	6.2991	9.4354	12.5743
0.200	0.4328	3.2039	6.3148	9.4459	12.5823
0.300	0.5218	3.2341	6.3305	9.4565	12.5902
0.400	0.5932	3.2636	6.3461	9.4670	12.5981
0.500	0.6533	3.2923	6.3616	9.4775	12.6060
0.600	0.7051	3.3204	6.3770	9.4879	12.6139
0.700	0.7506	3.3477	6.3923	9.4983	12.6218
0.800	0.7910	3.3744	6.4074	9.5087	12.6296
0.900	0.8274	3.4003	6.4224	9.5190	12.6375
1.000	0.8603	3.4256	6.4373	9.5293	12.6453
1.500	0.9882	3.5422	6.5097	9.5801	12.6841
2.000	1.0769	3.6436	6.5783	9.6296	12.7223
3.000	1.1925	3.8088	6.7040	9.7240	12.7966
4.000	1.2646	3.9352	6.8140	9.8119	12.8678
5.000	1.3138	4.0336	6.9096	9.8928	12.9352
6.000	1.3496	4.1116	6.9924	9.9667	12.9988
7.000	1.3766	4.1746	7.0640	10.0339	13.0584
8.000	1.3978	4.2264	7.1263	10.0949	13.1141
9.000	1.4149	4.2694	7.1806	10.1502	13.1660
10.000	1.4289	4.3058	7.2281	10.2003	13.2142
15.000	1.4729	4.4255	7.3959	10.3898	13.4078
20.000	1.4961	4.4915	7.4954	10.5117	13.5420
30.000	1.5202	4.5615	7.6057	10.6543	13.7085
40.000	1.5325	4.5979	7.6647	10.7334	13.8048
50.000	1.5400	4.6202	7.7012	10.7832	13.8666
10.000	1.5552	4.6659	7.7764	10.8871	13.9981

## ANEXO 2

**TABLA DE DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA**

<b>CACHIMBO 30 cm x 30 cm</b>					
Muestra	Tiempo(s)	Espesor "L" (m)	$\alpha_a=0,3829 \cdot L^2 / \Theta_{0,5}$	$1 / \alpha_a$	$L / \alpha_a$
cachimbo 1,0cm-A1	339	0,0091	9,35338E-08	10691325,38	97291,06
cachimbo 1,0cm-B1	400	0,0099	9,38201E-08	10658699,93	105521,13
cachimbo 1,0cm-C1	435	0,0098	7,77771E-08	12857252,81	120858,18
cachimbo 1,0cm-A2	336	0,0091	9,43689E-08	10596711,88	96430,08
cachimbo 1,0cm-B2	366	0,0099	1,02536E-07	9752710,43	96551,83
cachimbo 1,0cm-C2	406	0,0098	8,33326E-08	12000102,62	112800,96
cachimbo 1,0cm-A3	348	0,0091	9,11148E-08	10975165,88	99874,01
cachimbo 1,0cm-B3	381	0,0099	9,84988E-08	10152411,68	100508,88
cachimbo 1,0cm-C3	375	0,0098	9,02215E-08	11083838,63	104188,08
cachimbo 1,0cm-A4	338	0,0091	9,38105E-08	10659787,55	97004,07
cachimbo 1,0cm-B4	388	0,0099	9,67217E-08	10338938,93	102355,50
cachimbo 1,0cm-C4	379	0,0098	8,92692E-08	11202066,24	105299,42
cachimbo 3,0cm-A1	2730	0,0302	1,25391E-07	7975077,35	238454,81
cachimbo 3,0cm-B1	2639	0,0298	1,28848E-07	7761068,13	231279,83
cachimbo 3,0cm-C1	2566	0,0296	1,28104E-07	7806134,77	228719,75
cachimbo 3,0cm-A2	2678	0,0302	1,27825E-07	7823171,12	233912,82
cachimbo 3,0cm-B2	2525	0,0298	1,34666E-07	7425804,10	221288,96
cachimbo 3,0cm-C2	2736	0,0296	1,20145E-07	8323298,80	243872,65
cachimbo 3,0cm-A3	2697	0,0302	1,26925E-07	7878675,32	235572,39
cachimbo 3,0cm-B3	2889	0,0298	1,17698E-07	8496296,26	253189,63
cachimbo 3,0cm-C3	2555	0,0296	1,28656E-07	7772671,22	227739,27
cachimbo 3,0cm-A4	2702	0,0302	1,2669E-07	7893281,69	236009,12
cachimbo 3,0cm-B4	2722	0,0298	1,24919E-07	8005163,87	238553,88
cachimbo 3,0cm-C4	2503	0,0296	1,31329E-07	7614479,86	223104,26

