



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
PARA AISLANTES TÉRMICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

JORGE AGUILAR JUÁREZ

DIRECTOR DE TESIS: ING. ADRIÁN VALERA NEGRETE



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo de tesis a mis padres: Roberto y Marisela

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Adrián Valera Negrete por haber dirigido la presente tesis, así como por sus comentarios y sugerencias al respecto.

A los miembros del jurado de tesis: Ing. José Alberto Sánchez Rivera, M.I. Vicente G. López Fernández, Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz y el M.I. José Esteban Barrios Bonilla por la revisión crítica del manuscrito, por sus acertados comentarios y sugerencias.

A la Profra. Irma Oliva García y a la Sra. Modesta por sus consejos, cariño y apoyo incondicional.

Al Ing. Félix Castillo y al Sr. Ponce por su amistad y por su ayuda para la realización de las pruebas.

Al Laboratorio de Termofluidos y al Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por las facilidades otorgadas para llevar a cabo este trabajo.

Y A TODOS AQUELLOS QUE HAN CONTRIBUIDO CON LA FORMACIÓN ACADÉMICA Y HUMANA DE SU SERVIDOR

GRACIAS

Índice

Resumen.....	V
Capítulo 1	
Antecedentes de transferencia de calor.....	1
Mecanismos de transmisión de calor.....	2
Leyes fundamentales en transmisión de calor.....	2
Conducción del calor.....	3
Radiación del calor.....	4
Convección del calor.....	5
Capítulo 2	
Conductividad térmica y aislantes térmicos.....	6
Conductividad térmica.....	7
Aislantes térmicos.....	8
Capítulo 3	
Medidores de conductividad térmica de aislamientos térmicos.....	11
La importancia de los equipos de medición en el ahorro de energía.....	12
Mediciones experimentales para determinar la conductividad térmica de diferentes aislantes térmicos.....	12
Principio de medición de la conductividad térmica por medio del aparato de placa caliente con guarda.....	13
Aparato con medidor de flujo de calor.....	15
Antecedentes del diseño y construcción de un medidor de conductividad Térmica.....	17
Otros proyectos de investigación para medir la conductividad térmica de aislantes térmicos mexicanos.....	20
Normalización sobre aislamientos térmicos en la república mexicana.....	20
Capítulo 4	
Rediseño y construcción del medidor de conductividad térmica para aislantes térmicos.....	22
Diseño térmico.....	23
Diseño del sistema eléctrico.....	28
Elemento calefactor.....	28
Instrumentación y control.....	29
Conductores eléctricos y protecciones.....	38
Diseño mecánico.....	46
Construcción del medidor de conductividad térmica.....	54
Capítulo 5	
Pruebas, mediciones y análisis de resultados.....	58
Pruebas.....	59

Mediciones.....	61
Preparación de las muestras.....	61
Método de ensayo para determinar la conductividad térmica de aislantes Térmicos.....	62
Aislantes térmicos utilizados para las pruebas.....	63
Variables y constantes del sistema de medición.....	65
Lecturas registradas durante el ensayo.....	65
Análisis de resultados.....	66
Resultados.....	66
Análisis.....	69
Capítulo 6	
Calibración del equipo.....	71
La preparación de las muestras.....	72
La instrumentación.....	72
El equipo de medición de conductividad térmica.....	73
Conclusiones y recomendaciones.....	74
Conclusiones.....	75
Recomendaciones.....	75
Bibliografía.....	76
Bibliografía.....	77
Webgrafía.....	78

RESUMEN

Con base en un primer diseño de un equipo de medición para determinar la conductividad térmica de materiales aislantes del cual no se obtuvieron resultados satisfactorios, el presente trabajo muestra las etapas de rediseño y construcción de un medidor de conductividad térmica para aislantes térmicos, así como las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. En la literatura disponible se encontraron algunos equipos para medir la conductividad térmica de materiales aislantes, todos utilizan placas planas en su diseño y un método de medición secundaria o comparativa a excepción del aparato de placa caliente con guarda el cual emplea un método de medición primaria o absoluta. La atención se enfocó en el último equipo debido a que no requiere datos de propiedades de ningún material de referencia para medir la conductividad térmica de aislantes térmicos, y se decidió rediseñarlo y construir una versión cilíndrica del mismo.

La etapa de rediseño se efectuó considerando tres aspectos generales:

- a) Diseño térmico. Se analizó la ley de Fourier para conducción de calor a través de un cilindro hueco en condiciones estables, cuya superficie interna se expone a una fuente de calor a temperatura constante mientras que la superficie exterior se encuentra circundada por aire a temperatura ambiente sin corrientes convectivas, sin flujo de energía en la dirección longitudinal, y con una conductividad térmica constante, siendo este el principio de funcionamiento del equipo de medición.
- b) Sistema eléctrico. Se indicaron las características técnicas y la función de cada uno de los elementos eléctricos que forman parte del equipo (resistencia calefactora, contactor, reóstato, banco de resistencias fijas, conductores eléctricos y protecciones) incluyendo la instrumentación (termómetro, termopares, termostato y amperímetro)
- c) Diseño mecánico. Se diseñaron elementos mecánicos para proporcionar estructura y resguardo al sistema cilíndrico.

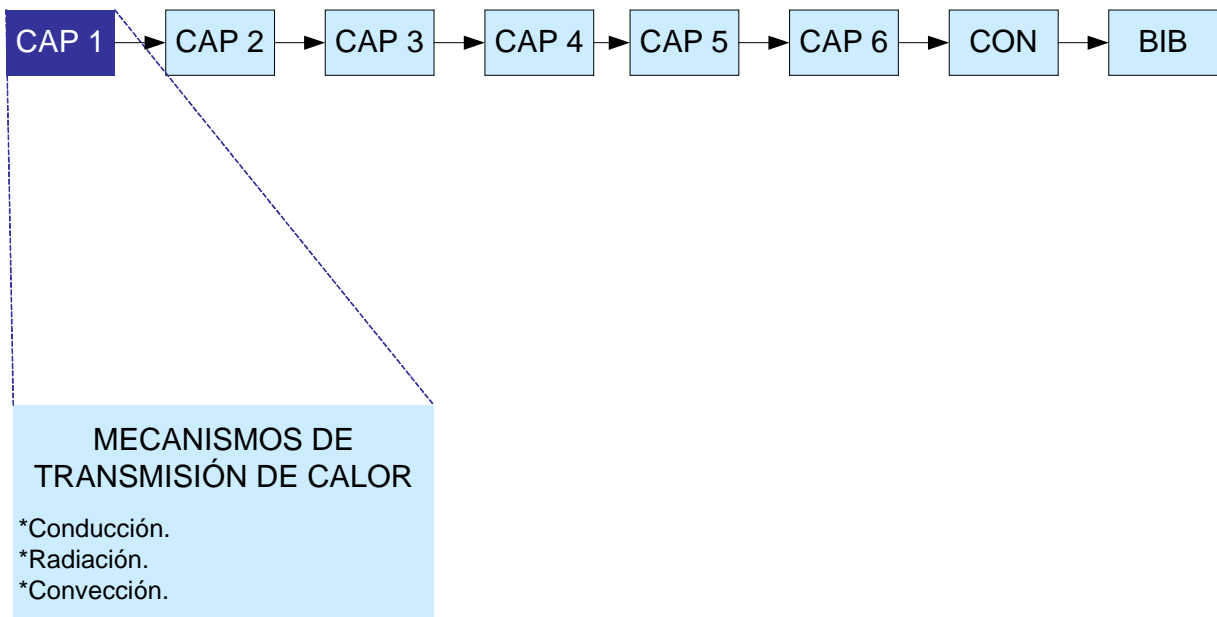
En la etapa constructiva se explicó la forma en que se llevó a cabo la instalación y el ensamble de las partes del medidor de conductividad térmica.

El periodo de pruebas se caracterizó por una serie de ajustes para corregir el funcionamiento del equipo y el método de medición. Con base a resultados satisfactorios en las mediciones, se concluyó que el equipo es confiable y válidas las magnitudes de conductividad térmica obtenidas con el ensayo. De esta manera se cumplió con el objetivo de la tesis: rediseñar y construir un equipo de medición para determinar de manera confiable la conductividad térmica de aislantes térmicos.



