



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
BANCO DE PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD
TERMICA PARA MATERIALES EMPLEADOS
EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS**

Tesis

para obtener el Grado de

Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

Arturo Llovera Esteban

Director de Tesis

Dr. Fernando Enrique Flores Murrieta

Asesores

Dr. Inocente Bojórquez Báez

Dr. José Hernández Rodríguez

Chetumal, Quintana Roo, México, Marzo de 2012.



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

Trabajo de Tesis elaborada bajo supervisión del comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:

Ingeniero en Sistemas de Energía

Comité de Tesis

DIRECTOR: _____
DR. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA

ASESOR: _____
DR. INOCENTE BOJÓRQUEZ BÁEZ

ASESOR: _____
DR. JOSE HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

Chetumal, Quintana Roo, México, Marzo de 2012.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis:

A Dios.

A mis padres:

Juana Esteban Bobadilla y Aurelio Llovera Hernández†.

Por sus sabios consejos y ejemplos y sobre todo por su invaluable cariño, apoyo y confianza que siempre me demostraron.

A mis hermanas y hermanos:

Olivia, Elsy, Ramona, Dalila, Elma, Angel, Armando y Alfredo.

Por su cariño y por darme ánimos siempre.

A mis hijos Ivana y Bruno. Y en especial a mi esposa Silvia. Por estar conmigo en todo momento, por su gran amor y apoyo para seguir adelante a pesar los tropiezos en la conclusión de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a:

Los Drs. Fernando Enrique Flores Murrieta, Inocente Bojórquez Báez y José Hernández Rodríguez por su dirección y ayuda en la elaboración de esta tesis ya que sin ella no hubiera sido posible concluirla.

Todos mis maestros que influyeron en mi formación personal y académica, a mis compañeros alumnos y todas aquellas personas que de una u otra forma colaboran en este trabajo.

A la Universidad de Quintana Roo por las facilidades proporcionadas para la elaboración de este trabajo.

Muchas gracias.

LISTA DE TABLAS

TABLA No.	DESCRIPCIÓN	PAGINA
0	Conductividad Térmica de los materiales de construcción	3
1.1	Características termofísicas de algunos materiales aislantes	32
1.2	Características termofísicas de algunos materiales estructurales	33
3.1	Dimensiones de los especímenes de yeso	58
3.2	Dimensiones de los dos especímenes de madera de pino	59
3.3	Proporciones utilizadas en la elaboración de la muestra de fibras leñosas	60
3.4	Dimensiones de los especímenes de fibras leñosas	61
3.5	Duración de cada corrida en las tres muestras y valores de voltaje y amperaje	62
3.6	Incertidumbre del Banco de Pruebas de Conductividad Térmica	69
3.7	Parámetros medidos para el yeso únicamente en el estado estable, además del promedio de cada parámetro, temperatura media de trabajo y la diferencia de temperatura para cada espécimen	71
3.8	Determinación del área para el yeso	72
3.9	Determinación de k_{prom} para el yeso primera corrida	72

LISTA DE TABLAS. Continuación.....

TABLA No.	DESCRIPCIÓN	PAGINA
3.10	Resultados finales de las propiedades termofísicas del yeso en las cuatro corridas	73
4.1	Resultados finales para la madera de pino	76
4.2	Resultados finales para las fibras leñosas	78
4.3	Calor específico para el yeso, madera de pino y fibras leñosas	79
4.4	Densidad para el yeso, madera de pino y fibras leñosas	79
4.5	Resumen de resultados para el yeso madera de pino y fibras leñosas	80
4.6	Comparación de los valores de "k" determinados experimentalmente con los valores reportados en la bibliografía	82
TCU	Conversión de Unidades	95
T1	Toma de lecturas para el yeso primera corrida a 0.5 Ampere	99
T2	Toma de lecturas para el yeso segunda corrida a 1 Ampere	100
T3	Toma de lecturas para el yeso tercera corrida a 1.7 Ampere	101
T4	Toma de lecturas para el yeso cuarta corrida a 2.2 Ampere	102
T5	Toma de lecturas para la madera de pino primera corrida a 0.5 Ampere	103
T6	Toma de lecturas para la madera de pino segunda corrida a 1 Ampere	104

LISTA DE TABLAS. Continuación...

TABLA No	DESCRIPCIÓN	PAGINA
T7	Toma de lecturas para la madera de pino tercera corrida a 1.5 Ampere	105
T8	Toma de lecturas para la madera de pino cuarta corrida a 2 Ampere	106
T9	Toma de lecturas para la fibra leñosa primera corrida a 0.5 Ampere	107
T10	Toma de lecturas para la fibra leñosa segunda corrida a 1 Ampere	108
T11	Toma de lecturas para la fibra leñosa tercera corrida a 1.5 Ampere	109
T12	Toma de lecturas para la fibra leñosa cuarta corrida a 2 Ampere	110

LISTA DE GRAFICAS

GRAFICA No.	DESCRIPCIÓN	PAGINA
2.1	Calibración de Termopares	50
3.1 ó GD1	Estabilización térmica para el yeso en la primera corrida	70 ó 111
3.2	Regresión lineal para el yeso	74
4.1	Regresión lineal para la madera de pino	77
4.2	Regresión lineal para las fibras leñosas	78
4.3	Valores de "k" de los materiales ensayados en el Banco de Pruebas de Conductividad Térmica	81
GD2	Estabilización térmica para el yeso segunda corrida	111
GD3	Estabilización térmica para el yeso tercera corrida	112
GD4	Estabilización térmica para el yeso cuarta corrida	112
GD5	Estabilización térmica para la madera de pino primera corrida	113
GD6	Estabilización térmica para la madera de pino segunda corrida	113
GD7	Estabilización térmica para la madera de pino tercera corrida	114
GD8	Estabilización térmica para la madera de pino cuarta corrida	114
GD9	Estabilización térmica para las fibras leñosas primera corrida	115
GD10	Estabilización térmica para las fibras leñosas segunda corrida	115

LISTA DE GRAFICAS. Continuación.....

GRAFICA No.	DESCRIPCIÓN	PAGINA
GD11	Estabilización térmica para las fibras leñosas tercera corrida	116
GD12	Estabilización térmica para las fibras leñosas cuarta corrida	116

LISTA DE FIGURAS

FIGURA No.	DESCRIPCION	PAGINA
1	Versión final del NIST del aparato de la placa caliente guardada construido en 1929 por Van Dusen	7
2	Chock Siu (sentado), Frank Powell y Tom Watson frente al aparato, versión final 1929, de placa caliente guardada del NIST (1973)	9
3	Prototipo de Robinson del aparato de fuente lineal de calor para placa caliente guardada (1978)	9
4	Aparato del NIST de one-meter de Fuente lineal de calor para placa caliente guardada (1980)	10
5	Dave Ober y el ingeniero mecánico Mahn Hee Han instalando el aparato circular "hot plate"	10
6	El técnico John McAuley y Rick Petersen instrumentando el nuevo 1000-mm de placa caliente guardada	11
7	Dispositivo para medir la conductividad térmica. Grupo de Energía de la Universidad de Sonora.	12
8	Medidor de Conductividad térmica para materiales de edificación. Departamento de Ingeniería Química y Metalúrgica, Grupo de Energía Universidad de Sonora.	12
9	Aparato para medir la conductividad térmica en materiales sólidos aislantes	13

LISTA DE FIGURAS. Continuación.....

FIGURA No.	DESCRIPCION	PAGINA
10	Estimación experimental de conductividad térmica en materiales de construcción. Facultad de Arquitectura Universidad Autónoma de Baja California.	13
1.1	Ley de Fourier	19
1.2	Flujo de calor a través de una pared compuesta	21
1.3	Conducción de calor a través de una pared plana	23
1.4	Determinación de Q_{x+dx}	24
2.1	Base de madera	38
2.2	Prensa de hierro	38
2.3	Gabinete de pruebas	39
2.4	Fuente de calor: resistencia eléctrica y sus dimensiones.	40
2.5	Placas de distribución de calor	41
2.6	Fuente distribuidora de calor que consta de dos placas de aluminio y dos ventiladores	41
2.7	Diagrama de bloques del sistema eléctrico para las resistencias y ventiladores. También se muestra el monitor de termopares	42
2.8	Monitor de termopares de 18 canales	43
2.9	Principio de operación del Banco de Pruebas de Conductividad Térmica	45
2.10	Variac y resistencia eléctrica	46
2.11	Equipo utilizado en la calibración de termopares	49

LISTA DE FIGURAS. Continuación.....

FIGURA No.	DESCRIPCION	PAGINA
2.12	Banco de Pruebas de Conductividad Térmica operando	54
3.1	Moldes de hierro para elaborar los especímenes de yeso.	58
3.2	Colocación de los termopares en los especímenes de madera de pino	61

LISTA DE CUADROS

CUADRO No .	DESCRIPCIÓN	PAGINA
C1	Dimensiones de la placa caliente y especímenes: yeso, madera de pino y fibras leñosas	96
C2	Análisis de incertidumbre	97
C3	Toma de lecturas de temperaturas para la calibración de termopares	98
C4	Costo del Banco de pruebas de Conductividad térmica	98

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BANCO DE PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA MATERIALES EMPLEADOS EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Arturo Llovera Esteban

Universidad de Quintana Roo

División de Ciencias e Ingenierías

Marzo de 2012

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE GRAFICAS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE CUADROS	xiii
RESUMEN	1
INTRODUCCION	2
ANTECEDENTES	6
OBJETIVO	14
CAPITULO I	
CONCEPTOS GENERALES	15
1.1 Balance de energía: Primera Ley de la Termodinámica y Ecuación de la Conservación de la Energía	15
1.1.1 Primera ley de la termodinámica	15
1.1.2 Ecuación de la Conservación de la Energía	16

1.2	Relación de la transferencia de calor con la termodinámica	17
1.3	Transmisión de calor por conducción y Ley de Fourier	18
1.4	Conducción unidimensional de estado estable	20
1.4.1	Flujo de calor a través de una pared compuesta	21
1.4.2	Pared plana con generación uniforme de calor	22
1.5	Propiedades térmicas de la materia	28
1.5.1	Conductividad térmica	29
1.5.2	Resistividad térmica	34
1.5.3	Conductancia térmica	34
1.5.4	Densidad	34
1.5.5	Calor específico	35

CAPITULO II

CARACTERÍSTICAS DEL BANCO DE PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD 37

TERMICA PARA MATERIALES EMPLEADOS EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

2.1	Componentes del Banco de Pruebas de Conductividad Térmica	37
2.1.1	Base de Madera	37
2.1.2	Prensa de Hierro	38
2.1.3	Gabinete	38
2.1.4	Fuente de Calor	40
2.1.5	Placas de distribución de calor	40
2.1.6	Fuente fría o distribuidora de calor	41
2.1.7	Circuito Eléctrico	42
2.1.8	Equipo de Medición	43
2.2	Principio de operación del Banco de Pruebas	43
2.3	Calibración de los termopares	47
2.3.1	Preparación del equipo de calibración	47

2.3.2	Procedimiento de toma de lecturas de las temperaturas	49
2.3.3	Resultados obtenidos y análisis	49
2.4	Preparación e instalación del Banco de Pruebas	50
CAPITULO III		
PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES		55
3.1	Selección y preparación de las muestras	55
3.1.1	Yeso	56
3.1.2	Madera de pino	58
3.1.3	Fibras leñosas	59
3.2	Instalación de los termopares	60
3.3	Monitoreo y establecimiento del estado estable	61
3.4	Procesamiento de datos	62
3.5	Análisis de incertidumbre	64
3.6	Ejemplo de cálculo de medición	69
CAPITULO IV		
ANALISIS DE RESULTADOS		75
4.1	Descripción de los resultados obtenidos	75
4.1.1	Resultados obtenidos para el yeso	75
4.1.2	Resultados obtenidos para la madera de pino	76
4.1.3	Resultados obtenidos para las fibras leñosas	77
4.2	Resumen de resultados	80
CAPITULO V		
CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES		83
5.1	Conclusiones	83
5.2	Observaciones y recomendaciones	85
REFERENCIAS		89
NOMENCLATURA		93

ANEXO 1:	Tabla de conversiones	95
ANEXO 2:	Cuadro C1 Dimensiones placa caliente y especímenes, Cuadro C2 Análisis de incertidumbre, Cuadro C3 Toma de lecturas temperatura termopares para su calibración y Cuadro C4 Costo del banco de pruebas de conductividad térmica	96
ANEXO 3:	Tablas de toma de lecturas y gráficas para los especímenes	99
ANEXO 4:	Formato utilizado para la toma de lecturas de los especímenes	117

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un *Banco de Pruebas de Conductividad Térmica*, de acuerdo a las normas ASTM C-518-91 y ASTM C-177-97, se utiliza la técnica de la *Placa Caliente Guardada* (Guarded Hot Plate) en estado estacionario con flujo de calor unidimensional en una zona de pruebas donde se colocan dos especímenes de 15 x 20 cm cada uno, colocados entre una fuente de calor y una fuente fría aisladas térmicamente. Se determinó experimentalmente, bajo condiciones controladas de laboratorio mediante mediciones de flujo térmico y del gradiente de temperatura, la **Conductividad Térmica "k"** de materiales constructivos. Se experimento con el yeso, madera de pino y un espécimen de nueva fabricación a base de fibras leñosas de la región. Los dos primeros utilizados como referencia en la comparación de las propiedades termofísicas que aparecen en la bibliografía técnica con lo cual se obtuvo un aceptable grado de confiabilidad del $\pm 10.47\%$ empleando este dispositivo.

La conductividad térmica de estos materiales y de cualquier otro que se emplee en la construcción es de mucha importancia para un buen diseño térmico en todo edificio, logrando con esto un adecuado confort y un considerable ahorro energético.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, una de las principales preocupaciones del ser humano, en el sector energético, es el ahorro y uso eficiente de la energía. En los sistemas constructivos son pocos los esfuerzos que se han realizado para solucionar este problema. En toda la República Mexicana existe gran cantidad de edificaciones en donde hay un uso excesivo de la energía eléctrica, lo cual puede notarse en el recibo que proporciona la Comisión Federal de Electricidad.

Este desmedido consumo de energía mucho se debe al inadecuado diseño de edificios ocasionado por diversos factores entre los cuales tenemos: la escasa información que se tiene respecto a la *Conductividad Térmica* de los materiales empleados en la construcción de edificios, la poca variedad de materiales de construcción que existen en el mercado, entre otras.

El conocimiento de la *Conductividad Térmica* de cualquier material de construcción, es un factor determinante para poder establecer un criterio de uso en el diseño de un edificio.

En México y específicamente en el Estado de Quintana Roo los edificios están contruidos en su mayoría de mampostería, utilizándose materiales con elevados valores de Conductividad Térmica como son: vigueta y bovedilla de concreto que cuentan con un valor de " k " de $1.740 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, respectivamente, y el block hueco de concreto con un valor de " k " de $0.998 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ [8], por no mencionar los demás materiales empleados con elevados valores de " k " como se observa en la tabla 0. Esto ocasiona que la temperatura sea mucho más elevada en el interior de la vivienda, sobre todo en épocas de calor, es por eso que se ve

la necesidad de utilizar ventiladores eléctricos y equipos de aire acondicionado trayendo como consecuencia los altos consumos de energía eléctrica y por consiguiente los elevados costos por el uso de esta misma.

Tabla 0. Conductividad Térmica de los materiales de construcción

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD "k" a 24 °C W/m-°C
EN LOSAS:	
Vigüeta de concreto armado tipo 12-3	1.740
Bovedilla de concreto vibroprensado de 0.15x0.20x0.56m	1.740
Aplanado de cal-arena-cemento 1:2:3 de 0.02m de espesor	0.721
Calcreto en exterior de 0.02m de espesor	0.372
EN MUROS:	
Block hueco de concreto vibroprensado de 0.15x0.20x0.40m	0.998
Aplanado de cal-arena-cemento 1:2:3 de 0.02m de espesor	0.721
EN PISOS:	
Mosaico de pasta de 0.30x0.30m	1.047
Firme de concreto de 0.02m de espesor	0.698
EN PUERTAS Y VENTANAS:	
Vidrio florentino de 0.003m de espesor	0.814

Fuente: FIDE "Guía para aplicar criterios de eficiencia energética en construcciones para uso habitacional" [8]

Por otra parte es necesario considerar que las condiciones climatológicas en el exterior de un local intervienen directamente con las condiciones ambientales interiores. De esta manera, la diferencia entre la temperatura exterior e interior produce movimientos de materia y energía a través de las paredes de la edificación cuya magnitud dependerá de la eficiencia del material de construcción. Esto es, del comportamiento térmico. Por lo tanto, en todo sistema de climatización la forma de evaluar los factores que intervienen en el comportamiento térmico de una edificación es basándose en un análisis energético denominado "balance térmico", el cual, analiza las cargas térmicas que un espacio puede ganar por diferentes conceptos como son: a través de barreras (muros, techos, pisos, puertas), por radiación

solar, por iluminación artificial, por maquinaria, equipo eléctrico y por ocupantes entre otras.

Por lo anterior, el buen diseño térmico de las edificaciones es una medida de ahorro de energía que permitirá reducir los requerimientos de los sistemas electromecánicos de aire acondicionado y ventilación. El diseño térmico estará en función de las propiedades termofísicas de los materiales involucrados en los sistemas constructivos, como son entre otras: la *Conductividad Térmica*, la *Conductancia Térmica*, la *Resistencia Térmica*, la *Densidad*, el *Calor Específico*, etc. En la bibliografía técnica se dan los valores de estas propiedades en forma tabular y gráfica para una gran variedad de sustancias y materiales; sin embargo, para los materiales nuevos que aparecen con cierta regularidad, es importante conocer a detalle alguna metodología básica para determinar estas propiedades.

Tomando en cuenta lo anterior surgió la necesidad por diseñar y construir un equipo con el cual pueda determinarse la *Conductividad Térmica "k"* de los materiales de la región de nueva fabricación (material de fibras leñosas) y los que normalmente se emplean actualmente en la construcción de edificios (yeso y madera, entre otros). Este dispositivo estará integrado en el **"Banco de Pruebas de Conductividad Térmica para materiales empleados en sistemas constructivos"**. La mayoría de las propiedades térmicas involucran la medición de flujo de calor y temperatura. En el caso de la *Conductividad Térmica*, esta será definida mediante la ecuación de Fourier modificada para dos especímenes, basado en la técnica de la *Placa Caliente Guardada* (Guarded-Hot-Plate) en estado estacionario (régimen permanente), es decir, el perfil de temperatura será constante a través del tiempo.

Asimismo, durante la prueba del dispositivo, se pretende lograr en gran medida las condiciones de operación con flujo de calor unidimensional dentro de la muestra.

ANTECEDENTES

Se han construido ya bastantes equipos sobre transferencia de calor, los primeros trabajos fueron elaborados por la **National Institute of Standards and Technology (NIST)** y se realizaron en aislamientos térmicos en materiales para edificios alrededor de 1910, atendiendo la solicitud de la American Society of Refrigerating Engineers. A partir de entonces paso algún tiempo y no había un método preciso para medir la transmisión de calor en aislamientos. Fue en 1912 cuando Dickinson diseñó y construyó la primera placa caliente guardada para el NIST, poco después en su viaje a Europa descubrió que Poensgen en Alemania había estado usando la placa caliente guardada para mediciones de Conductividad Térmica en 1910. La transferencia de calor en aislamientos había sido determinada por métodos en los cuales el calor se transfería a través de paneles de aislamiento de aire caliente de un lado y aire frío en el otro. El resultado de pruebas de ese tipo fue en muchos casos expresados como conductividades térmicas, pero ahora son definidos como valores de transmitancia térmica [9].

En 1916 aparece la primera publicación en este campo y fue descrita por Dickinson y Van Dusen en donde aparecen determinaciones importantes de flujo de calor a través de espacios de aire y en 30 materiales aislantes, así como también terminología estándar para medidas de transmisión térmica obtenidas por la investigación con el método de la placa caliente; subsecuentemente usando un aparato similar, Van Dusen y Finck en 1928 reportaron estas medidas. Alrededor de 1929 Van Dusen construyó lo que sería la versión final del aparato del tipo de placa caliente guardada (figura 1), este aparato operó para el NIST por más de 50 años hasta 1983. En

1987, el aparato fue oficialmente trasladado bajo resguardo al museo del NIST para su preservación y exhibición [9].

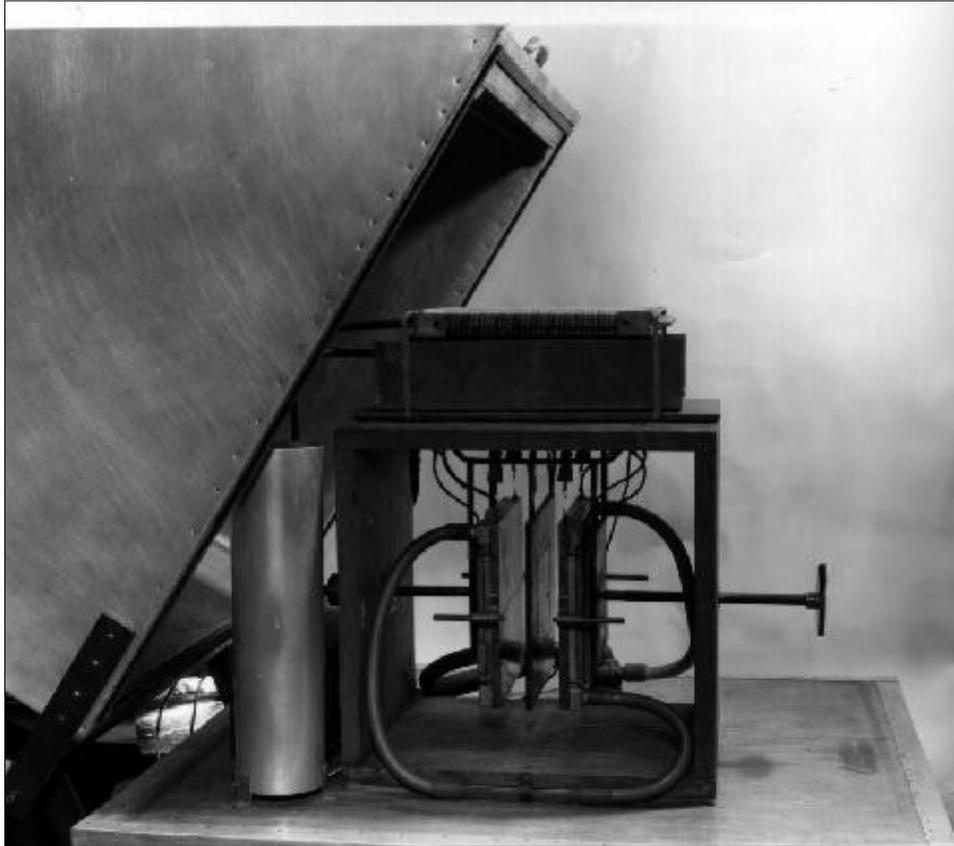


Figura 1. Versión final del NIST del aparato de la placa caliente guardada construido en 1929 por Van Dusen

En 1945, la **American Society for Testing and Materials (ASTM)** adoptó formalmente el método de la placa caliente guardada, método basado en pruebas estándar, en parte, diseñada por el NIST. En 1947 Robinson y Watson incrementaron el rango de temperaturas del aparato de la placa caliente guardada y en pocos años completaron las primeras comparaciones interlaboratorios de pruebas de Conductividad Térmica en aislamientos, patrocinados conjuntamente por la

American Society of Heating, Ventilating Engineers y la NIST. Para 1977, más de 300 laboratorios contaban con estos equipos, resultando un considerable progreso en la calidad de los datos de Conductividad Térmica sobre aislantes y materiales para edificios reportados en revistas técnicas y manuales [9].

En 1964, Robinson presentó los primeros diseños básicos de la fuente lineal de calor para placa caliente guardada, para una conferencia de Conductividad Térmica patrocinada por la National Physical Laboratory en Inglaterra, el diseño fue novedoso, en contraste a la placa caliente guardada convencional que usaba calentadores uniformemente distribuidos, la fuente lineal de calor para placa caliente guardada utilizó la fuente lineal de calor circular en puntos especificados con precisión. Por la propia ubicación de la fuente(s) lineal de calor, la temperatura en el borde de la placa de medición es igual a la temperatura media de la placa de medición, por lo tanto se facilitan las mediciones de temperatura y la mantienen. Los beneficios que ofrece una fuente lineal de calor para placa caliente guardada incluyen: métodos de construcción más simples; precisión mejorada; análisis matemático simplificado para el cálculo de la temperatura media de la superficie de la placa y así determinar los errores que resultan de las ganancias o pérdidas de calor en los bordes de los especímenes; y uso bajo condiciones de vacío. En 1971, Hahn realizó un análisis profundo del concepto fuente lineal de calor e investigó varias opciones de diseño. El diseño, análisis matemático, y análisis de incertidumbre para un prototipo de la fuente lineal de calor para placa caliente guardada fueron publicados en 1973 por Hahn, Robinson y Flynn. La construcción del aparato prototipo fue finalizada en 1978 y

descrita por Powell y Siu (Figuras 2 y 3). La operación y el análisis de incertidumbre fueron publicados en 1981 por Siu y Bulik [9].



Figura 2. Chock Siu (sentado), Frank Powell y Tom Watson frente al aparato, versión final 1929, de placa caliente guardada del NIST (1973).

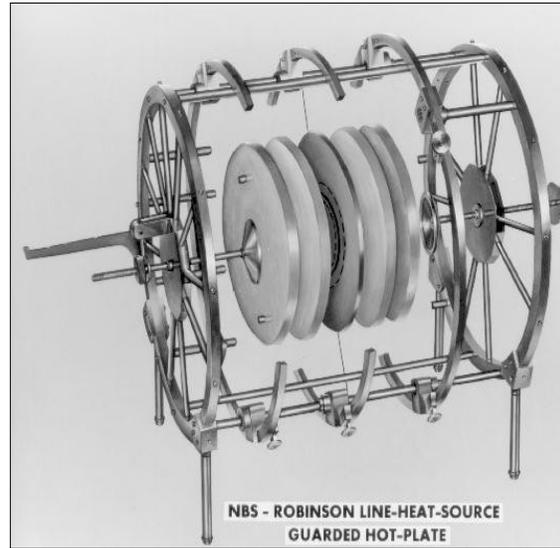


Figura 3. Prototipo de Robinson del aparato de fuente lineal de calor para placa caliente guardada (1978).

A finales de 1980 el segundo aparato de fuente lineal de calor para placa caliente guardada fue finalizado con los esfuerzos de Hahn, Peavy del NIST y Ober (figura 4 y 5). Casi inmediatamente los servicios de medición para el público comenzaron en los inicios de 1981 con el laboratorio que proporcionó las primeras referencias completas de materiales de varios espesores de aislamiento térmico a base de fibra de vidrio de baja densidad. De 1981 a 1996 se han proporcionado más de 75 mediciones. Estos aparatos eventualmente han reemplazado a los primeros aparatos de placa caliente guardada que fueron construidos en 1929 y que aún dan servicio actualmente. En 1996 la Asociación Americana de

Pruebas y Materiales ASTM adoptó formalmente el concepto de fuente lineal de calor como una práctica estándar basada, en parte en los diseños del NIST. Las normas estándar ASTM C-518-91 y C-177-97 consideran tanto a los diseños de los prototipos NIST como a los aparatos con fuente lineal de calor para placa caliente guardada de la segunda generación [9].

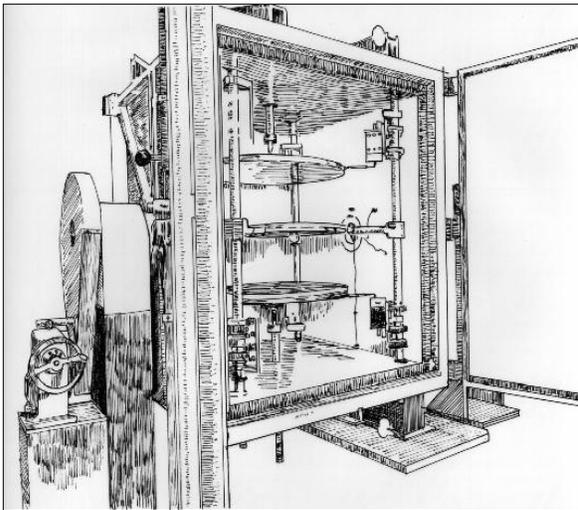


Figura 4. Aparato del NIST de one-meter de Fuente lineal de calor para placa caliente guardada (1980).

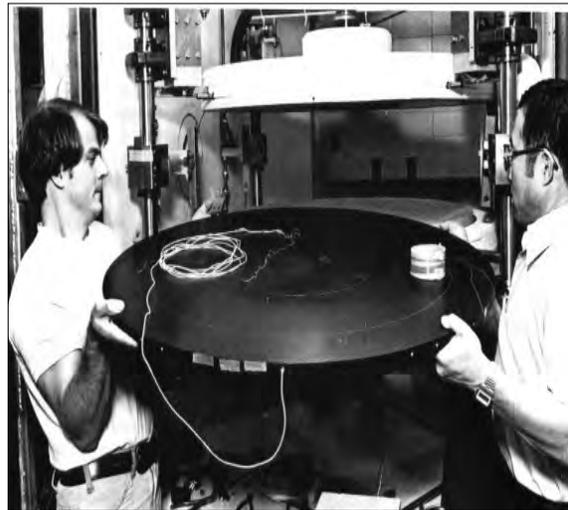


Figura 5. Dave Ober y el ingeniero mecánico Mahn Hee Hahn instalando el aparato Circular "hot plate"

En adición a los servicios de medición para el público, los aparatos de placa caliente guardada se han utilizado para desarrollar materiales estándar de referencia para resistencia térmica [9].

En nuestro país también se han realizado diferentes trabajos relacionados a la medición de la Conductividad Térmica de diferentes materiales, sobre todo para materiales utilizados en la industria de la construcción. A continuación se mencionan algunas de estas investigaciones.

En la Universidad de Sonora, en el grupo de Energía se ha estado investigando, en sus primeras etapas el desarrollo de

un Medidor de Conductividad Térmica para materiales de construcción (figura 7) en el cual se experimentan con especímenes cilíndricos [10]. Asimismo en esta misma Universidad pero en el Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia se diseñó y construyó un Medidor de Conductividad Térmica para materiales de edificación, como se observa en la figura 8 [11].



Figura 6. El técnico John McAuley y Rick Petersen instrumentando el nuevo 1000-mm de placa caliente guardada.

En el centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Departamento de Ingeniería Mecánica-Diseño Térmico se construyó un Equipo de Medición de Conductividad Térmica para materiales de construcción, como se aprecia en la figura 9 [12].

En la Universidad Autónoma de Baja California, se ha estado desarrollando un experimento, sobre la estimación de Conductividad Térmica en materiales de construcción (figura 10), como apoyo a investigaciones sobre materiales

alternativos llevándose a cabo dentro de la materia de Evaluación de Sistemas Arquitectónicos, del programa de Maestría en Arquitectura [13].

Existen también trabajos similares a los ya mencionados como los de Morillón, citado por Rojas y Casas [13], en donde se realizan experimentos para estimar el valor de la Conductividad Térmica en materiales locales, todo esto con el fin de sustituir a los costosos equipos que existen en el mercado como lo es el conductímetro.

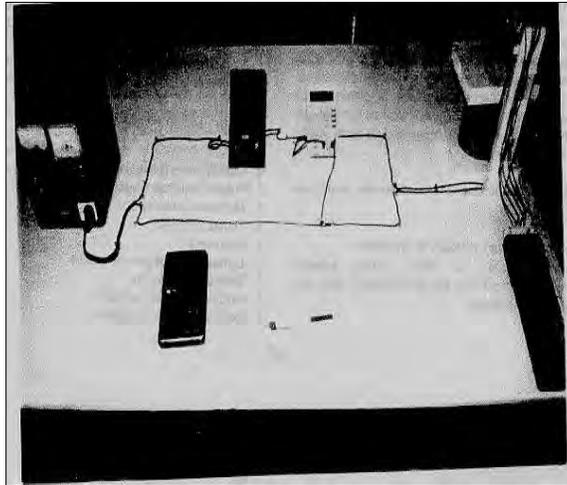


Figura 7. Dispositivo para medir la Conductividad Térmica. Grupo de Energía Universidad de Sonora.

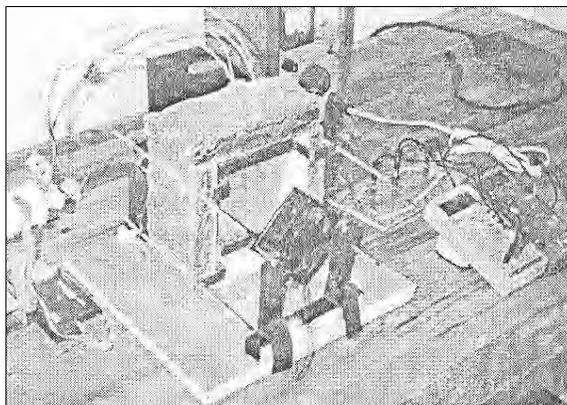


Figura 8. Medidor de Conductividad Térmica para materiales de edificación. Departamento de Ingeniería Química y Metalúrgica, grupo de energía Universidad de Sonora.

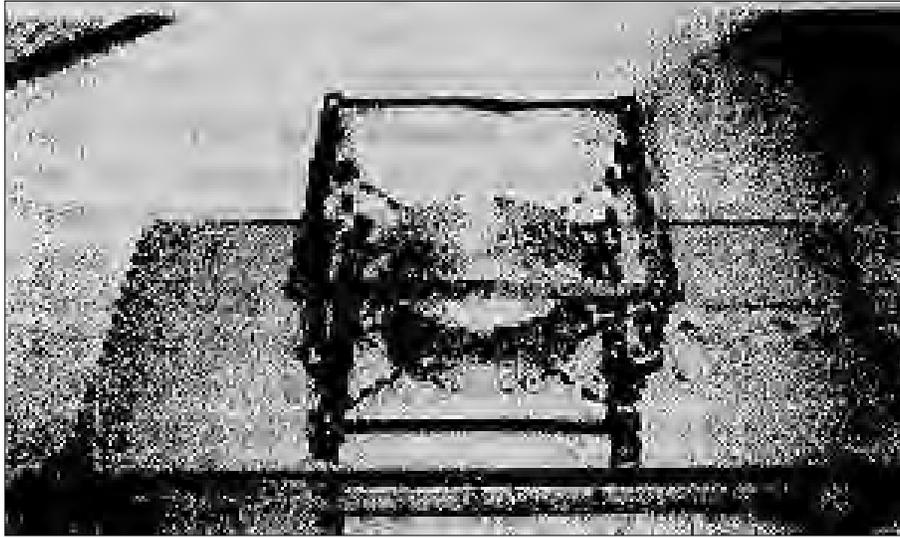
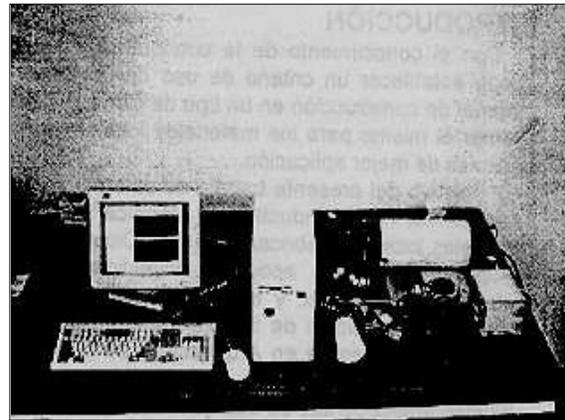


Figura 9. Aparato para medir la Conductividad Térmica en materiales sólidos aislantes.



a) Colocación de los termopares en los especímenes.



b) Dispositivo de medición.