<b>CACHIMBO 20 cm x 20 cm</b>					
Muestra	Tiempo(s)	Espesor "L" (m)	$\alpha_a=0,3829 \cdot L^2 / \Theta_{0,5}$	$1 / \alpha_a$	$L / \alpha_a$
cachimbo 1,0cm-A1	357	0,0091	8,88178E-08	11259006,38	102456,96
cachimbo 1,0cm-B1	350	0,0099	1,07223E-07	9326362,44	92330,99
cachimbo 1,0cm-C1	344	0,0098	9,83519E-08	10167574,64	95575,20
cachimbo 1,0cm-A2	354	0,0091	8,95705E-08	11164392,88	101595,98
cachimbo 1,0cm-B2	365	0,0099	1,02817E-07	9726063,68	96288,03
cachimbo 1,0cm-C2	352	0,0098	9,61166E-08	10404029,86	97797,88
cachimbo 1,0cm-A3	383	0,0091	8,27884E-08	12078990,03	109918,81
cachimbo 1,0cm-B3	334	0,0099	1,12359E-07	8900014,44	88110,14
cachimbo 1,0cm-C3	384	0,0098	8,81069E-08	11349850,76	106688,60
cachimbo 1,0cm-A4	354	0,0091	8,95705E-08	11164392,88	101595,98
cachimbo 1,0cm-B4	349	0,0099	1,0753E-07	9299715,69	92067,19
cachimbo 1,0cm-C4	330	0,0098	1,02524E-07	9753777,99	91685,51
cachimbo 3,0cm-A1	2445	0,0302	1,40007E-07	7142514,33	213561,18
cachimbo 3,0cm-B1	2763	0,0298	1,23066E-07	8125741,28	242147,09
cachimbo 3,0cm-C1	2422	0,0296	1,35721E-07	7368066,41	215884,35
cachimbo 3,0cm-A2	2376	0,0302	1,44073E-07	6940946,44	207534,30
cachimbo 3,0cm-B2	2771	0,0298	1,2271E-07	8149268,58	242848,20
cachimbo 3,0cm-C2	2505	0,0296	1,31224E-07	7620564,15	223282,53
cachimbo 3,0cm-A3	2416	0,0302	1,41687E-07	7057797,39	211028,14
cachimbo 3,0cm-B3	2852	0,0298	1,19225E-07	8387482,49	249946,98
cachimbo 3,0cm-C3	2451	0,0296	1,34115E-07	7456288,51	218469,25
cachimbo 3,0cm-A4	2394	0,0302	1,42989E-07	6993529,37	209106,53
cachimbo 3,0cm-B4	2585	0,0298	1,3154E-07	7602258,85	226547,31
cachimbo 3,0cm-C4	2400	0,0296	1,36965E-07	7301139,30	213923,38