Capítulo 1

Antecedentes de transferencia de calor



ANTECEDENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor viene siendo generado y aplicado por el hombre desde la más remota antigüedad, contribuyendo decisivamente a su progreso técnico. En la actualidad el campo de la transmisión térmica posee un gran alcance en todos los problemas relacionados con la energía, cubriendo un amplio espectro que varía desde la climatización de edificios hasta los problemas complejos que aparecen relacionados con las plantas termoeléctricas de potencia.

Al proceso mediante el cual se produce un flujo de energía como resultado de un desequilibrio térmico se le conoce como transferencia de calor, donde lo que se transfiere recibe el nombre de calor, el cual no puede medirse u observarse directamente, pero sí los efectos que produce.

Es conveniente recordar que la termodinámica se ocupa de la conservación de energía y la dirección en que ésta puede transferirse en los sistemas en equilibrio. La transferencia de calor nos permite determinar, con respecto al tiempo, la energía transferida provocada por una diferencia de temperaturas.

Así pues, por la propia naturaleza del calor, como transferencia de energía térmica, y dado el carácter real e irreversible de los procesos térmicos industriales, los conocimientos adquiridos en termodinámica deben ser completados con la teoría de la transmisión del calor.

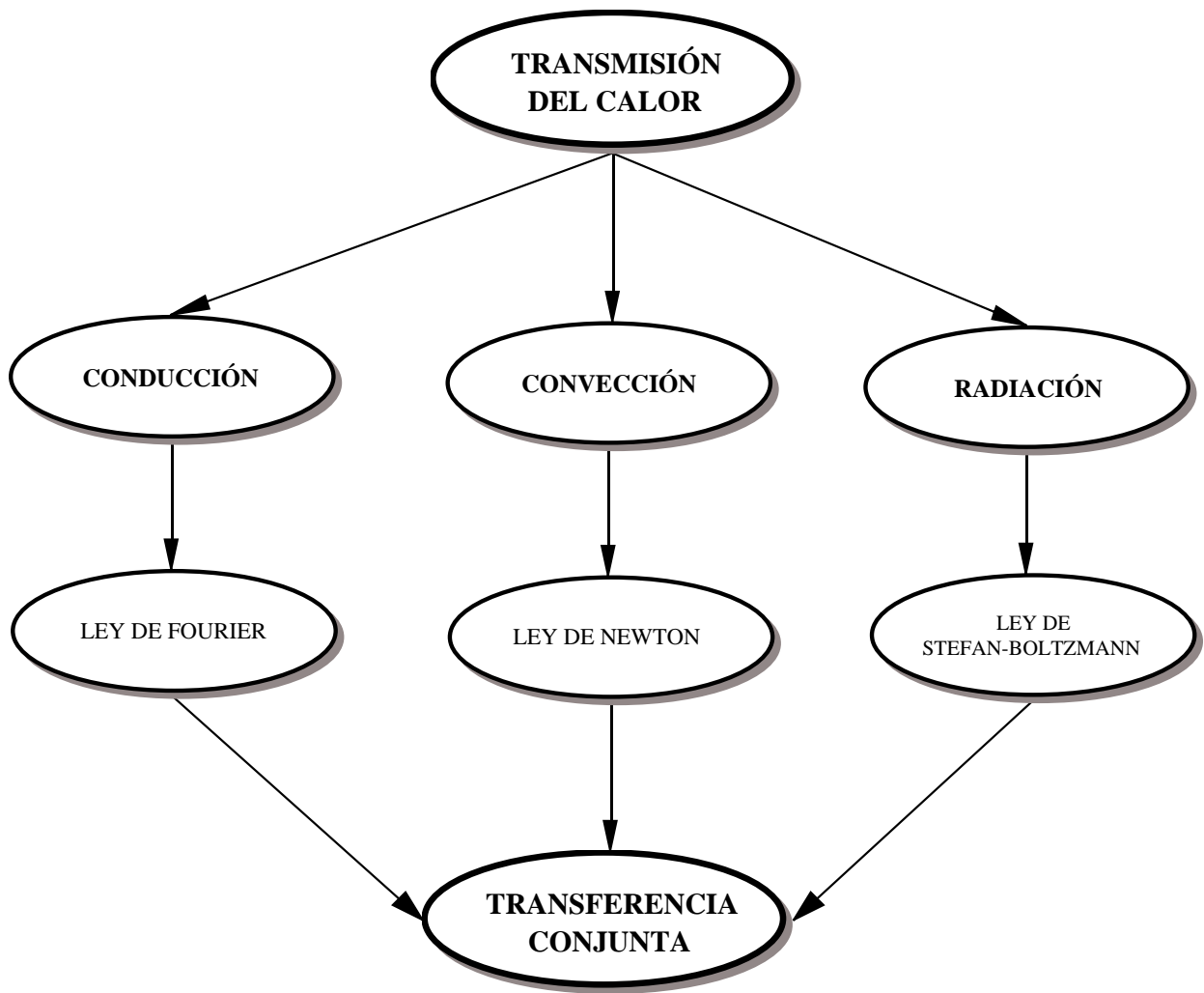
La teoría de la transmisión del calor es de gran importancia en las aplicaciones térmicas, por cuanto nos permite relacionar, con base a leyes y modelos matemáticos, la velocidad de transmisión de energía en forma de calor con las temperaturas y demás propiedades termodinámicas de los sistemas materiales perfectamente definidos que intervienen en el proceso.

Mecanismos de transmisión de calor.

Los textos de transferencia de calor suelen reconocer tres modos distintos de transmisión del calor: conducción, radiación y convección. En rigor, solo la conducción y la radiación debieran clasificarse como procesos de transferencia de calor, porque solo estos dos mecanismos dependen de la simple existencia de un desequilibrio térmico. Por su parte, la convección no satisface de manera estricta la condición de transferencia de calor porque su operación también depende del transporte de masa. Pero como la convección también transmite energía de regiones con mayor temperatura a regiones con menor temperatura, se ha adoptado el término "transferencia de calor por convección".

Leyes fundamentales en transmisión de calor.

Antes de desarrollar matemáticamente la transmisión de calor, se consideran de manera particular las leyes definitorias de los tres mecanismos de transferencia de calor (ver el siguiente diagrama), y posteriormente se analizan las características de cada uno de ellos así como las ecuaciones básicas que rigen su comportamiento. El objetivo es obtener una amplia perspectiva del campo sin involucrarse en los detalles por lo que solo se toman en cuenta casos simples. No obstante, se debe hacer hincapié en que durante la mayoría de las situaciones naturales el calor se transfiere no sólo por uno, sino por varios mecanismos que operan en forma simultánea.



Leyes correspondientes a vías de transferencia de calor.

Conducción del calor.

Desde un punto de vista general, la transmisión de calor por conducción tiene lugar en sólidos que están en contacto directo, o entre partes de un mismo sólido, sometidas a diferente temperatura. Los fenómenos de conducción pura en el caso de fluidos, exige la anulación completa de movimiento.

Toda la teoría de transmisión de calor por conducción se fundamenta en los trabajos del binomio Biot-Fourier. En 1804 Biot formuló las leyes de la conducción basadas en investigación empírica, sin embargo resulta mucho más conocido el nombre de Fourier, que en 1822 publicó una descripción matemática del fenómeno.

La ecuación básica de la conducción del calor expresa que la velocidad de transmisión del calor por unidad de área y de tiempo, o densidad de flujo del calor, en un medio material, es proporcional al gradiente de la distribución de temperaturas en dicho punto en el instante considerado, con su misma dirección vectorial pero en sentido opuesto (en virtud del segundo principio de la termodinámica); y cuyo factor de proporcionalidad es una característica del medio, que depende del estado

termodinámico del mismo y que indica la mayor o menor facilidad de dicho medio a la conducción de calor. Es decir:

$$\vec{\phi} = -k\vec{\nabla}T$$

Radiación del calor.

La radiación térmica es la radiación electromagnética emitida por la superficie de un cuerpo en virtud de su temperatura. Este cuerpo emite una radiación electromagnética en todas direcciones que al incidir sobre otro puede; en parte reflejarse, en parte absorberse y el resto transmitirse a través de él. La parte absorbida se transformará en energía térmica.

Las peculiaridades más importantes del proceso estriban en:

- El proceso es dinámico, pues todo cuerpo a temperatura mayor a cero grados kelvin emite y absorbe energía radiante térmica transformando la que absorbe en energía térmica del cuerpo.
- A diferencia de la conducción, la transmisión del calor por radiación no precisa de un medio material, pudiéndose efectuar en el vacío absoluto.
- La radiación es un proceso que puede considerarse superficial, ya que no se propaga en el interior del sólido.