Figura 10. Estimación experimental de la Conductividad Térmica en materiales de construcción. Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Baja California. a) Colocación de los termopares, b) Dispositivo de medición.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es el de ***diseñar y construir un Banco de Pruebas de conductividad térmica para materiales empleados en Sistemas Constructivos***, mediante el cual se determinarán las propiedades termofísicas tanto de nuevos materiales, como son los elaborados a base de fibras leñosas, así como también los ya existentes, que es el caso del yeso y madera de pino.

CAPITULO I

CONCEPTOS GENERALES

En este capítulo se exponen las bases que sustentan este trabajo y se explican las relaciones matemáticas para determinar las características termofísicas de los materiales experimentados en el Banco de Pruebas de Conductividad Térmica.

1.1 Balance de energía: Primera Ley de la Termodinámica y Ecuación de la Conservación de la Energía

Para muchos problemas de transferencia de calor la primera ley de la termodinámica (ley de conservación de la energía) proporciona una herramienta útil, a menudo esencial.

1.1.1 Primera ley de la termodinámica

Se han efectuado varios experimentos a través de los años en los que se llevó a cabo la medición del trabajo y el calor. Siempre que las mediciones se hicieron en forma cíclica, se determinó que el calor neto en el sistema era igual al trabajo neto. En forma de ecuación queda de la siguiente manera:

$$Q_{\text{entr.}} + W_{\text{entr.}} = Q_{\text{sal.}} + W_{\text{sal.}}$$

o bien

$$Q_{\text{entr.}} - Q_{\text{sal.}} = \sum Q = W_{\text{sal.}} - W_{\text{entr.}} = \sum W \text{ ----- (1)}$$

parafraseando los primeros enunciados se puede decir que cuando un sistema pasa por un cambio cíclico, el calor neto

que entra o sale del sistema es igual al trabajo neto que efectúa o admite el mismo.

1.1.2 Ecuación de la Conservación de la Energía

La ley de la conservación de la energía expresa que *la energía no puede ser creada ni destruida*. Esta ley es uno de los más útiles descubrimientos que se hayan hecho nunca. Al considerar un problema real de ingeniería, se necesita tener cabal conocimiento de las diversas formas en que aparece la energía, puesto que en ninguna de ellas se puede omitir. Además, cada forma es una entidad en sí misma y no deberá omitirse en la resolución de problemas. Para cualquier clase de sistema, las siguientes ecuaciones se deducen lógicamente a partir del principio de que la energía no se crea ni se destruye:

$$\begin{bmatrix} \textit{energía} \\ \textit{entrante} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \textit{energía} \\ \textit{saliente} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \textit{cambio de energía} \\ \textit{almacenada en el sistema} \end{bmatrix}$$

$$E_{\text{entr.}} - E_{\text{sal.}} = E_{\text{alm.}} \text{ ----- (2)}$$

$$\begin{bmatrix} \textit{energía} \\ \textit{almacenada} \\ \textit{inicial} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \textit{energía} \\ \textit{de entrada} \\ \textit{al sistema} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \textit{energía} \\ \textit{de salida} \\ \textit{del sistema} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \textit{energía} \\ \textit{almacenada} \\ \textit{final} \end{bmatrix}$$

$$(E_{\text{alm.}})_1 + E_{\text{entr.}} - E_{\text{sal.}} = (E_{\text{alm.}})_2 \text{ ----- (3)}$$

donde $E_{\text{alm.}}$ representa una o todas las clases de energía almacenadas, según se evalúan generalmente para una masa en especial, para un particular cambio de masa, o para cambios durante un intervalo de tiempo determinado.

1.2 Relación de la transferencia de calor con la termodinámica

A través del tiempo, la transferencia de calor ha sido en verdad un tema relevante, por no mencionar que es en sí parte fascinante de las ciencias de la ingeniería [3]. Es una de las formas más comunes de intercambio de energía, produciéndose de forma espontánea entre dos sistemas, siempre y cuando exista una diferencia de temperaturas entre ambos, no importando el medio que los separe incluyendo el vacío. El estudio de la transmisión de calor se basa en la cantidad de calor y la diferencia de temperaturas y es de mucha importancia tanto en aplicaciones tecnológicas como en las ciencias puras [4].

Es conveniente hacer notar las diferencias fundamentales entre transferencia de calor y termodinámica. Aunque la termodinámica trata de la interacción del calor y del papel vital que ésta desempeña en la primera y segunda leyes, no considera los mecanismos que realizan el intercambio de calor ni los métodos que existen para calcular la velocidad de éste intercambio. La termodinámica trata de estados en equilibrio de la materia, donde un estado de equilibrio necesariamente excluye la existencia de un gradiente de temperatura. Aunque la termodinámica sirve para determinar la cantidad de energía que se requiere en forma de calor para que un sistema pase de un sistema de equilibrio a otro, no reconoce que la transferencia de calor es inherentemente un proceso de no equilibrio. Para que ocurra la transferencia de calor, debe haber un gradiente de temperatura, es decir, un desequilibrio termodinámico. La disciplina de la transferencia de calor busca llevar a cabo lo que la termodinámica es intrínsecamente incapaz de hacer, esto es, cuantificar la

velocidad a la que ocurre la transferencia de calor en términos del grado de desequilibrio térmico [3]. Esto se lleva a cabo a través de los tres modelos para los tres modos de transferencia de calor: *conducción*, *convección* y *radiación*

Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario, que puede ser un sólido o un líquido, utilizamos el término **conducción**, para referirnos a la transferencia de calor que se producirá a través del medio. En cambio, el término **convección** se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. La **radiación térmica**, existe cuando todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas, por tanto, en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas [3].

1.3 Transmisión de calor por conducción y Ley de Fourier

Al referirnos al término *conducción* debemos evocar de inmediato conceptos de actividad atómica y molecular, pues hay procesos en estos niveles que sustentan este modo de transferencia de calor. La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas [3].

Los ejemplos de transferencia de calor por conducción son innumerables. El extremo opuesto de una cuchara metálica introducida súbitamente en una taza de café caliente se calentará debido a la conducción de energía a través de la cuchara. En un día invernal hay una pérdida significativa de energía de una habitación caliente hacia el exterior, esta pérdida se debe principalmente a la transferencia de calor

por conducción a través de la pared que separa el aire de la habitación del aire exterior.

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como Ley de Fourier. La ley de Fourier es fenomenológica, es decir, se desarrolla a partir de los fenómenos observados más que derivarse de los principios básicos [3].

El matemático francés Fourier (1822) fue quien realizó las primeras investigaciones sobre la conducción de calor y quien propuso la ley que lleva su nombre "**Ley de la conducción de calor de Fourier**". Dicha ley predice el comportamiento de la conducción del calor a través de un medio, de una región de alta temperatura a otra de baja temperatura (Figura 1.1). Su expresión define la conductividad térmica "k" [16].

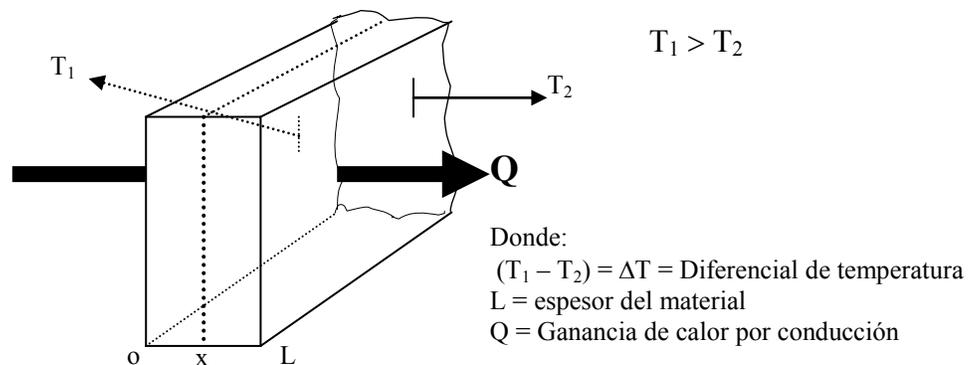


Figura 1.1 Ley de Fourier

De acuerdo a la figura y a la Ley de Fourier podemos decir que el flujo de calor es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección, es decir:

$$Q \propto \frac{A(T_2 - T_1)}{L} \quad \text{o bien} \quad Q = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{L} = kA \frac{(T_1 - T_2)}{L} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{----- (4)}$$

Donde:

Q = Razón de flujo de calor, Watts (W)

A = Área de la pared normal al flujo de calor, m²

T₁ = Temperatura de la superficie interior de la pared, °C.

T₂ = Temperatura de la superficie exterior de la pared, °C.

k = Conductividad Térmica del material de la pared (constante de proporcionalidad), W/m°C.

1.4 Conducción unidimensional de estado estable

La palabra "unidimensional", se refiere al hecho de que solo se necesita una coordenada para describir la variación espacial de las variables dependientes. Así, en un sistema unidimensional existen gradientes de temperatura a lo largo de una sola dirección coordenada y la transferencia de calor ocurre exclusivamente en esa dirección. El sistema se caracteriza por condiciones de estado estable se la temperatura en cada punto es independiente del tiempo. A pesar de su simplicidad inherente, los modelos unidimensionales de estado estable sirven para representar de forma precisa numerosos sistemas de ingeniería [3].

Solo se analiza el caso de la conducción unidimensional de estado estable de la transferencia de calor sin generación interna. Existen varios casos donde se presentan problemas unidimensionales, para los cuales se determinan las distribuciones de temperatura y las razones de flujo de calor, utilizando consideraciones de la primera ley de la

termodinámica y de la ley de Fourier. Aquí solo se explicaran dos casos: la pared compuesta y la pared plana.

1.4.1 Flujo de calor a través de una pared compuesta

En la siguiente figura se colocan tres diferentes materiales refractarios en serie, indicados por los suscritos a, b, c [5]. Para la pared total tenemos que:

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \text{ ----- (5)}$$

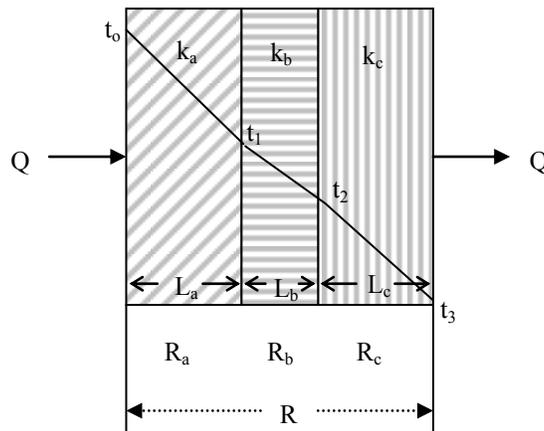


Figura 1.2 Flujo de calor a través de una pared compuesta

El flujo de calor en Watts a través del material debe vencer la resistencia térmica R_a , pero al pasar a través del material **a**, el calor también pasa a través del material **b** y **c** en serie.

El calor entrando en la cara izquierda debe ser igual al calor que sale en la cara derecha, puesto que el estado estable sanciona el almacenamiento de calor. Si R_a , R_b y R_c son diferentes, como resultado de diferente conductividad y grosor, la razón de la diferencia de temperatura a través de cada capa a su resistencia, deberá ser la misma que la razón

de la diferencia total de temperatura a la resistencia total, o sea.

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\Delta t_a}{R_a} = \frac{\Delta t_b}{R_b} = \frac{\Delta t_c}{R_c} \quad \text{-----} \quad (6)$$

Para cualquier sistema compuesto que use temperaturas reales

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_0 - t_1}{R_a} = \frac{t_1 - t_2}{R_b} = \frac{t_2 - t_3}{R_c} \quad \text{-----} \quad (7)$$

Sustituyendo y reacomodando términos

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_0 - t_3}{(L_a/k_a A) + (L_b/k_b A) + (L_c/k_c A)} \quad \text{-----} \quad (8)$$

1.4.2 Pared plana con generación uniforme de calor

La Ecuación del estado estable que determina el flujo de calor a través de una pared plana es [3]:

$$Q = \frac{kA}{L} \Delta T$$

dadas las superficies fría y caliente de la pared, respectivamente, el flujo de calor puede ser determinado utilizando esta ecuación.

A continuación se explica detalladamente esta expresión.

Se considera que la pared plana está constituida de un material que tiene conductividad térmica constante y que se extiende al infinito en las direcciones **y** y **z** (Figura 1.3). Es importante notar que la conductividad térmica es constante y no depende de cualesquiera posición o temperaturas. El calor que se conduce a través de la pared de un cuarto donde

la energía que se pierde a través de las aristas de la pared es despreciable, se puede modelar como una pared plana. Para un problema de este tipo, la temperatura es función de x únicamente; por lo tanto, se dice que se trata de un problema unidimensional. Esto es, la única variable dependiente es la temperatura, y la única variable independiente es la posición x en la pared [3].

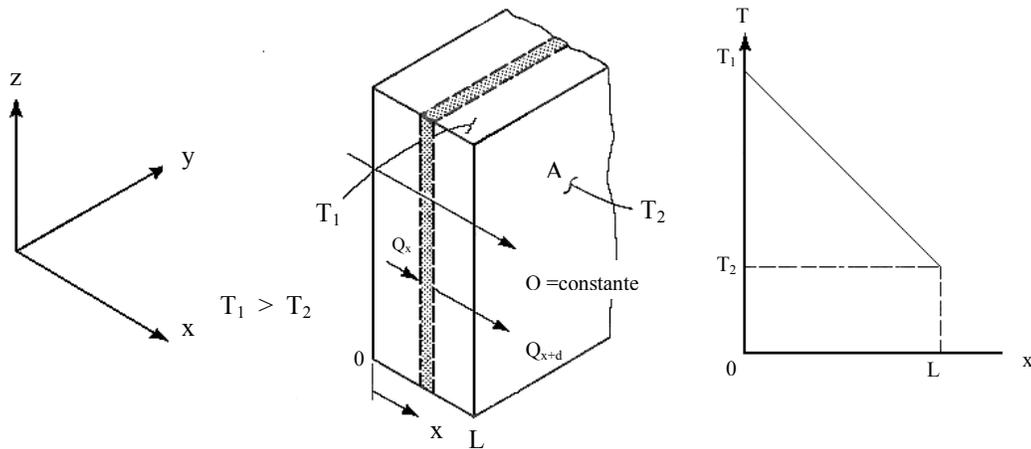


Figura 1.3 Conducción de calor a través de una pared plana

Se puede obtener la ecuación diferencial que gobierna el proceso, haciendo un balance de energía en un pequeño elemento de volumen de la pared, con espesor dx , y área transversal A .

Sea Q_x el calor que se conduce hacia el interior del elemento de volumen en $x = x$, y sea Q_{x+dx} el calor conducido hacia fuera del elemento de volumen en $x = x + dx$. Para condiciones de estado estacionario, la temperatura no puede ser función del tiempo. Por lo tanto, el elemento de volumen no experimentará cambio alguno en su energía interna. Ya que se supone que la temperatura sólo varía con x , no habrá conducción en las direcciones y o z . Suponiendo que no hay

generación interna de calor, tal como ocurre cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor, las cantidades Q_x y Q_{x+dx} deben ser iguales [3].

$$Q_x = Q_{x+dx} \quad \text{-----} \quad (9)$$

De la ley de Fourier,

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{-----} \quad (10)$$

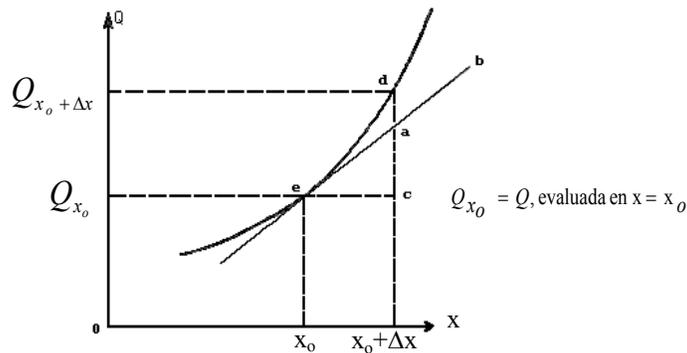


Figura 1.4 Determinación de Q_{x+dx}

Para determinar Q_{x+dx} considere una variación arbitraria de Q al variar x , como se ve en la figura 1.4. El análisis se aplica al caso general tridimensional, y el resultado nos permite, además, determinar $Q_y + dy$ y $Q_z + dz$. La Línea curva representa una variación arbitraria en Q_x para valores específicos de y y z . Digamos y_0 y z_0 cuando x cambia, mientras que la línea **eab** es tangente a la curva en **e**. El punto **e** representa el valor de Q_{x_0} en x_0 y el punto **d** representa el valor de $Q_{x_0 + \Delta x}$ en $x_0 + \Delta x$. Deseamos expresar $Q_{x_0 + \Delta x}$ en términos de Q_{x_0} y sus derivadas en X_0 [3].

Ahora se determina el valor de Q_x en el punto **a**. En primer lugar, la línea **eab** representa la cantidad $(\partial/\partial x)(Q_x)$, o, en otras palabras, representa la pendiente de la curva Q contra x , evaluada en $x = x_o$, esta pendiente es igual a **ac**/ Δx , que nos dice que el segmento **ac** es igual a $[(\partial/\partial x)(Q_x)](\Delta x)$. Por lo tanto, el valor de Q en el punto **a** es igual a la cantidad $[Q_{x_o} + (\partial Q_x/\partial x)(\Delta x)]$. Ahora, si Δx se hace suficientemente pequeño, ambos puntos **a** y **d** se mueven hacia el punto **e**, y entonces el punto **a** se acerca al punto **d**. Así, en dicho proceso de límites, Δx se transforma en dx y $Q_{x_o + \Delta x}$ se transforma en $Q_{x_o + dx}$. Por lo tanto, omitiendo el subíndice o en x_o , se tiene [3]:

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{\partial}{\partial x}(Q_x)dx \quad \text{-----} \quad (11)$$

Para el caso de una pared plana, la temperatura es función de una sola variable independiente, x , y las derivadas parciales que aparecen en las ecuaciones 10 y 11 se transforman en derivadas ordinarias; de modo que se puede escribir:

$$Q = Q_{x+dx} = Q_x + \frac{d}{dx}(Q_x)dx \quad \text{-----} \quad (12)$$

$$-kA \frac{dT}{dx} = -kA \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(-kA \frac{dT}{dx} \right) dx \quad \text{-----} \quad (13)$$

O bien

$$\frac{d}{dx} \left(kA \frac{dT}{dx} \right) dx = 0 \quad \text{-----} \quad (14)$$

Para este caso k y A son constantes y ya que dx no puede ser cero.

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad \text{-----} \quad (15)$$

Esta es una ecuación diferencial de segundo orden, lo cual indica que se requieren dos condiciones en la frontera para hallar su solución. Estas son:

$$\text{En } x = 0, \quad T = T_1$$

$$x = L, \quad T = T_2$$

Integrando una vez la ecuación 15 tenemos

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad \text{-----} \quad (16)$$

Donde C_1 es una constante de integración. Integrando de nuevo

$$T(x) = C_1x + C_2 \quad \text{-----} \quad (17)$$

En cuya expresión C_2 es otra constante de integración. En $x = 0$, $T = T_1$ de modo que $C_2 = T_1$ y la temperatura está dada por

$$T(x) = C_1x + T_1 \quad \text{-----} \quad (18)$$

Además, en $x = L$, $T = T_2$ de modo que

$$T_2 = C_1L + T_1 \quad \text{-----} \quad (19)$$

Lo cual da

$$C_1 = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad \text{-----} \quad (20)$$

Dando por resultado

$$T_x = (T_2 - T_1) \frac{x}{L} + T_1 \quad \text{-----} \quad (21)$$

La ecuación 21 es la distribución de temperaturas en la pared plana [3]. Esto nos demuestra que la distribución de temperaturas es una función lineal de x .

Ahora que sabemos cómo varía la temperatura con x , se determinará el flujo de calor unitario a través de la pared, ya que la ley de Fourier establece que

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{-----} \quad (22)$$

Procediendo con la ecuación 22 se puede escribir

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad \text{-----} \quad (23)$$

y

$$Q = \frac{-kA(T_2 - T_1)}{L} \quad \text{-----} \quad (24)$$

o bien

$$Q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L}$$

Esta es la razón de calor, Q , que se debe suministrar a la cara izquierda de la pared para que se mantenga la diferencia de temperaturas ($T_1 - T_2$).

Para el caso de dos especímenes con generación interna de calor Q se determina de acuerdo con la siguiente ecuación de Fourier modificada:

$$Q = \frac{2kA(T_1 - T_2)}{L_1 + L_2}$$

para nuestro caso como la incógnita es la Conductividad Térmica " k ", es necesario despejarla de la anterior ecuación,

$$k = \frac{Q}{2A} \frac{L_1 + L_2}{T_1 - T_2} \quad \text{-----} \quad (25)$$

las unidades de esta ecuación son las siguientes:

$$k = \frac{\text{Watts} \cdot m}{m^2 \cdot ^\circ C} = \frac{\text{Watts}}{m \cdot ^\circ C}$$

ya que Q se obtiene de las lecturas de el voltaje y el amperaje que recibe la resistencia como constante en *Watts*, el espesor (L) y el área (A) del espécimen son medidos en m y m^2 , respectivamente mediante un promedio de varias medidas sobre el mismo espécimen y la diferencia de temperatura es obtenida por las temperaturas registradas por los termopares y están dadas en $^\circ C$, por lo consiguiente " k " esta en $W/m^\circ C$.

1.5 Propiedades térmicas de la materia

Existen varias propiedades en los materiales, en nuestro caso solo mencionaremos las más importantes, las cuales son. La conductividad, la resistividad, la conductancia, la densidad y el calor específico.

1.5.1 Conductividad térmica

Esta propiedad es de mucha importancia su conocimiento, sobre todo si se desea realizar un estudio térmico en un

edificio ya que conociendo su valor se puede seleccionar los materiales adecuados para la construcción del edificio. Se le conoce con el nombre de conductividad térmica "**k**" y se evalúa experimentalmente y está básicamente definida por la ecuación

$$dQ = kA - \frac{dt}{dx} \quad (W/m^{\circ}C) \quad \text{-----} \quad (26)$$

Donde: dQ = Flujo de calor, Watts
 A = Área del material, metro
 $-dt/dx$ = gradiente de temperatura, $^{\circ}C$

El uso de la Ley de Fourier necesita el conocimiento de la conductividad térmica, esto es referido como una propiedad de transporte, provee una indicación de la velocidad a la cual la energía es transferida por el proceso de difusión. Esto depende de la estructura física del material, tanto atómica como molecular que está relacionada al estado del material.

La constante de proporcionalidad "**k**" es una propiedad de transporte obtenida de la Ley de Fourier [4], [16].

$$K = -q_x / (\partial T / \partial x)$$

Por consiguiente, para un gradiente de temperatura prescrito, la conducción de flujo de calor incrementa con el incremento de la conductividad térmica. Los mecanismos físicos asociados con la conducción en general son los siguientes, la conductividad térmica de un sólido es mayor que la de un líquido, la cual a su vez, es mayor que la de un gas. Esta tendencia está dada principalmente por las diferencias entre espacios intermoleculares para los dos estados.

La conductividad térmica de los materiales puede definirse mediante la ecuación de Fourier para la transferencia de calor por conducción vista con anterioridad.

$$Q = -kA(dt/dx)$$

Donde " k " es la llamada Conductividad Térmica, y cuyo valor numérico depende de la sustancia estudiada.

Una sustancia que tiene una gran conductividad térmica es un buen conductor de calor, caso contrario es un mal conductor del calor, también conocido como aislante térmico. No existe ninguna sustancia que sea un conductor perfecto ($k=\infty$) o un aislador perfecto ($k=0$).

El valor de " k " depende de la temperatura para sólidos metálicos y no metálicos. Los sistemas aislantes térmicos combinan materiales de baja conductividad térmica para lograr en conjunto un bajo nivel en el valor de conductividad térmica. En aislante del tipo de fibras, polvos y escamas, el material sólido está finamente dispersado alrededor del espacio de aire. Tales sistemas son caracterizados por una conductividad térmica equivalente, la cual depende de la conductividad térmica y de las propiedades radiactivas de las superficies del material sólido, además de la naturaleza y fracción volumétrica del aire o espacio. Un parámetro especial del sistema es su densidad de volumen (masa sólida entre volumen total), la cual depende fuertemente de la manera en la cual el material sólido está interconectado.

Si los espacios vacíos o espacios huecos son formados por lazos o porciones fundidas del material sólido, una sólida matriz es creada. Cuando esos espacios son sellados y no se comunican entre sí, el sistema es llamado aislante celular. Ejemplos de este tipo de aislantes rígidos son los sistemas de espumas particularmente aquellos hechos de materiales plásticos y vidrio. Los aislamientos reflectivos están compuestos de multicapas paralelas, hoja delgada o láminas finas de metal de alta reflectividad, los cuales están espaciados para reflejar calor radiante de regreso a su origen. El espaciamiento entre las láminas finas de metal

está diseñado para restringir el movimiento de aire, y en aislamiento de alto rendimiento, el espacio plano evacuado. En todos los tipos de aislantes, la evacuación del aire en el espacio vacío reducirá la efectividad de la conductividad térmica del sistema [15].

Las unidades estándares empleadas en este trabajo para la Conductividad Térmicas son las del Sistema Internacional, las cuales son $W/m-^{\circ}C$ ó $W/m-^{\circ}K$.

En las tablas 1.1 y 1.2 encontraremos la conductividad térmica de algunos materiales.

Tabla 1.1 Características termofísicas de algunos materiales aislantes.

Sustancia	Temperatura °C	k $W/m \cdot ^\circ C$	ρ Kg/m^3	c $kJ/kg \cdot ^\circ C$	
Asbesto:					
Baja densidad	-45	0.149			
	0	0.154	470-570	0.816	
	100	0.161			
Tableros de asbesto cemento	20	0.740			
Hojas	51	0.166			
Filtro, 40 capas/plg	38	0.057			
	150	0.069			
	260	0.083			
	20 capas/plg	38	0.078		
		150	0.095		
		260	0.112		
Corrugado, 4 pliegues/plg	38	0.087			
	93	0.100			
	150	0.119			
Asbesto cemento	-	2.080			
Balsamina, 2.2 lb/pie ³	32	0.040	35		
Cartón corrugado	-	0.064			
Cartón de bagazo (celotex)	32	0.048			
Corcho, 10 lb/pie ³	30	0.043	160		
Corcho granulado	32	0.045	45-120	1.88	
	Molido	32	0.043	150	
Tierra de diatomeas (Sil-o-cel)	0	0.061	320		
Fieltro, filamentos	30	0.036	130-200		
Lana	30	0.052	330		
Tablero aislante de fibra	20	0.048	240		
Lana de vidrio, 1.5 lb/pie ³	23	0.038	24	0.7	
Insulex, seco	32	0.064			
	-	0.144			
Capoca	30	0.035			
Magnesio, 85%	38	0.067	270		
	93	0.071			
	150	0.074			
	204	0.080			
	32	0.040	160		
Lana mineral, 10 lb/pie ³	150	0.067	64		
	260	0.087			
	23	0.059			
Aserrín	23	0.059			
Silica aerogel	32	0.024	140		
Virutas de madera	23	0.059			

Fuente: Holman, J.P. "Transferencia de Calor [2]

Tabla 1.2 Características termofísicas de algunos materiales estructurales.

Sustancia	Temperatura °C	k W/m·°C	ρ Kg/m ³	c kJ/kg-°C
Asfalto	20 - 55	0.74-0.76		
Ladrillo:				
Ladrillo de construcción común	20	0.69	1600	0.84
de cara	-	1.32	2000	
de carborundum	600	18.5		
	1400	11.1		
de cromo	200	2.32	3000	0.84
	550	2.47		
	900	1.99		
tierra de diatomeas, moldeado y cocido	200	0.24		
	870	0.31		
refractario cocido a 2426 °F	500	1.04	2000	0.96
	800	1.07		
	1100	1.09		
cocido a 2642 °F	500	1.28	2300	0.96
	800	1.37		
	1100	1.4		
Missouri	200	1.00	2600	0.96
	600	1.47		
	1400	1.77		
Magnesita	200	3.81		1.13
	650	2.77		
	1200	1.9		
Cemento Portland		0.29	1500	
Mortero	23	1.16		
Concreto con escoria	23	0.76		
Bloque con mezcla 1-2-4	20	1.37	1900-2300	0.88
Vidrio de ventana	20	0.78 (avg)	2700	0.84
Borosilicato	30 - 75	1.09	2200	
Yeso	20	0.48	1440	0.84
Granito		1.73-3.98	2640	0.82
Piedra caliza	100 - 300	1.26-1.33	2500	0.9
Mármol		2.07-2.94	2500-2700	0.80
Arenisca	40	1.83	2160-2300	0.71
Madera (transversal al grano):				
Balsa, 8.8 lb/pie ³	30	0.055	140	
Ciprés	30	0.097	460	
Abeto	23	0.11	420	2.72
Arce	30	0.166	540	2.4
Pino amarillo	23	0.147	640	2.8
Pino blanco	30	0.112	430	

Fuente: Holman, J.P. "Transferencia de Calor [2]"

1.5.2 Resistencia térmica

La resistencia térmica es el recíproco de la conductancia, se determina con la ecuación:

$$R = \frac{1}{C} \quad \text{-----} \quad (27)$$

Las unidades de R son: $R = \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$

1.5.3 Conductancia térmica

De acuerdo a la Norma ASTM C-518-91, cuando dos especímenes son utilizados la Conductancia Térmica se determina de acuerdo a la siguiente ecuación [13]:

$$C = \frac{Q}{2A \Delta T_1 + \Delta T_2} \quad \text{-----} \quad (28)$$

Donde:

Q = Flujo de calor, (W)

A = Área, (m^2)

$\Delta T_1, \Delta T_2$ = Diferencial de temperaturas, ($^\circ C$)

1.5.4 Densidad

De acuerdo a la Norma ASTM C-177-97, la Densidad se obtiene de acuerdo a la ecuación 29 y se representa por la letra griega ρ [14].

$$\rho_{PROM} = \frac{m_{PROM}}{A_{PROM} \times L_{PROM}} \quad \text{-----} \quad (29)$$

Donde:

m_{PROM} = Masa del material (Kg)

L_{PROM} = Espesor promedio del material (m)

A_{PROM} = Área promedio del material (m^2)

1.5.5 Calor específico

Para aumentar la temperatura de un objeto, se debe aumentar la energía térmica de sus moléculas. Se puede lograr haciendo que en el objeto fluya calor proveniente de un objeto más caliente. De manera semejante, si quiere enfriar un objeto, se hace que fluya energía del objeto a otro aún más frío. Para describir cuantitativamente estos procesos de enfriamiento y calentamiento, debemos conocer cuánta energía se requiere para cambiar la temperatura de un objeto. La cantidad de calor que debe fluir hacia un objeto o salir de él por unidad de masa de la sustancia para cambiar su temperatura en un grado se **llama calor específico** de la sustancia y está representado por c . Se define como una ecuación de la siguiente manera: cuando una cantidad de calor ΔQ fluye hacia una sustancia de masas m , su temperatura aumentará una cantidad ΔT . Entonces por definición

$$\text{Calor específico} = c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} \quad \text{-----} \quad (30)$$

$$\text{O bien} \quad \Delta Q = cm\Delta T \quad \text{-----} \quad (31)$$

Para el caso de dos especímenes con fuente interna de calor:

$$c = \frac{1}{2} \frac{\Delta Q}{(m_1 + m_2)(\Delta T_1 + \Delta T_2)} \quad \text{-----} \quad (32)$$

Las unidades, en el Sistema Internacional y en el Sistema Ingles, de c son:

$$c = \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \quad \text{o} \quad c = \frac{BTU}{Lb_m \cdot ^\circ F}$$

Para poder determinar la cantidad de calor ΔQ que fluye hacia la sustancia de masa m , hay que involucrar el tiempo. También será necesario aplicar la siguiente equivalencia de unidades para obtener c en las unidades del Sistema Internacional: $1W = 1J/s$; $1KW \cdot h = 3600 KJ$ o bien: $1BTU/lb_m \cdot ^\circ F = 4.1868 KJ/Kg \cdot ^\circ C$.

Para el caso de los gases son dos los calores específicos, uno a volumen constante y otro a presión constante.

El calor específico a volumen constante (C_v) se define por la relación

$$C_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad \text{-----} \quad (33)$$

El calor específico a presión constante (C_p) se define a su vez por la relación

$$C_p \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad \text{-----} \quad (34)$$

CAPITULO II

CARACTERÍSTICAS DEL BANCO DE PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA MATERIALES EMPLEADOS EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

En este capítulo se describirán todas y cada una de las partes que conforman el banco de pruebas de conductividad térmica, así como también se detalla la preparación e instalación del mismo. Este equipo se elaboró basándose en las normas de la ASTM-C177-97 y ASTM-C518-91.

2.1 Componentes del Banco de Pruebas de Conductividad Térmica.

El banco de pruebas consta de los siguientes elementos:

1. Base de madera
2. Prensa de hierro
3. Gabinete
4. Fuente de calor
5. Placas de distribución de calor
6. Fuente fría o disipadora de calor
7. Circuito eléctrico
8. Equipo de medición

Se coloca sobre un escritorio de madera de 162 x 75 cm y 74 cm de alto.