<b>ISHPINGO 30 cm x 30 cm</b>					
Muestra	Tiempo(s)	Espesor "L" (m)	$\alpha_a=0,3829 \cdot L^2 / \Theta_{0,5}$	$1 / \alpha_a$	$L / \alpha_a$
ishpingo 1,0cm-A1	481	0,0103	8,44529E-08	11840914,92	121961,42
ishpingo 1,0cm-B1	444	0,0106	9,68978E-08	10320146,76	109393,56
ishpingo 1,0cm-C1	466	0,0102	7,57255E-08	13205598,36	126773,74
ishpingo 1,0cm-A2	446	0,0103	9,10804E-08	10979309,88	113086,89
ishpingo 1,0cm-B2	488	0,0106	8,81612E-08	11342864,00	120234,36
ishpingo 1,0cm-C2	461	0,0102	7,65468E-08	13063907,39	125413,51
ishpingo 1,0cm-A3	493	0,0103	8,23973E-08	12136322,36	125004,12
ishpingo 1,0cm-B3	498	0,0106	8,63909E-08	11575299,74	122698,18
ishpingo 1,0cm-C3	459	0,0102	7,68 03E-08	13007231,00	124869,42
ishpingo 1,0cm-A4	460	0,0103	8,83084E-08	11323951,90	116636,70
ishpingo 1,0cm-B4	451	0,0106	9,53939E-08	10482851,77	111118,23
ishpingo 1,0cm-C4	451	0,0102	7,8244E-08	12780525,45	122693,04
ishpingo 3,0cm-A1	3313	0,0306	1,0822E-07	9240452,02	282757,83
ishpingo 3,0cm-B1	3310	0,0305	1,07611E-07	9292722,08	283428,02
ishpingo 3,0cm-C1	3388	0,0308	1,07212E-07	9327314,11	287281,27
ishpingo 3,0cm-A2	3393	0,0306	1,05668E-07	9463583,98	289585,67
ishpingo 3,0cm-B2	3309	0,0305	1,07644E-07	9289914,61	283342,40
ishpingo 3,0cm-C2	3228	0,0308	1,12526E-07	8886827,02	273714,27
ishpingo 3,0cm-A3	3428	0,0306	1,04589E-07	9561204,21	292572,85
ishpingo 3,0cm-B3	3264	0,0305	1,09128E-07	9163578,51	279489,14
ishpingo 3,0cm-C3	3337	0,0308	1,08851E-07	9186908,85	282956,79
ishpingo 3,0cm-A4	3462	0,0306	1,03562E-07	9656035,29	295474,68
ishpingo 3,0cm-B4	3257	0,0305	1,09362E-07	9143926,23	278889,75
ishpingo 3,0cm-C4	3360	0,0308	1,08105E-07	9250228,87	284907,05

<b>ISHPINGO 20 cm x 20cm</b>					
Muestra	Tiempo(s)	Espesor "L" (m)	$\alpha_a=0,3829 \cdot L^2 / \Theta_{0,5}$	$1 / \alpha_a$	$L / \alpha_a$
ishpingo 1,0cm-A1	447	0,0103	9,08766E-08	11003927,17	113340,45
ishpingo 1,0cm-B1	443	0,0106	9,71166E-08	10296903,18	109147,17
ishpingo 1,0cm-C1	446	0,0102	7,91212E-08	12638834,48	121332,81
ishpingo 1,0cm-A2	463	0,0103	8,77362E-08	11397803,76	117397,38
ishpingo 1,0cm-B2	444	0,0106	9,68978E-08	10320146,76	109393,56
ishpingo 1,0cm-C2	433	0,0102	8,14967E-08	12270437,96	117796,20
ishpingo 1,0cm-A3	447	0,0103	9,08766E-08	11003927,17	113340,45
ishpingo 1,0cm-B3	431	0,0106	9,98 05E-08	10017980,30	106190,59
ishpingo 1,0cm-C3	426	0,0102	8,28358E-08	12072070,60	115891,88
ishpingo 1,0cm-A4	447	0,0103	9,08766E-08	11003927,17	113340,45
ishpingo 1,0cm-B4	435	0,0106	9,89026E-08	10110954,59	107176,12
ishpingo 1,0cm-C4	459	0,0102	7,68803E-08	13007231,00	124869,42
ishpingo 3,0cm-A1	2942	0,0306	1,21867E-07	8205677,59	251093,73
ishpingo 3,0cm-B1	3007	0,0305	1,18455E-07	8442059,00	257482,80
ishpingo 3,0cm-C1	2953	0,0308	1,23005E-07	8129739,83	250395,99
ishpingo 3,0cm-A2	3017	0,0306	1,18837E-07	8414863,80	257494,83
ishpingo 3,0cm-B2	2960	0,0305	1,20335E-07	8310107,96	253458,29
ishpingo 3,0cm-C2	2971	0,0308	1,2226E-07	8179294,63	251922,27
ishpingo 3,0cm-A3	2996	0,0306	1,1967E-07	8356291,66	255702,52
ishpingo 3,0cm-B3	2952	0,0305	1,20661E-07	8287648,21	252773,27
ishpingo 3,0cm-C3	2951	0,0308	1,23089E-07	8124233,75	250226,40
ishpingo 3,0cm-A4	2954	0,0306	1,21372E-07	8239147,38	252117,91
ishpingo 3,0cm-B4	2966	0,0305	1,20092E-07	8326952,78	253972,06
ishpingo 3,0cm-C4	2962	0,0308	1,22631E-07	8154517,23	251159,13