La ley básica en radiación es la ley de Kirchhoff (1859) que establece la relación del poder emisor con el absorbente. Por su parte Stefan estableció la relación entre la energía emitida por un cuerpo negro y la cuarta potencia de su temperatura, esta relación fue expresada matemáticamente por Boltzmann en 1884, siendo hoy conocida como ley de Stefan-Boltzmann. En 1893, Wien trabajó sobre el tema de la distribución espectral de la radiación dando lugar a la llamada ley de desplazamiento. Las tres leyes enumeradas fueron deducidas con base a los criterios de la termodinámica clásica, siendo confirmadas por vía experimental. Sin embargo, para una temperatura dada, la intensidad de la radiación se distribuye en las longitudes de onda del espectro de radiación de un cuerpo negro y no se dedujo con base a consideraciones termodinámicas, así Planck en 1901 desarrolló la teoría del “quantum” dando origen a su ley de la radiación.

La ecuación básica de transmisión del calor por radiación entre las superficies de dos cuerpos y conocida con el nombre de ley de Stefan-Boltzmann, puede expresarse como sigue:

$$\phi = \sigma F (T_1^4 - T_2^4)$$

en donde:

- “ σ ” = Constante de Stefan-Boltzmann = $5.675 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

- F = Factor de proporcionalidad dependiente de la geometría y naturaleza del sistema.
- T_1 y T_2 = Temperaturas superficiales absolutas de los respectivos cuerpos (en escala absoluta R).

Convección del calor.

Por último, se entiende por transmisión del calor por convección la que se establece entre la superficie de contorno de un cuerpo sólido y el fluido adyacente que lo envuelve, sin o con cambio de fase del mismo.

En realidad, el fenómeno de la convección es una combinación de los procesos de conducción y radiación junto al movimiento del fluido, lo que hace que su estudio sea en general complejo.

Dentro del campo de la convección hay que distinguir dos grandes apartados:

- *La convección forzada* es aquella en la que el movimiento del fluido se debe a un agente externo al sistema, o bien al desplazamiento relativo del sólido que intercambia calor con el fluido,
- *La convección natural o libre*, en la que el movimiento del fluido se origina como resultado de la dilatación del mismo debido al efecto de la temperatura.

Resulta extremadamente difícil mencionar el trabajo de cada uno de los investigadores que se han ocupado de la convección, ya que en general cada uno de ellos se ha preocupado por la resolución de problemas concretos que de ningún modo abarcan el fenómeno en su totalidad. Sin considerar el estudio de los campos de velocidades en un fluido, se puede delimitar el periodo que se extiende desde 1880 a 1920 como el de comprensión y desarrollo inicial de la convección como mecanismo de transporte de calor, si bien la ley básica fue sugerida con anterioridad por Isaac Newton en 1701, dicha expresión no implica más que una definición del llamado coeficiente de película o de transmisión de calor por convección, clave de la resolución del problema, cuya obtención analítica a su vez depende del conocimiento de la ecuación de semejanza propia del sistema sujeto a estudio.

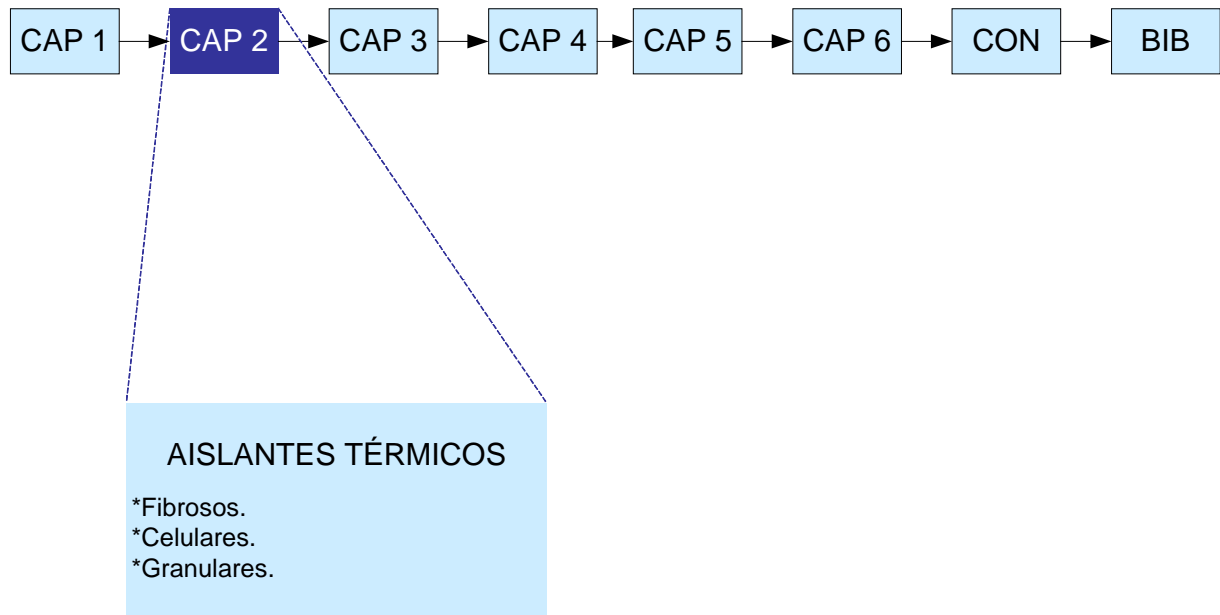
La ecuación que se viene utilizando para esta modalidad de transmisión del calor, debida a Newton, que la obtuvo como conclusión de sus estudios sobre el enfriamiento de los cuerpos, se le conoce como “Ley del enfriamiento de Newton”. Y relaciona la densidad del flujo de calor desde la superficie del sólido al fluido adyacente y la diferencia de temperaturas entre la de la superficie sólida y la del fluido.

$$\phi = h\Delta T$$

El coeficiente de proporcionalidad “ h ”, conocido como coeficiente superficial de transmisión de calor o coeficiente de película, es consecuencia de una serie de fenómenos fluidomecánicos y térmicos de la capa límite del fluido, que hacen que dependa fuertemente de la configuración geométrica del sistema, características termodinámicas del fluido en dicha capa y del régimen de circulación del mismo. Por lo que para su determinación se requiere tomar en cuenta el conjunto de tales fenómenos.

Capítulo 2

Conductividad térmica y aislantes térmicos



CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y AISLANTES TÉRMICOS

Conductividad térmica.

La conductividad térmica es una propiedad de la materia que en general depende de la temperatura, de la presión y de la composición de la misma. La conductividad térmica de los distintos materiales se determina experimentalmente, y con este propósito se conocen distintos métodos, la mayoría de los cuales se basan en la medida de la densidad de flujo de calor (cantidad de calor transmitido a través de una superficie isoterma por unidad de área y por unidad de tiempo) y en el gradiente de temperatura.

De acuerdo con la ley de Fourier, la conductividad térmica se define como:

$$k = \frac{q_k / A}{dT/dx}, \text{ (W/m K)}$$

en donde:

- k : Conductividad térmica.
- q_k : Flujo de calor por conducción.
- A : Área de transferencia de calor.
- dT/dx : Gradiente de temperatura en la dirección el flujo de calor.

De la ecuación anterior se deduce que la conductividad térmica es numéricamente igual a la cantidad de calor que atraviesa la unidad de área de superficie isoterma en la unidad de tiempo cuando el gradiente de temperatura es unitario.

Como ya se dijo anteriormente, la conductividad térmica es una propiedad del medio a través del cual se transporta calor por conducción y establece que tan fácilmente los sólidos, los líquidos y los gases llevan a cabo dicha transferencia de energía. En la siguiente tabla se incluyen los valores de conductividad térmica de varios materiales: observe que los mejores conductores del calor son los metales puros y los peores son los gases. Entre ellos se encuentran los sólidos no metálicos, las aleaciones y los líquidos.