A continuación se da una descripción de todas las partes que lo conforman.

2.1.1 Base de Madera

Está elaborada con madera de pino de 50.5 x 61.5 cm y 2.3 cm de espesor. Están colocadas al centro 2 piezas de madera de la misma clase de 34.6 cm de largo x 6.3 cm de ancho y 2 cm de espesor cuya función es la de fijar la zona de pruebas.

También se fijan la alimentación eléctrica de la resistencia y ventiladores, así como también las bases de los ventiladores (Figura 2.1).

2.1.2 Prensa de Hierro

Es una estructura construida de perfil metálico de 51 x 40 x 30 cm. Su función principal es sujetar todas las partes que envuelven a los especímenes en prueba, o sea soportan al gabinete de pruebas y da el ajuste necesario de apriete a las placas dispuestas en forma de sándwich (especímenes y fuentes de calor y frías), puesto que cuenta con tornillos laterales, longitudinales y un tornillo en la parte superior de la misma (Figura 2.2).



Figura 2.1 Base de madera



Figura 2.2 Prensa de hierro

2.1.3 Gabinete

El gabinete es un compartimiento constituido por las siguientes partes: madera, poliestireno y papel aluminio. El primero consta de cuatro placas de madera de pino de 2.2 cm de espesor, de las cuales dos son de 25.6 x 14.5 cm, otra más de 25 x 15 cm y la última de 27.3 x 14.3 cm. El segundo está formado por cuatro placas de poliestireno expandido de 3.6 cm

de espesor, dos placas son de 35 x 14.5 cm y las otras dos de 26.9 x 14.5 cm. El último es papel aluminio comercial (Figura 2.3). Estos tres materiales conforman una pared adiabática que evitan el intercambio de energía con el exterior. La función principal del gabinete es asegurar en su interior a la fuente de calor, a la fuente fría, especímenes y termopares.



a) Gabinete



b) Poliestireno



c) Madera de pino

Figura 2.3 Gabinete de pruebas: a) Gabinete, b) Poliestireno expandido y c) Madera de pino.

2.1.4 Fuente de Calor

Consta de dos resistencias en paralelo de 80 cm de largo y 0.7 cm de diámetro cada una. Una resistencia es de 17 y la otra de 17.5 Ohms. Estas resistencias son las utilizadas en estufas eléctricas, en este caso se acondiciona para nuestros propósitos dándole forma de "S" a cada una de ellas para acoplarse lo mejor posible a las placas distribuidoras de calor. Estas resistencias son alimentadas con corriente alterna controlada por medio de un VARIAC Staco Energy Products Co. Modelo 3PN1010B, de 0-140 V de salida (Figura 2.4).

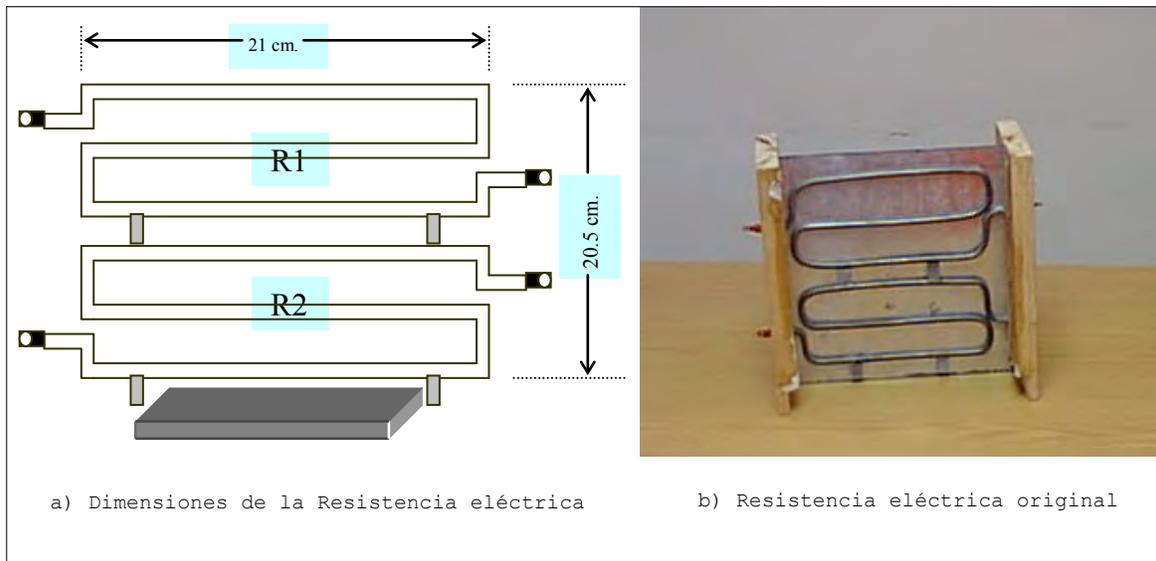


Figura 2.4 Fuente de calor: resistencia eléctrica y sus dimensiones

2.1.5 Placas de distribución de calor

Son dos placas de aluminio de 25 x 24.8 cm y 3.4 mm de espesor pintadas de negro mate. Tienen la función de distribuir el calor de manera uniforme por toda su superficie y trasmitirla de esa manera a las muestras o especímenes (Figura 2.5).



Figura 2.5 Placas de distribución de calor

2.1.6 Fuente fría o disipadora de calor

Está conformada por dos placas de aluminio de 22.9 x 21.6 cm y 3.4 mm de espesor, así como de dos ventiladores pequeños de C.D. de 12 Volts y 1.4 Amps. Estos ventiladores tienen la función de disipar el calor generado por la fuente de calor, de tal manera que se genere un flujo unidireccional de calor y se forme un gradiente térmico a través de las muestras (Figura 2.6).



a) Placas de aluminio de disipación de calor



b) Ventiladores de CD, 12V y 1.4 A y convertidores de CA/CD.

Figura 2.6 Fuente distribuidora de calor que consta de dos placas de aluminio y dos ventiladores

2.1.7 Circuito Eléctrico

Son dos los circuitos eléctricos utilizados. Uno para la resistencia de la fuente de calor alimentados con CA, en la cual se emplearon alambres calibre 12 y 14. Y el otro para los ventiladores, alimentados con CD, en el cual se utilizó alambre calibre 22 (Figura 2.7).

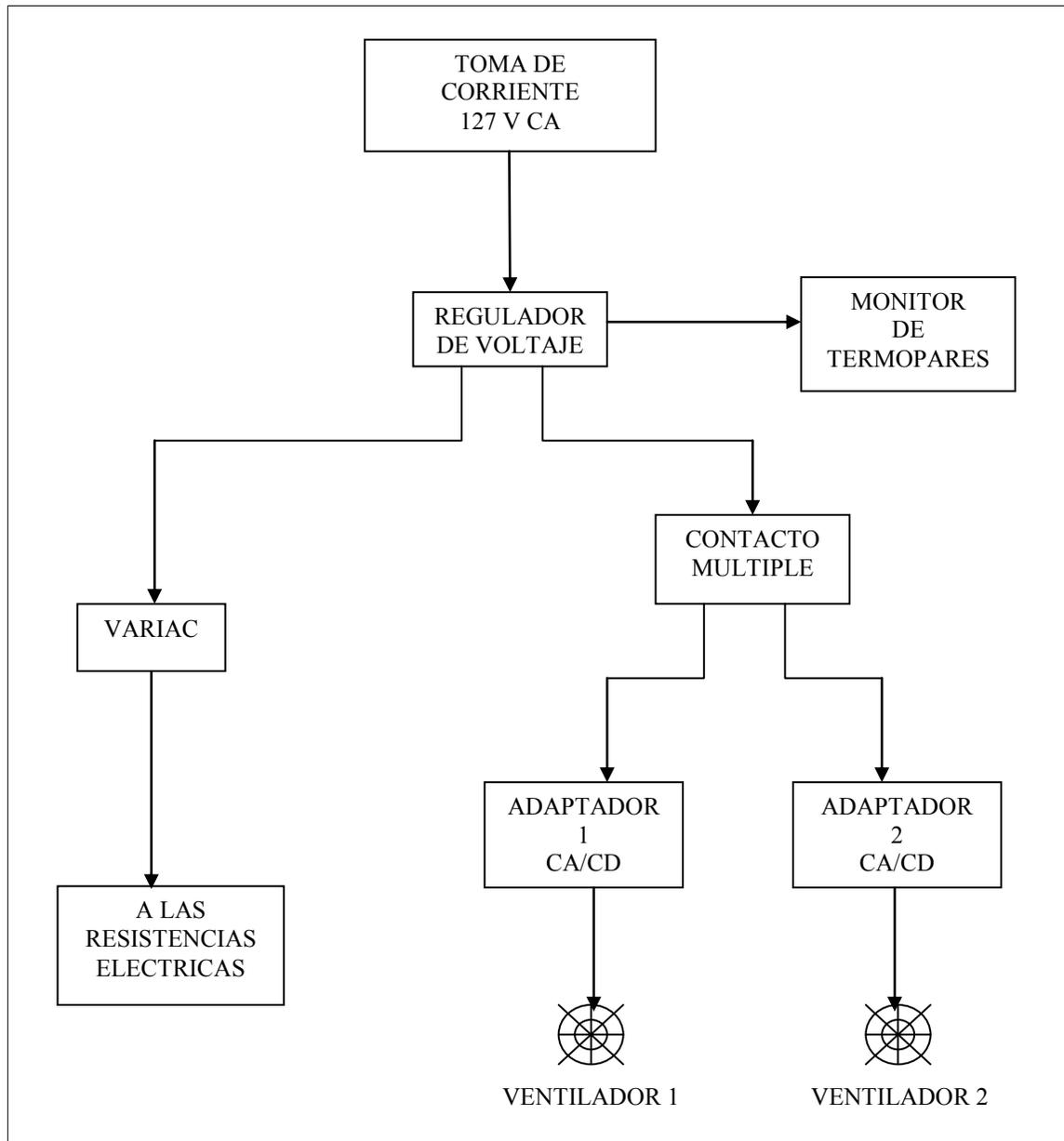


Figura 2.7 Diagrama de bloques del sistema eléctrico para las resistencias y ventiladores. También se muestra el monitor de termopares.

2.1.8 Equipo de Medición

Para el registro de las temperaturas se dispuso de un monitor de termopares de 16 canales Stanford Research Systems Mod. SR630. Únicamente se utilizaron 9 canales, 8 para registrar las temperaturas en las muestras con termopares de superficie tipo "J" calibre 30 de 220 cm de largo soldados en la punta y revestidos con fibra de vidrio, y un termopar más para censar la temperatura ambiente del lugar de pruebas y es un termopar tipo "K" de 50 cm de largo. Asimismo, para medir la corriente y el voltaje que llegan a las resistencias se utilizan dos multímetros de gancho Protek 12000 de 0 - 750 V AC (Figura 2.8).



Figura. 2.8 Monitor de termopares de 18 canales

2.2 Principio de operación del Banco de Pruebas

Una vez conocidas las partes que conforman el banco de pruebas de conductividad térmica a continuación se explica el principio de operación de este dispositivo.

La técnica de la placa caliente guardada nos permite determinar la conductividad térmica de materiales, y es particularmente adecuada para sólidos homogéneos y no homogéneos debido al gran tamaño de las muestras que se pueden utilizar y abarca un amplio campo de condiciones ambientales, pero está limitado a muestras geométricamente rectangulares (placas planas).

Entre los materiales típicos que se pueden probar en la placa caliente guardada se consideran los elementos no metálicos, es decir, sólidos de baja y alta conductividad térmica, como son los materiales fabricados a base de fibras naturales, en este caso las fibras leñosas que incluyen: bagazo de caña, fibras de maderas (caoba, chaktecok, tzalam, etc.); concretos, yeso, entre otros. El principio de operación de este dispositivo se observa en la figura 2.9; se requieren de dos muestras idénticas, las cuales se colocan cada una entre la fuente de calor (placas calientes) ubicada al centro y la fuente fría (placas de enfriamiento) dispuestas en los extremos con ventiladores. Esta última fuente es la encargada de provocar el flujo de calor de la parte caliente a la parte de más baja temperatura.

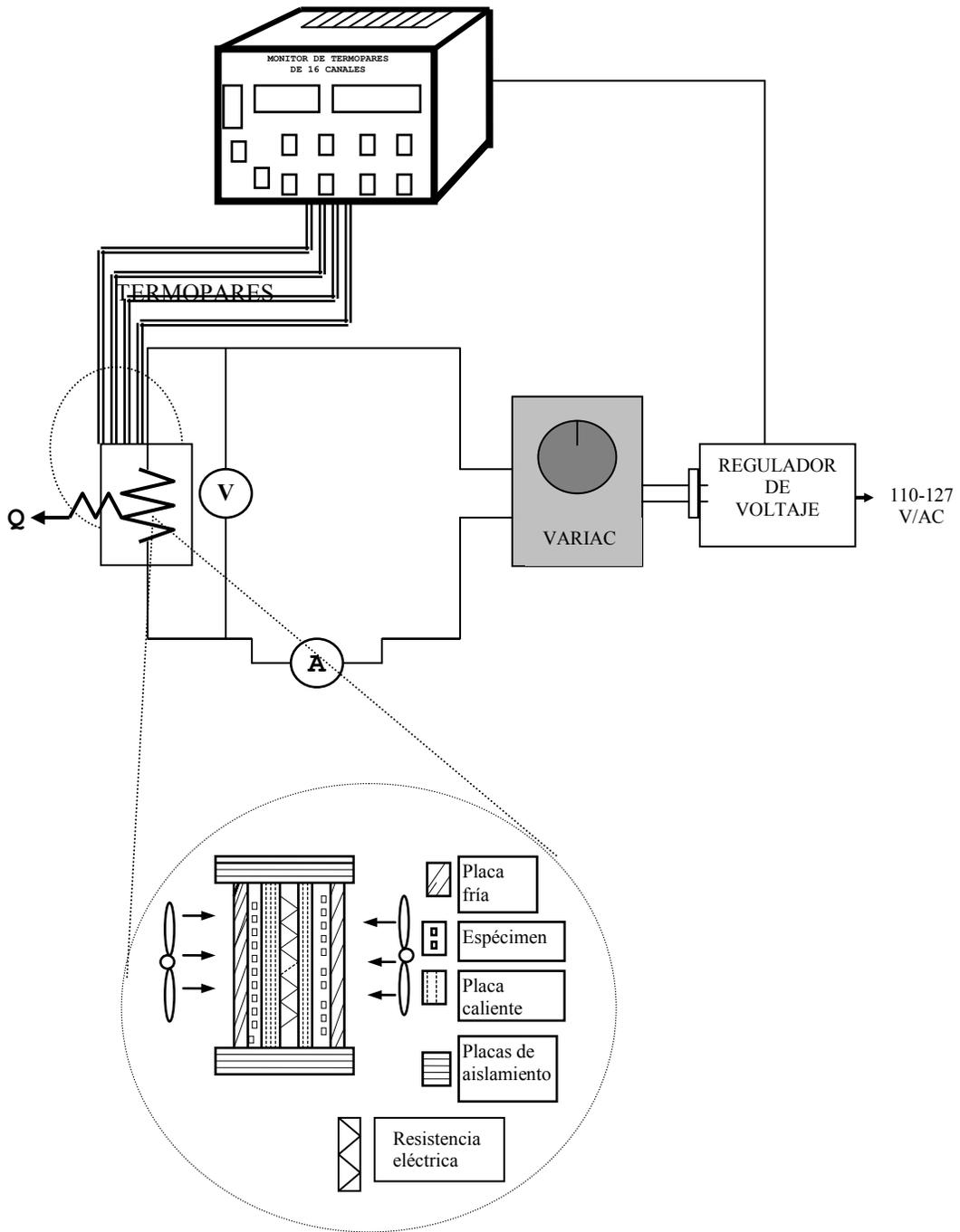


Figura 2.9 Principio de operación del Banco de Pruebas de Conductividad Térmica

La resistencia eléctrica que produce el calor necesario es controlada mediante un Variac, asimismo, se dispone el uso de termopares tipo "J" (Hierro-Constantan) en ambas superficies de la muestra y en la zona central; para este caso se utilizaron 9 termopares 4 para cada espécimen y 1 más para tener un valor de la temperatura ambiente en donde el equipo está operando. Estos termopares de cada muestra miden la caída de temperatura (gradiente térmico) a través de las mismas. El flujo de calor que atraviesan las muestras es igual a la potencia suministrada (diferencia de potencial e intensidad de corriente) por la fuente de calor que consiste de dos resistencias eléctricas de 17 y 17.05 Ohms, respectivamente (Figura 2.10).

Las lecturas de temperatura son registradas por medio de un monitor de termopares, éstas se realizan al momento de poner en funcionamiento el equipo, en este caso fue en períodos de 15 minutos hasta lograr el estado estable o sea cuando la temperatura estacionaria y el voltaje indican el equilibrio térmico, en ese momento se termina la primera corrida y se pone en marcha las siguientes corridas. Se realizaron cuatro corridas para cada espécimen con amperajes de 0.5, 1, 1.5, 1.7 y 2 Amperes.



Figura 2.10 Variac y resistencia eléctrica

2.3 Calibración de los termopares

Los errores en las mediciones ocurren cuando la capacidad del sensor es medida. El rango de temperatura utilizado para este trabajo está desde los 24°C hasta los 70°C. La resistencia eléctrica utilizada permite un buen rango de operación, de hasta 150°C, en la determinación de la conductividad térmica a diferentes temperaturas. Los termopares utilizados son de Hierro-Constantan tipo "J" calibre 30 de 220 cm de largo, soldados en la punta y revestidos con fibra de vidrio, los cuales pueden soportar temperaturas de hasta 750°C.

Para poder determinar la calibración de los termopares se requirió del siguiente material:

- 1 Parrilla eléctrica oscilatoria modelo 1266, 120 V, 50/90 Hertz, 500W Serial No. 0694-2503. Rango de 0-10 para regular el voltaje y un rango de 2-10 para regular la velocidad de la mosca magnética.
- 1 Vaso de precipitados PYREX de 1000 ml con un rango de error del $\pm 5\%$.
- 1 Soporte universal
- 1 Pinza para soporte universal
- 1 Termómetro de bulbo de mercurio BRANNAN con un rango de -10 a +260 °C.
- 9 Termopares, 8 tipo "J" y 1 Tipo "K", y Agua destilada 850ml.

2.3.1 Preparación del equipo de calibración

Se tomaron 850 ml de agua destilada y se vertieron en el vaso de precipitados asimismo se le colocó un agitador magnético dentro del vaso de precipitados con el agua destilada, colocándose todo esto sobre la parrilla eléctrica. En el soporte universal se le colocó la pinza la cual

sujetaba al termómetro de mercurio el cual tenía que estar en contacto con el agua destilada, este termómetro sirvió únicamente como referencia de lecturas con los demás termopares. Los 9 termopares se sujetaron al soporte universal y posteriormente se conectaron a un monitor de termopares de 16 canales Stanford Research Systems Mod. SR630 y por último se sumergieron hasta la mitad del agua destilada contenida en el vaso de precipitados. El contacto con el agua fue total, o sea, la punta de los termopares quedó dentro del agua (figura 2.11). Cabe destacar que para poder tener el valor de 10°C como temperatura de inicio en la calibración de los termopares fue necesario disponer de un recipiente aparte en el cual se agregó agua normal y hielo y se sumergió el vaso de precipitado con el agua destilada en su interior y cuando se logró la temperatura deseada se inició con el monitoreo de temperaturas, incrementando poco a poco la temperatura del agua destilada con el regulador de la parrilla eléctrica y poniendo también en funcionamiento el agitador magnético para lograr una temperatura uniforme en toda el agua.

Se tomaron lecturas de temperaturas de todos los termopares y del termómetro de mercurio cada 5°C hasta alcanzar la temperatura de 95°C. Todo este proceso duró no más de 3 horas.



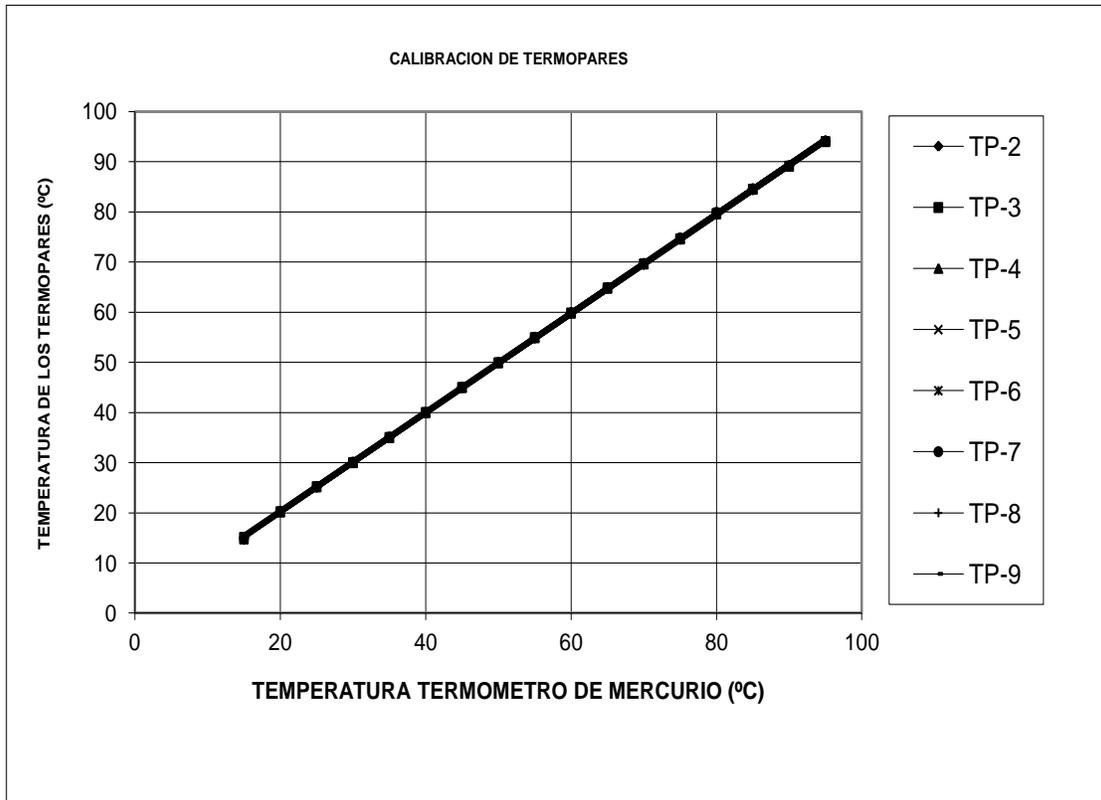
Figura 2.11 Equipo utilizado en la calibración de termopares

2.3.2 Procedimiento de toma de lecturas de las temperaturas

Se tomaron lecturas de temperaturas de todos los termopares y del termómetro de mercurio cada 5°C hasta alcanzar la temperatura de 95°C . Todo este proceso duró no más de 3 horas.

2.3.3 Resultados obtenidos y análisis

A continuación en la gráfica 2.1 se muestran los resultados obtenidos ya procesados:



Gráfica 2.1 Calibración de termopares

En la gráfica anterior se observa que es muy poca la diferencia de lecturas de temperaturas entre los termopares y el termómetro de mercurio, por lo tanto las lecturas serán confiables al utilizarlos.

2.4 Preparación e instalación del Banco de Pruebas

A continuación se describirá la forma de preparar e instalar el Banco de pruebas de Conductividad Térmica para poder realizar las pruebas que se requieran.

Se requiere del siguiente material para instalar la Zona de Pruebas: silicón blanco, papel aluminio, un Amperímetro, un Multímetro de Gancho, un contacto múltiple, un Regulador de Voltaje, unas llaves (torquímetro) para apretar las tuercas de la Prensa de Hierro y por supuesto los dos

especímenes a experimentar, previamente secados, cuyas dimensiones deben ser acorde al diseño del equipo y lo mas idénticamente posibles con superficies lisas.

Primeramente se acondiciona un lugar en donde quedarán instalados todos los componentes del banco de pruebas, un escritorio de madera, una silla y espacio suficiente para poder operar el equipo. De preferencia se debe evitar el flujo de personas ajenas al lugar de prueba ya que esto repercute en el funcionamiento del equipo puesto que hay variaciones de la temperatura ambiente y el período de estabilización es más largo.

Posteriormente se coloca la base de madera sobre el escritorio, se le colocan los dos soportes para los ventiladores a cada costado. Cabe señalar que en este componente ya vienen adaptadas las conexiones de los ventiladores y sus soportes, así como el de las resistencias eléctricas; también consta de una salida para poder tomar las mediciones de voltaje, como puede observarse en la Figura 2.1; en el caso de la corriente, ésta es medida a la salida del Variac con un multímetro de gancho.

Seguidamente se arma la zona de pruebas, esto es: se le coloca el papel aluminio, en cantidad suficiente, entre las dos tablas de madera que están al centro de la base de madera y sobre esta se colocan los aislamientos de poliestireno y de madera inferiores, en ese orden. Posteriormente se coloca y asegura la prensa de hierro en la base de madera con cuatro tornillos para evitar que esta se mueva. Una vez concluido lo anterior se colocan los aislamientos (madera y poliestireno) laterales entre los cuales se les disponen las resistencias eléctricas y las dos placas de aluminio distribuidoras de calor. Cabe aclarar que las resistencias eléctricas y las placas quedan firmemente sujetas a los aislamientos de madera

y que son finalmente los que le dan rigidez a esa parte del equipo; antes de colocar los aislamientos laterales de poliestireno se conectan las resistencias de tal manera que la salida está conectada a un enchufe de dos o tres salidas (para poder medir el voltaje) y esta salida a su vez se conecta a otro enchufe que está a un costado de la base de madera. Luego entonces ya es posible colocar los especímenes con sus respectivos termopares en ambos costados así como las otras dos placas de aluminio disipadoras de calor. Los termopares a su vez están previamente conectados al monitor de termopares en el cual finalmente se tomaran las lecturas de las temperaturas de cada termopar. Los especímenes deben estar al centro de la placa y para tal efecto se le colocaron en su base dos piezas de yeso en cada costado y se mantengan en el lugar deseado. Después se colocan los aislamientos de madera y poliestireno superiores y se termina de colocar el papel aluminio y se cuida que quede bien cubierto con este papel. Y por último se le coloca la última pieza suelta de la Prensa de Hierro la cual es la que prensa la parte superior de la Zona de Pruebas. Ya instalada la zona de pruebas se procede a sellar con silicón blanco todas las orillas en donde están las placas de aluminio y cualquier otra zona que requiera ser sellada, esto es con el fin de evitar lo más posible alguna fuga de calor. Se presan las dos muestras lo necesario, de acuerdo a la norma "ASTM-C177 y C-518", para provocar un buen contacto de los termopares con las superficies a medir, debe tenerse mucho cuidado de no apretar demasiado las muestras ya que pueden romperse o bien se pueden dañar los termopares. Finalmente se colocan los ventiladores en ambos costados del equipo en las bases que están acondicionadas para tal efecto y se conectan a unas terminales, mismas que están a un lado de sus bases en la

parte inferior de la base de madera y conectadas a unas salidas especiales para los convertidores de corriente y estos a su vez a un contacto múltiple

El Variac, Monitor de Termopares y contacto múltiple se conectan a un Regulador de Voltaje, esto es para prevenir lo más posible las variaciones bruscas de voltaje.

En el caso de los ventiladores estos constan de un convertidor de corriente de 12 Volts de Corriente directa, cada uno, puesto que es el voltaje y tipo de corriente al que operan.

El equipo se encuentra listo para trabajar, se determina a que valor de amperaje se realizará la primera corrida ajustando el variac y se colocan el amperímetro y el multímetro de gancho para medir la corriente y el voltaje. Se conecta el Regulador de voltaje a la toma de corriente (110-127 Volts) y se enciende. Se ponen en marcha los ventiladores y el variac y se inicia con el monitoreo de temperaturas al intervalo de tiempo estipulado.

En la figura 2.12 se muestra el Banco de Pruebas de Conductividad Térmica funcionando. En esta figura puede apreciarse claramente varios de los componentes del Banco de Pruebas de Conductividad Térmica.

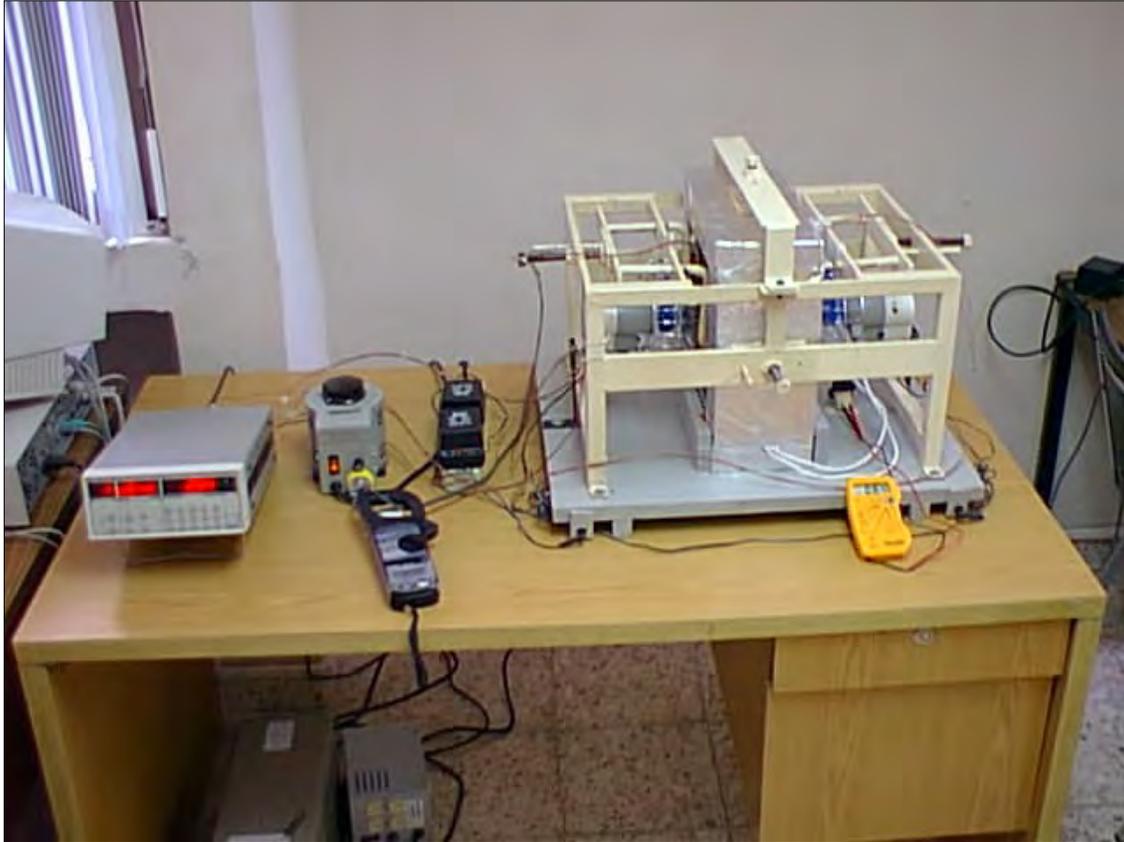


Figura 2.12 Banco de Pruebas de Conductividad Térmica operando

CAPITULO III

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Este trabajo se realizo en las instalaciones de la Universidad de Quintana Roo de Julio de 1999 a Enero de 2000.

El procedimiento experimental que se empleó empezó desde el momento mismo en que se inició con la preparación y selección de los especímenes, pasando por el diseño y construcción del equipo hasta la determinación de sus conductividades térmicas respectivas. En general el desarrollo para llevar a cabo la parte experimental consta de los siguientes pasos:

1. Selección y preparación de las muestras
2. Monitoreo y establecimiento de un estado permanente térmico
3. Procesamiento de datos
4. Análisis de incertidumbre, y
5. Ejemplo de cálculo para el yeso, únicamente.

3.1 Selección y preparación de las muestras

Se seleccionaron el yeso y la madera de pino como muestras base ya que son muy fáciles de conseguir y el valor de su conductividad térmica puede obtenerse en la bibliografía técnica correspondiente. Este valor a final de cuentas fue utilizado como parámetro de comparación con el valor obtenido experimentalmente. Y como última muestra se seleccionó una elaborada con fibras leñosas de la región (aserrín de Caoba), más adelante se describirá a detalle. Esta muestra se seleccionó de acuerdo a sus características físicas, térmicas y de uso dentro del campo de la construcción.

Como ya se mencionó antes en el caso aquí tratado solamente se seleccionaron 3 diferentes muestras las cuales

son: Yeso, Madera de pino y Fibras leñosas. Por cada muestra se realizaron 2 especímenes. Los ensayos se enfocaron a la obtención de la conductividad térmica, resistividad térmica, conductancia térmica, densidad y calor específico, respectivamente. Dándole mayor relevancia a la determinación experimental de la conductividad térmica puesto que es el objetivo del presente trabajo.

A continuación se describe a detalle el procedimiento de elaboración de las muestras de yeso, madera de pino y fibras leñosas, así como también la colocación de los termopares en cada muestra además de las medidas de largo, ancho y espesor.

3.1.1 Yeso

Para la elaboración de esta muestra fue necesario elaborar dos moldes especiales de hierro de 15 x 20 cm y un pisón de hierro, como se observa en la figura 3.1. El yeso que se utilizó fue de la marca "El Tigre", también se utilizó agua potable. Se elaboraron dos mezclas, una para cada ejemplar, las proporciones empleadas para cada ejemplar son las siguientes:

850 ml de yeso "El Tigre", y
400 ml de agua potable.

Se debe de tener muy en cuenta el tiempo de secado del yeso al momento de reaccionar con el agua, puesto que el proceso de reacción es muy rápido. Hay que estar moviendo constantemente la mezcla y agregar agua de manera continua y una vez que la mezcla esté lista de manera inmediata vaciarla a los moldes que previamente deben estar preparados para tal efecto.

Se utilizó una charola plana de metal de 50 x 40 cm para mezclar el yeso con el agua. Para que no se pegara el yeso a las paredes del molde fue necesario forrar estas paredes con

plástico. Estos moldes se colocaron sobre una base de madera sobre la cual también se colocó plástico y de esa manera evitar que el yeso se adhiriera a la madera. Una vez terminado todo el proceso de vaciado en cada molde se utilizó un pisón de hierro para apisonar las mezclas, esto con el fin de que no existan grumos en ella y para que cada ejemplar quedara lo más sólido posible sin espacios de aire en su interior. Se esperaron alrededor de 30 minutos para extraer los ejemplares de cada molde y posteriormente se sumergieron en agua por espacio de 15 minutos aproximadamente para disminuir la temperatura. Lo mismos pasos se siguieron para elaborar el segundo ejemplar. Por último se dejaron secar durante 28 días.