## DESARROLLO DE LA ECUACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA

Siau (1995) señala que el valor de la difusividad puede ser determinado gráficamente, para lo cual usa los gráficos desarrollados por Heisler, pero en forma invertida, o sea  $E$  vs.  $\tau$ , donde  $E = 1 - \Theta$ . Sin embargo, en el presente trabajo desarrollaremos las relaciones en base a la temperatura adimensional  $\Theta$ .

Todos los cálculos son basados para un  $\Theta_{0,5}$  al cual lo denomina *Temperatura de tiempo medio* y proviene del cociente:

$$\Theta_{0,5} = 0,5 = \frac{T_m - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (A)$$

Donde:

$T_m$  : temperatura medida;  $T_m = (T_\infty - T_i)/2$ , °C.

$T_i$  : temperatura inicial, °C.

$T_\infty$  : temperatura infinito, °C.

También explica que todas las curvas correspondientes a  $1/Bi$  se encuentran linealmente espaciadas en  $\Theta_{0,5}$  haciendo posible a derivar una ecuación lineal que relacione el tiempo adimensional y los valores del número de Biot.

Las adaptaciones realizadas para fines del presente trabajo consistieron básicamente en hallar las nuevas constantes de la ecuación de difusión. Para ello se procedió a determinar los diversos valores del número de Fourier,  $\tau$ , que aparecen en el eje de las abscisas del gráfico de Heisler. Estos valores corresponden a la intersección de las curvas  $1/Bi$  con el tiempo adimensional 0,5 que aparece en el eje de las ordenadas de dicho gráfico. Se plotean dichos valores vs. el valor de la curva  $1/Bi$  al que le corresponde, hallándose luego de la regresión lineal las nuevas constantes. Lográndose las nuevas ecuaciones que permitirán determinar la difusividad térmica de la muestra:

$$\tau_{0,5} = 0,3829 + \frac{0,7153 \cdot \alpha}{h \cdot L} \quad (B)$$

$$\tau_{0,5} = t_{0,5} \frac{\alpha}{L^2} \quad (C)$$

$$\alpha_a = 0,3829 \frac{L^2}{t_{0,5}} \quad (D)$$

Sustituyendo la ecuación (C) en la (B) multiplicando por  $0.3829\alpha$  se tiene:

$$\frac{1}{\alpha_a} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1,868}{h \cdot L} \quad (E)$$

Se sabe que,  $Bi = h \cdot L / \alpha$ . Multiplicando y dividiendo por  $\alpha$  el segundo término del lado derecho de la ecuación anterior y reemplazando  $1/Bi$ , se obtiene:

$$\frac{1}{\alpha_a} = \frac{1}{\alpha} + 1,868 \frac{1}{Bi \cdot \alpha}$$

También se sabe que,  $Bi = h \cdot L / k$  y  $\alpha = k / \rho \cdot c_{pw}$ . Haciéndose las sustituciones se obtiene la finalmente la ecuación:

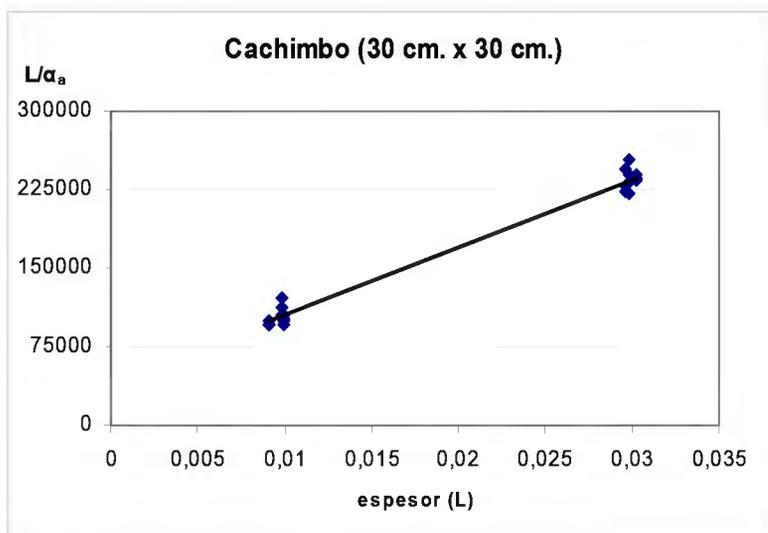
$$\frac{1}{\alpha_a} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1,868 \cdot \rho \cdot c_{pw}}{h \cdot L} \quad (F)$$