MATERIAL	Conductividad térmica a 300 K
	W/m K
Cobre	399
Aluminio	237
Acero al carbón, 1% de C	43
Vidrio	0.81
Plástico	0.2-0.3
Agua	0.6
Etilenglicol	0.26
Aceite para motor	0.15
Freón (líquido)	0.07
Hidrógeno	0.18
Aire	0.026

El mecanismo de conducción térmica en un gas puede explicarse a nivel molecular utilizando los conceptos básicos de la teoría cinética de los gases. La energía cinética de una molécula está relacionada con su temperatura, pues las moléculas en la región de alta temperatura tienen velocidades mayores que aquellas en una región de baja temperatura. Las moléculas tienen un movimiento continuo aleatorio y cuando chocan entre sí intercambian energía y cantidad de movimiento. Cuando una molécula se mueve de una región de alta temperatura a una región con menor temperatura, transporta energía cinética de una hacia la otra. Después de chocar con moléculas más lentas, cede parte de su energía a las moléculas de menor contenido energético. De esta manera la energía térmica se transfiere de las regiones con mayor temperatura a las regiones de menor temperatura en un gas mediante la interacción molecular.

De acuerdo con la descripción anterior, mientras más rápido se mueven las moléculas, más rápido transportarán energía. Por consiguiente, la conductividad depende de la temperatura del gas, y debido a que a presiones moderadas el espacio entre las moléculas es grande en comparación con su tamaño, la conductividad térmica de los gases es en esencia independiente de la presión.

El mecanismo básico de conducción de energía en los líquidos es similar al de los gases. Sin embargo, sus condiciones moleculares son más difíciles de describir y los detalles de sus modos de conducción del calor no son del todo conocidos. En la mayoría de los líquidos la conductividad térmica disminuye al aumentar la temperatura y depende poco de la presión siempre y cuando no se encuentren cerca de su punto crítico. Por regla general, la conductividad térmica de los líquidos disminuye a medida que se incrementa su peso molecular. Para propósitos de ingeniería, la conductividad térmica de los líquidos se toma de tablas como una función de la temperatura en el estado saturado.

De acuerdo con las teorías actuales, los materiales sólidos se componen de electrones libres y de átomos dispuestos en una estructura cristalina continua. Por tanto, es posible conducir la energía térmica mediante dos mecanismos: migración de electrones libres y vibración de estructura cristalina. Estos dos efectos son aditivos, aunque en general el transporte realizado por los electrones es más eficaz que el realizado por medio de energía vibracional en la estructura cristalina. Puesto que los electrones transportan una carga eléctrica de la misma forma en que transportan la energía térmica de una zona con mayor temperatura a una zona con menor temperatura, los buenos conductores eléctricos por lo general también son buenos conductores térmicos y viceversa. Los sólidos no metálicos presentan un transporte electrónico escaso o nulo y por consiguiente, la conducción depende principalmente de la vibración de la estructura cristalina. Por ello, estos materiales tienen una conductividad térmica menor que la de los metales.

Aislantes térmicos.

Los aislantes térmicos constituyen un grupo importante de materiales sólidos en el diseño para transferencia de calor, donde el propósito es reducir el flujo del mismo. Ejemplo de casos como esos incluyen el aislamiento de edificios para minimizar la pérdida de calor en invierno y un termo para conservar caliente el té o café. La solución a cada una de estas situaciones implica el uso del aislamiento térmico.

Los materiales aislantes del calor deben tener una baja conductividad térmica. En la mayoría de los casos esto se logra atrapando aire o algún otro gas en el interior de pequeñas cavidades en un sólido; aunque en ocasiones se obtiene el mismo efecto

rellenando el espacio a través del cual se tiene que reducir el flujo de calor con pequeñas partículas sólidas y atrapando aire entre ellas. Estos aislantes térmicos utilizan la baja conductividad inherente a un gas para inhibir el flujo de calor. Sin embargo, como los gases son fluidos, el calor también puede transferirse por convección natural en el interior de bolsas de gas y por radiación entre las paredes sólidas del recinto. Por lo tanto, la conductividad de los materiales aislantes no es en realidad una propiedad debida exclusivamente al material, sino el resultado de una combinación de mecanismos de transferencia de calor. La conductividad térmica del aislamiento es un valor efectivo que no solo cambia con la temperatura, sino también con la presión y las condiciones ambientales, como la humedad. El cambio de la conductividad térmica efectiva con la temperatura puede ser bastante pronunciado, en especial a temperaturas elevadas cuando la radiación desempeña un papel significativo en el proceso global de transferencia de calor total.

Existen en esencia tres tipos de materiales aislantes:

- I. *Fibrosos*. Los materiales fibrosos se componen de filamentos con partículas de diámetro pequeño de baja densidad que pueden colocarse en una abertura como “relleno suelto” o en forma de tablas, bloques o mantas. Los materiales fibrosos tienen una porosidad muy alta (-90%). La lana mineral es un aislante fibroso común para aplicaciones a temperaturas por debajo de los 700 °C, y con frecuencia se utiliza fibra de vidrio con temperaturas por debajo de los 200 °C. Para protección térmica a temperaturas entre 700 y 1700 °C se pueden utilizar fibras refractarias tales como alúmina o sílice.
- II. *Celulares*. Los aislantes celulares son materiales que se encuentran en celdas cerradas o abiertas que suelen tener la forma de tableros extendidos flexibles o rígidos. Sin embargo, también es posible darles forma o rociarlos en el lugar para lograr las formas geométricas deseadas. El aislamiento celular tiene la ventaja de su baja densidad, baja capacidad de calentamiento, y una resistencia a la compresión relativamente buena. Algunos ejemplos son el poliuretano y la espuma de poliestireno expandida.
- III. *Granulares*. El aislamiento granular consiste en pequeñas escamas o partículas de materiales inorgánicos, aglomeradas en formas prefabricadas o utilizadas como polvo. Algunos ejemplos son polvo de perlita, sílice diatomáceo y vermiculita.

Para temperaturas criogénicas, los gases presentes en los materiales celulares pueden condensarse o congelarse y crear un vacío parcial, lo que mejora la eficacia del aislamiento. Es posible aplicar vacío a los aislamientos fibrosos y granulares para eliminar la convección y conducción, con lo que disminuye la conductividad efectiva de una manera apreciable.

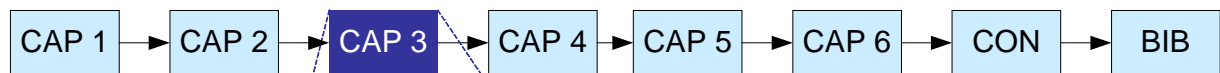
Además de los tres tipos de aislamientos anteriormente mencionados, también es posible limitar la transferencia de energía térmica por medio de una barrera de calor. En este método se colocan paralelas dos o más hojas metálicas delgadas con baja emitancia para reflejar la radiación de regreso a su fuente.

La propiedad más importante a considerar para elegir un material aislante es la conductividad térmica, aunque la densidad, el límite superior de temperatura, la rigidez estructural, la degradación, la estabilidad química y el costo, desde luego, también son factores importantes. Las propiedades físicas de los aislantes son medidas pero en

general los indica el fabricante del producto o es posible obtenerlas en manuales. Por desgracia, los datos a menudo son muy limitados, sobre todo para temperaturas elevadas. En esos casos se extrapola la información disponible y luego se aplica un factor de seguridad para el diseño final, pero si lo que se desea es optimizar el funcionamiento de un equipo o sistema en el que intervenga el aislamiento térmico, se requiere de valores reales y por lo tanto confiables de la conductividad térmica de los aislamientos.

Capítulo 3

Medidores de conductividad térmica de aislamientos térmicos



MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN MATERIALES AISLANTES

- *Aparato de placa caliente con guarda.
- *Aparato con medidor de flujo de calor.
- *Medidor de conductividad térmica (FI de la UNAM).

MEDIDORES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE AISLAMIENTOS TÉRMICOS

La importancia de los equipos de medición en el ahorro de energía.

A lo largo de la historia, el hombre ha tenido la necesidad de desarrollar diversos instrumentos de medición para llevar a cabo investigaciones y crear tecnología que le permitan apropiarse de la naturaleza y usarla a su favor. Sin embargo, la sobre explotación de los recursos naturales y la contaminación resultantes del crecimiento acelerado de la población mundial, obliga en la actualidad a la optimización de la maquinaria y procesos industriales.

Hablando de los recursos energéticos, el área de térmica se ha enfocado en crear y perfeccionar equipos de medición de propiedades termo físicas de materiales (fluidos y sólidos) en amplios intervalos y bajo la premisa de que cumplan con los requisitos establecidos por las normas correspondientes. Solo de esta forma se obtienen datos confiables sobre el comportamiento de los materiales que se pretenden utilizar en los diseños térmicos y hacerlos eficientes desde el punto de vista energético.

Mediciones experimentales para determinar la conductividad térmica de diferentes aislantes térmicos.