Las dimensiones de cada ejemplar se muestran a continuación en la tabla 3.1 y como se observa fue necesario hacer varias medidas a cada ejemplar para tener un promedio para que las medidas fueran lo más exactas posibles. Las mediciones del espesor se realizaron con un vernier y el largo y ancho con una regla de 30 cm. Cabe mencionar que en el caso del largo y ancho solo se tomaron 3 mediciones puesto que con estas son suficientes, pero en el caso del espesor fue necesario tomar tres mediciones en cada orilla dando un total de doce mediciones, esto con el fin de tener una medida más exacta del espesor de cada espécimen.

No.	ESPECIMEN 1			ESPECIMEN 2		
	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ESPESOR (cm)	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ESPESOR (cm)
1	20.40	14.60	2.07	20.00	14.70	2.05
2	20.30	14.70	2.06	20.00	14.70	2.10
3	20.20	14.70	2.02	20.20	14.70	2.06
4			2.04			2.10
5			2.10			2.10
6			2.04			2.05
7			2.04			2.05
8			2.04			2.09
9			2.08			2.05
10			2.10			2.05
11			2.02			2.09
12			2.06			2.05
PROM	20.30	14.67	2.06	20.07	14.70	2.07

Tabla 3.1 Dimensiones de los especímenes de yeso



Figura 3.1 Moldes de hierro para elaborar los especímenes de yeso

3.1.2 Madera de pino

Para esta muestra se utilizaron dos especímenes de madera de pino, para la cual se realizaron varias mediciones como en el caso anterior. Los valores obtenidos para cada espécimen se muestran en la tabla 3.2.

No.	ESPECIMEN 1			ESPECIMEN 2		
	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ESPESOR (cm)	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ESPESOR (cm)
1	20.00	14.90	2.42	19.85	15.00	2.39
2	20.00	14.90	2.42	19.90	15.00	2.39
3	20.00	14.80	2.45	19.95	14.90	2.40
4			2.50			2.40
5			2.45			2.40
6			2.41			2.43
7			2.44			2.44
8			2.38			2.42
9			2.36			2.43
10			2.35			2.43
11			2.43			2.39
12			2.43			2.38
PROM	20.00	14.87	2.42	19.90	14.97	2.41

Tabla 3.2 Dimensiones de los dos especímenes de madera de pino

3.1.3 Fibras leñosas

Para este caso se seleccionó la fibra leñosa de la caoba por ser una de las más abundante en el estado y también por ser la que mayor resistencia a la compresión presento (19.98 kg/cm² a los 28 días, después de varias pruebas mecánicas realizadas, con respecto a otros tipos de fibras leñosas ensayadas (tzalam, chactekoc, chaca blanco, etc.). Para las pruebas mecánicas de compresión se una Máquina Universal L. Small, con capacidad para 13,608 kgf y sensibilidad de 1 kg.

Para la elaboración de esta muestra se utilizaron los siguientes materiales y proporciones, los cuales se muestran en la tabla 3.3.

MATERIAL	CANTIDAD		
	Ml	Gr	Pza.
ASERRIN DE CAOBA (CRIBA #10)	19000	6612	
POLVO CALICA (CRIBA #60)	11900	14994	
CEMENTO GRIS PORTLAND	3810	4724.40	
AGUA	9500	9500	
MALLA DE GALLINERO (60 X 120 cm)			1

Tabla 3.3 Proporciones utilizadas en la elaboración de la muestra de fibras leñosas

Para elaborar esta muestra, primero se mezclaron el aserrín de caoba, el polvo calica, el cemento y de manera gradual agua, para revolver bien la mezcla se empleó una pala. Posteriormente cuando la mezcla quedó lista se depositó en un molde de madera rectangular de 60 x 120 x 3 cm (con forma de marco) previamente elaborado para tal caso. Pero antes de vaciar toda la mezcla, a mitad del proceso se le puso al centro de la muestra la malla de gallinero y se procedió a depositar el resto de la mezcla hasta quedar oculta totalmente la malla de gallinero. Se dejó en reposo por espacio de 28 días. Por último a esta muestra se le cortaron los dos especímenes, los cuales son los que se utilizaron para ensayo en el Banco de Pruebas de Conductividad Térmica.

Para determinar su espesor, largo y ancho de cada espécimen se realizaron varias mediciones como en el caso del yeso y de la madera de pino, los valores se presentan en la tabla 3.4.

No.	ESPECIMEN 1			ESPECIMEN 2		
	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ESPEJOR (cm)	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ESPEJOR (cm)
1	19.70	14.80	3.15	19.70	14.80	2.87
2	19.80	14.70	3.19	19.80	14.80	3.07
3	19.80	14.60	2.89	19.90	14.70	3.10
4			2.92			3.10
5			3.00			2.95
6			2.98			2.96
7			2.97			2.84
8			3.29			2.83
9			3.25			2.80
10			3.25			2.80
11			3.24			2.83
12			3.17			2.89
PROM	19.77	14.70	3.11	19.80	14.77	2.92

Tabla 3.4 Dimensiones de los especímenes de fibras leñosas

3.2 Instalación de los termopares

El procedimiento de instalación de los termopares es el mismo para todos los especímenes. Fue necesario realizar dos ranuras al centro de cada cara de cada uno de los especímenes para que el termopar quedara oculto y solamente hiciera contacto la punta del termopar con la superficie a medir y también para que ambas caras del espécimen hicieran un contacto total con las fuentes calientes y frías. En la figura 3.2 se observa lo antes descrito.

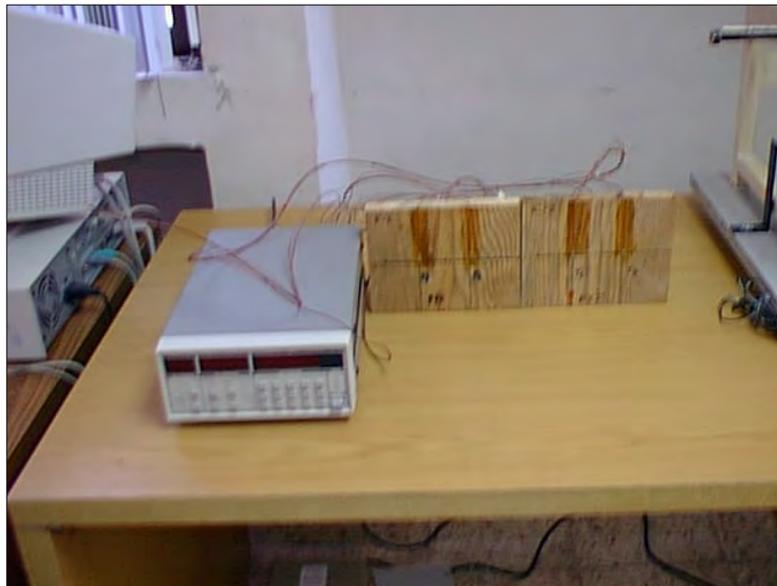


Figura 3.2 Colocación de los termopares en los especímenes de madera de pino

3.3 Monitoreo y establecimiento del estado estable

Una vez iniciada la operación del Banco de Pruebas de Conductividad Térmica se ajusta manualmente el Variac, esto con el fin de mantener un amperaje constante y lograr las condiciones de temperatura a las que se realizará la prueba. Esto es, la corriente suministrada a las resistencias es la necesaria para obtener una temperatura media entre los lados interiores y exteriores de cada espécimen, aproximados a la temperatura máxima que estarán expuestas las muestras durante su uso. También denominada temperatura de operación.

El monitoreo de las variables se lleva a cabo desde el inicio de la corrida en intervalos de 10 ó 15 minutos. Si transcurrido algún tiempo los parámetros no cambian significativamente, se habrá logrado el **estado permanente**. Esto significa que las muestras ya no pueden absorber más calor y por lo tanto, el flujo térmico se desplazará de manera constante a través de los especímenes. El tiempo empleado para alcanzar el estado estable varía de acuerdo a las características de la muestra y estará en función de su espesor y de las condiciones de la prueba. En este caso las horas empleadas para cada corrida y para cada muestra son mostradas en la tabla 3.5.

TIPO DE MUESTRA	HORAS/MINUTOS	MINUTOS	VOLTAJE (VOLTS)	CORRIENTE (AMPERES)
YESO				
CORRIDA 1	6 HRS y 28 MIN	388	5.2	0.5
CORRIDA 2	6 HRS y 14 MIN	374	9.8	1
CORRIDA 3	5 HRS y 53 MIN	353	15.8	1.7
CORRIDA 4	7 HRS y 05 MIN	425	20	2.2
MADERA DE PINO				
CORRIDA 1	7 HRS y 02 MIN	422	4.8	0.5
CORRIDA 2	12 HRS	720	10.4	1
CORRIDA 3	11 HRS y 30 MIN	690	14.6	1.5
CORRIDA 4	11 HRS y 45 MIN	705	19.5	2
FIBRAS LEÑOSAS				
CORRIDA 1	11 HRS y 20 MIN	680	4.6	0.5
CORRIDA 2	10 HRS	600	13.1	1
CORRIDA 3	10 HRS y 30 MIN	630	14.2	1.5
CORRIDA 4	6 HRS y 45 MIN	405	18.7	2

Tabla 3.5 Duración de cada corrida en las tres muestras y valores de voltaje y amperaje

3.4 Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos se llevó a cabo en una hoja de cálculo de Microsoft Excel. Los valores obtenidos del monitoreo corresponden a las siguientes variables: tiempo, voltaje, amperaje y temperaturas. Estos valores, como ya se mencionó anteriormente, se harán en intervalos de tiempo de 10 ó 15 minutos hasta alcanzar el estado térmico estable. Se consideró que si la temperatura no variaba en más de 1 °C entre cada registro se había logrado el *estado permanente*. Ahora bien, considerando dentro del estado estable los promedios de temperaturas y las diferencias de temperaturas en ambas superficies, el espesor y el flujo térmico; la conductividad térmica promedio para dos especímenes se determina con la siguiente ecuación de Fourier modificada (NORMA ASTM-C518-91) [14].

$$k_{PROM} = \frac{Q}{2A} \frac{L_1 + L_2}{\Delta T_1 + \Delta T_2} \quad \text{-----} \quad (35)$$

Donde:

Q = Calor suministrado (Watts)

L_1, L_2 = Espesores de cada espécimen (m)

A = Sección medida del área normal al flujo de calor (m²)

$\Delta T_1, \Delta T_2$ = Diferencial de temperaturas de cada espécimen (°C)

Ahora bien, la sección medida del área normal al flujo de calor A , se obtiene del área actual de la sección medida A_m (área del espécimen) y del área de separación entre la sección medida y la zona de guarda (A_g) (área de la placa caliente menos área del espécimen), mediante la siguiente ecuación [15].

$$A = A_m + \left(\frac{A_g}{2} \right) \text{ ----- (36)}$$

Donde:

A_m = Área del espécimen, m²

A_g = Área de la placa de distribución de calor menos área del espécimen, m²

Cabe aclarar, que en este caso, como no existe zona de guarda, A_g es todo el espacio vacío que deja el espécimen al ser colocado sobre la placa distribuidora de calor.

Empleando las formulas 35 y 36 podemos calcular la Conductividad Térmica del material experimentado, aunque este resultado no es absoluto, puesto que se deben de tomar en consideración los posibles errores que se cometen durante la fase experimental y de procesamiento de datos. A continuación hablaremos sobre este tema.

3.5 Análisis de incertidumbre

Cuando no se tiene un valor conocido para realizar la comparación con la lectura del instrumento se puede confiar en que el instrumento está dentro de un intervalo del valor medio. En tales casos se dice que el intervalo expresa la incertidumbre de las lecturas del instrumento. La incertidumbre es el valor posible de error.

Las incertidumbres obtenidas en este trabajo pueden ser tan grandes o tan pequeñas dependiendo del cuidado que se tomó en la construcción del equipo y operación de cada aparato individual que lo conforma. En nuestro caso se tomo mucho cuidado en la selección de todos los equipos de medición empleados.

Para el análisis de la incertidumbre en los resultados experimentales, se tomó como base el método presentado por Kline y McClintock [1]. Este método se basa en una cuidadosa

especificación de las incertidumbres en diversas mediciones experimentales primarias.

Supongamos que se realiza un conjunto de mediciones y que la incertidumbre en cada medición se expresa con las mismas probabilidades; entonces, estas mediciones se usan a fin de calcular el resultado deseado de los experimentos. Se desea estimar la incertidumbre en el resultado calculado con base en las incertidumbres de las mediciones primarias. El resultado R es una función dada de las variables independientes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$; por lo tanto,

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Sea w_R la incertidumbre en el resultado y $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ las incertidumbres en las variables independientes. Si las incertidumbres en las variables independientes tienen las mismas probabilidades, entonces la incertidumbre en el resultado, según estas probabilidades, se expresa en la siguiente ecuación,

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{---- (37)}$$

Esta ecuación la aplicamos a la ecuación de Fourier para la conductividad térmica y de esta manera obtenemos el análisis de incertidumbre para las siguientes incógnitas involucradas en: incertidumbre en el flujo de calor, incertidumbre en la diferencia de temperatura e incertidumbre en el área medida y espesor del espécimen.

El flujo de calor es el que suministra la resistencia eléctrica y que pasa a través de cada espécimen, siendo estos de las mismas dimensiones. La energía Q , se determina al medir la corriente y el voltaje y aplicando la siguiente expresión:

$$Q = V \times I \text{ ----- (38)}$$

Las unidades de Q son:

$$Q = \text{Volts} \times \text{Amperes} = \text{Watts}.$$

Las temperaturas son censadas por medio de unos termopares y la lectura por medio de un monitor de termopares. Los termopares previamente fueron calibrados para saber la diferencia de lecturas entre ambos como se explica en el Capítulo II.

En lo que respecta al área y espesor de cada espécimen, estas fueron medidas directamente.

Ahora bien partiendo de la ecuación de Fourier,

$$Q = kA \frac{\Delta T}{L}$$

De esta ecuación se determinan las variables que nos interesa conocer su incertidumbre y las cuales hacen que la ecuación se determine de la siguiente manera:

$$k = \frac{VIx}{AT} \text{ ----- (39)}$$

Encontramos por separado la incertidumbre de cada variable:

$$\begin{array}{ll} x_1 = V & x_4 = A \\ x_2 = I & x_5 = T \\ x_3 = x & R = k \end{array}$$

Aplicando la ecuación 39:

$$w_k = \left[\left(\frac{\partial k}{\partial V} w_v \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial I} w_I \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial x} w_x \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial A} w_A \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial T} w_T \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad - (40)$$

Para la incertidumbre del voltaje:

$$k = \frac{VIx}{AT}$$

$$\left(\frac{\partial K}{\partial V} w_v \right) = \frac{Ix}{AT} \frac{d}{dV} V = \frac{Ix}{AT} w_v \quad \text{-----} (41)$$

Para la incertidumbre del amperaje:

$$k = \frac{VIx}{AT}$$

$$\left(\frac{\partial K}{\partial I} w_I \right) = \frac{Vx}{AT} \frac{d}{dI} I = \frac{Vx}{AT} w_I \quad \text{-----} (42)$$

Para la incertidumbre espesor:

$$k = \frac{VIx}{AT}$$

$$\left(\frac{\partial K}{\partial x} w_x \right) = \frac{VI}{AT} \frac{d}{dx} x = \frac{VI}{AT} w_x \quad \text{-----} (43)$$

Para la incertidumbre del área:

$$k = \frac{VIx}{A^2T}$$

$$\left(\frac{\partial K}{\partial A} w_A \right) = \frac{VIx}{T} \frac{d}{dA} \left(\frac{1}{A^2} \right) = \frac{2VIx}{A^3T} w_A \quad \text{-----} (44)$$

Para la incertidumbre de la temperatura:

$$k = \frac{VIx}{AT}$$

$$\left(\frac{\partial K}{\partial T} w_T \right) = \frac{VIx}{A} \frac{d}{dT} \left(\frac{1}{T} \right) = \frac{VIx}{AT^2} w_T \quad \text{----- (45)}$$

Sustituyendo las ecuaciones 41, 42, 43, 44 y 45 en la ecuación 40 tenemos:

$$w_k = \left[\left(\frac{Ix}{AT} w_V \right)^2 + \left(\frac{Vx}{AT} w_I \right)^2 + \left(\frac{VI}{AT} w_x \right)^2 + \left(\frac{2VIx}{A^3 T} w_A \right)^2 + \left(\frac{VIx}{AT^2} w_T \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{--- (46)}$$

Donde:

- w_k = Incertidumbre de la conductividad térmica (%)
- w_V = Incertidumbre del voltaje (%)
- w_I = Incertidumbre del amperaje (%)
- w_x = Incertidumbre de la medición del espesor de los especímenes (%)
- w_A = Incertidumbre en la medición del área de los especímenes (%)
- w_T = Incertidumbre en la medición de la temperatura (%)
- V = Voltaje, Volts
- I = Corriente, Amperes
- x = Espesor de la muestra, m
- A = Áreas de la muestra, m²
- T = Temperatura, °C

La ecuación 46 finalmente es la que se utiliza para determinar la incertidumbre del equipo (Cuadro C2 Anexo 2).

Las incertidumbres de los aparatos de medición empleados en este trabajo son:

	REGLA 30cm	TERMOPARES TIPO "J"	VERNIER	MULTIMETRO	AMPERIMETRO
	AREA (A)	TEMPERATURA (T)	ESPESOR (x)	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (I)
Cantidad	± 0.0045	± 0.015	± 0.00308	± 0.005	± 0.01
%	± 0.45	± 1.5	± 0.308	± 0.5	± 1

Los resultados finales del análisis de incertidumbre promedio se presentan en la tabla 3.6 (ver cuadro C2 en Anexo 2).

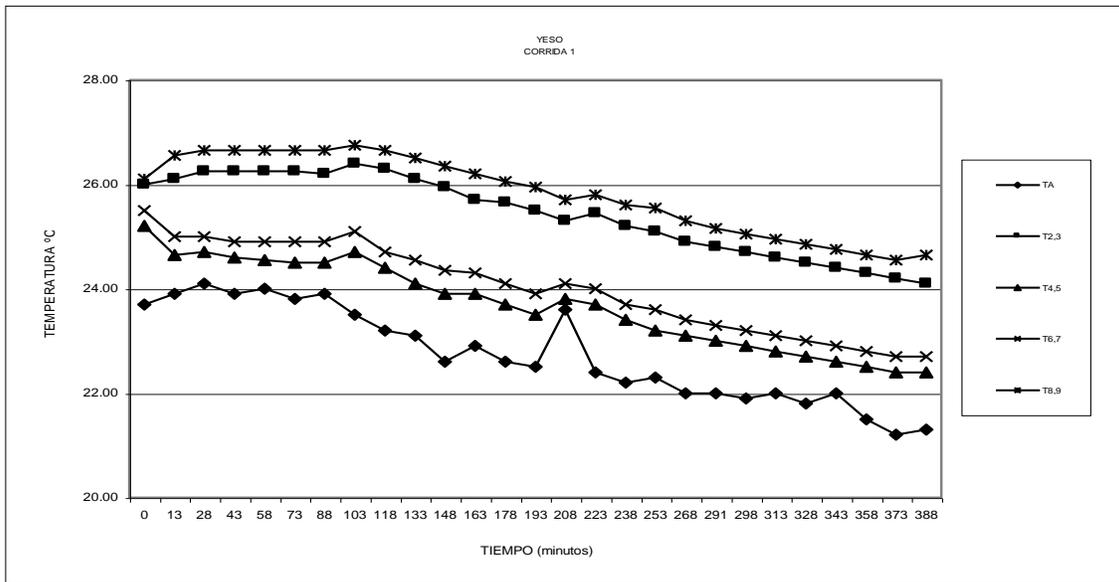
No.DE CORRIDA	INCERTIDUMBRE (W_k) en %		
	YESO	MADERA DE PINO	FIBRAS LEÑOSAS
1	2.35	2.30	2.70
2	7.02	6.77	9.56
3	13.20	12.25	15.09
4	18.39	15.41	20.65
INCERTIDUMBRE DEL EQUIPO		± 10.47 %	

Tabla 3.6 Incertidumbre del Banco de pruebas de conductividad térmica

3.6 Ejemplo de cálculo de medición

Una vez terminado de instalar el Banco de Pruebas de Conductividad Térmica y puesto en operación se procede a tomar las mediciones de las variables de tiempo, voltaje, corriente y temperaturas por medio de los equipos de medición (reloj, multímetros y monitor de termopares) y todos los datos son registrados, en nuestro caso fue manualmente, en una tabla preparada para tal caso (ver Anexos 3 y 4).

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo del yeso, únicamente para la primera corrida, puesto que es el mismo para las demás corridas. Este mismo procedimiento de cálculo se aplica para las demás muestras.



Gráfica 3.1 Estabilización térmica para el yeso en la primera corrida

En la gráfica 3.1 se puede observar todo el proceso realizado, desde la primera lectura de temperaturas hasta llegar al estado estable. Este proceso duró 388 minutos. Se consideró que ya se había logrado el estado estable cuando la temperatura no rebasaba un grado centígrado entre una medida y la otra, esto en las últimas cinco mediciones como se observa en la tabla 3.7. Las gráficas de estabilización para cada corrida del yeso, madera de pino y fibras leñosas se muestran en el Anexo 3.

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2									
	HORAS : MINUTOS	MINUTOS				SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA						
						T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.				
22:00	5:28	328	5.2	0.5	21.80	24.60	24.40	24.50	22.70	22.70	22.70	23.00	23.00	23.00	24.80	24.90	24.85				
22:15	5:43	343	5.2	0.5	22.00	24.50	24.30	24.40	22.60	22.60	22.60	22.90	22.90	22.90	24.70	24.80	24.75				
22:30	5:58	358	5.2	0.5	21.50	24.40	24.20	24.30	22.50	22.50	22.50	22.80	22.80	22.80	24.60	24.70	24.65				
22:45	6:13	373	5.2	0.5	21.20	24.30	24.10	24.20	22.40	22.40	22.40	22.70	22.70	22.70	24.50	24.60	24.55				
23:00	6:28	388	5.2	0.5	21.30	24.20	24.00	24.10	22.40	22.40	22.40	22.70	22.70	22.70	24.60	24.70	24.65				
PROMEDIO ESTADO EST.			5.20	0.50	21.56			24.30			22.52			22.82			24.69				
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN												23.41						23.76			
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})																		23.58			
ESTADO ESTABLE						ΔT_1						1.78						ΔT_2			1.87

Tabla 3.7 Parámetros medidos para el yeso únicamente en el estado estable, además del promedio de cada parámetro, temperatura media de trabajo y la diferencia de temperaturas para cada espécimen

Conociendo las dimensiones, las diferencias de temperaturas y el flujo de calor suministrado, en este caso para el yeso en la primera corrida, se procedió a determinar el valor de la Conductividad Térmica " k ", utilizando las fórmulas previamente descritas. También se determina el valor de la Conductancia Térmica, Resistencia Térmica, Densidad y Calor Específico. A continuación se presenta el resumen de los resultados en las siguientes tablas.

MATERIAL	LARGO (m)	ANCHO (m)	ESPESOR (m)	AREA (m ²)
PLACA CALIENTE	0.25	0.248	0.00034	0.062
MUESTRA				
ESPECIMEN	0.2030	0.1467	0.0206	0.02978010
ESPECIMEN	0.2007	0.1470	0.0207	0.02950290
PROMEDIO	0.20185	0.14685	0.02065	$A_m = 0.02964150$
$A_g = A_{PLACA} - A_{MUESTRA}$				0.03235850
$A = A_m + A_g/2$				0.04582075

Tabla 3.8 Determinación del Area para el yeso

TEMPERATURA DE PRUEBA (°C)			Q (W)			L (m)			A*	ΔT (°C)			$k_{promedio}$	C	R
T_{MEDIA} PRUEBA1	T_{MEDIA} PRUEBA2	T_{MEDIA} PRUEBA	V	I	Q	L ₁	L ₂	(L ₁ +L ₂)	(m ²)	ΔT ₁	ΔT ₂	(ΔT ₁ +ΔT ₂)	W/m·°C	W/m ² ·°C	m ² ·°C/W
23.41	23.76	23.585	5.2	0.5	2.6	0.0206	0.0207	0.0413	0.04582075	1.78	1.87	3.65	0.32102462	7.77299332	0.12865057

Tabla 3.9 Determinación de " $k_{promedio}$ " para el yeso primera corrida

Para las corridas dos, tres y cuatro se realizó el mismo manejo de datos que en el caso anterior. A continuación se presentan los resultados finales de todas las corridas.

VARIABLES	ESPECIMEN: YESO			
	1 CORRIDA	2 CORRIDA	3 CORRIDA	4 CORRIDA
$T_{\text{MEDIA PRUEBA1}}, ^\circ\text{C}$	23.41	28.89	41.24	47.96
$T_{\text{MEDIA PRUEBA2}}, ^\circ\text{C}$	23.76	30.00	43.90	52.47
$T_{\text{MEDIA PRUEBA}}, ^\circ\text{C}$	23.59	29.44	42.57	50.22
V, Voltaje	5.20	9.70	15.52	19.88
I, Amperaje	0.50	1.00	1.70	2.18
Q, W	2.60	9.70	26.38	43.34
L_1, m	0.0206	0.0206	0.0206	0.0206
L_2, m	0.0207	0.0207	0.0207	0.0207
$(L_1+L_2), \text{m}$	0.0413	0.0413	0.0413	0.0413
A^*, m^2	0.04582075	0.04582075	0.0458208	0.0458208
$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$	1.78	5.65	14.36	23.04
$\Delta T_2, ^\circ\text{C}$	1.87	5.67	14.33	22.80
$(\Delta T_1+\Delta T_2), ^\circ\text{C}$	3.65	11.32	28.69	45.84
$k_{\text{promedio}}, \text{W/m}^\circ\text{C}$	0.32	0.39	0.41	0.43
$C, \text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$	7.77	9.35	10.04	10.32
$R, \text{m}^2\text{-}^\circ\text{C/W}$	0.13	0.11	0.10	0.10

Tabla 3.10 Resultados finales de las propiedades Termofísicas del yeso en las cuatro corridas

De acuerdo a los resultados obtenidos, que se muestran en la tabla anterior, se observa los cuatro valores de “ k ” obtenidos. Con estos valores se obtiene una sucesión de puntos y una regresión lineal, determinándose de esta forma una ecuación útil en el rango de determinado de temperaturas ensayadas y con esto poder conocer la conductividad térmica de dicho material, como se aprecia en la gráfica 3.2.

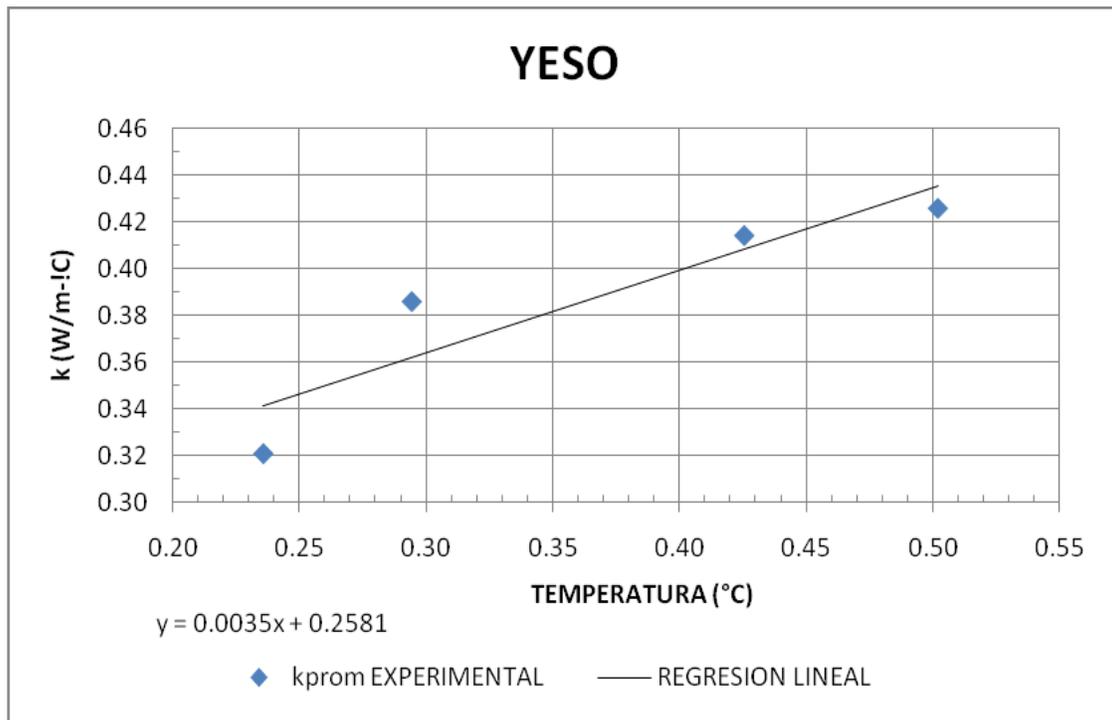
La ecuación lineal obtenida es:

$$y = 0.0035x + 0.2581$$

Acondicionándola para nuestros propósitos, con las variables adecuadas queda:

$$k = 0.0035T + 0.2581 \quad \text{-----} \quad (47)$$

Esta ecuación, finalmente puede utilizarse interpolando de acuerdo al rango ensayado y no para extrapolar.



Gráfica 3.2 Regresión lineal para el yeso.

La gráfica 3.2 representa la temperatura Vs " k " del yeso y la recta obtenida por regresión lineal.

Los resultados obtenidos son confiables ya que previamente se determinó la incertidumbre del Banco de Pruebas, como se menciono anteriormente, y cuyo valor fue del ± 10.47

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos de la Conductividad Térmica, determinados aplicando la ecuación de Fourier modificada para dos especímenes, en el estado estable unidimensional. Estos resultados son los valores promedios de todas las mediciones realizadas en las pruebas de todas y cada una de las muestras. Cabe mencionar que para la determinación de las demás propiedades físicas tales como la Conductancia Térmica, Resistencia Térmica, Densidad y Calor Específico, se emplearon las fórmulas descritas en el Capítulo I.

4.1 Descripción de los resultados obtenidos

Se presentan en el siguiente orden:

1. Yeso
2. Madera de pino, y
3. Fibras leñosas

Para cada muestra se realizó el mismo procedimiento de cálculo señalado en el capítulo III.

4.1.1 Resultados obtenidos para el yeso.

En la tabla 3.10 y gráfica 3.2 mostrados en el capítulo III se presentaron los resultados obtenidos para el yeso.

Para éste material y como para los demás materiales se analizan de manera experimental y matemática el valor de la Conductividad Térmica " k "; así como también se presenta la Conductancia Térmica, Resistencia Térmica, Densidad y Calor Específico, mostrados en la Tabla 4.5. En esta muestra, como en las demás, se obtuvieron cuatro valores de " k " de las

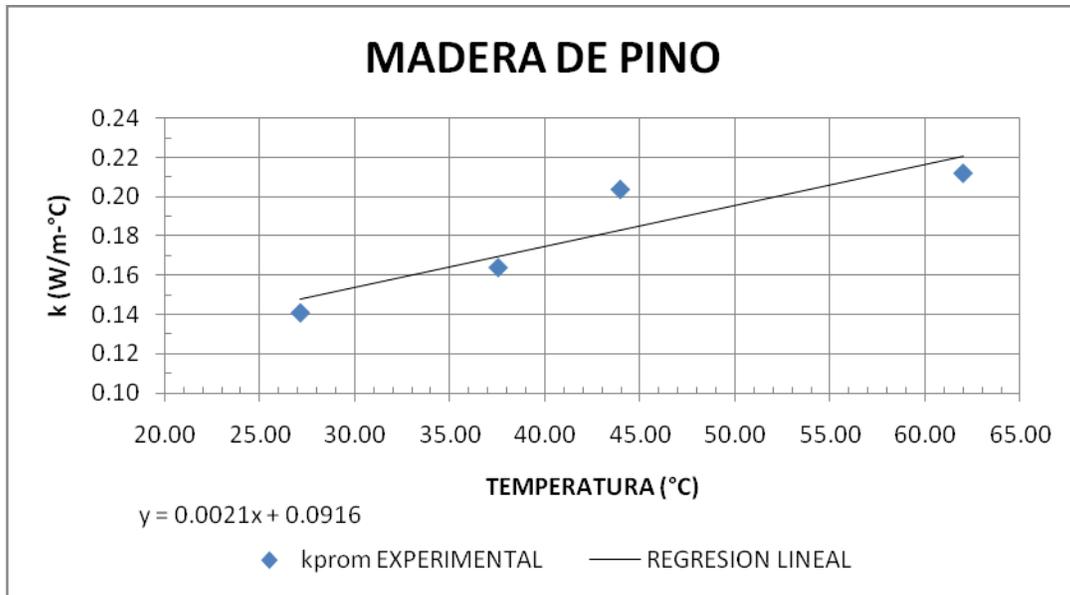
cuatro corridas, con los cuales se determinó la ecuación matemática por regresión lineal. Con la expresión obtenida en la gráfica 3.2 podemos encontrar el valor de "k" en $W/m-^{\circ}C$ en los rangos de temperatura ensayados. También se puede apreciar como el valor de "k" fue aumentando en cada corrida alcanzando un valor máximo de $0.43 W/m-^{\circ}C$ en la última corrida a una temperatura de $50.22^{\circ}C$.