Con el fin determinar los valores de la difusividad térmica,  $\alpha$ , y del coeficiente de convectividad,  $h$ , para muestras de dos o más espesores diferentes, la ecuación anterior puede ser transformada a:

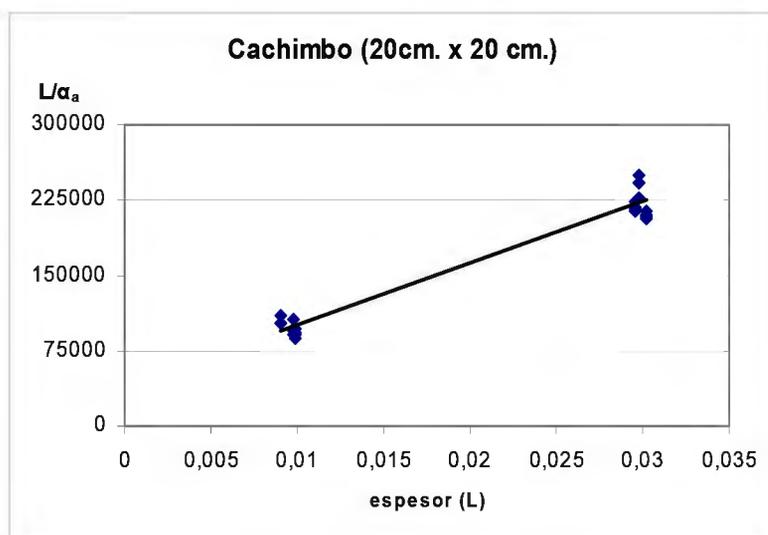
$$\frac{L}{\alpha_a} = \frac{L}{\alpha} + \frac{1,868 \cdot \rho \cdot c_{pw}}{h} \quad (G)$$

El gráfico  $L/\alpha_a$  vs.  $(a)$ , espesor de las muestra de madera, dará una recta cuya pendiente corresponderá a la inversa del valor de la difusividad térmica de las muestras.

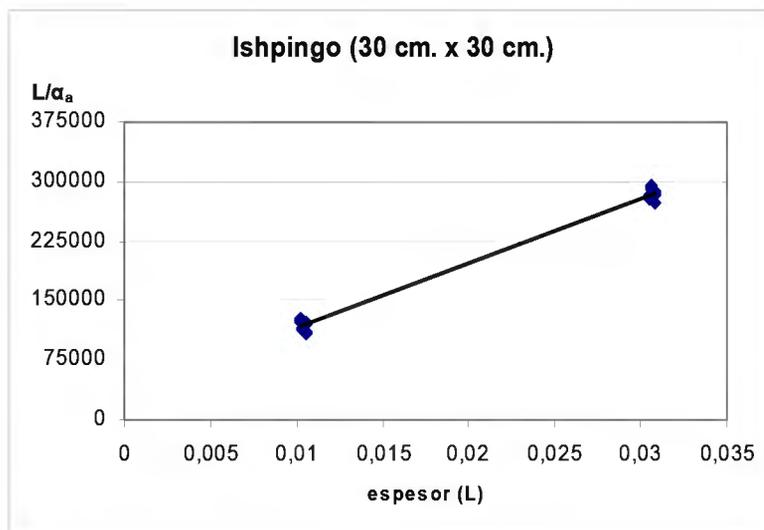
## GRÁFICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA



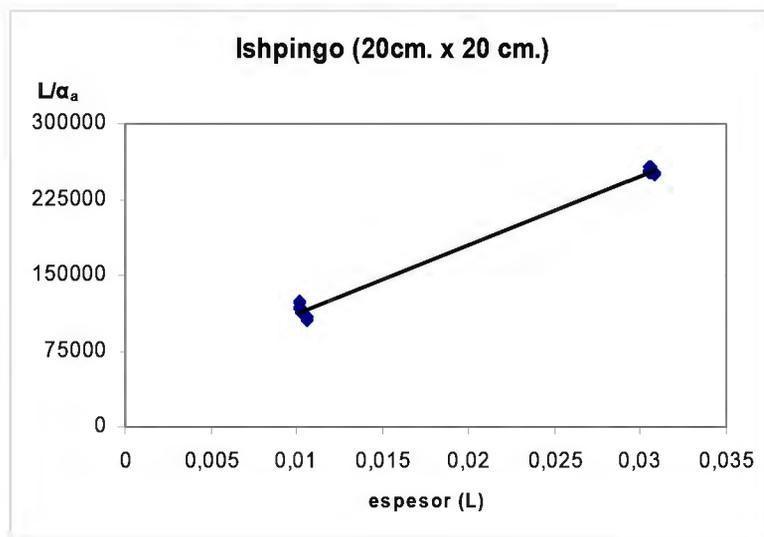
Ecuación de la recta:  $6 \times 10^6 x + 41086$



Ecuación de la recta:  $6 \times 10^6 x + 39262$



Ecuación de la recta:  $8 \times 10^6 x + 35923$



Ecuación de la recta:  $7 \times 10^6 x + 43106$

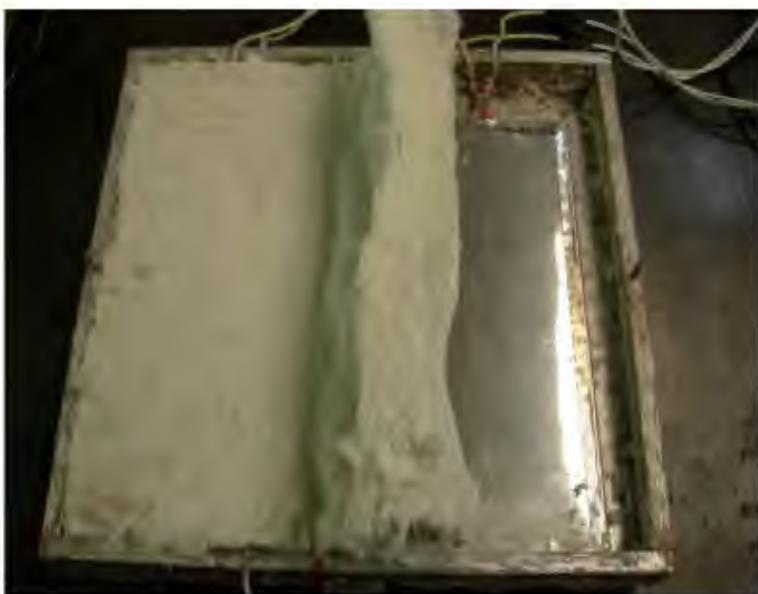
## ANEXO 3

### DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA, CALOR ESPECÍFICO Y COEFICIENTE DE CONVECCIÓN

Especie	Superficie de la muestra (cm <sup>2</sup> )	Pendiente de la recta	Intercepto	Densidad prom. (kg/m <sup>3</sup> )	C.H. prom. (%)	Calor Especifico (J/kg.K)	Difus. Térmica (m <sup>2</sup> /s)	Coef. de convección (h) (W/m <sup>2</sup> .K)
Cachimbo	30 x 30	6 x 10 <sup>6</sup>	41086	663,80	0,107	1628,64	1,67 x 10 <sup>-7</sup>	49,15
	20 x 20	6 x 10 <sup>6</sup>	39262	663,80	0,107	1628,64	1,67 x 10 <sup>-7</sup>	51,44
Ishpingo	30 x 30	8 x 10 <sup>6</sup>	35923	625,24	0,117	1666,52	1,25 x 10 <sup>-7</sup>	61,13
	20 x 20	7 x 10 <sup>6</sup>	43106	625,24	0,117	1666,52	1,43 x 10 <sup>-7</sup>	45,15

## *ANEXO 4*

### **FOTOS DEL INTERIOR DE LA CAJA METÁLICA CALEFACTORA**



## *ANEXO 5*

### **FOTOS DEL EQUIPO EN PLENO FUNCIONAMIENTO**