Los aislamientos térmicos son materiales usados comúnmente en los equipos y sistemas en los que es necesario minimizar el flujo de calor hacia el medio circundante.

La conductividad térmica es una propiedad que interviene directamente en el transporte de calor por conducción en los materiales. Dicha propiedad esta definida por la ley de Fourier de la siguiente manera:

$$k = \frac{q_k / A}{dT/dx}, \text{ (W/m K)}$$

en donde:

- k : Conductividad térmica.
- q_k : Flujo de calor por conducción.
- A : Área de transferencia de calor.
- dT/dx : Gradiente de temperatura en la dirección el flujo de calor.

Basándose en este concepto, se deben realizar mediciones experimentales para determinar la conductividad térmica de diferentes materiales incluidos los aislamientos térmicos.

La medición de la conductividad térmica de los aislantes térmicos se puede efectuar con dispositivos que utilizan un método primario de medición o con aparatos que emplean un método secundario de medición.

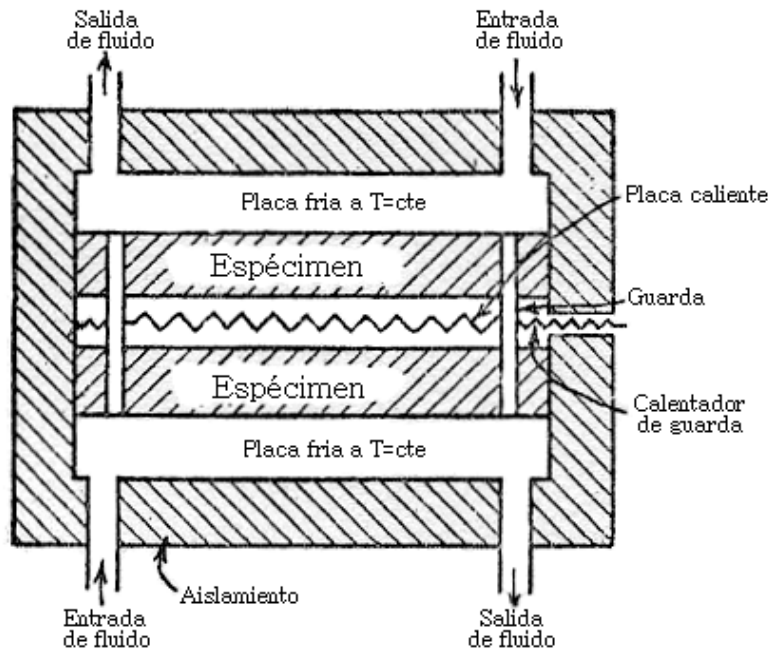
La medición primaria o absoluta consiste en determinar la conductividad térmica a partir de magnitudes como la longitud, el área, la diferencia de temperatura y el flujo de

calor; mientras que la medición secundaria o comparativa usa materiales de propiedades de transporte de calor conocidas para calibrar el equipo.

A continuación se explica la configuración y funcionamiento de algunos medidores de conductividad térmica que precisamente hacen uso del método de medición absoluta o del método de medición comparativa.

Principio de medición de la conductividad térmica por medio del aparato de placa caliente con guarda.

Para la medición primaria de la conductividad térmica de materiales aislantes térmicos se utiliza un aparato como el esquema mostrado en la siguiente figura que representa al llamado aparato de placa caliente con guarda, siendo este último elemento el encargado de garantizar un flujo de calor unidimensional de la placa caliente hacia los especímenes, en términos reales esto quiere decir, que las pérdidas de calor a través de los extremos de los especímenes son despreciables.



Arreglo general de los componentes mecánicos de un aparato de placa caliente.

Se colocan dos especímenes teniendo la misma densidad, tamaño y espesor en cada lado de la placa caliente con guarda y se sujetan firmemente por medio de las placas frías. Idealmente, las placas caliente y frías proporcionan condiciones de frontera de temperatura constante a las superficies de los especímenes. Con un aislamiento adecuado en la dirección lateral, el aparato está diseñado para proporcionar flujo de calor unidimensional a través del área de medición de un par de muestras.

La placa caliente está formada de una sección de medición y otra sección de guarda que se fabrican de una pieza continua de material conductor térmico. Las dos placas frías se fabrican de material conductor térmico con pasajes concéntricos en su interior para el paso del fluido de temperatura controlada. Las placas caliente y frías se hacen lo suficientemente gruesas de tal manera que para las conductancias térmicas de los

especímenes típicos, las variaciones de temperatura radial y axial sean bastante pequeñas.

El calor para la placa caliente en la sección de medición se obtiene de una fuente estable de potencia, para la sección de guarda se requiere de otra fuente de potencia independiente de la primera. Mientras la corriente eléctrica circula a través del elemento calefactor de la placa caliente, el calentador de la sección de guarda se ajusta hasta que no haya diferencia de temperatura entre los especímenes y los puntos adyacentes a dicha sección. La medición de temperatura en las placas caliente y frías se hace a través de sensores de temperatura (típicamente termopares o termómetro de resistencia). Controles de temperatura, selectores de canales y otros aparatos forman parte de la instrumentación del equipo.

Durante las pruebas a los especímenes, se realizan mediciones para determinar el flujo de calor y las temperaturas de las placas de manera periódica. Cuando la temperatura de las placas está cerca de su temperatura final y es estable y el flujo de calor permanece constante, los datos se colectan por varias horas y se promedian sobre un intervalo de tiempo. El valor de la conductividad térmica se obtiene de la medición de las demás magnitudes que intervienen en la ecuación que se muestra a continuación, en la cual se basa el comportamiento de un aparato de placa caliente con guarda con dos especímenes y dos diferencias de temperatura de la placa caliente con respecto a las placas frías y con espesores del espécimen muy parecidos (dentro del 1% de su valor, como puede ser el caso de los materiales de referencia) se tiene:

$$k = \frac{qL_{promedio}}{2A\Delta T_{promedio}}, \text{ (W/m K)}$$

donde:

- k : Conductividad térmica del aislante de prueba.
- q : Flujo de calor unidimensional a través del área de medición.
- $\Delta T_{promedio}$: La media aritmética de la diferencia de temperatura $(\Delta T_1 + \Delta T_2)/2$, donde ΔT_1 y ΔT_2 es la diferencia de temperaturas entre una placa fría y la placa caliente y la otra placa fría y la placa caliente respectivamente.
- $L_{promedio}$: $(L_1 + L_2)/2$ es la media aritmética del espesor de los dos especímenes L_1 y L_2 .
- $2A$: Es el área a través de la cual fluye el calor, el factor 2 considera el hecho de que “ q ” sale a través de las dos caras de área A .

La determinación de la conductividad térmica por este método es absoluta o primaria ya que sólo se requieren mediciones de longitud, temperatura y potencia eléctrica que corresponde al flujo de calor suministrado.

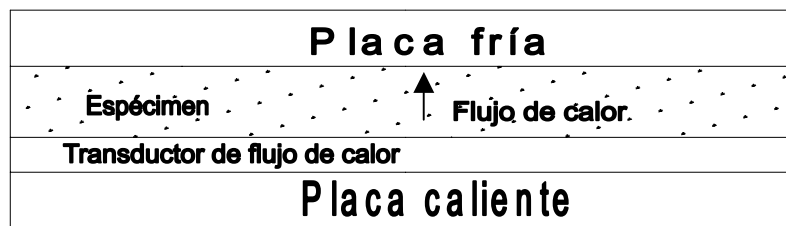
Problemática.

A pesar de que los aparatos de placa caliente se han usado por muchos años con mejoras continuas, todavía se experimenta considerable dificultad para establecer los errores asociados con este equipo, ya que requieren de sofisticadas técnicas de control y medición. En el caso del aparato de placa caliente con guarda convencional la incertidumbre de las mediciones de conductividad térmica, depende de mantener condiciones estables de temperatura en las superficies, flujo de calor suministrado y geometría. Otro factor importante es el balance de temperaturas a través de la separación entre la sección de medición y la de aislamiento de la placa caliente.

Aparato con medidor de flujo de calor.

Antes de comenzar a explicar el diseño de este equipo, conviene aclarar en qué consiste el mencionado “medidor de flujo de calor”. Propiamente dicho, se trata de uno o más transductores cuya señal de salida (en volts) depende de la magnitud del flujo de calor; ambas variables se relacionan entre sí a través de un factor de proporcionalidad llamado factor de calibración. Existen unidades analógico-digitales de registro y procesamiento de datos, que por medio de software permiten configurar el o los transductores, de tal forma que al monitorear el voltaje de salida de los mismos se obtiene de forma rápida y fácil el valor del flujo de calor correspondiente.