4.1.2 Resultados obtenidos para la madera de pino.

En la tabla 4.1 y gráfica 4.1 se muestran los resultados obtenidos para la madera de pino:

VARIABLES	ESPECIMEN: MADERA DE PINO			
	1 CORRIDA	2 CORRIDA	3 CORRIDA	4 CORRIDA
$T_{\text{MEDIA PRUEBA1}}, ^{\circ}C$	27.32	38.12	44.96	64.11
$T_{\text{MEDIA PRUEBA2}}, ^{\circ}C$	26.96	36.98	42.98	59.92
$T_{\text{MEDIA PRUEBA}}, ^{\circ}C$	27.14	37.55	43.97	62.02
V, Voltaje	5.06	10.32	14.58	19.40
I, Amperaje	0.50	1.00	1.50	2.00
Q, W	2.53	10.32	21.87	38.80
L_1, m	0.0242	0.0242	0.0242	0.0242
L_2, m	0.0241	0.0241	0.0241	0.0241
$(L_1+L_2), m$	0.0483	0.0483	0.0483	0.0483
A^*, m^2	0.0458826	0.0458826	0.04588258	0.0458826
$\Delta T_1, ^{\circ}C$	4.84	17.06	28.56	47.23
$\Delta T_2, ^{\circ}C$	4.60	16.05	27.92	49.09
$(\Delta T_1+\Delta T_2), ^{\circ}C$	9.44	33.11	56.48	96.32
$k_{\text{promedio}}, W/m-^{\circ}C$	0.14	0.16	0.20	0.21
$C, W/m^2-^{\circ}C$	2.92	3.40	4.22	4.39
$R, m^2-^{\circ}C/W$	0.34	0.29	0.24	0.23

Tabla 4.1 Resultados finales para la madera de pino



Gráfica 4.1 Regresión lineal para la madera de pino

En la tabla 4.1 y gráfica 4.1 se aprecia el comportamiento térmico para la madera de pino obteniéndose un valor mínimo de $0.14 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ a 27.14 °C y un valor máximo de $0.21 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ a 62.02 °C así como la ecuación para "k" en los rangos de valores mencionados.

La ecuación obtenida por regresión lineal, para la madera de pino es:

$$k = 0.0021T + 0.0916 \text{ -----(48)}$$

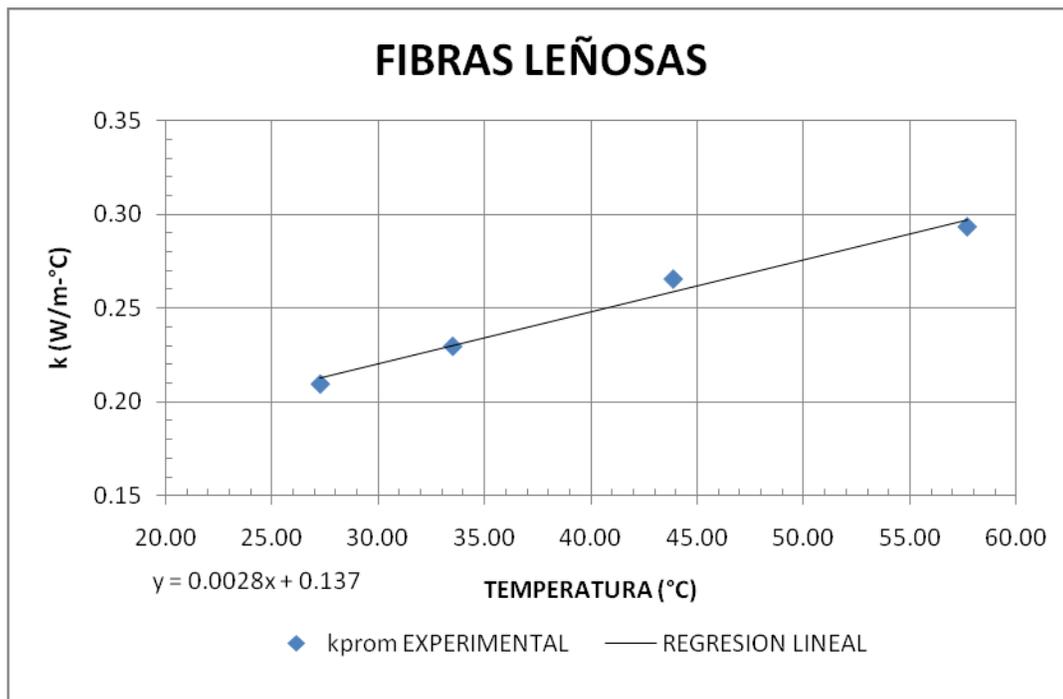
Esta ecuación es válida para determinar el valor de "k" en $\text{W/m}\cdot\text{°C}$ en el rango de temperaturas ensayados y no para extrapolar.

4.1.3 Resultados obtenidos para las fibras leñosas.

En la tabla 4.2 y gráfica 4.2 se observan los resultados obtenidos para las fibras leñosas: los valores de "k" obtenidos experimentalmente en las cuatro corridas con temperaturas que van desde los 27.28 °C hasta los 57.705 °C .

VARIABLES	ESPECIMEN: FIBRAS LEÑOSAS			
	1 CORRIDA	2 CORRIDA	3 CORRIDA	4 CORRIDA
$T_{\text{MEDIA PRUEBA1}}, ^\circ\text{C}$	27.30	33.48	43.95	57.70
$T_{\text{MEDIA PRUEBA2}}, ^\circ\text{C}$	27.26	33.54	43.82	57.71
$T_{\text{MEDIA PRUEBA}}, ^\circ\text{C}$	27.28	33.51	43.89	57.71
V, Voltaje	4.60	9.32	13.76	18.60
I, Amperaje	0.50	1.00	1.50	2.00
Q, W	2.30	9.32	20.64	37.20
L_1, m	0.0311	0.0311	0.0311	0.0311
L_2, m	0.0292	0.0292	0.0292	0.0292
$(L_1+L_2), \text{m}$	0.0603	0.0603	0.0603	0.0603
A^*, m^2	0.0455766	0.0455766	0.0455766	0.0455766
$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$	3.93	14.55	27.52	45.15
$\Delta T_2, ^\circ\text{C}$	3.33	12.30	23.94	38.80
$(\Delta T_1+\Delta T_2), ^\circ\text{C}$	7.26	26.85	51.46	83.95
$k_{\text{promedio}}, \text{W/m}^\circ\text{C}$	0.21	0.23	0.27	0.29
$C, \text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$	3.48	3.81	4.40	4.86
$R, \text{m}^2\text{-}^\circ\text{C/W}$	0.29	0.26	0.23	0.21

Tabla 4.2 Resultados finales para las fibras leñosas



Gráfica 4.2 Regresión lineal para las fibras leñosas

La ecuación obtenida por regresión lineal es:

$$k = 0.0028T + 0.137 \quad \text{-----} (49)$$

Con esta ecuación puede determinarse el valor de "k" en $W/m\text{-}^\circ C$ en los rangos de temperatura ensayados y no para extrapolar.

A continuación se determina el Calor Específico y la Densidad de cada muestra, empleando las variables y ecuaciones correspondientes.

VARIABLES	ESPECIMEN: YESO				ESPECIMEN: MADERA DE PINO				ESPECIMEN: FIBRAS LEÑOSAS			
	1 CORRIDA	2 CORRIDA	3 CORRIDA	4 CORRIDA	1 CORRIDA	2 CORRIDA	3 CORRIDA	4 CORRIDA	1 CORRIDA	2 CORRIDA	3 CORRIDA	4 CORRIDA
V, Voltaje	5.20	9.70	15.52	19.88	5.06	10.32	14.58	19.40	4.60	9.32	13.76	18.60
I, Amperaje	0.50	1.00	1.70	2.18	0.50	1.00	1.50	2.00	0.50	1.00	1.50	2.00
Q, W	2.60	9.70	26.38	43.34	2.53	10.32	21.87	38.80	2.30	9.32	20.64	37.20
Q, KW	0.0026	0.0097	0.0264	0.0433	0.0025	0.0103	0.0219	0.0388	0.0023	0.0093	0.0206	0.0372
Q, KJ	9.36	34.92	94.98	156.02	9.11	37.15	78.73	139.68	8.28	33.55	74.30	133.92
m ₁ , Kg	0.7947	0.7947	0.7947	0.7947	0.4359	0.4359	0.4359	0.4359	0.9412	0.9412	0.9412	0.9412
m ₂ , Kg	0.8502	0.8502	0.8502	0.8502	0.4257	0.4257	0.4257	0.4257	0.9412	0.9412	0.9412	0.9412
(m₁ + m₂), Kg	1.6449	1.6449	1.6449	1.6449	0.8616	0.8616	0.8616	0.8616	1.8824	1.8824	1.8824	1.8824
ΔT ₁ , °C	1.78	5.65	14.36	23.04	4.84	17.06	28.56	47.23	3.93	14.55	27.52	45.15
ΔT ₂ , °C	1.87	5.67	14.33	22.80	4.60	16.05	27.92	49.09	3.33	12.30	23.94	38.80
(ΔT₁+ΔT₂), °C	3.65	11.32	28.69	45.84	9.44	33.11	56.48	96.32	7.26	26.85	51.46	83.95
c, KJ/Kg-°C	0.78	0.94	1.01	1.03	0.56	0.65	0.81	0.84	0.30	0.33	0.38	0.42

Tabla 4.3 Calor Específico para el yeso, madera de pino y fibras leñosas

VARIABLES	YESO	MADERA DE PINO	FIBRAS LEÑOSAS
m ₁ , Kg	0.7947	0.4359	0.9412
m ₂ , Kg	0.8502	0.4257	0.9412
m_{promedio}, Kg	0.8225	0.4308	0.9412
A _{ESPECIMEN1} , m ²	0.02978	0.02974	0.02906
A _{ESPECIMEN2} , m ²	0.02950	0.02979	0.02924
Am, m²	0.02964	0.02977	0.02915
L ₁ , m	0.0206	0.0242	0.0311
L ₂ , m	0.0207	0.0241	0.0292
L_{promedio}, m	0.0207	0.0242	0.0302
ρ, Kg/m³	1343.68	599.31	1070.80

Tabla 4.4 Densidad para el yeso, madera de pino y fibras leñosas

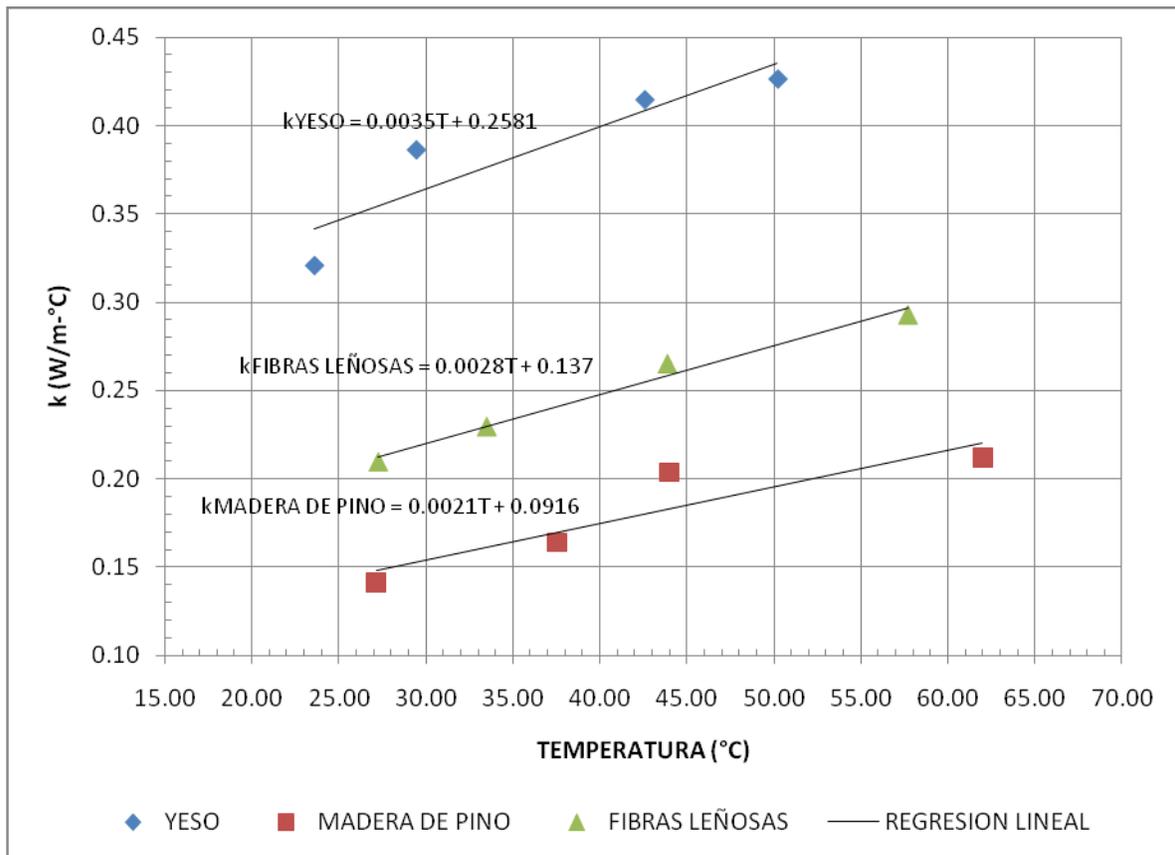
4.2 Resumen de resultados

En la tabla 4.5 se presentan todos los resultados obtenidos, de acuerdo al análisis experimental y por medio de las ecuaciones matemáticas ya descritas anteriormente de la Conductividad Térmica, la Conductancia Térmica, la Resistividad Térmica, el Calor Específico y la Densidad; para las tres muestras ensayadas. Para estas propiedades se emplearon las ecuaciones 25, 27, 28, 29 y 32, respectivamente.

MUESTRA	CONCEPTO	T.PRUEBA	k_{promedio}		C	R	c	ρ
		(°C)	W/m ² ·°C		W/m ² ·°C	m ² ·°C/W	KJ/Kg·°C	Kg/m ³
			EXPERIMENTAL	MATEMATICO				
YESO	EC.REGRESION LINEAL		$k = 0.0035T + 0.2581$					
	T.AMBIENTE	22.78						1343.68
	1 CORRIDA	23.59	0.32	0.34	7.77	0.13	0.78	
	2 CORRIDA	29.44	0.39	0.36	9.35	0.11	0.94	
	3 CORRIDA	42.57	0.41	0.41	10.04	0.10	1.01	
	4 CORRIDA	50.22	0.43	0.43	10.32	0.10	1.03	
MADERA DE PINO	EC.REGRESION LINEAL		$k = 0.0021T + 0.0916$					
	T.AMBIENTE	23.64						599.31
	1 CORRIDA	27.14	0.14	0.15	2.92	0.34	0.56	
	2 CORRIDA	37.55	0.16	0.17	3.40	0.29	0.65	
	3 CORRIDA	43.97	0.20	0.18	4.22	0.24	0.81	
	4 CORRIDA	62.02	0.21	0.22	4.39	0.23	0.84	
FIBRAS LEÑOSAS	EC.REGRESION LINEAL		$k = 0.0028T + 0.137$					
	T.AMBIENTE	22.43						1070.80
	1 CORRIDA	27.28	0.21	0.21	3.48	0.29	0.30	
	2 CORRIDA	33.51	0.23	0.23	3.81	0.26	0.33	
	3 CORRIDA	43.89	0.27	0.26	4.40	0.23	0.38	
	4 CORRIDA	57.71	0.29	0.30	4.86	0.21	0.42	

Tabla 4.5 Resumen de resultados para el yeso, madera de pino y fibras leñosas

En la gráfica 4.3 observamos como el valor de "k" para cada material ensayado tiende a ser constante, esto se lograría haciendo más corridas y por un período de tiempo más largo para cada material. En nuestro caso no fue posible ya que no se contó con el software para la toma de temperaturas, ya que estas se tomaron manualmente por lo cual no se pudo tomar lecturas por más tiempo.



Gráfica 4.3 Valores de "k" de los materiales ensayados en el Banco de Pruebas de Conductividad Térmica

A continuación se presenta una comparación de los resultados experimentales obtenidos de la Conductividad Térmica "k", Densidad y Calor Específico de los materiales ensayados con los reportados en las bibliografías.

VALORES OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE								VALORES OBTENIDOS EN LA BIBLIOGRAFIA			
MUESTRA	CONCEPTO	T.PRUEBA (°C)	kpromedio W/m-°C	C W/m ² -°C	R m ² -°C/W	c KJ/Kg-°C	ρ Kg/m ³	TEMPERATURA (°C)	k W/m-°C	c KJ/Kg-°C	ρ Kg/m ³
YESO	T.AMBIENTE	22.78					1343.68	20	0.48	0.84	1440.00
	1 CORRIDA	23.59	0.32	7.77	0.13	0.78					
	2 CORRIDA	29.44	0.39	9.35	0.11	0.94					
	3 CORRIDA	42.57	0.41	10.04	0.10	1.01					
	4 CORRIDA	50.22	0.43	10.32	0.10	1.03					
MADERA DE PINO	T.AMBIENTE	23.64					599.31	23	0.147	2.80	640.00
	1 CORRIDA	27.14	0.14	2.92	0.34	0.56					
	2 CORRIDA	37.55	0.16	3.40	0.29	0.65					
	3 CORRIDA	43.97	0.20	4.22	0.24	0.81					
	4 CORRIDA	62.02	0.21	4.39	0.23	0.84					
FIBRAS LEÑOSAS*	T.AMBIENTE	22.43					1070.80				
	1 CORRIDA	27.28	0.21	3.48	0.29	0.30					
	2 CORRIDA	33.51	0.23	3.81	0.26	0.33					
	3 CORRIDA	43.89	0.27	4.40	0.23	0.38					
	4 CORRIDA	57.71	0.29	4.86	0.21	0.42					

* ESTE MATERIAL POR SER NUEVO NO SE ENCONTRO UN VALOR EN LA BIBLIOGRAFIA.

Tabla 4.6 Comparación de los valores de "k" determinados experimentalmente con los valores reportados en la bibliografía

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Al diseñar cualquier edificio se debe de tener muy en cuenta el gasto energético que requerirá, de tal manera que sea energéticamente funcional y eficiente. Para tal efecto hay que entender perfectamente los procesos de transferencia de calor que se presentan en las envolventes de los edificios. El conocimiento de las propiedades físicas de los materiales de construcción es primordial y la de mayor importancia es la Conductividad Térmica " k ", altos valores de esta propiedad implicaría mayor intercambio de calor entre el interior y exterior de los edificios y por lo tanto un mayor consumo de energía eléctrica para lograr las condiciones de confort interna del edificio; por lo contrario si el valor de " k " es bajo, las condiciones de confort se lograrían con un menor consumo de energía eléctrica.

Por lo antes expuesto, en este trabajo se presenta el diseño y construcción de un Banco de Pruebas de Conductividad Térmica para Materiales de Construcción. El diseño y construcción de este equipo está basado en la técnica de la Placa Caliente Guardada de acuerdo a las normas: ASTM C-518-91 y ASTM C-717-97.

A manera de resumen, a continuación se señalan las siguientes ventajas y desventajas del equipo:

VENTAJAS

1. El diseño es sencillo y práctico para cualquier material de construcción.
2. Disposición de ensamble y desensamble.

3. Amplio rango de operación de hasta 150°C en la determinación de la conductividad térmica.
4. El costo del equipo es económico en comparación de los que existen en el mercado. El costo del equipo es de \$ 28,616.00 Moneda Nacional (ver Anexo 2) incluyendo el monitor de termopares y el variac. No se incluye la computadora ni la interfase para la toma de lecturas de la temperatura.
5. Los materiales con los se construyó son de fácil adquisición.
6. Cualquier componente del equipo que deje de funcionar puede ser sustituido inmediatamente, debido a que todas sus partes son desarmables.

DESVENTAJAS

1. Se requieren de tiempos relativamente largos para lograr el estado estable, sobre todo para materiales como el concreto.
2. No se pueden medir especímenes heterogéneos.
3. Mala mano de obra para su construcción.

Los valores de Conductividad Térmica medidos de los tres materiales (yeso, madera de pino y fibras leñosas) son confiables, puesto que en el caso del yeso y la madera de pino se compararon con los valores reportados en la bibliografía técnica y su aproximación es aceptable. Por lo tanto, en lo que respecta al material nuevo ensayado (fibras leñosas), el valor de "*k*" obtenido es confiable. El análisis de incertidumbre realizado al equipo es de $\pm 10.47\%$ lo cual nos da una confiabilidad aceptable en los resultados experimentales efectuados.

Finalmente, se puede decir que los objetivos principales del presente trabajo se cumplieron. Se logra diseñar y construir un Banco de Pruebas de Conductividad Térmica para materiales de Construcción y lo más importante se puso en operación, lográndose medir diferentes muestras y determinar de manera experimental y matemática su conductividad térmica, obteniéndose valores de conductividad térmica, aceptables, para cada material.

5.2 Observaciones y recomendaciones

En ocasiones se piensa que por tener, en algunos casos, un trabajo de investigación, un principio de operación sencillo, la elaboración será de manera fácil. Quizá en parte se tenga razón, pero es indudable que durante el transcurso de la investigación surjan contratiempos de diferente índole que repercuten de manera directa en la realización del trabajo. En el caso aquí tratado se presentaron varios contratiempos que impidieron terminar el equipo en el tiempo programado.

El diseño del equipo se efectuó en aproximadamente dos semanas. La construcción de todas sus partes fue lo que se retardó. Hay que considerar que aquí en la ciudad de Chetumal, por ser un lugar apartado del centro de la República, carecemos de muchos materiales que en nuestro caso son necesarios para la elaboración del equipo. En el caso de la prensa de hierro no se respetaron las medidas de ancho y largo, hubo una disminución de 2cm tanto de largo como de ancho y para que no perjudicara en el funcionamiento del equipo se le hizo unas pequeñas adaptaciones al diseño original. La resistencia eléctrica que primeramente se pensó en utilizar es una en forma de placa, pero como no fue posible contar con ella a tiempo fue necesario utilizar una de estufa eléctrica adaptada a nuestros propósitos. Las

placas de aluminio, no fue posible conseguirlas en la ciudad de Chetumal, por lo que se solicitaron a la ciudad de México con los consecuentes retrasos de envío. El poliestireno se adquirió en la ciudad de Can-cun, no fue posible contar con el aislamiento que originalmente se pensó (poliuretano) debido a lo tardado de su envío desde la ciudad de México. Los demás componentes se adquirieron aquí en la ciudad de Chetumal. Prácticamente esto fue lo que ocasionó que el equipo se terminara en el tiempo estipulado. Cabe señalar que únicamente se dedicaron entre 3 a 4 horas de Lunes a Viernes en la elaboración del equipo.

Haya que cuidar mucho de que no existan fugas de calor en el equipo al estar operando, para nuestro caso, se sellaron todas las orillas del gabinete de pruebas con silicón blanco en cada prueba, para evitar posibles fugas de calor del interior hacia el exterior y mantener el flujo de calor unidimensional y disminuir lo más posible el flujo de calor radial.

Hay que cuidar que los termopares queden perfectamente colocados, esto es que deben estar bien presionados por las placas y los especímenes y estar situados al centro de cada espécimen para asegurarse que el flujo de calor sea perpendicular a la superficie del espécimen ensayado.

Todas las mediciones de temperatura se realizaron manualmente cada 15 minutos hasta lograr el estado estable, el mayor tiempo de registro fue de 720 minutos. Esto se debió a que no se contaba con un sistema de adquisición de datos.

Los valores de la conductividad térmica obtenidos para cada muestra en el Banco de Pruebas de Conductividad Térmica se consideran aceptables, pero pueden mejorarse haciendo correcciones al sistema, tales como el empleo de la resistencia eléctrica originalmente considerada y la

incorporación del sistema de adquisición de datos. Contando con esta última adaptación se pueden realizar mediciones por períodos más largos de tiempo y por lo tanto mayor rango de precisión del equipo.

El equipo está diseñado para materiales planos rectangulares homogéneos. Especímenes demasiados delgados no es recomendable probarlos con este equipo, puesto que los termopares no harían un buen contacto entre las placas de aluminio y dicho espécimen y por lo tanto se generarían cámaras de aire y ocasionarían lecturas erróneas de temperaturas, también no es recomendable para especímenes demasiado gruesos ya que el tiempo de estabilización serían demasiados largo, además de que el flujo de calor no se asegura que sea en sentido longitudinal a la superficie medida. El equipo está diseñado para especímenes de 2 pulgadas de espesor máximo.

Como recomendaciones finales se mencionan las siguientes:

El lugar en donde se instalará el equipo deberá estar cerrado y mantener lo más posible una temperatura ambiente estable.

No debe haber personas ajenas en el lugar de prueba, ya que esto repercute en el funcionamiento adecuado del equipo.

Al momento de realizar las lecturas debe tenerse cuidado especial en el amperaje suministrado al sistema, el amperaje debe ser constante durante todo el tiempo que dure la prueba.

Las muestras deberán estar completamente secas al momento de ser evaluadas, esto con la finalidad de evitar errores en las lecturas.

Al momento de sellar las orillas del gabinete de pruebas debe cuidarse de no dejar partes sin sellar para eliminar las corrientes de aire dentro del gabinete.

Por otro lado se sugiere en futuras pruebas considerar el comportamiento de la conductividad térmica del material con respecto a su contenido de humedad relativa.

REFERENCIAS

- [1] Holman J. P. **"Métodos Experimentales para Ingenieros"**. 4ª Edición. Mc Graw Hill, 1992. pp. 55-56.
- [2] Holman J. P. **"Transferencia de Calor"**. 1ª Edición. Mc Graw Hill, 1986. pp. 592-593.
- [3] Frank P. Incropera., David P. DeWitt. **"Fundamentos de Transferencia de Calor"**. 4ª Edición. Prentice Hall, México, 1999. pp. 1-77
- [4] Karlekar B. V., Desmond R. M. **"Transferencia de Calor"**, 2ª edición, Mc Graw Hill, 1990. pp. 31-35.
- [5] Kern, D. **"Procesos de Transferencia de Calor"**. Editorial Continental, México D.F. 1965. pp. 29-30.
- [6] Pita, E. G. **"Principios y Sistemas de Refrigeración"**. 1ª. Edición, Editorial Limusa, S.A. de C.V., México Distrito Federal. pp. 18-19.
- [7] Bueche, F. **"Fundamentos de Física"**. "2ª. Edición en español, McGraw-Hill, 1989. pp. 296-297.
- [8] FIDE. **"Guía para aplicar criterios de eficiencia energética en construcciones para uso habitacional"** pp. 49-50.

- [9] National Institute of Standards and Technology (NIST).
"Guarded-Hot-Plate History, "Early Guarded-Hot-Plate Apparatus"
<http://museum.nist.gov/panels/hotplate/index.html>
- [10] Casas, V., et. al. **"Desarrollo de un medidor de conductividad térmica, para materiales de construcción"**. MEMORIA, XX Semana Nacional de Energía Solar (ANES), del 2 al 4 de Octubre de 1996, Xalapa, Veracruz. pp. 233-239.
- [11] Ruiz, M. H. et. al. **"Diseño y Construcción de un Medidor de Conductividad Térmica para Materiales de Edificación"**. Ponencia, MEMORIA: XXI SEMANA NACIONAL DE ENERGIA SOLAR (ANES), del 1 al 3 de Octubre 1997, Chihuahua, Chihuahua. pp. 248-253.
- [12] Lira, C. L. et. al. **"Equipo de medición de conductividad térmica para materiales de construcción desarrollado en el CENIDET"**. MEMORIA: 22 Semana Nacional de Energía Solar (ANES), del 28 de Septiembre al 2 de Octubre de 1998, Mexicali, B.C. pp. 246-257.
- [13] Gallegos, R. et. al. **"Estimación Experimental de Conductividad Térmica en Materiales de Construcción"**. Ponencia, MEMORIA: XXI SEMANA NACIONAL DE ENERGIA SOLAR (ANES), del 1 al 3 de Octubre 1997, Chihuahua, Chih. pp. 43-46.

- [14] ASTM C-518-1991: **"Steady State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus"**.
- [15] ASTM C-177-1997: Standard Test Method for **"Steady State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot Plate Apparatus"**.
- [16] Aguilar García, M. et. al. **"Diseño y Construcción de un Medidor de Conductividad Térmica en Materiales de Edificación"**. Tesis de Licenciatura. División de Ingeniería. Universidad de Sonora. Julio de 1997.
- [17] Bojórquez, B. I. et. al. **"Aprovechamiento de las Fibras leñosas del sureste mexicano en paneles para sistemas constructivos habitacionales"**. MEMORIA, XXII Semana Nacional de Energía Solar (ANES), Morelia, Michoacán, del 4 al 8 de Octubre de 1999. pp. 153-155.
- [18] Flores, M. F. et. al. **"Diseño de un banco de pruebas de transmisión de calor por conducción"**. MEMORIA: AVANCES EN INGENIERIA MECANICA, INGENIERIA DE SISTEMAS Y EDUCACION TECNOLOGICA, (ESIME-SEPI), del 9 al 13 de Noviembre de 1998. pp. 155-162.
- [19] Flores, M. F. et. al. **"Determinación de la Conductividad Térmica de Materiales de Construcción mediante un Banco de Pruebas"**. MEMORIA, XXIII SEMANA NACIONAL DE ENERGIA SOLAR (ANES), Morelia, Michoacán, del 4 al 8 de Octubre de 1999. pp. 400-405.

- [20] Flores, M. F. et. al. **"Construcción de un banco de pruebas de conductividad térmica de materiales"**. 2° Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas", (SEPI-ESIME), México, D.F., del 25-29 de Octubre de 1999. pp. 367-374.

NOMENCLATURA

SIMB.	CONCEPTO	UNIDAD
K	Conductividad Térmica	W/m °C
C	Conductancia Térmica	W/m ² °C
R	Resistencia Térmica	m ² °C/W
ρ	Densidad	Kg/m ³
C	Calor específico	KJ/Kg °C
C_P	Calor específico a presión constante	KJ/Kg °C
C_V	Calor específico a Volumen constante	KJ/Kg °C
Q	Razón de Flujo de calor a través de la pared de la muestra generado por la resistencia eléctrica	W
ΔQ	Diferencial de calor	W
ΔT	Gradiente térmico a través de la pared de la muestra perpendicular al flujo de calor	°C
T_{int}	Temperatura interior	°C
T_{ext}	Temperatura exterior	°C
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura	°C
Δx	Diferencial de x	M
M	Masa de la muestra	Kg
T	Tiempo	Seg., min., hr.
A_m	Área de medición o área del espécimen	m ²
A_g	Área de guarda (área de la placa caliente menos área del espécimen)	m ²
W_k	Incertidumbre de la Conductividad Térmica	%
W_V	Incertidumbre del voltaje	%

NOMENCLATURA, Continuación...		
SIMB.	CONCEPTO	UNIDAD
W_x	Incertidumbre del espesor	%
W_A	Incertidumbre del área	%
W_T	Incertidumbre de la temperatura	%
V	Voltaje	V (Volts)
I	Intensidad de corriente	A (Ampere)
L	Espesor	M
A	Área de la muestra transversal al flujo térmico	m ²
T	Temperatura	°C

ANEXO 1

Tabla TCU – CONVERSION DE UNIDADES

MAGNITUD FÍSICA	SÍMBOLO	CONVERSIÓN DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES AL SISTEMA INGLÉS	CONVERSIÓN DEL SISTEMA INGLÉS AL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES
Longitud	<i>L</i>	$1\text{ m} = 3.2808\text{ft}$	$1\text{ ft} = 0.3048\text{ m}$
Área	<i>A</i>	$1\text{ m}^2 = 10.7639\text{ft}^2$	$1\text{ ft}^2 = 0.092903\text{ m}^2$
Volumen	<i>V</i>	$1\text{ m}^3 = 35.3134\text{ft}^3$	$1\text{ ft}^3 = 0.028317\text{ m}^3$
Densidad	ρ	$1\text{ kg/m}^3 = 0.06243\text{ lbm/ft}^3$	$1\text{ lbm/ft}^3 = 16.018\text{ kg/m}^3$
Fuerza	<i>F</i>	$1\text{ N} = 0.2248\text{ lbf}$	$1\text{ lbf} = 4.4482\text{ N}$
Masa	<i>M</i>	$1\text{ kg} = 2.20462\text{ lbm}$	$1\text{ lbm} = 0.45359637\text{ kg}$
Energía, calor	q_x	$1\text{ kJ} = 0.94783\text{ Btu}$	$1\text{ Btu} = 1.05504\text{ kJ}$
Flujo de calor	q_x	$1\text{ W} = 3.4121\text{ Btu/h}$	$1\text{ Btu/h} = 0.29307\text{ W}$
Flujo de calor por unidad de área	$\frac{q_x}{A}$	$1\text{ W/m}^2 = 0.317\text{ Btu/h.ft}^2$	$1\text{ Btu/h.ft}^2 = 3.154\text{ W/m}^2$
Flujo de calor por unidad de longitud	$\frac{q_x}{A}$	$1\text{ W/m} = 1.0403\text{ Btu/h.ft}$	$1\text{ Btu/h.ft} = 0.9613\text{ W/m}$
Generación de calor por unidad de vol.	\dot{q}	$1\text{ W/m}^3 = 0.096623\text{ Btu/h.ft}^3$	$1\text{ Btu/h.ft}^3 = 10.35\text{ W/m}^3$
Energía por unidad de masa	$\frac{q_x}{M}$	$1\text{ kJ/kg} = 0.4299\text{ Btu/lbm}$	$1\text{ Btu/lbm} = 2.326\text{ kJ/kg}$
Calor Específico	<i>C</i>	$1\text{ kJ/kg. }^\circ\text{C} = 0.23884\text{ Btu/lbm. }^\circ\text{F}$	$1\text{ Btu/lbm. }^\circ\text{F} = 4.1869\text{ kJ/kg. }^\circ\text{C}$
Conductividad térmica	<i>K</i>	$1\text{ W/m. }^\circ\text{C} = 0.5778\text{ Btu/h.ft. }^\circ\text{F}$	$1\text{ Btu/h.ft. }^\circ\text{F} = 5.6782\text{ W/m}^2\text{. }^\circ\text{C}$

Fuente: Holman, J.P. "Métodos experimentales para ingenieros"

ANEXO 2

DIMENSIONES DEL YESO Y PLACA CALIENTE				
MATERIAL	LARGO (m)	ANCHO (m)	ESPESOR (m)	AREA (m ²)
PLACA CALIENTE	0.25	0.248	0.00034	0.062
MUESTRA				
ESPECIMEN	0.2030	0.1467	0.0206	0.02978010
ESPECIMEN	0.2007	0.1470	0.0207	0.02950290
PROMEDIO	0.20185	0.14685	0.02065	A_m = 0.02964150
$A_g = A_{PLACA} - A_{MUESTRA}$				0.03235850
$A = A_m + A_g/2$				0.04582075
DIMENSIONES DE LA MADERA DE PINO Y PLACA CALIENTE				
MATERIAL	LARGO (m)	ANCHO (m)	ESPESOR (m)	AREA (m ²)
PLACA	0.25	0.248	0.00034	0.062
MUESTRA				
ESPECIMEN	0.200	0.1487	0.0242	0.029740
ESPECIMEN	0.199	0.1497	0.0241	0.029790
PROMEDIO	0.19950	0.14920	0.02415	A_m = 0.02976515
$A_g = A_{PLACA} - A_{MUESTRA}$				0.03223485
$A = A_m + A_g/2$				0.045882575
DIMENSIONES DE: FIBRA LEÑOSA Y PLACA CALIENTE				
MATERIAL	LARGO (m)	ANCHO (m)	ESPESOR (m)	AREA (m ²)
PLACA	0.25	0.248	0.00034	0.062
MUESTRA				
ESPECIMEN	0.1977	0.1470	0.0311	0.0290619
ESPECIMEN	0.1980	0.1477	0.0292	0.0292446
PROMEDIO	0.19785	0.14735	0.03015	A_m = 0.02915325
$A_g = A_{PLACA} - A_{MUESTRA}$				0.03284675
$A = A_m + A_g/2$				0.045576625
A _m es el área promedio de los dos especímenes.				