Un aparato con medidor de flujo de calor consta de dos placas isotérmicas (una caliente y una fría), uno o más transductores de flujo de calor, equipo para medir y controlar la temperatura, el espesor y la salida del transductor o los transductores de flujo de calor y dispositivos para el control de las condiciones ambientales cuando es necesario. A continuación se muestra el esquema de tal aparato.



Aparato de placa caliente con medidor de flujo de calor.

El aparato de placa caliente con medidor de flujo de calor establece un flujo de calor unidimensional en estado permanente a través de un espécimen de prueba entre dos placas paralelas a temperaturas diferentes pero constantes. Con una calibración apropiada del o los transductores de flujo de calor y midiendo las temperaturas de las placas y la separación entre ellas, se usa la ley de conducción de Fourier para calcular la conductividad térmica.

Este medidor de conductividad térmica se utiliza ampliamente debido a su concepto simple, rapidez, y aplicación a una amplia variedad de aislantes de prueba.

Existen tres configuraciones de este tipo de dispositivo de medición:

1. *Con un transductor de flujo de calor y un espécimen.*
2. *Con un transductor de flujo de calor y dos especímenes.*
3. *Con dos transductores de flujo de calor y dos especímenes.*

El más común de estos por su sencillez y costo es el de un transductor de flujo de calor y un espécimen del cual se da la ecuación para el cálculo de la conductividad térmica del aislante de prueba:

$$k = S \cdot E \left(\frac{L}{\Delta T} \right)$$

donde:

- k : Conductividad térmica del espécimen de prueba, W/(m K).
- S : Factor de calibración del medidor de flujo de calor, (W/m²)/V.
- E : Salida del transductor de flujo de calor, V.
- L : Separación entre las placas caliente y fría durante la medición, m.
- ΔT : Es la diferencia de temperatura a través del espécimen de prueba, K.

Problemática.

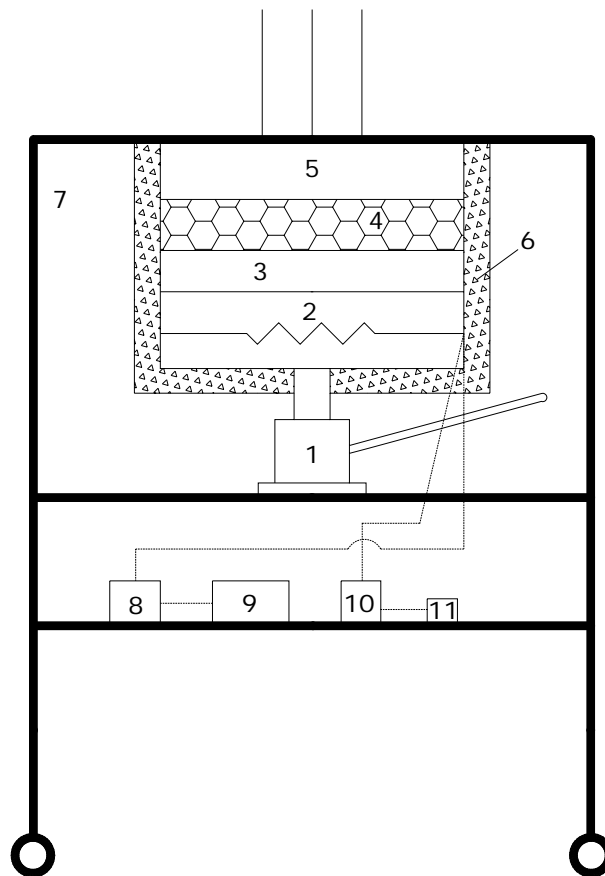
Este equipo utiliza un método comparativo o secundario de medición, ya que se usan especímenes con conductividades térmicas conocidas (materiales de referencia) para calibrar el aparato. Estos materiales de referencia deben ser analizados en laboratorios nacionales que utilicen un método de medición primaria o absoluta para determinar su conductividad térmica. Además se debe encontrar la relación entre el flujo de calor y la respuesta del transductor de flujo de calor.

Antecedentes del diseño y construcción de un medidor de conductividad térmica.

En la Facultad de Ingeniería de la UNAM existe el antecedente de la construcción de un medidor de conductividad térmica para materiales aislantes. Enseguida se expone brevemente el diseño y la problemática del mismo.

Diseño.

Al diseñar el sistema de medición de conductividad térmica, por simplicidad de uso y obtención de resultados, se considera un flujo de calor unidimensional en línea, es decir, que los termopares se localizan puntualmente sobre una línea vertical donde se considera el mismo flujo de calor en estado permanente, para de esta manera aplicar la ley de Fourier y calcular la conductividad del aislante de prueba a partir de conocer la conductividad térmica de un material de referencia (muestra patrón) que da por resultado el flujo de calor a través del sistema.



MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES AISLANTES

1. PISTON HIDRÁULICO
2. RESISTENCIA ELÉCTRICA
3. MUESTRA-PATRÓN-ACERO INOX. 304
4. MUESTRA-PRUEBA
5. DISIPADOR DE CALOR-ALUMINIO
6. CAMARA AISLANTE
7. CAMARA CONTENEDORA DEL SISTEMA
8. SELECTOR
9. REGISTRADOR DE TEMPERATURA
10. REGULADOR DE TEMPERATURA
11. BOBINA DEL REGULADOR DE TEMPERATURA

Como se puede ver en la figura anterior, se utiliza un pistón hidráulico que suministra una presión mínima de 3.75 kg/cm^2 para aumentar la adhesión de superficies sin deformación de ellas. Debido a que los pistones con manómetro integrado resultan bastante costosos y por la función que desempeñan en el sistema, se optó por medir solo la deformación volumétrica del aislante al estar sujeto a presión, y así cuidar el control de su homogeneidad física.

La fuente de calor es una resistencia eléctrica, cuya potencia es de 1500 W con entrada trifásica y 220V, calentándose su superficie anterior hasta $550 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura promedio máxima de operación de aislantes. La resistencia se encuentra aislada en sus caras posterior y laterales para evitar transmisión de calor en esas direcciones, y soportar una presión de 3.75 kg/cm^2 . Además, cuenta con un control de temperatura, constituido por un regulador corta corriente y un termopar tipo "J" como sensor, que desconecta del circuito eléctrico a la resistencia para evitar que ésta siga aumentando su temperatura y se sobrecaliente pudiendo quemar a algunos aislantes.

La muestra patrón es de acero inoxidable 304, que tiene como características principales su homogeneidad y estabilidad de sus propiedades físicas, su fácil adquisición e igualmente una conductividad térmica conocida. Su espesor de 19 mm, se determinó a partir de estimar una caída de temperatura a través de ella de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, considerando que el flujo de calor en esta dirección es de un 80% del que suministra la fuente.

El aparato puede medir la conductividad térmica de cualquier aislante térmico con espesor de 13 a 102 mm (1/2 a 4 pulgadas), las cuales son usualmente mas comerciales.

Al final, se tiene un sumidero de disipación de calor que de acuerdo a sus ventajas de alta conductividad térmica y calor específico, bajo costo y fácil de encontrar en el mercado sin requerir maquinado adicional, se seleccionó una placa de aluminio de 25mm de espesor, que es el máximo espesor comercial e implica una caída de temperatura máxima para el propósito requerido. Asimismo, esta placa cuenta con tres aletas de aluminio instaladas a presión con un espesor de 1/16" y con dimensiones de 20X20 cm, con el fin de aumentar la transferencia de calor y disminuir la temperatura superficial en el extremo de ella.

Para evitar la transferencia de calor transversal al flujo unidimensional, se determinó usar bloques de lana mineral por su baja conductividad térmica y alta resistencia mecánica, ya que es necesario remover la parte lateral izquierda para cambiar las muestras de prueba.

El sistema está aislado del medio ambiente para evitar corrientes de aire convectivas que pudieran incidir en las mediciones, por medio de cuatro placas laterales de acrílico y dos placas de fierro en las partes superior e inferior que además le sirven de estructura de soporte al sistema.

Instrumentación.

La instrumentación está integrada totalmente al aparato de medición de conductividad térmica y consiste solamente de un indicador de temperatura tipo digital cuya señal de entrada la recibe de un selector de diez canales, de los cuales únicamente se utilizan tres para medir la temperatura al mismo tiempo en las secciones correspondientes. Además se tiene un control de temperatura de la resistencia térmica como se mencionó anteriormente y de acuerdo a los rangos de temperatura a manejar y para obtener una mejor sensibilidad se seleccionó el uso de los termopares tipo "K"

para registrar la temperatura entre la resistencia y la placa de acero, la temperatura entre la placa de acero y la muestra del aislante de prueba, y la temperatura entre la muestra de aislante y el disipador de aluminio. La medición de la deformación volumétrica de los aislantes a prueba, se realiza simplemente con una regla con escala en mm.

Problemática.

El problema básico que presenta el diseño del medidor de conductividad térmica anteriormente descrito, consiste en que para determinar la constante de calibración del sistema de medición, se requiere conocer la conductividad térmica de algún material aislante, misma que se obtiene de datos técnicos del fabricante, dicho en otras palabras, para determinar la conductividad térmica de aislantes térmicos se debe conocer el valor de la conductividad térmica de uno de esos aislamientos, y hay que recordar que en México ese dato se presenta como el suministrado por la casa matriz que los produce, sin considerar que los aislamientos fabricados en sucursales de nuestro país utilizan materias primas con características y propiedades diferentes. Por si esto fuera poco, muchos fabricantes no cuentan con laboratorios de prueba para determinar dichas conductividades térmicas, por lo que proporcionan datos que aparecen en la literatura de manera general. También se debe considerar el hecho de que al cambiar el aislante de prueba, cambia el flujo de calor a través del mismo, por lo que la constante de calibración no se puede aplicar en todos los casos ya que resulta variable.

Otros proyectos de investigación para medir la conductividad térmica de aislantes térmicos mexicanos.

En el presente capítulo, no es prioridad exponer ni evaluar el trabajo de otras personas o instituciones, sino simplemente hacer constancia de que en México se han realizado investigaciones previas para determinar la conductividad térmica de materiales aislantes. Particularmente se menciona el título de algunos proyectos llevados a cabo por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en su área de térmica, que ha orientado esfuerzos en la materia en los últimos años.

Proyectos de Investigación CENIDET

<i>PROYECTO</i>	<i>RESPONSABLE/ PROFESORES</i>	<i>ALUMNOS</i>
Diseño y construcción de un aparato para determinar la conductividad térmica de materiales aislantes conforme a la norma ASTM-177. CENIDET 1998-1999	M. F. Leonel Lira Cortés. M. C. José Manuel Morales Rosas. M. C. Yvonne Chávez Chena.	Ing. Jesús Perfecto Xaman Villaseñor.
Determinación de la conductividad térmica de materiales y fluidos que se usan en sistemas energéticos. CENIDET 1998-1999	M. F. Leonel Lira Cortés. M. C. José Manuel Morales Rosas.	Ing. Francisco Morales Cuevas.
Determinación de la conductividad térmica de materiales aislantes. CENIDET 1999-2000	M. F. Leonel Lira Cortés. M. C. Yvonne Chávez Chena. M. C. José Manuel Morales Rosas.	M. C. Jesús Perfecto Xaman Villaseñor.
Determinación de conductividad térmica de muestras de materiales aislantes. IIE 1998 \$3250.00 de financiamiento	M. F. Leonel Lira Cortés. M. C. Yvonne Chávez Chena. M. C. José Manuel Morales Rosas.	Ing. Jesús Perfecto Xaman Villaseñor.
Determinación de conductividad térmica de muestras de materiales aislantes. IMCYC 1998 \$9000.00 de financiamiento	M. F. Leonel Lira Cortés. M. C. Yvonne Chávez Chena. M. C. José Manuel Morales Rosas.	Ing. Jesús Perfecto Xaman Villaseñor.

Normalización sobre aislamientos térmicos en la república mexicana.

La norma oficial que regula la comercialización de aislantes térmicos para su uso en edificaciones en nuestro país es la NOM-018-ENER-1997 “Aislantes térmicos para edificaciones. Características, límites y métodos de prueba”, la cual se publicó en el Diario Oficial de la Federación el 24 de octubre de 1997 y fue elaborada por un grupo de trabajo integrado por representantes de varios organismos y empresas, bajo la coordinación de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.

Esta norma tiene por objeto establecer las características que deben cumplir los materiales, productos, componentes y elementos termoaislantes, de fabricación nacional o de importación que se comercialicen con propiedades de aislantes térmicos para techos, plafones y muros de las edificaciones; así como los métodos de prueba para determinar su conductividad térmica o su resistencia térmica, densidad aparente, permeabilidad al vapor de agua y adsorción de humedad.

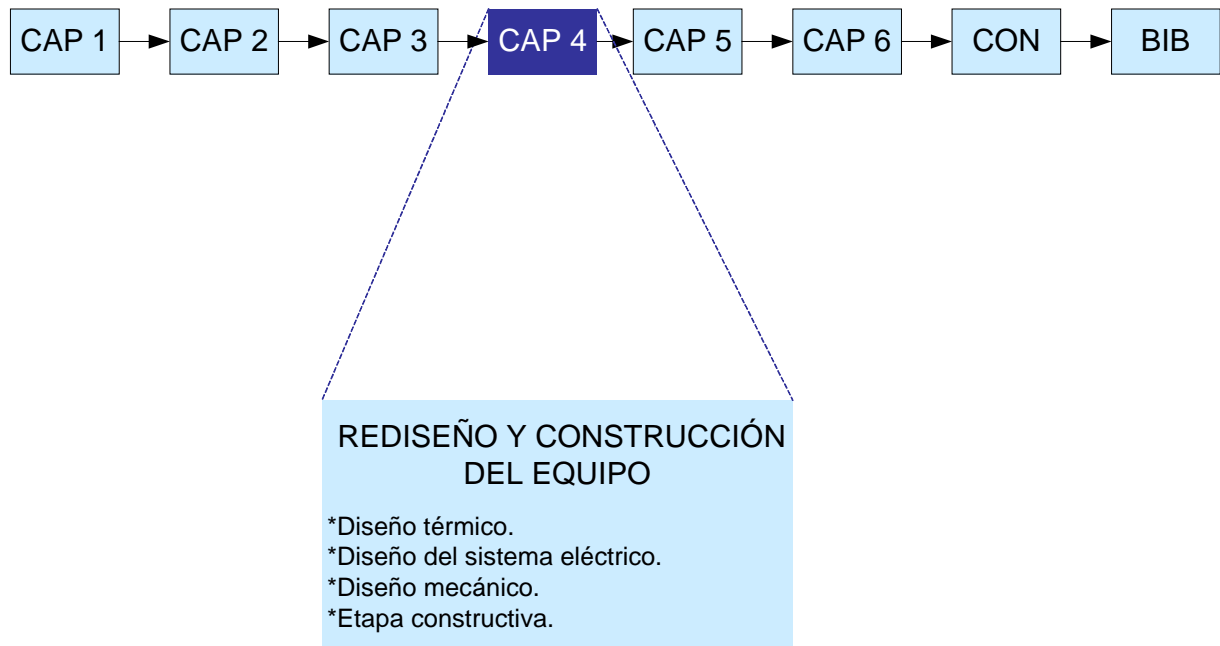
La norma responde a la premisa de incrementar el ahorro de energía por el uso de equipos de aire acondicionado, coadyuvando a la preservación de los recursos energéticos a través de la utilización de mejores materiales, orientando al consumidor en la selección de aquellos que le ofrezcan la mejor alternativa para su necesidad de aislar térmicamente su edificación.

Para obtener los parámetros a que hace mención la norma, se requieren laboratorios de prueba acreditados y aprobados. En el país, la vigencia de la acreditación y aprobación de un laboratorio de pruebas, es de cuatro años y su validez queda sujeta a las evaluaciones que realice la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) y la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), a efecto de constatar que el laboratorio en su estructura y funcionamiento, cumple cabalmente con las disposiciones de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y los ordenamientos que derivan de ella.

A la fecha, el único laboratorio acreditado para llevar a cabo las pruebas citadas y en particular para determinar la conductividad térmica de aislantes térmicos (mediciones primarias), es el de la compañía Polioles, S.A. de C.V., fabricante de materiales termoaislantes (vigencia de la aprobación: cuatro años a partir del 03 de diciembre del 2003), cuyas acciones se rigen bajo los lineamientos que establece dicha norma.