CUADRO C1. DIMENSIONES DE LA PLACA CALIENTE Y ESPECIMENES: YESO, MADERA DE PINO Y FIBRAS LEÑOSAS.

MATERIAL	CORRIDA	V (VOLTS)	I (AMPERS)	X (m)	A (m ²)	T (°C)	W _v 0.005	W _I 0.01	W _x 0.00308	W _A 0.0045	W _T 0.015	W _k	(%) INCERTI DUMBRE	K	k _{max}	k _{min}
YESO	1	5.20	0.50	0.0207	0.0296	23.5850	0.0260	0.0050	0.000063756	0.0001332	0.35377500	0.02349	2.34860	0.36973	0.37842	0.36105
	2	9.70	1.00	0.0207	0.0296	29.4425	0.0485	0.0100	0.000063756	0.0001332	0.44163750	0.07019	7.01890	0.44477	0.47599	0.41355
	3	15.52	1.70	0.0207	0.0296	42.5700	0.0776	0.0170	0.000063756	0.0001332	0.63855000	0.13204	13.20411	0.47733	0.54036	0.41430
	4	19.88	2.18	0.0207	0.0296	50.2150	0.0994	0.0218	0.000063756	0.0001332	0.75322500	0.18387	18.38703	0.49072	0.58095	0.40049
MADERA DE PINO	1	5.06	0.50	0.0242	0.0298	27.1400	0.0253	0.0050	0.000074536	0.00013394	0.40710000	0.02296	2.29617	0.16338	0.16714	0.15963
	2	10.32	1.00	0.0242	0.0298	37.5500	0.0516	0.0100	0.000074536	0.00013394	0.56325000	0.06770	6.76961	0.19001	0.20288	0.17715
	3	14.58	1.50	0.0242	0.0298	43.9700	0.0729	0.0150	0.000074536	0.00013394	0.65955000	0.12251	12.25141	0.23606	0.26498	0.20714
	4	19.40	2.00	0.0242	0.0298	62.0150	0.0970	0.0200	0.000074536	0.00013394	0.93022500	0.15411	15.41093	0.24557	0.28342	0.20773
FIBRAS LEÑOSAS	1	4.60	0.50	0.0302	0.0292	27.2800	0.0230	0.0050	0.000093016	0.00013119	0.40920000	0.02701	2.70132	0.24299	0.24956	0.23643
	2	10.00	1.00	0.0302	0.0292	33.5100	0.0500	0.0100	0.000093016	0.00013119	0.50265000	0.09561	9.56134	0.28566	0.31298	0.25835
	3	13.78	1.50	0.0302	0.0292	43.8850	0.0689	0.0150	0.000093016	0.00013119	0.65827500	0.15091	15.09098	0.30808	0.35458	0.26159
	4	18.60	2.00	0.0302	0.0292	57.7050	0.0930	0.0200	0.000093016	0.00013119	0.86557500	0.20655	20.65487	0.33988	0.41008	0.26968

CUADRO C2. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

TERM. DE MERCURIO (°C)	TERMOPARES								
	"K"	"J"							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
15	15.1	15.1	15.1	14.8	15.1	14.7	14.9	14.5	15.1
20	20.1	20.2	20.2	20.2	20.2	20.3	20.3	20.3	20.3
25	25.1	25.1	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.3	25.3
30	30	30	30	30	30	30.1	30.1	30.1	30.1
35	35	35	35	35	35.1	35.1	35.1	35.2	35.2
40	40	40	40	40	40	40	40	40	40.1
45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
50	49.9	49.9	49.9	50	50	50	50	50	50
55	54.9	54.8	54.9	55	55	55	55	55	55
60	59.9	59.9	59.8	59.9	59.9	59.9	59.9	60	60
65	64.8	64.8	64.8	64.8	64.9	64.9	64.9	64.9	65
70	69.6	69.5	69.6	69.7	69.7	69.7	69.7	69.7	69.7
75	74.6	74.5	74.6	74.7	74.7	74.7	74.8	74.8	74.9
80	79.6	79.5	79.6	79.7	79.7	79.8	79.9	79.9	79.9
85	84.5	84.4	84.5	84.6	84.5	84.6	84.6	84.6	84.6
90	89.2	89.1	89.1	89.2	89.1	89.2	89.2	89.2	89.2
95	94.4	94.1	94	94.2	94	94.1	94.1	94	93.9

CUADRO C3. TOMA DE LECTURAS DE TEMPERATURAS PARA LA CALIBRACIÓN DE TERMOPARES.

CONCEPTO	IMPORTE
BASE DE MADERA	50.00
PRENSA DE HIERRO	1,320.00
AISLAMIENTOS (MADERA, POLIESTIRENO, PAPEL ALUMINIO)	77.00
FUENTE DE CALOR (RESISTENCIAS ELECTRICAS)	112.00
PLACAS DE DIST.DE CALOR	32.00
PLACAS DE DISIPACION DE CALOR	26.00
FUENTE DISPERSADORA DE CALOR (VENTILADORES)	888.00
ACCESORIOS (MATERIAL ELECTRICO, PINTURA, ETC.)	550.00
SUBTOTAL 1	\$ 3,055.00
MULTIMETRO	2,418.00
MONITOR DE TERMOPARES	17,000.00
REGULADOR DE VOLTAJE	216.00
TERMOPARES	1,200.00
VARIAC	4,727.00
SUBTOTAL 2	\$ 25,561.00
TOTAL	\$ 28,616.00

CUADRO C4. COSTO DEL BANCO DE PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD TERMICA

ANEXO 3

TABLA 1. TOMA DE LECTURAS YESO PRIMERA CORRIDA A 0.5 AMP.

VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.

No. DE PRUEBA: 1

MATERIAL DEL ESPECIMEN: YESO

FECHA: 22/SEP/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2					
						SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA		
	HORAS : MINUTOS	MINUTOS				T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.
16:32	0	0	5.3	0.5	23.70	26.00	26.00	26.00	25.20	25.20	25.20	25.50	25.50	25.50	26.10	26.10	26.10
16:45	0:13	13	5.3	0.5	23.90	26.20	26.00	26.10	24.60	24.70	24.65	25.00	25.00	25.00	26.50	26.60	26.55
17:00	0:28	28	5.3	0.5	24.10	26.30	26.20	26.25	24.70	24.70	24.70	25.00	25.00	25.00	26.60	26.70	26.65
17:15	0:43	43	5.3	0.5	23.90	26.30	26.20	26.25	24.60	24.60	24.60	24.90	24.90	24.90	26.60	26.70	26.65
17:30	0:58	58	5.3	0.5	24.00	26.30	26.20	26.25	24.50	24.60	24.55	24.90	24.90	24.90	26.60	26.70	26.65
17:45	1:13	73	5.3	0.5	23.80	26.30	26.20	26.25	24.50	24.50	24.50	24.90	24.90	24.90	26.60	26.70	26.65
18:00	1:28	88	5.3	0.5	23.90	26.30	26.10	26.20	24.50	24.50	24.50	24.90	24.90	24.90	26.60	26.70	26.65
18:15	1:43	103	5.4	0.5	23.50	26.50	26.30	26.40	24.70	24.70	24.70	25.10	25.10	25.10	26.70	26.80	26.75
18:30	1:58	118	5.4	0.5	23.20	26.40	26.20	26.30	24.40	24.40	24.40	24.70	24.70	24.70	26.60	26.70	26.65
18:45	2:13	133	5.4	0.5	23.10	26.20	26.00	26.10	24.10	24.10	24.10	24.60	24.50	24.55	26.50	26.50	26.50
19:00	2:28	148	5.3	0.5	22.60	26.10	25.80	25.95	23.90	23.90	23.90	24.40	24.30	24.35	26.30	26.40	26.35
19:15	2:43	163	5.2	0.5	22.90	25.80	25.60	25.70	23.90	23.90	23.90	24.30	24.30	24.30	26.20	26.20	26.20
19:30	2:58	178	5.3	0.5	22.60	25.80	25.50	25.65	23.70	23.70	23.70	24.10	24.10	24.10	26.00	26.10	26.05
19:45	3:13	193	5.3	0.5	22.50	25.60	25.40	25.50	23.50	23.50	23.50	23.90	23.90	23.90	25.90	26.00	25.95
20:00	3:28	208	5.2	0.5	23.60	25.40	25.20	25.30	23.80	23.80	23.80	24.10	24.10	24.10	25.60	25.80	25.70
20:15	3:43	223	5.2	0.5	22.40	25.60	25.30	25.45	23.70	23.70	23.70	24.00	24.00	24.00	25.80	25.80	25.80
20:30	3:58	238	5.2	0.5	22.20	25.30	25.10	25.20	23.40	23.40	23.40	23.70	23.70	23.70	25.60	25.60	25.60
20:45	4:13	253	5.2	0.5	22.30	25.20	25.00	25.10	23.20	23.20	23.20	23.60	23.60	23.60	25.50	25.60	25.55
21:00	4:28	268	5.2	0.5	22.00	25.00	24.80	24.90	23.10	23.10	23.10	23.40	23.40	23.40	25.30	25.30	25.30
21:15	4:43	291	5.2	0.5	22.00	24.90	24.70	24.80	23.00	23.00	23.00	23.30	23.30	23.30	25.10	25.20	25.15
21:30	4:58	298	5.2	0.5	21.90	24.80	24.60	24.70	22.90	22.90	22.90	23.20	23.20	23.20	25.00	25.10	25.05
21:45	5:13	313	5.2	0.5	22.00	24.70	24.50	24.60	22.80	22.80	22.80	23.10	23.10	23.10	24.90	25.00	24.95
22:00	5:28	328	5.2	0.5	21.80	24.60	24.40	24.50	22.70	22.70	22.70	23.00	23.00	23.00	24.80	24.90	24.85
22:15	5:43	343	5.2	0.5	22.00	24.50	24.30	24.40	22.60	22.60	22.60	22.90	22.90	22.90	24.70	24.80	24.75
22:30	5:58	358	5.2	0.5	21.50	24.40	24.20	24.30	22.50	22.50	22.50	22.80	22.80	22.80	24.60	24.70	24.65
22:45	6:13	373	5.2	0.5	21.20	24.30	24.10	24.20	22.40	22.40	22.40	22.70	22.70	22.70	24.50	24.60	24.55
23:00	6:28	388	5.2	0.5	21.30	24.20	24.00	24.10	22.40	22.40	22.40	22.70	22.70	22.70	24.60	24.70	24.65
PROMEDIO ESTADO EST.			5.20	0.50	21.56			24.30			22.52			22.82			24.69
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN											23.41						23.76
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})																	23.58
ESTADO ESTABLE								ΔT_1			1.78			ΔT_2			1.87

TABLA 2. TOMA DE LECTURAS YESO SEGUNDA CORRIDA A 1 AMP.

VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.

No. DE PRUEBA: 2

MATERIAL DEL ESPECIMEN: YESO

FECHA: 23/SEP/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2					
	HORA : MINUTOS	MINUTOS				SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA		
						T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.
16:16	0	0	10.3	1	23.60	23.00	23.00	23.00	22.90	22.90	22.90	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00
16:30	0:14	14	9.5	1	23.70	25.90	25.70	25.80	23.70	23.70	23.70	23.80	23.80	23.80	26.10	26.30	26.20
16:45	0:29	29	9.6	1	22.90	27.90	27.60	27.75	24.40	24.40	24.40	24.70	24.70	24.70	27.90	28.10	28.00
17:00	0:44	44	9.7	1	22.90	29.00	28.60	28.80	24.60	24.60	24.60	25.20	25.20	25.20	29.30	29.50	29.40
17:15	0:59	59	9.7	1	22.20	29.70	29.20	29.45	24.70	24.70	24.70	25.40	25.40	25.40	30.00	30.20	30.10
17:30	1:14	74	9.7	1	22.40	30.10	29.50	29.80	24.80	24.80	24.80	25.70	25.70	25.70	30.60	30.80	30.70
17:45	1:29	89	9.7	1	22.00	30.30	29.70	30.00	24.70	24.80	24.75	25.70	25.80	25.75	30.90	31.20	31.05
18:00	1:44	104	9.8	1	21.30	30.50	29.90	30.20	24.70	24.70	24.70	25.80	25.80	25.80	31.10	31.50	31.30
18:15	1:59	119	9.8	1	21.00	30.60	30.00	30.30	24.60	24.60	24.60	25.80	25.80	25.80	31.30	31.50	31.40
18:30	2:14	134	9.8	1	21.10	30.50	29.90	30.20	24.60	24.60	24.60	25.80	25.80	25.80	31.30	31.60	31.45
18:45	2:29	149	9.7	1	21.40	30.60	30.00	30.30	24.70	24.70	24.70	25.80	25.80	25.80	31.30	31.60	31.45
19:00	2:44	164	9.6	1	21.50	30.70	30.10	30.40	24.90	24.90	24.90	26.10	26.00	26.05	31.40	31.70	31.55
19:15	2:59	179	9.5	1	21.50	30.60	30.00	30.30	24.90	24.80	24.85	25.90	25.90	25.90	31.30	31.60	31.45
19:30	3:14	194	9.5	1	22.20	30.60	30.00	30.30	25.00	25.00	25.00	26.00	26.00	26.00	31.30	31.60	31.45
19:45	3:29	209	9.5	1	23.10	30.70	30.20	30.45	25.30	25.30	25.30	26.40	26.30	26.35	31.40	31.60	31.50
20:00	3:44	224	9.5	1	23.10	31.00	30.40	30.70	25.70	25.70	25.70	26.70	26.70	26.70	31.70	31.90	31.80
20:15	3:59	239	9.5	1	23.30	31.30	30.70	31.00	26.00	26.00	26.00	27.00	27.00	27.00	31.90	32.10	32.00
20:30	4:14	254	9.5	1	23.20	31.50	30.90	31.20	26.10	26.10	26.10	27.10	27.10	27.10	32.10	32.30	32.20
20:45	4:29	269	9.5	1	23.10	31.80	31.20	31.50	26.30	26.30	26.30	27.30	27.30	27.30	32.40	32.60	32.50
21:00	4:44	284	9.6	1	22.90	31.90	31.30	31.60	26.20	26.20	26.20	27.20	27.20	27.20	32.50	32.80	32.65
21:15	4:59	299	9.6	1	22.70	31.90	31.30	31.60	26.10	26.10	26.10	27.20	27.20	27.20	32.60	32.90	32.75
21:30	5:14	314	9.6	1	22.90	32.00	31.40	31.70	26.10	26.10	26.10	27.20	27.20	27.20	32.60	32.90	32.75
21:45	5:29	329	9.7	1	22.70	32.10	31.40	31.75	26.10	26.10	26.10	27.10	27.10	27.10	32.70	33.00	32.85
22:00	5:44	344	9.7	1	22.70	32.10	31.40	31.75	26.10	26.10	26.10	27.20	27.20	27.20	32.70	33.00	32.85
22:15	5:59	359	9.7	1	22.50	32.00	31.30	31.65	26.00	26.00	26.00	27.10	27.10	27.10	32.70	33.00	32.85
22:30	6:14	374	9.8	1	22.40	32.00	31.40	31.70	26.00	26.00	26.00	27.20	27.20	27.20	32.70	33.00	32.85
T.PROM. ESTADO EST.			9.7	1	22.64			31.71			26.06			27.16			32.83
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN											28.89						30.00
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T ^{PRUEBA})																	29.44
ESTADO ESTABLE								ΔT_1			5.65			ΔT_2			5.67

TABLA 3. TOMA DE LECTURAS YESO TERCERA CORRIDA A 1.7 AMP.
 VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.
 No. DE PRUEBA: 3
 MATERIAL DEL ESPECIMEN: YESO
 FECHA: 14/SEP/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2							
	HORAS : MINUTOS					SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA				
	MINUTOS					T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.		
16:37	0	0	15.5	1.7	28.30	28.60	28.50	28.55	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	29.00	29.20	29.10		
16:45	0:08	8	15.5	1.7	28.70	32.80	32.30	32.55	28.50	28.50	28.50	28.50	28.50	28.50	32.50	32.80	32.65		
17:00	0:23	23	15.6	1.7	28.70	39.60	38.80	39.20	31.50	31.50	31.50	32.10	32.10	32.10	39.90	40.20	40.05		
17:15	0:38	38	15.7	1.8	29.40	43.30	42.30	42.80	33.60	33.50	33.55	34.30	34.30	34.30	43.30	43.80	43.55		
17:30	0:53	53	15.6	1.7	29.10	45.50	44.50	45.00	34.80	34.80	34.80	36.10	36.00	36.05	46.20	46.70	46.45		
17:45	1:08	68	15.5	1.7	29.80	47.70	46.50	47.10	36.00	36.00	36.00	37.40	37.40	37.40	48.30	48.80	48.55		
18:06	1:29	89	14	1.6	29.50	49.60	48.40	49.00	37.00	37.00	37.00	38.90	38.80	38.85	50.60	51.10	50.85		
18:17	1:40	100	14.8	1.7	29.60	50.10	48.80	49.45	37.60	37.60	37.60	39.40	39.30	39.35	51.00	51.60	51.30		
18:30	1:53	113	15.2	1.7	29.10	50.60	49.30	49.95	37.70	37.70	37.70	39.60	39.50	39.55	51.70	52.30	52.00		
18:45	2:08	128	15.2	1.7	29.40	51.20	50.00	50.60	38.00	38.10	38.05	40.00	40.00	40.00	52.40	53.00	52.70		
19:00	2:23	143	15	1.7	27.20	51.60	50.30	50.95	38.00	38.00	38.00	40.10	40.00	40.05	52.90	53.40	53.15		
19:15	2:38	158	14.8	1.7	29.80	51.70	50.40	51.05	38.30	38.30	38.30	40.40	40.30	40.35	53.00	53.50	53.25		
19:30	2:53	173	15.2	1.8	25.60	51.90	50.50	51.20	37.30	37.30	37.30	39.80	39.70	39.75	53.30	53.80	53.55		
19:45	3:08	188	15.2	1.7	26.00	51.60	50.20	50.90	36.70	36.80	36.75	39.30	39.20	39.25	53.10	53.70	53.40		
20:00	3:23	203	15.2	1.7	25.60	50.90	49.40	50.15	35.70	35.80	35.75	38.30	38.30	38.30	52.50	53.10	52.80		
20:18	3:41	221	15.2	1.7	25.80	50.60	49.20	49.90	35.80	35.80	35.80	38.20	38.20	38.20	52.20	52.80	52.50		
20:30	3:53	233	15.3	1.7	25.80	50.50	49.00	49.75	35.80	35.80	35.80	38.20	38.10	38.15	52.00	52.60	52.30		
20:45	4:08	248	15.4	1.7	25.70	50.10	48.60	49.35	35.10	35.20	35.15	37.60	37.60	37.60	51.60	52.30	51.95		
21:00	4:23	263	15.4	1.7	25.10	49.90	48.40	49.15	34.70	34.80	34.75	37.30	37.30	37.30	51.40	52.00	51.70		
21:15	4:38	278	15.4	1.7	25.20	49.60	48.10	48.85	34.50	34.60	34.55	37.10	37.00	37.05	51.20	51.70	51.45		
21:30	4:53	293	15.4	1.7	25.10	49.50	48.00	48.75	34.40	34.40	34.40	37.00	37.00	37.00	50.90	51.50	51.20		
21:45	5:08	308	15.4	1.7	25.10	49.20	47.70	48.45	34.10	34.20	34.15	36.80	36.80	36.80	50.90	51.50	51.20		
22:00	5:23	323	15.5	1.7	24.50	49.10	47.60	48.35	34.00	34.00	34.00	36.70	36.70	36.70	50.70	51.30	51.00		
22:15	5:38	338	15.5	1.7	24.60	49.10	47.60	48.35	33.90	34.00	33.95	36.70	36.60	36.65	50.70	51.30	51.00		
22:30	5:53	353	15.8	1.7	24.40	49.00	47.40	48.20	33.80	33.80	33.80	36.50	36.50	36.50	50.60	51.20	50.90		
PROMEDIO ESTADO EST.			15.52	1.70	24.74			48.42			34.06			36.73			51.06		
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN											41.24			43.90					
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})											42.57								
ESTADO ESTABLE								ΔT_1			14.36			ΔT_2			14.33		

TABLA 4. TOMA DE LECTURAS YESO CUARTA CORRIDA A 2.2 AMP.

VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.

No. DE PRUEBA: 4

MATERIAL DEL ESPECIMEN: YESO

FECHA: 24/SEP/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2									
	HORAS : MINUTOS					SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA						
	MINUTOS					T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.				
15:55	0	0	19.9	2.2	22.90	25.30	25.20	25.25	24.20	24.20	24.20	24.40	24.40	24.40	25.70	25.80	25.75				
16:17	0:22	22	20	2.2	22.20	41.10	39.70	40.40	27.30	27.20	27.25	28.40	28.40	28.40	41.00	41.60	41.30				
16:30	0:35	35	20	2.2	21.80	45.40	43.70	44.55	29.20	29.20	29.20	31.00	31.00	31.00	45.90	46.60	46.25				
16:48	0:53	53	20	2.2	21.80	50.80	48.90	49.85	31.60	31.60	31.60	34.30	34.30	34.30	51.70	52.40	52.05				
17:00	1:05	65	20.1	2.2	21.20	52.90	50.90	51.90	32.40	32.40	32.40	35.70	35.80	35.75	54.30	55.10	54.70				
17:15	1:20	80	20.2	2.2	21.20	55.00	52.90	53.95	33.40	33.40	33.40	37.20	37.20	37.20	56.80	57.50	57.15				
17:30	1:35	95	20.2	2.2	21.30	56.60	54.30	55.45	34.00	34.00	34.00	38.20	38.20	38.20	58.60	59.40	59.00				
17:45	1:50	110	19.4	2.2	22.20	57.70	55.50	56.60	34.70	34.30	34.50	39.10	39.10	39.10	60.00	60.70	60.35				
18:00	2:05	125	19.5	2.2	22.20	57.90	55.70	56.80	35.20	35.30	35.25	39.70	39.70	39.70	60.20	61.10	60.65				
18:15	2:20	140	19.5	2.2	22.50	58.10	55.90	57.00	35.50	35.50	35.50	39.90	39.90	39.90	60.50	61.20	60.85				
18:30	2:35	155	19.4	2.2	22.30	58.30	56.10	57.20	35.70	35.70	35.70	40.00	40.00	40.00	60.90	61.60	61.25				
18:45	2:50	170	19.3	2.2	22.80	58.50	56.30	57.40	35.90	35.90	35.90	40.10	40.20	40.15	61.00	61.70	61.35				
19:00	3:05	185	19.3	2.2	22.80	58.60	56.30	57.45	36.00	36.00	36.00	40.30	40.30	40.30	61.00	61.80	61.40				
19:15	3:20	200	19.1	2.1	22.70	58.50	56.30	57.40	36.10	36.10	36.10	40.30	40.40	40.35	61.10	61.80	61.45				
19:30	3:35	215	19.8	2.2	22.60	59.20	56.90	58.05	36.10	36.10	36.10	40.40	40.40	40.40	61.70	62.50	62.10				
19:45	3:50	230	19.9	2.2	22.60	59.80	57.50	58.65	36.40	36.40	36.40	40.60	40.70	40.65	62.30	63.10	62.70				
20:00	4:05	245	19.8	2.2	22.30	60.20	57.90	59.05	36.60	36.60	36.60	40.90	41.00	40.95	62.70	63.50	63.10				
20:15	4:20	260	19.8	2.2	22.30	60.50	58.20	59.35	36.70	36.70	36.70	41.00	41.10	41.05	63.10	63.90	63.50				
20:30	4:35	275	19.8	2.2	22.30	60.80	58.40	59.60	36.80	36.80	36.80	41.20	41.30	41.25	63.40	64.20	63.80				
20:45	4:50	290	19.8	2.2	22.40	61.00	58.60	59.80	36.80	36.90	36.85	41.20	41.30	41.25	63.60	64.40	64.00				
21:00	5:05	305	19.6	2.2	22.00	60.80	58.40	59.60	36.70	36.70	36.70	41.10	41.20	41.15	63.40	64.20	63.80				
21:15	5:20	320	19.6	2.2	22.30	60.60	58.20	59.40	36.60	36.60	36.60	41.00	41.10	41.05	63.30	64.10	63.70				
21:30	5:35	335	19.6	2.2	22.30	60.40	58.00	59.20	36.50	36.60	36.55	41.00	41.10	41.05	63.10	64.00	63.55				
21:45	5:50	350	19.7	2.2	22.10	60.50	58.10	59.30	36.40	36.50	36.45	40.90	41.00	40.95	63.20	64.00	63.60				
22:00	6:05	365	19.7	2.2	22.20	60.50	58.10	59.30	36.40	36.50	36.45	41.00	41.10	41.05	63.30	64.00	63.65				
22:15	6:20	380	19.8	2.2	22.10	60.50	58.10	59.30	36.30	36.40	36.35	40.90	41.00	40.95	63.30	64.10	63.70				
22:30	6:35	395	19.9	2.2	22.10	60.60	58.20	59.40	36.40	36.40	36.40	40.90	41.00	40.95	63.40	64.20	63.80				
22:45	6:50	410	20	2.2	22.30	60.80	58.40	59.60	36.50	36.50	36.50	41.10	41.20	41.15	63.60	64.40	64.00				
23:00	7:05	425	20	2.1	22.20	61.00	58.60	59.80	36.50	36.50	36.50	41.20	41.30	41.25	63.80	64.60	64.20				
PROMEDIO ESTADO EST.			19.88	2.18	22.18			59.48			36.44			41.07			63.87				
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN													47.96								
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})																		50.22			
ESTADO ESTABLE									ΔT ₁	23.04									ΔT ₂	22.80	

TABLA 5. TOMA DE LECTURAS MADERA DE PINO A 0.5 AMP.

VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.

No. DE PRUEBA: 1

MATERIAL DEL ESPECIMEN: MADERA DE PINO

FECHA: 26/OCT/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2							
	HORA S:	MINUTOS				SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA				
						T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.		
15:58	0	0	5.2	0.5	23.70	24.50	24.50	24.50	23.80	23.80	23.80	23.70	23.80	23.75		24.40	24.40		
16:21	0:23	23	5.2	0.5	20.90	26.00	26.10	26.05	22.10	22.00	22.05	21.90	22.10	22.00		25.70	25.70		
17:25	1:27	87	4.7	0.5	22.10	26.00	26.00	26.00	22.20	22.10	22.15	21.90	22.00	21.95		25.60	25.60		
17:44	1:46	106	4.8	0.5	24.70	26.20	26.20	26.20	24.00	24.00	24.00	23.70	23.70	23.70		25.80	25.80		
18:05	2:07	127	4.8	0.5	22.20	26.80	26.80	26.80	23.70	23.70	23.70	23.50	23.50	23.50		26.60	26.60		
18:25	2:27	147	4.7	0.5	21.50	27.00	27.10	27.05	22.80	22.70	22.75	22.60	22.80	22.70		26.70	26.70		
18:45	2:47	167	5.2	0.5	21.90	27.00	27.00	27.00	22.60	22.60	22.60	22.40	22.60	22.50		26.60	26.60		
19:00	3:02	182	5.2	0.5	22.80	27.10	27.10	27.10	23.00	23.00	23.00	22.70	22.90	22.80		26.70	26.70		
19:21	3:23	203	5.1	0.5	25.00	27.50	27.60	27.55	24.80	24.80	24.80	24.50	24.60	24.55		27.10	27.10		
19:30	3:32	212	5.2	0.5	25.30	27.80	27.80	27.80	25.30	25.30	25.30	25.00	25.10	25.05		27.40	27.40		
19:45	3:47	227	5.2	0.5	25.50	28.40	28.40	28.40	25.80	25.80	25.80	25.60	25.60	25.60		28.00	28.00		
20:00	4:02	242	5.1	0.5	22.00	28.80	28.90	28.85	25.00	24.90	24.95	24.70	24.90	24.80		28.50	28.50		
20:15	4:17	257	5.2	0.5	21.30	29.00	29.00	29.00	23.70	23.60	23.65	23.40	23.70	23.55		28.50	28.50		
20:30	4:32	272	5.2	0.5	23.00	28.80	28.90	28.85	23.70	23.60	23.65	23.30	23.50	23.40		28.40	28.40		
20:45	4:47	287	5.2	0.5	24.70	28.80	28.90	28.85	24.80	24.70	24.75	24.40	24.50	24.45		28.40	28.40		
21:00	5:02	302	5.2	0.5	25.00	29.10	29.20	29.15	25.60	25.60	25.60	25.30	25.50	25.40		28.70	28.70		
21:22	5:24	324	5.2	0.5	25.40	29.60	29.70	29.65	26.10	26.10	26.10	25.90	26.00	25.95		29.20	29.20		
21:30	5:32	332	5.2	0.5	25.30	29.80	29.80	29.80	26.20	26.10	26.15	25.90	26.00	25.95		29.30	29.30		
21:45	5:47	347	5.2	0.5	22.00	30.10	30.10	30.10	25.50	25.40	25.45	25.20	25.40	25.30		29.60	29.60		
22:00	6:02	362	5.2	0.5	21.10	30.00	30.10	30.05	23.90	23.70	23.80	23.50	23.70	23.60		29.50	29.50		
22:15	6:17	377	5.2	0.5	22.80	29.70	29.70	29.70	23.90	23.80	23.85	23.40	23.70	23.55		29.20	29.20		
22:30	6:32	392	5.3	0.5	24.70	29.60	29.70	29.65	24.90	24.90	24.90	24.60	24.70	24.65		29.10	29.10		
22:45	6:47	407	4.8	0.5	25.30	29.60	29.70	29.65	25.80	25.80	25.80	25.50	25.60	25.55		29.20	29.20		
23:00	7:02	422	4.8	0.5	25.40	29.60	29.70	29.65	26.10	26.20	26.15	25.90	26.00	25.95		29.30	29.30		
PROMEDIO ESTADO EST.			5.06	0.50	23.86			29.74			24.90			24.66			29.26		
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN											27.32			26.96					
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})											27.14								
ESTADO ESTABLE					ΔT_1						4.84			ΔT_2				4.60	

TABLA 6. TOMA DE LECTURAS MADERA DE PINO SEGUNDA CORRIDA A 1 AMP.
 VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.
 No. DE PRUEBA: 2
 MATERIAL DEL ESPECIMEN: MADERA DE PINO
 FECHA: 25/OCT/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2					
	HORAS	MINUTOS				SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA		
						T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.
11:00	0	0	10.3	1	25.40	24.80	24.80	24.80	24.40	24.50	24.45	24.50	24.50	24.50		24.70	24.70
11:35	0:35	35	10.4	1	25.40	34.70	34.80	34.75	26.00	25.90	25.95	25.40	25.40	25.40		33.20	33.20
12:00	1:00	60	10.3	1	26.30	38.20	38.30	38.25	28.00	27.90	27.95	27.40	27.70	27.55		36.60	36.60
12:31	1:31	91	10.4	1.1	23.40	41.20	41.30	41.25	27.10	26.90	27.00	26.30	26.90	26.60		39.50	39.50
13:02	2:02	122	10.4	1.1	23.30	42.40	42.50	42.45	27.00	26.80	26.90	26.20	26.80	26.50		40.50	40.50
13:30	2:30	150	10.2	1	22.80	42.50	42.50	42.50	27.10	26.90	27.00	26.20	26.90	26.55		40.90	40.90
13:56	2:56	176	10.2	1	24.90	42.80	42.90	42.85	27.60	27.50	27.55	26.70	27.40	27.05		41.10	41.10
16:50	5:50	350	10.4	1.1	26.50	45.90	46.10	46.00	30.50	30.30	30.40	29.60	30.20	29.90		44.30	44.30
17:28	6:28	388	10.3	1	22.20	45.80	45.90	45.85	27.40	27.10	27.25	26.30	27.00	26.65		44.10	44.10
17:58	6:58	418	10.3	1	21.70	44.70	44.90	44.80	26.50	26.30	26.40	25.40	26.10	25.75		43.00	43.00
18:10	7:10	430	10.3	1	21.60	44.40	44.50	44.45	26.40	26.10	26.25	25.30	25.90	25.60		42.80	42.80
18:20	7:20	440	10.2	1	20.60	44.00	44.10	44.05	25.80	25.60	25.70	24.80	25.50	25.15		42.40	42.40
18:30	7:30	450	10.2	1	20.90	43.80	43.90	43.85	25.70	25.40	25.55	24.70	25.20	24.95		42.20	42.20
18:40	7:40	460	10	1	20.80	43.40	43.50	43.45	25.30	25.10	25.20	24.40	25.00	24.70		41.70	41.70
18:50	7:50	470	10	1	22.30	43.10	43.20	43.15	26.10	25.80	25.95	25.00	25.50	25.25		41.50	41.50
19:00	8:00	480	10	1	23.20	42.80	43.00	42.90	26.80	26.60	26.70	25.60	26.20	25.90		41.30	41.30
19:10	8:10	490	10	1	23.60	42.70	42.90	42.80	27.10	26.90	27.00	26.00	26.50	26.25		41.30	41.30
19:20	8:20	500	10.1	1	25.00	42.80	43.00	42.90	27.90	27.70	27.80	27.00	27.40	27.20		41.30	41.30
19:30	8:30	510	10.1	1	25.00	43.00	43.10	43.05	28.40	28.30	28.35	27.50	27.80	27.65		41.50	41.50
19:40	8:40	520	10.1	1	25.50	43.30	43.40	43.35	28.90	28.70	28.80	27.90	28.30	28.10		41.80	41.80
19:50	8:50	530	10.1	1	24.80	43.50	43.60	43.55	29.00	28.80	28.90	28.00	28.40	28.20		42.00	42.00
20:00	9:00	540	11.5	1	24.40	43.70	43.80	43.75	28.60	28.40	28.50	27.50	28.00	27.75		42.10	42.10
20:10	9:10	550	10.1	1	24.90	43.80	44.00	43.90	28.60	28.40	28.50	27.50	28.00	27.75		42.30	42.30
20:20	9:20	560	10.1	1	25.40	44.00	44.10	44.05	28.80	28.70	28.75	27.90	28.30	28.10		42.40	42.40
20:30	9:30	570	10.1	1	25.80	44.30	44.40	44.35	29.30	29.10	29.20	28.40	28.80	28.60		42.70	42.70
20:40	9:40	580	11.6	1	26.00	44.40	44.50	44.45	29.50	29.30	29.40	28.70	29.10	28.90		42.90	42.90
20:50	9:50	590	10.2	1	26.10	44.70	44.80	44.75	29.70	29.50	29.60	28.90	29.30	29.10		43.20	43.20
21:00	10:00	600	10.3	1	26.10	44.90	45.10	45.00	29.90	29.70	29.80	29.10	29.60	29.35		43.30	43.30
21:10	10:10	610	10.2	1	26.40	45.20	45.30	45.25	30.10	29.90	30.00	29.20	29.70	29.45		43.60	43.60
21:20	10:20	620	10.3	1	26.30	45.40	45.60	45.50	30.20	30.00	30.10	29.40	29.90	29.65		43.90	43.90
21:30	10:30	630	10.3	1	26.30	45.70	45.80	45.75	30.40	30.10	30.25	29.50	30.00	29.75		44.10	44.10
21:40	10:40	640	10.3	1	26.30	45.90	46.00	45.95	30.40	30.20	30.30	29.60	30.00	29.80		44.30	44.30
21:50	10:50	650	10.3	1	26.30	46.10	46.20	46.15	30.50	30.20	30.35	29.60	30.10	29.85		44.40	44.40
22:00	11:00	660	10.3	1	26.30	46.20	46.30	46.25	30.50	30.30	30.40	29.70	30.10	29.90		44.60	44.60
22:10	11:10	670	10.2	1	26.30	46.40	46.50	46.45	30.60	30.40	30.50	29.80	30.20	30.00		44.80	44.80
22:20	11:20	680	10.3	1	25.50	46.60	46.70	46.65	30.40	30.20	30.30	29.40	30.00	29.70		45.10	45.10
22:30	11:30	690	10.3	1	24.50	46.70	46.80	46.75	29.80	29.50	29.65	28.80	29.30	29.05		45.10	45.10
22:40	11:40	700	10.3	1	24.40	46.60	46.70	46.65	29.30	29.10	29.20	28.30	28.70	28.50		45.00	45.00
22:50	11:50	710	10.3	1	25.10	46.60	46.70	46.65	29.30	29.10	29.20	28.30	28.80	28.55		44.90	44.90
23:00	12:00	720	10.4	1	25.70	46.50	46.60	46.55	29.70	29.50	29.60	28.80	29.10	28.95		44.90	44.90
PROMEDIO ESTADO EST.			10.32	1.00	25.04			46.65			29.59			28.95			45.00
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN											38.12						36.98
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})																	37.55
ESTADO ESTABLE								ΔT ₁			17.06			ΔT ₂			16.05

TABLA 7. TOMA DE LECTURAS MADERA DE PINO A 1.5 AMP.

VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.

No. DE PRUEBA: 3

MATERIAL DEL ESPECIMEN: MADERA DE PINO

FECHA: 20/OCT/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1				ESPECIMEN No. 2										
	HORAS : MINUTOS	MINUTOS				SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA					
						T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.			
10:30	0	0	14.3	1.5	21.60	26.50	26.70	26.60	23.00	23.00	23.00	23.00	23.20	23.10		25.40	25.40			
11:00	0:30	30	14.4	1.5	22.10	39.70	40.10	39.90	23.90	23.70	23.80	23.20	23.90	23.55		37.20	37.20			
11:30	1:00	60	14.4	1.5	23.10	47.60	48.00	47.80	27.20	26.90	27.05	26.00	27.20	26.60		44.50	44.50			
12:00	1:30	90	14.4	1.5	23.20	52.00	52.40	52.20	29.10	28.80	28.95	27.50	28.90	28.20		49.10	49.10			
12:30	2:00	120	14.3	1.5	23.30	54.60	55.00	54.80	30.20	29.90	30.05	28.30	29.90	29.10		51.70	51.70			
13:00	2:30	150	14.4	1.5	23.10	56.50	56.90	56.70	30.90	30.60	30.75	28.70	30.40	29.55		53.50	53.50			
13:32	3:02	182	14.4	1.5	23.40	57.30	58.20	57.75	31.30	31.10	31.20	29.30	30.90	30.10		54.80	54.80			
14:00	3:30	210	14.4	1.5	23.40	58.40	58.80	58.60	31.50	31.30	31.40	29.40	31.00	30.20		55.50	55.50			
16:02	5:32	332	14.6	1.5	22.10	59.20	59.70	59.45	30.30	30.00	30.15	28.10	29.50	28.80		56.30	56.30			
16:32	6:02	362	14.6	1.5	23.10	59.50	59.90	59.70	31.40	31.20	31.30	29.10	30.30	29.70		56.60	56.60			
17:06	6:36	396	13.2	1.4	23.00	58.00	58.40	58.20	31.70	31.60	31.65	29.50	30.60	30.05		55.50	55.50			
17:54	7:24	444	14.3	1.5	23.30	58.80	59.20	59.00	31.60	31.40	31.50	29.60	30.50	30.05		56.20	56.20			
18:30	8:00	480	15.6	1.6	23.10	61.90	62.30	62.10	31.70	31.60	31.65	29.60	30.50	30.05		58.80	58.80			
19:05	8:35	515	14.3	1.5	21.50	60.20	60.50	60.35	30.70	30.50	30.60	28.40	29.20	28.80		57.60	57.60			
19:30	9:00	540	14.3	1.5	21.50	59.20	59.50	59.35	30.10	30.00	30.05	27.90	28.60	28.25		56.70	56.70			
19:45	9:15	555	14.3	1.5	24.50	58.90	59.20	59.05	31.30	31.10	31.20	29.10	29.60	29.35		56.50	56.50			
20:00	9:30	570	14.3	1.5	22.50	59.10	59.30	59.20	31.30	31.20	31.25	29.20	29.80	29.50		56.50	56.50			
20:10	9:40	580	14.4	1.5	22.60	59.10	59.30	59.20	31.20	31.10	31.15	29.10	29.70	29.40		56.70	56.70			
20:20	9:50	590	14.4	1.5	22.50	59.10	59.30	59.20	31.20	31.00	31.10	29.00	29.60	29.30		56.70	56.70			
20:30	10:00	600	14.4	1.5	22.20	59.10	59.30	59.20	31.00	30.90	30.95	28.90	29.50	29.20		56.70	56.70			
20:40	10:10	610	14.4	1.5	22.00	59.10	59.30	59.20	31.10	30.90	31.00	28.80	29.40	29.10		56.80	56.80			
20:50	10:20	620	14.4	1.5	22.00	59.00	59.20	59.10	30.90	30.70	30.80	28.70	29.30	29.00		56.70	56.70			
21:00	10:30	630	14.4	1.5	22.00	59.00	59.20	59.10	30.80	30.70	30.75	28.70	29.20	28.95		56.60	56.60			
21:10	10:40	640	14.4	1.5	21.90	59.00	59.20	59.10	30.70	30.60	30.65	28.70	29.20	28.95		56.70	56.70			
21:20	10:50	650	14.5	1.5	22.10	59.00	59.20	59.10	30.80	30.60	30.70	28.70	29.20	28.95		56.80	56.80			
21:30	11:00	660	14.6	1.5	22.00	59.00	59.20	59.10	30.80	30.60	30.70	28.80	29.20	29.00		56.80	56.80			
21:40	11:10	670	14.6	1.5	22.00	59.20	59.40	59.30	30.80	30.60	30.70	28.80	29.30	29.05		57.00	57.00			
21:50	11:20	680	14.6	1.5	22.00	59.20	59.40	59.30	30.70	30.60	30.65	28.80	29.30	29.05		57.00	57.00			
22:00	11:30	690	14.6	1.5	22.10	59.30	59.50	59.40	30.70	30.60	30.65	28.80	29.30	29.05		57.10	57.10			
PROMEDIO ESTADO EST.			14.58	1.50	22.04			59.24			30.68			29.02			56.94			
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN									44.96				42.98							
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})									43.97											
ESTADO ESTABLE			ΔT_1						28.56			ΔT_2						27.92		

TABLA 8. TOMA DE LECTURAS MADERA DE PINO A 2 AMP.

VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.

No. DE PRUEBA: 4

MATERIAL DEL ESPECIMEN: MADERA DE PINO

FECHA: 27/OCT/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2						
	HORA S: MINUTOS	MINUTOS				SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA			
						T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.	
11:15	0	0	19.3	2	25.60	24.70	24.70	24.70	24.70	24.80	24.80	24.80	25.00	25.00	25.00	24.80	24.80	24.80
12:00	0:45	45	19.3	2	26.20	56.30	56.60	56.45	29.50	29.30	29.40	28.70	29.40	29.05		51.80	51.80	51.80
12:15	1:00	60	19.2	2	23.50	63.30	63.70	63.50	31.00	30.80	30.90	29.50	30.70	30.10		59.30	59.30	59.30
12:30	1:15	75	19.2	2	22.40	68.10	68.40	68.25	32.20	31.90	32.05	30.20	31.60	30.90		64.10	64.10	64.10
13:08	1:53	113	19.2	2	22.30	74.90	75.40	75.15	34.20	33.90	34.05	31.60	32.90	32.25		71.20	71.20	71.20
15:00	3:45	225	19.2	2	22.00	80.20	80.40	80.30	35.80	35.70	35.75	33.00	33.80	33.40		77.40	77.40	77.40
15:15	4:00	240	19.4	2	22.00	80.40	80.50	80.45	35.80	35.80	35.80	33.20	33.90	33.55		77.80	77.80	77.80
15:30	4:15	255	19.3	2	21.80	80.70	80.80	80.75	35.80	35.80	35.80	33.30	34.00	33.65		78.20	78.20	78.20
15:45	4:30	270	19.3	2	23.80	80.80	80.90	80.85	36.50	36.60	36.55	34.00	34.60	34.30		78.50	78.50	78.50
15:55	4:40	280	19.3	2	25.20	81.20	81.20	81.20	37.40	37.50	37.45	34.90	35.50	35.20		78.90	78.90	78.90
17:18	6:03	363	19.2	2	21.80	83.40	82.20	82.80	35.80	37.20	36.50	33.40	33.90	33.65		80.10	80.10	80.10
17:30	6:15	375	19.2	2	22.00	83.50	82.10	82.80	35.90	37.50	36.70	33.70	34.10	33.90		80.00	80.00	80.00
17:45	6:30	390	19.2	2	21.90	83.60	81.80	82.70	36.00	37.80	36.90	33.70	34.10	33.90		79.70	79.70	79.70
18:00	6:45	405	19.2	2	21.80	83.80	81.70	82.75	35.80	38.10	36.95	33.70	34.10	33.90		79.70	79.70	79.70
18:15	7:00	420	19.1	2	21.80	84.50	81.70	83.10	35.60	38.50	37.05	33.50	33.80	33.65		79.70	79.70	79.70
18:30	7:15	435	19.1	2	21.40	84.80	81.60	83.20	35.40	38.80	37.10	33.30	33.50	33.40		79.60	79.60	79.60
18:45	7:30	450	18.8	2	23.20	84.80	81.30	83.05	36.00	39.60	37.80	33.90	34.30	34.10		79.40	79.40	79.40
19:00	7:45	465	18.8	1.9	25.00	85.00	81.20	83.10	37.20	40.70	38.95	35.00	35.20	35.10		79.40	79.40	79.40
19:15	8:00	480	19.7	2	25.30	86.60	82.30	84.45	37.90	41.70	39.80	35.90	36.10	36.00		80.60	80.60	80.60
19:30	8:15	495	19.6	2	22.00	88.00	83.40	85.70	37.10	41.50	39.30	35.10	35.40	35.25		81.60	81.60	81.60
19:45	8:30	510	19.6	2	21.40	88.70	83.60	86.15	36.20	41.00	38.60	34.10	34.40	34.25		82.10	82.10	82.10
20:00	8:45	525	19.6	2	21.50	89.00	83.70	86.35	36.00	41.00	38.50	33.80	34.10	33.95		82.30	82.30	82.30
20:15	9:00	540	19.6	2	23.50	89.30	83.70	86.50	36.80	41.70	39.25	34.50	34.80	34.65		82.30	82.30	82.30
20:30	9:15	555	19.6	2	25.10	89.90	84.10	87.00	37.90	42.80	40.35	35.60	35.90	35.75		82.80	82.80	82.80
20:45	9:30	570	19.6	2	25.20	90.50	84.60	87.55	38.50	43.60	41.05	36.30	36.50	36.40		83.60	83.60	83.60
21:00	9:45	585	19.6	2	23.20	91.20	85.20	88.20	38.80	44.00	41.40	36.60	36.70	36.65		84.20	84.20	84.20
21:15	10:00	600	19.7	2.1	21.90	91.60	85.50	88.55	37.30	42.90	40.10	35.00	35.00	35.00		84.60	84.60	84.60
21:30	10:15	615	19.7	2	21.40	91.60	85.30	88.45	36.70	42.50	39.60	34.30	34.30	34.30		84.60	84.60	84.60
21:45	10:30	630	19.2	2	22.60	90.80	84.50	87.65	36.60	42.30	39.45	34.30	34.30	34.30		84.10	84.10	84.10
22:00	10:45	645	19.3	2	24.40	90.50	84.20	87.35	37.40	42.90	40.15	35.10	35.10	35.10		83.80	83.80	83.80
22:15	11:00	660	19.4	2	25.20	90.60	84.30	87.45	38.40	43.70	41.05	36.10	35.90	36.00		84.00	84.00	84.00
22:30	11:15	675	19.4	2	25.30	90.90	84.50	87.70	38.60	44.00	41.30	36.40	36.40	36.40		84.50	84.50	84.50
22:45	11:30	690	19.4	2	21.70	91.30	84.90	88.10	37.60	43.40	40.50	35.20	35.30	35.25		85.00	85.00	85.00
23:00	11:45	705	19.5	2	21.50	91.30	84.70	88.00	36.50	42.40	39.45	34.10	34.10	34.10		85.00	85.00	85.00
PROMEDIO ESTADO EST.			19.40	2.00	23.62				87.72			40.49			35.37			84.46
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN												64.11						59.92
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})																		62.01
ESTADO ESTABLE									ΔT ₁		47.23				ΔT ₂			49.09

TABLA 9. TOMA DE LECTURAS FIBRAS LEÑOSAS A 0.5 AMP.

VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.

No. DE PRUEBA: 1

MATERIAL DEL ESPECIMEN: FIBRAS LEÑOSAS

FECHA: 07/OCT/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2					
	HORAS	MINUTOS				SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA		
						T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.
10:10	0	0	5.2	0.5	26.40	28.60	28.50	28.55	28.30	28.40	28.35	28.70	28.70	28.70	28.70	28.60	28.65
10:15	0:05	5	5.2	0.5	26.30	29.10	29.00	29.05	27.60	27.60	27.60	28.00	27.90	27.95	29.10	29.00	29.05
10:30	0:20	20	5.2	0.5	26.90	30.20	30.00	30.10	27.10	27.20	27.15	27.40	27.40	27.40	29.90	29.80	29.85
11:00	0:50	50	5.1	0.5	28.30	31.40	31.30	31.35	29.00	29.10	29.05	29.20	29.20	29.20	31.10	31.10	31.10
11:30	1:20	80	4.5	0.5	28.40	32.20	32.00	32.10	28.80	28.90	28.85	29.10	29.10	29.10	31.80	31.80	31.80
11:45	1:35	95	4.6	0.5	28.50	32.10	32.00	32.05	28.90	29.00	28.95	29.20	29.10	29.15	31.80	31.80	31.80
12:00	1:50	110	4.6	0.5	28.30	32.40	32.20	32.30	29.10	29.20	29.15	29.40	29.30	29.35	32.10	32.00	32.05
12:15	2:05	125	4.5	0.5	28.90	32.40	32.30	32.35	29.20	29.30	29.25	29.40	29.40	29.40	32.10	32.10	32.10
12:30	2:20	140	4.6	0.5	26.00	32.40	32.30	32.35	28.20	28.40	28.30	28.80	28.70	28.75	32.10	32.10	32.10
12:45	2:35	155	4.5	0.5	24.70	32.40	32.20	32.30	27.10	27.30	27.20	27.80	27.70	27.75	32.00	32.00	32.00
13:00	2:50	170	4.6	0.5	23.90	32.00	31.80	31.90	26.10	26.40	26.25	27.00	26.80	26.90	31.60	31.60	31.60
16:34	6:24	384	4.6	0.5	22.50	28.60	28.50	28.55	23.80	23.90	23.85	24.40	24.30	24.35	28.30	28.20	28.25
16:45	6:35	395	4.6	0.5	22.70	28.50	28.30	28.40	23.90	24.00	23.95	24.40	24.30	24.35	28.20	28.10	28.15
17:00	6:50	410	4.6	0.5	22.80	28.30	28.20	28.25	23.90	24.10	24.00	24.40	24.30	24.35	28.00	27.90	27.95
17:15	7:05	425	4.6	0.5	22.60	28.20	28.00	28.10	23.80	24.00	23.90	24.30	24.20	24.25	27.80	27.80	27.80
17:30	7:20	440	4.6	0.5	22.50	28.20	27.90	28.05	23.70	23.90	23.80	24.20	24.10	24.15	27.70	27.70	27.70
17:45	7:35	455	4.7	0.5	22.30	28.00	27.90	27.95	23.70	23.80	23.75	24.10	24.00	24.05	27.70	27.70	27.70
18:00	7:50	470	4.6	0.5	22.60	27.90	27.80	27.85	23.70	23.80	23.75	24.10	24.00	24.05	27.60	27.50	27.55
18:15	8:05	485	4.6	0.5	22.60	27.80	27.60	27.70	23.60	23.80	23.70	24.00	24.00	24.00	27.50	27.50	27.50
18:30	8:20	500	4.6	0.5	22.70	27.70	27.60	27.65	23.70	23.80	23.75	24.00	24.00	24.00	27.40	27.40	27.40
18:45	8:35	515	4.6	0.5	24.80	27.70	27.60	27.65	24.20	24.30	24.25	24.30	24.30	24.30	27.40	27.30	27.35
19:00	8:50	530	4.4	0.5	25.00	27.70	27.60	27.65	25.00	25.10	25.05	25.00	24.90	24.95	27.50	27.30	27.40
19:15	9:05	545	4.6	0.5	24.80	27.80	27.80	27.80	25.10	25.20	25.15	25.20	25.20	25.20	27.60	27.60	27.60
19:30	9:20	560	4.5	0.5	25.90	28.10	27.90	28.00	25.40	25.50	25.45	25.40	25.30	25.35	27.70	27.70	27.70
19:45	9:35	575	4.6	0.5	26.30	28.30	28.20	28.25	26.10	26.20	26.15	26.10	26.00	26.05	28.00	28.00	28.00
20:00	9:50	590	4.5	0.5	26.90	28.70	28.60	28.65	26.70	26.70	26.70	26.60	26.60	26.60	28.40	28.30	28.35
20:15	10:05	605	4.6	0.5	27.00	28.90	28.80	28.85	26.90	26.90	26.90	26.90	26.90	26.90	28.70	28.60	28.65
20:30	10:20	620	4.6	0.5	24.00	29.30	29.20	29.25	25.80	26.00	25.90	26.20	26.10	26.15	28.90	28.90	28.90
20:45	10:35	635	4.6	0.5	23.80	29.40	29.30	29.35	25.40	25.50	25.45	25.70	25.60	25.65	29.00	29.00	29.00
21:00	10:50	650	4.6	0.5	24.10	29.40	29.20	29.30	25.10	25.20	25.15	25.50	25.40	25.45	29.00	29.00	29.00
21:15	11:05	665	4.6	0.5	23.80	29.30	29.10	29.20	25.00	25.20	25.10	25.40	25.30	25.35	28.90	28.90	28.90
21:30	11:20	680	4.6	0.5	23.80	29.30	29.10	29.20	25.00	25.10	25.05	25.40	25.30	25.35	28.80	28.80	28.80
PROMEDIO ESTADO EST.			4.60	0.50	23.90			29.26			25.33			25.59			28.92
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN											27.30						27.26
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})																	27.28
ESTADO ESTABLE								ΔT ₁			3.93			ΔT ₂			3.33

TABLA 10. TOMA DE LECTURAS FIBRAS LEÑOSAS A 1 AMP.

VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.

No. DE PRUEBA: 2

MATERIAL DEL ESPECIMEN: FIBRAS LEÑOSAS

FECHA: 01/OCT/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2						
	HORAS : MINUTOS	MINUTOS				SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA			
						T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.	
10:00	0	0	9.4	1	29.70	29.60	29.30	29.45	25.30	25.30	25.30	25.50	25.40	25.45	29.00	28.80	28.90	
10:20	0:20	20	9.4	1	22.30	32.10	31.70	31.90	24.40	24.70	24.55	25.10	25.00	25.05	31.00	30.80	30.90	
10:32	0:32	32	9.5	1	22.30	33.50	33.10	33.30	24.10	24.40	24.25	24.90	24.80	24.85	32.30	32.20	32.25	
10:52	0:52	52	9.5	1	21.80	35.20	34.80	35.00	24.10	24.40	24.25	25.20	25.00	25.10	33.90	33.70	33.80	
11:00	1:00	60	9.5	1	21.80	35.90	35.50	35.70	24.30	24.60	24.45	25.30	25.20	25.25	34.70	34.50	34.60	
12:58	2:58	178	9.4	1	22.00	40.00	39.50	39.75	25.50	26.00	25.75	27.00	26.80	26.90	38.60	38.40	38.50	
13:19	3:19	199	9.5	1	21.60	40.10	39.70	39.90	25.40	25.90	25.65	26.90	26.70	26.80	38.80	38.70	38.75	
13:32	3:32	212	9.5	1	21.60	40.20	39.80	40.00	25.30	25.80	25.55	26.80	26.60	26.70	38.80	38.70	38.75	
13:46	3:46	226	9.5	1	22.30	40.20	40.00	40.10	25.70	26.10	25.90	27.10	26.80	26.95	39.00	38.90	38.95	
14:00	4:00	240	9.5	1	22.90	40.40	40.00	40.20	25.80	26.30	26.05	27.20	27.00	27.10	39.10	38.90	39.00	
16:15	6:15	375	9.6	1	23.20	41.90	41.40	41.65	26.70	27.20	26.95	28.20	28.00	28.10	40.50	40.40	40.45	
16:35	6:35	395	9.6	1	23.10	42.00	41.60	41.80	26.90	27.30	27.10	28.30	28.10	28.20	40.60	40.50	40.55	
16:46	6:46	406	9.6	1	23.20	42.10	41.60	41.85	26.90	27.40	27.15	28.40	28.10	28.25	40.70	40.60	40.65	
17:03	7:03	423	9.6	1	22.60	42.20	41.70	41.95	26.70	27.20	26.95	28.20	28.00	28.10	40.70	40.60	40.65	
17:15	7:15	435	9.7	1.1	21.90	42.30	41.80	42.05	26.30	26.80	26.55	27.90	27.60	27.75	40.80	40.70	40.75	
17:32	7:32	452	9.6	1	21.50	42.10	41.60	41.85	25.80	26.30	26.05	27.40	27.20	27.30	40.70	40.60	40.65	
17:45	7:45	465	9.6	1	21.40	42.00	41.50	41.75	25.60	26.20	25.90	27.30	27.00	27.15	40.50	40.40	40.45	
18:00	8:00	480	9.6	1	21.30	41.80	41.30	41.55	25.40	25.90	25.65	27.10	26.80	26.95	40.30	40.20	40.25	
18:22	8:22	502	9.6	1	21.10	41.60	41.10	41.35	25.20	25.70	25.45	26.90	26.70	26.80	40.10	40.00	40.05	
18:30	8:30	510	9.6	1	21.10	41.40	41.00	41.20	25.10	25.60	25.35	26.80	26.50	26.65	40.00	40.00	40.00	
18:50	8:50	530	9.4	1	20.90	41.10	40.60	40.85	25.00	25.50	25.25	26.70	26.40	26.55	39.80	39.70	39.75	
19:15	9:15	555	9.3	1	24.60	40.90	40.50	40.70	26.90	27.30	27.10	28.10	27.90	28.00	39.60	39.50	39.55	
19:30	9:30	570	9.3	1	22.10	41.00	40.50	40.75	26.40	26.90	26.65	28.00	27.70	27.85	39.80	39.70	39.75	
19:47	9:47	587	9.3	1	21.80	40.90	40.50	40.70	25.90	26.40	26.15	27.50	27.30	27.40	39.80	39.70	39.75	
20:00	10:00	600	13.1	1	21.70	41.00	40.50	40.75	25.60	26.10	25.85	27.30	27.00	27.15	39.70	39.60	39.65	
PROMEDIO ESTADO EST.			10.08	1.00	22.22			40.75			26.20			27.39			39.69	
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN											33.48			33.54				
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})											33.51							
ESTADO ESTABLE					ΔT_1						14.55			ΔT_2				12.30

TABLA 11. TOMA DE LECTURAS FIBRAS LEÑOSAS A 1.5 AMP.

VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.

No. DE PRUEBA: 3

MATERIAL DEL ESPECIMEN: FIBRAS LEÑOSAS

FECHA: 30/SEP/99

HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1				ESPECIMEN No. 2								
	HORA S:	MINUTOS				SUPERFICIE INTERNA				SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA		
						T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.	
10:00	0	0	13.7	1.5	22.80	27.60	27.40	27.50	25.00	25.10	25.05	25.30	25.20	25.25	27.40	27.20	27.30	
10:20	0:20	20	13.7	1.5	21.40	36.90	36.30	36.60	23.70	24.00	23.85	24.70	24.60	24.65	34.50	34.20	34.35	
10:32	0:32	32	13.7	1.5	21.80	40.20	39.70	39.95	24.10	24.50	24.30	25.40	25.30	25.35	38.10	37.90	38.00	
11:00	1:00	60	13.8	1.5	21.60	45.90	45.20	45.55	25.50	26.10	25.80	27.50	27.20	27.35	43.40	43.10	43.25	
11:15	1:15	75	13.8	1.5	22.20	47.70	47.10	47.40	26.50	27.20	26.85	28.60	28.30	28.45	45.40	45.20	45.30	
11:30	1:30	90	13.8	1.5	22.50	49.70	49.00	49.35	27.40	28.10	27.75	29.60	29.30	29.45	47.20	47.00	47.10	
12:00	2:00	120	13.8	1.5	22.80	51.90	51.20	51.55	28.60	29.40	29.00	30.90	30.50	30.70	49.60	49.40	49.50	
12:18	2:18	138	13.8	1.5	23.00	53.10	52.30	52.70	29.30	30.10	29.70	31.50	31.10	31.30	50.80	50.50	50.65	
12:30	2:30	150	13.8	1.5	22.60	53.70	52.90	53.30	29.40	30.30	29.85	31.70	31.30	31.50	51.40	51.20	51.30	
12:45	2:45	165	13.7	1.5	22.10	54.20	53.50	53.85	29.30	30.20	29.75	31.50	31.20	31.35	51.90	51.60	51.75	
13:00	3:00	180	13.7	1.5	21.80	54.70	53.90	54.30	29.30	30.20	29.75	31.50	31.10	31.30	52.40	52.20	52.30	
13:11	3:11	191	13.8	1.5	21.70	55.00	54.20	54.60	29.30	30.20	29.75	31.50	31.10	31.30	52.60	52.40	52.50	
15:41	5:41	341	13.8	1.5	21.20	56.10	55.30	55.70	28.60	29.40	29.00	30.70	30.30	30.50	53.80	53.60	53.70	
16:05	6:05	365	13.9	1.5	22.10	56.40	55.60	56.00	29.60	30.40	30.00	31.40	31.10	31.25	54.10	53.80	53.95	
16:15	6:15	375	13.9	1.5	22.80	56.60	55.70	56.15	29.80	30.60	30.20	31.70	31.30	31.50	54.20	54.00	54.10	
16:30	6:30	390	13.9	1.5	22.70	56.80	56.00	56.40	30.10	30.80	30.45	32.00	31.60	31.80	54.60	54.30	54.45	
16:45	6:45	405	13.9	1.5	22.70	57.00	56.30	56.65	30.20	30.90	30.55	32.10	31.70	31.90	54.80	54.50	54.65	
17:00	7:00	420	13.8	1.5	22.90	57.30	56.50	56.90	30.30	31.00	30.65	32.30	31.90	32.10	55.00	54.90	54.95	
17:37	7:37	457	13.8	1.5	21.60	57.50	56.70	57.10	29.60	30.40	30.00	31.60	31.20	31.40	55.30	55.00	55.15	
17:55	7:55	475	13.9	1.5	21.40	57.40	56.60	57.00	29.50	30.20	29.85	31.40	31.00	31.20	55.20	55.00	55.10	
18:15	8:15	495	13.9	1.5	24.00	57.60	56.90	57.25	30.70	31.40	31.05	32.30	32.00	32.15	55.40	55.10	55.25	
18:30	8:30	510	13.9	1.5	24.50	58.00	57.20	57.60	31.10	31.80	31.45	32.70	32.40	32.55	55.70	55.40	55.55	
18:40	8:40	520	14.5	1.5	21.90	58.20	57.40	57.80	30.50	31.20	30.85	32.40	32.10	32.25	55.90	55.60	55.75	
19:00	9:00	540	13.7	1.5	25.80	58.30	57.40	57.85	31.90	32.50	32.20	33.70	33.50	33.60	56.00	55.80	55.90	
19:15	9:15	555	13.6	1.5	24.30	58.40	57.60	58.00	31.50	31.90	31.70	33.30	33.10	33.20	56.20	56.00	56.10	
19:30	9:30	570	13.5	1.5	21.80	58.40	57.60	58.00	30.90	31.30	31.10	32.90	32.60	32.75	56.30	56.00	56.15	
19:45	9:45	585	13.6	1.5	21.20	58.30	57.50	57.90	29.90	30.30	30.10	31.90	31.60	31.75	56.00	55.70	55.85	
20:00	10:00	600	13.5	1.5	21.20	58.10	57.20	57.65	29.40	29.80	29.60	31.40	31.10	31.25	55.90	55.60	55.75	
20:15	10:15	615	14	1.5	23.00	57.60	56.80	57.20	30.00	30.30	30.15	31.80	31.60	31.70	55.50	55.20	55.35	
20:30	10:30	630	14.2	1.5	21.50	58.20	57.40	57.80	29.80	30.20	30.00	32.00	31.60	31.80	56.00	55.70	55.85	
PROMEDIO ESTADO EST.			13.76	1.50	21.74			57.71			30.19			31.85			55.79	
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN											43.95						43.82	
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})																	43.89	
ESTADO ESTABLE								ΔT_1			27.52			ΔT_2			23.94	

TABLA 12. TOMA DE LECTURAS FIBRAS LEÑOSAS A 2 AMP.

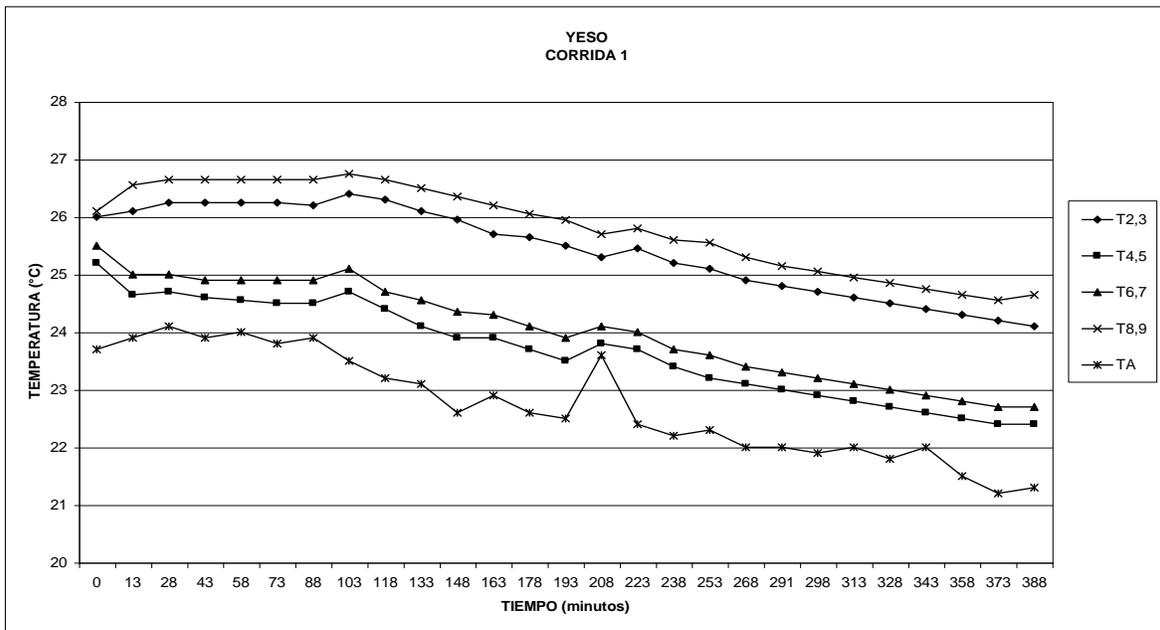
VALORES DE VOLTAJE, AMPERAJE, TIEMPO Y TEMPERATURA HASTA EL ESTADO ESTABLE.

No. DE PRUEBA: 4

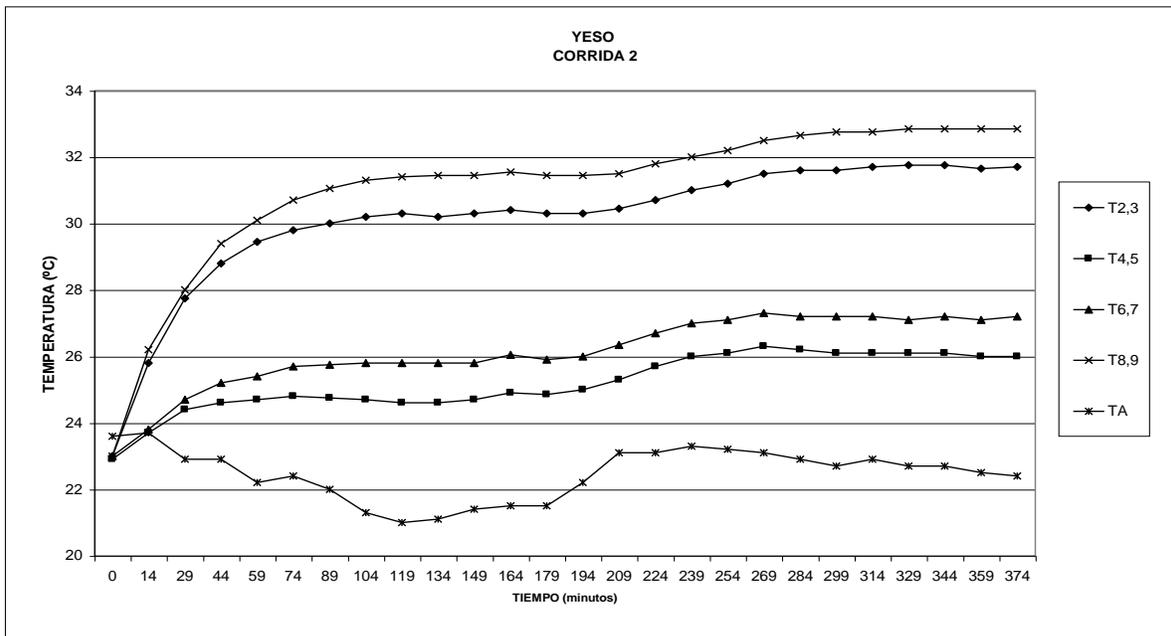
MATERIAL DEL ESPECIMEN: FIBRAS LEÑOSAS

FECHA: 05/OCT/99

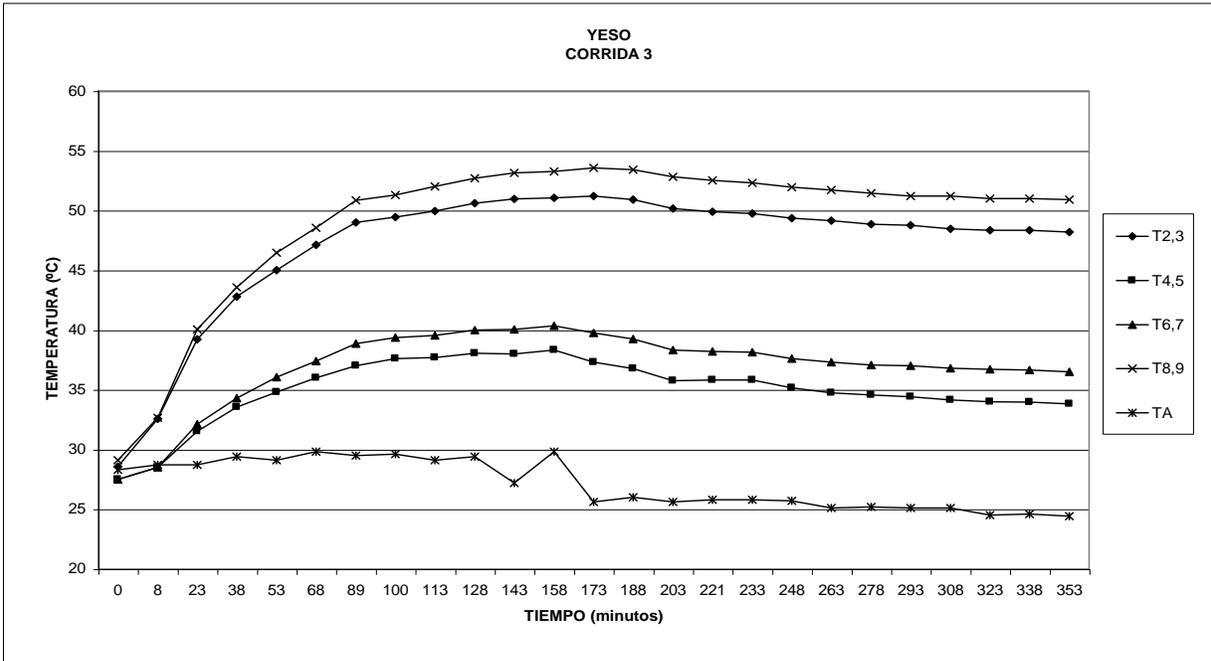
HORA	ACUMULADO EN		VOLTAJE (Volts)	CRTE. (Amp.)	TEMP. ABTE. T1 (°C)	ESPECIMEN No.1						ESPECIMEN No. 2							
	HORAS : MINUTOS	MINUTOS				SUPERFICIE INTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE EXTERNA			SUPERFICIE INTERNA				
						T2 (°C)	T3 (°C)	T.PROM.	T4 (°C)	T5 (°C)	T.PROM.	T6 (°C)	T7 (°C)	T.PROM.	T8 (°C)	T9 (°C)	T.PROM.		
16:15	0	0	18.6	2	28.20	27.80	27.60	27.70	27.60	27.50	27.55	27.50	27.50	27.50	27.30	27.20	27.25		
16:30	0:15	15	18.5	2	25.20	43.40	42.40	42.90	27.00	27.20	27.10	27.70	27.70	27.70	40.60	40.10	40.35		
16:45	0:30	30	18.3	2	24.30	53.10	51.90	52.50	28.10	28.40	28.25	29.40	29.30	29.35	48.70	48.10	48.40		
17:00	0:45	45	18.3	2	24.10	59.10	57.90	58.50	29.70	30.30	30.00	31.70	31.40	31.55	55.30	54.80	55.05		
17:15	1:00	60	18.3	2	23.80	64.00	62.70	63.35	31.30	32.00	31.65	33.60	33.20	33.40	60.00	59.40	59.70		
17:36	1:21	81	18.3	2	23.20	68.50	67.30	67.90	32.70	33.60	33.15	35.70	35.20	35.45	64.80	64.30	64.55		
17:45	1:30	90	18.1	2	23.00	69.90	68.60	69.25	33.10	34.10	33.60	36.10	35.60	35.85	65.90	65.40	65.65		
18:00	1:45	105	18.1	2	22.30	71.50	70.20	70.85	33.60	34.50	34.05	36.70	36.20	36.45	67.90	67.40	67.65		
18:15	2:00	120	18.2	2	22.10	73.00	71.80	72.40	33.80	34.40	34.10	37.00	36.40	36.70	69.30	68.80	69.05		
18:30	2:15	135	18.1	2	21.80	74.20	72.90	73.55	33.90	34.50	34.20	37.20	36.60	36.90	70.40	70.00	70.20		
18:45	2:30	150	18	2	21.90	75.10	73.70	74.40	34.00	34.30	34.15	37.40	36.80	37.10	71.20	70.70	70.95		
19:00	2:45	165	17.8	2	22.10	75.50	74.20	74.85	34.20	34.60	34.40	37.70	37.10	37.40	71.80	71.40	71.60		
19:15	3:00	180	17.8	2	22.50	75.90	74.50	75.20	34.70	34.90	34.80	38.10	37.50	37.80	72.20	71.80	72.00		
19:30	3:15	195	17.8	1.9	22.10	76.10	74.80	75.45	34.60	35.00	34.80	38.10	37.60	37.85	72.60	72.10	72.35		
19:45	3:30	210	18	2	21.80	76.80	75.40	76.10	34.60	34.90	34.75	38.00	37.50	37.75	73.10	72.60	72.85		
20:00	3:45	225	18	2	21.90	77.20	75.80	76.50	34.60	34.90	34.75	38.10	37.50	37.80	73.60	73.20	73.40		
20:15	4:00	240	18	2	22.10	77.70	76.20	76.95	34.70	35.00	34.85	38.20	37.70	37.95	74.00	73.50	73.75		
20:30	4:15	255	18	2	22.20	77.90	76.50	77.20	34.90	35.20	35.05	38.30	37.80	38.05	74.30	73.90	74.10		
20:45	4:30	270	18.5	2	22.10	78.30	76.80	77.55	34.90	35.20	35.05	38.40	37.90	38.15	74.70	74.20	74.45		
21:00	4:45	285	18.2	2	22.00	78.80	77.30	78.05	34.80	35.20	35.00	38.40	37.90	38.15	75.20	74.80	75.00		
21:15	5:00	300	18.2	2	22.10	79.10	77.70	78.40	34.90	35.20	35.05	38.50	38.00	38.25	75.60	75.10	75.35		
21:30	5:15	315	18.3	2	22.30	79.40	77.90	78.65	34.90	35.20	35.05	38.50	37.90	38.20	75.80	75.40	75.60		
21:45	5:30	330	18.4	2	22.20	79.80	78.30	79.05	35.00	35.30	35.15	38.60	38.00	38.30	76.20	75.70	75.95		
22:00	5:45	345	18.5	2	21.90	80.20	78.60	79.40	35.00	35.10	35.05	38.60	38.00	38.30	76.60	76.10	76.35		
22:15	6:00	360	18.5	2	22.00	80.70	79.20	79.95	35.10	35.20	35.15	38.70	38.00	38.35	77.00	76.50	76.75		
22:30	6:15	375	18.6	2	21.70	81.10	79.50	80.30	35.00	35.20	35.10	38.60	37.90	38.25	77.40	76.90	77.15		
22:45	6:30	390	18.7	2	21.90	81.50	79.90	80.70	35.10	35.20	35.15	38.80	37.90	38.35	77.70	77.20	77.45		
23:00	6:45	405	18.7	2	21.80	81.80	80.20	81.00	35.10	35.20	35.15	38.70	37.90	38.30	78.10	77.60	77.85		
PROMEDIO ESTADO EST.			18.60	2.00	21.86			80.27			35.12			38.31			77.11		
T.MEDIA DE TRABAJO DE CADA ESPECIMEN									57.70						57.71				
T.MEDIA DE TRABAJO DE LOS ESPECIMENES (T _{PRUEBA})									57.70										
ESTADO ESTABLE					ΔT_1						45.15			ΔT_2			38.80		



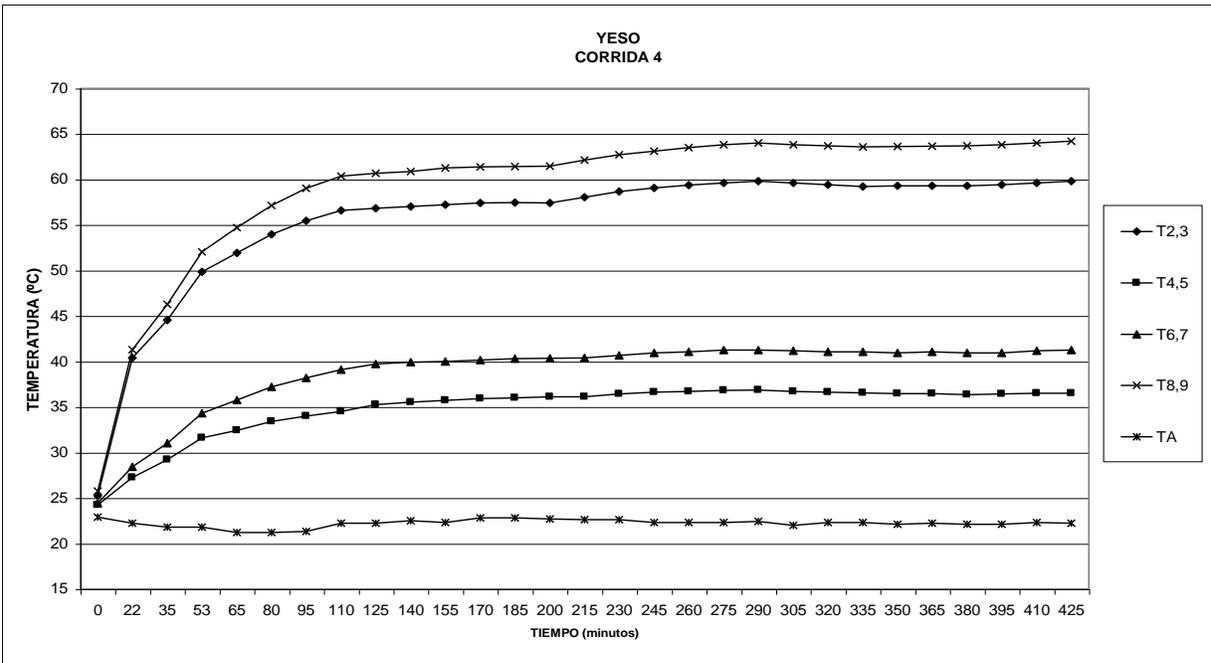
Grafica GD1. Estabilización térmica para el yeso primera corrida



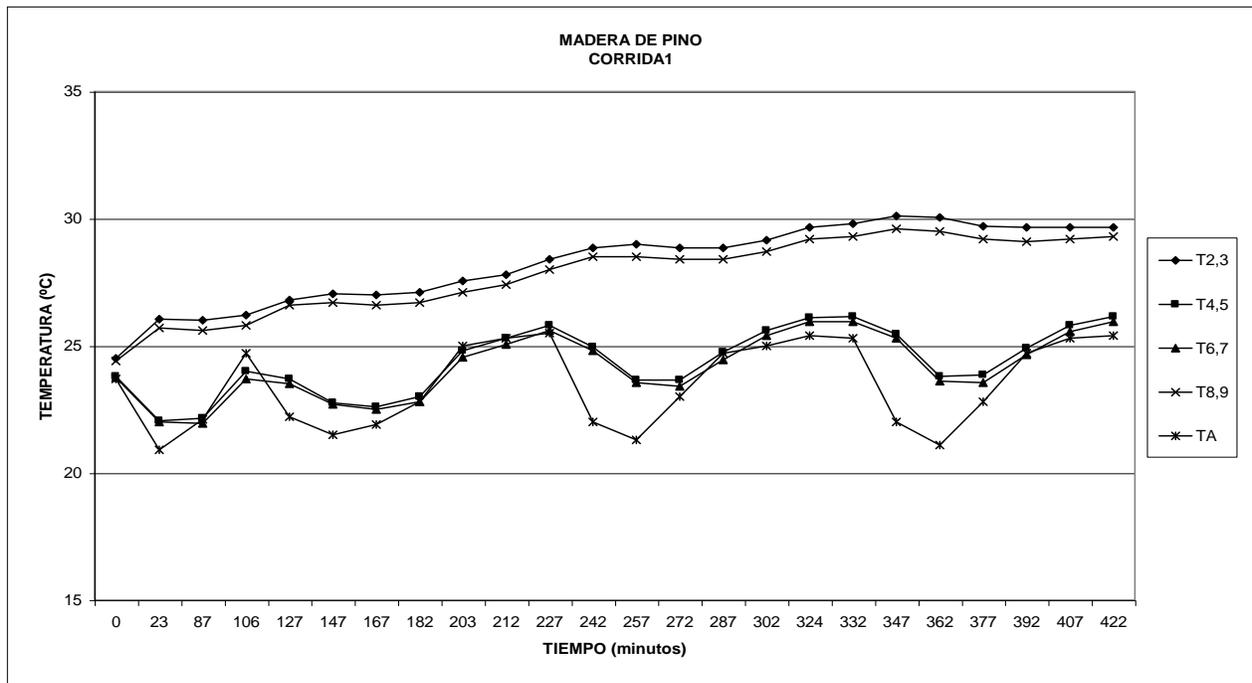
Gráfica GD2. Estabilización térmica para el yeso segunda corrida



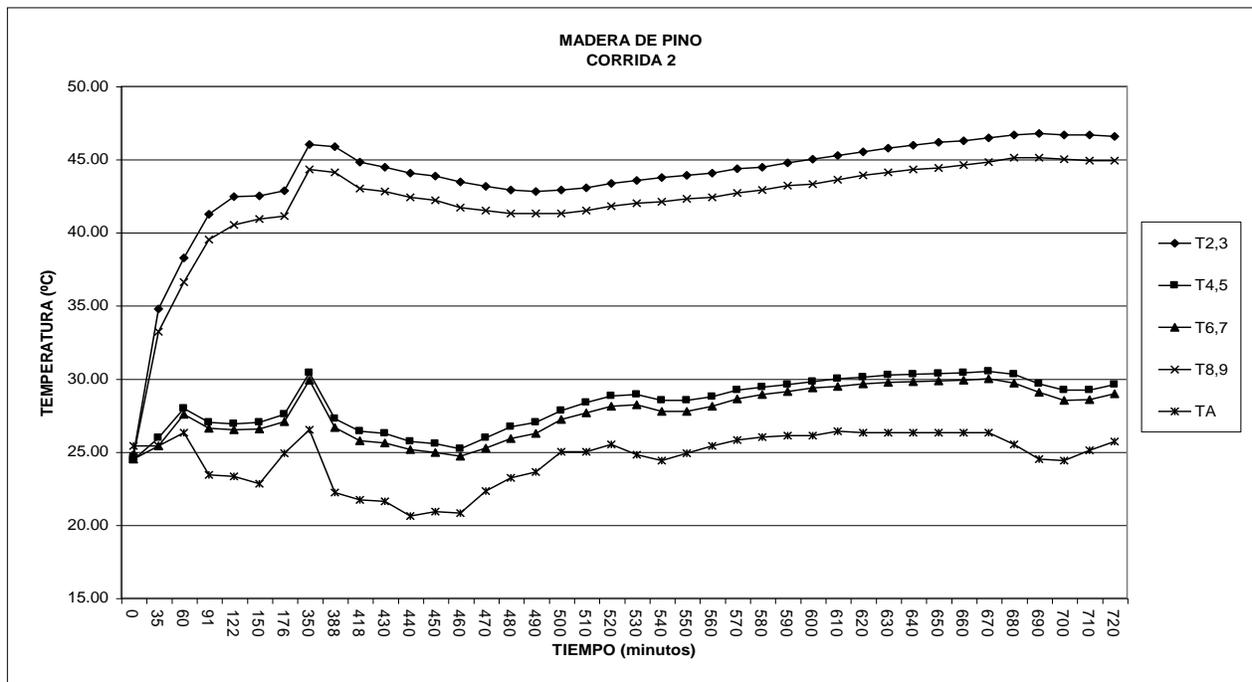
Gráfica GD3. Estabilización térmica para el yeso tercera corrida



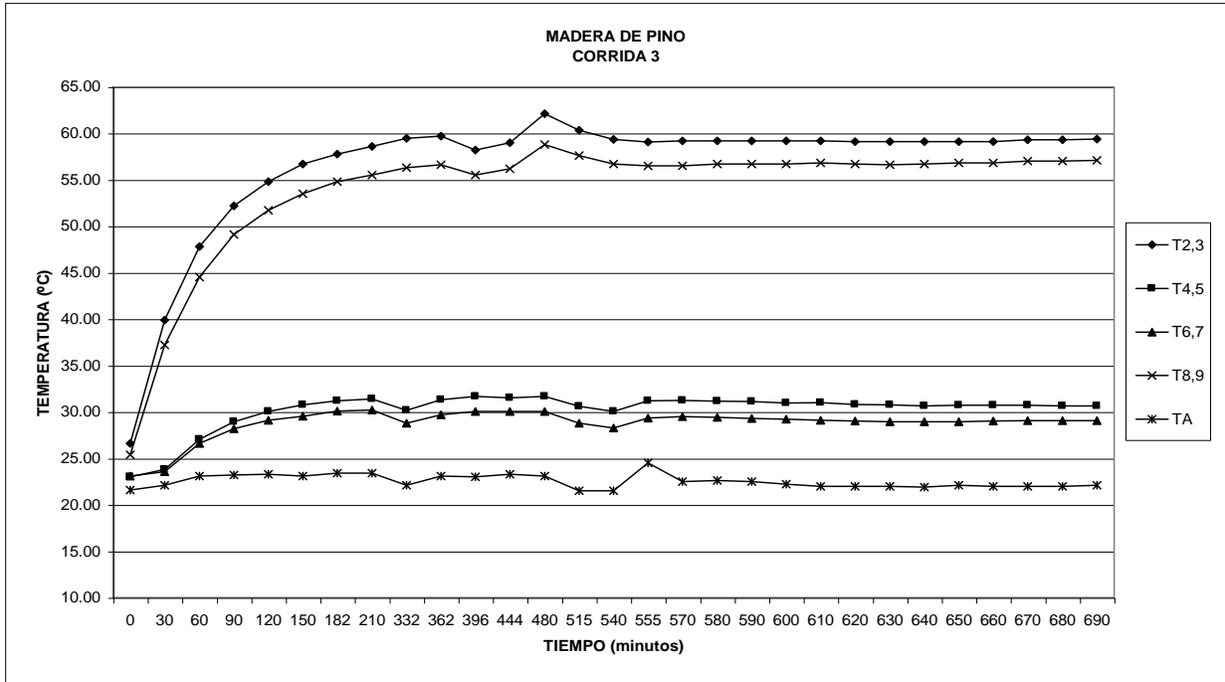
Gráfica GD4. Estabilización térmica para el yeso cuarta corrida



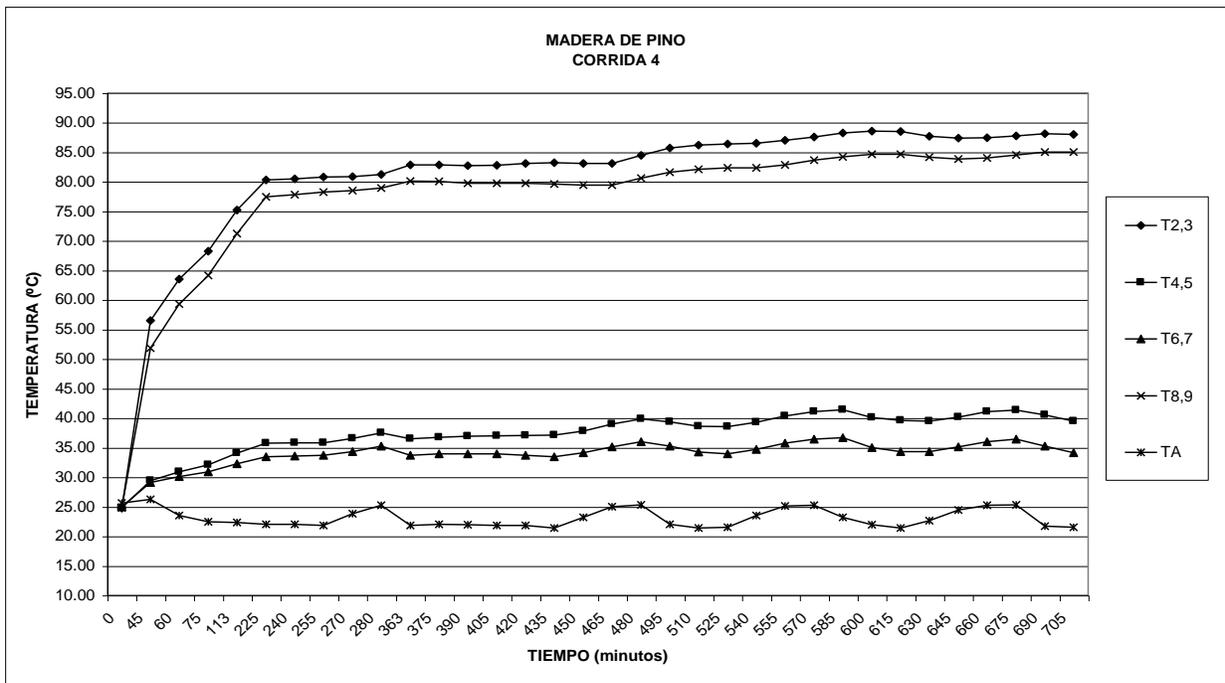
Gráfica GD5. Estabilización térmica para la madera de pino primera corrida



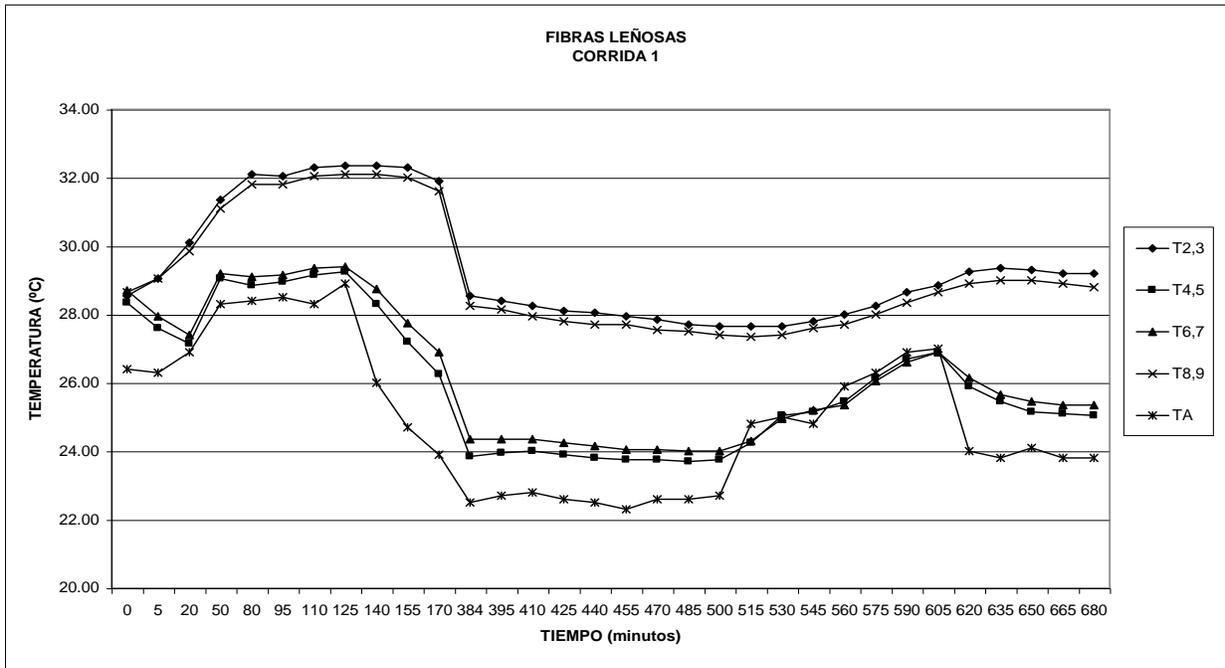
Gráfica GD6. Estabilización térmica para la madera de pino segunda corrida



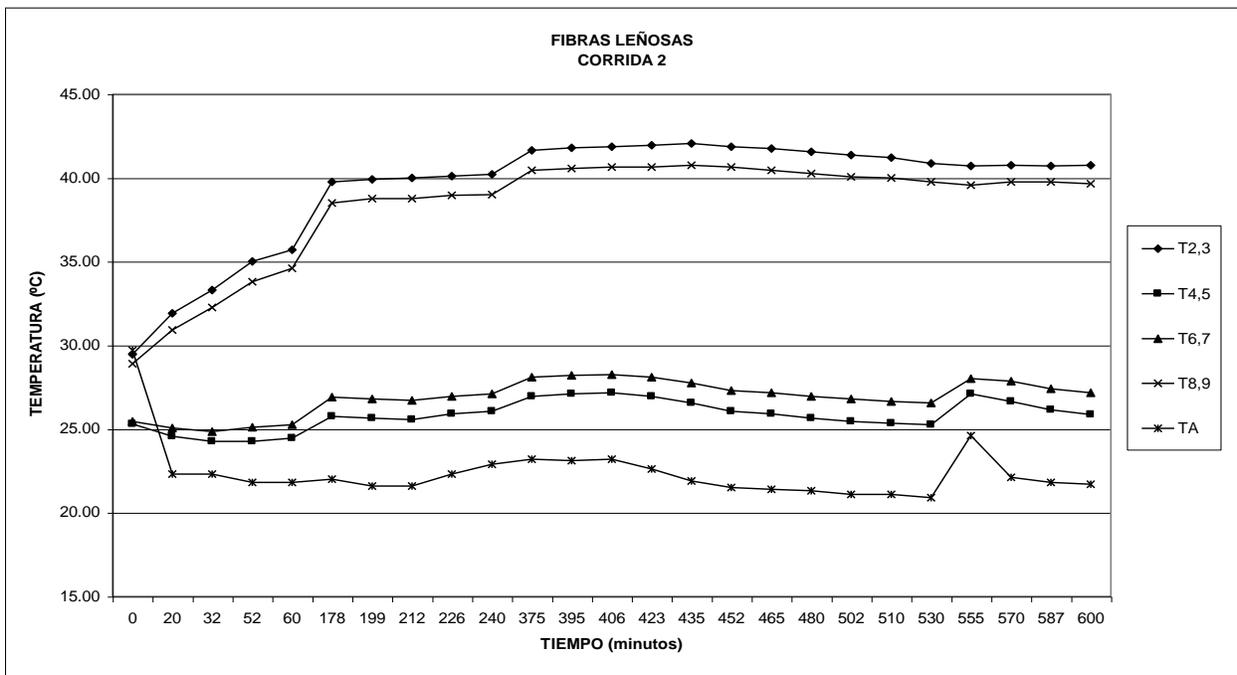
Gráfica GD7. Estabilización térmica para la madera de pino tercera corrida



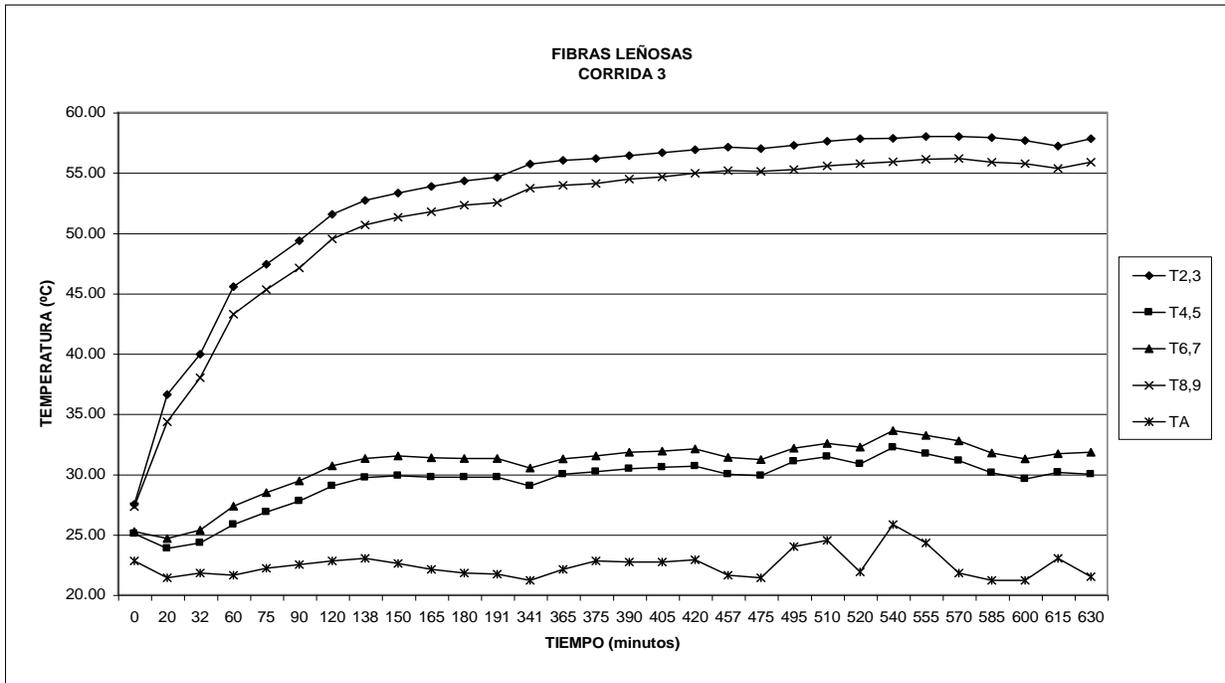
Gráfica GD8. Estabilización térmica de la madera de pino cuarta corrida



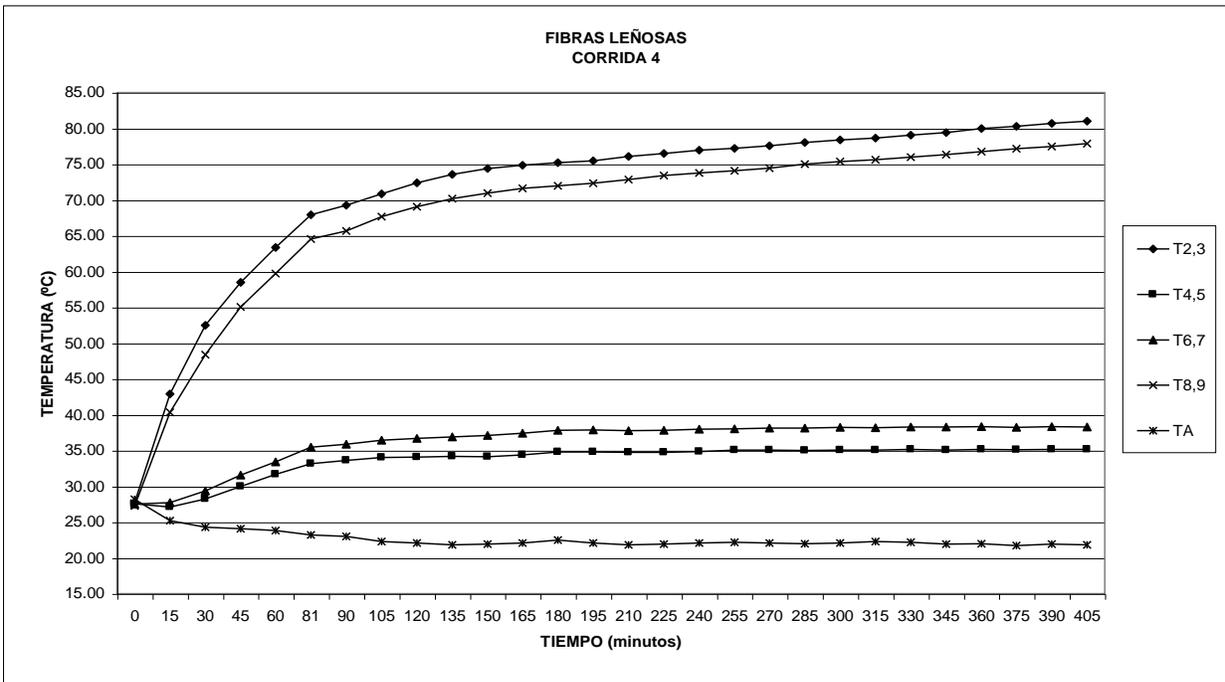
Gráfica GD9. Estabilización térmica para las fibras leñosas primera corrida



Gráfica GD10. Estabilización térmica para las fibras leñosas segunda corrida



Gráfica GD11. Estabilización térmica para las fibras leñosas tercera corrida



Gráfica GD12. Estabilización térmica para las fibras leñosas cuarta corrida