Capítulo 4

Rediseño y construcción del medidor de conductividad térmica para aislantes térmicos

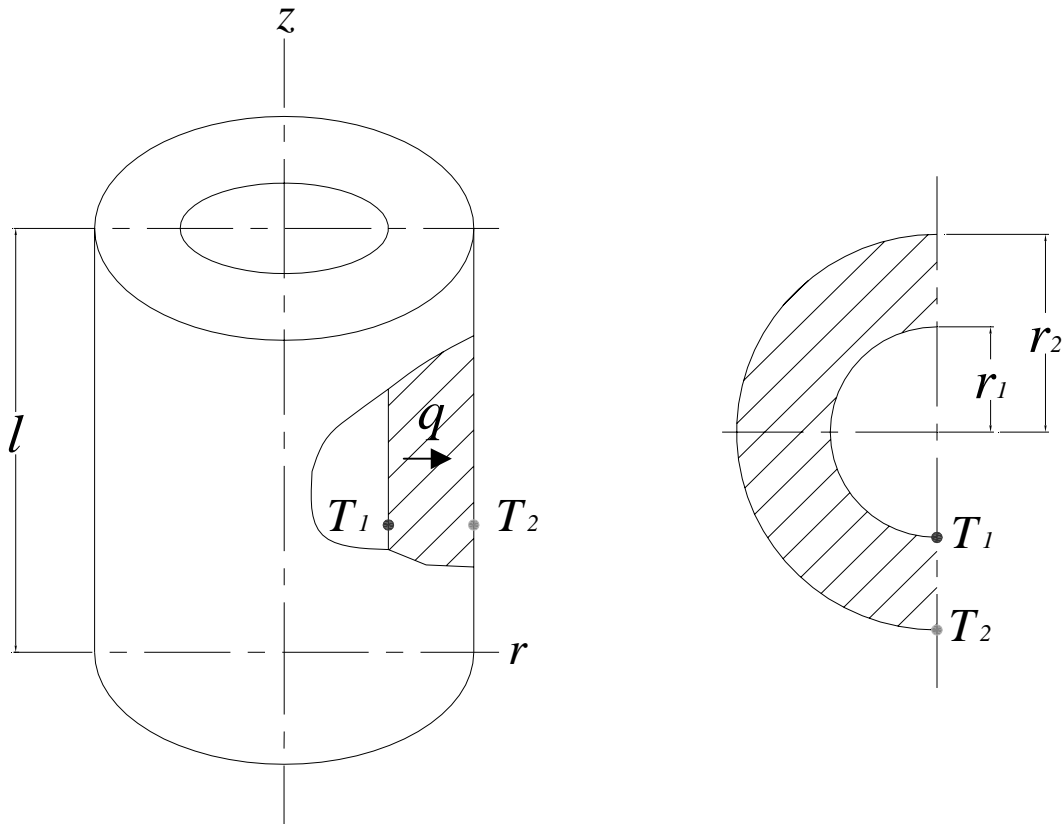


REDISEÑO DEL MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA AISLANTES TÉRMICOS.

En el capítulo anterior se explicaron brevemente los principios de funcionamiento de algunos dispositivos empleados para determinar la conductividad térmica de aislantes térmicos, y se encontró que pueden utilizar un método de medición primario (absoluto) o uno secundario (comparativo). Ahora es el momento de proyectar un medidor de conductividad térmica propio, en este caso se considera como base del rediseño el llamado aparato de placa caliente con guarda, que como ya se mencionó utiliza un método de medición primario de la conductividad térmica, con lo que se espera obtener valores confiables de esta propiedad termofísica.

Diseño térmico.

Para este equipo se decidió utilizar una configuración cilíndrica, en la cual, la longitud del cilindro es mucho mayor que el radio del mismo. Bajo esta premisa y considerando un gradiente de temperaturas únicamente radial, se puede suponer que las pérdidas de calor a través de los extremos del sistema son despreciables y por lo tanto el flujo de calor también se puede suponer unidireccional; pero para explicar mejor el fenómeno de transferencia de calor por conducción en un sistema cilíndrico hay que empezar por el principio, en condiciones estables, sin generación de calor, sin flujo de energía en la dirección longitudinal y con una conductividad térmica constante, la forma apropiada de la ecuación de calor para un cilindro hueco como el que se muestra en la siguiente figura y cuyas superficies interna y externa se exponen a diferentes temperaturas, es la siguiente:



$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \dots\dots(a)$$

Es posible determinar la distribución de temperaturas en el cilindro integrando dos veces con respecto a r la ecuación “a” y aplicando las condiciones de frontera apropiadas:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0$$

$$r \frac{dT}{dr} = C_1$$

$$\frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r}$$

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \dots\dots(b)$$

condiciones de frontera:

$$T(r) = T_1 \quad \text{para} \quad r = r_1$$

$$T(r) = T_2 \quad \text{para} \quad r = r_2$$

sustituyendo las condiciones de frontera en la ecuación “b” se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$T_1 = C_1 \ln r_1 + C_2$$

$$T_2 = C_1 \ln r_2 + C_2$$

resolviendo para C_1 y C_2 y sustituyendo en la ecuación “b”:

$$T(r) = \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)} \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) + T_2 \dots\dots(c)$$

La rapidez a la que se conduce la energía a través de cualquier superficie cilíndrica en el sólido se expresa como:

$$q = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rl) \frac{dT}{dr} \dots\dots(d)$$

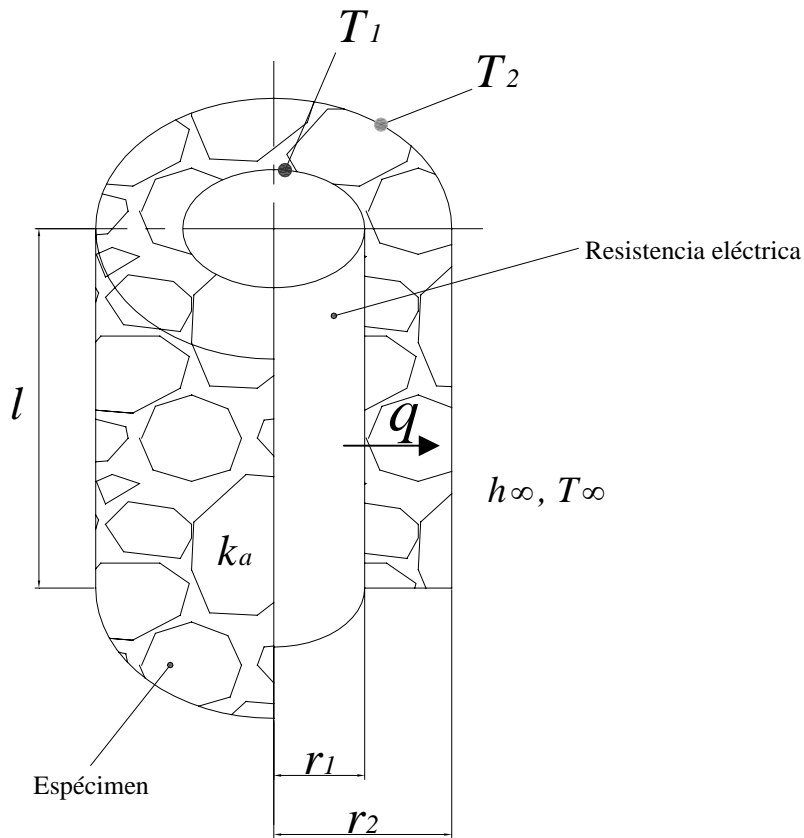
Si la distribución de temperaturas, ecuación “c”, se combina con la ley de Fourier, ecuación “d”:

$$q = \frac{2\pi kl}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2) \dots\dots(e)$$

De este resultado, es evidente que para la conducción radial en una pared cilíndrica, la resistencia térmica es de la forma:

$$R_t = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi kl} \dots\dots(f)$$

Analizando ahora el arreglo cilíndrico que a continuación se muestra en la figura, y que corresponde de manera general a la configuración física que tendrá el medidor de conductividad térmica:



puede apreciarse en el dibujo, que en la parte interior se encuentra una resistencia eléctrica proporcionando calor al sistema a temperatura constante. Envolviendo a la resistencia eléctrica se tiene el espécimen de material aislante, el cual a su vez se encuentra circundado por aire a temperatura ambiente sin corrientes convectivas.

La transferencia de calor total del sistema esta dada por:

$$q = \frac{T_1 - T_\infty}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_a l} + \frac{1}{h_\infty A}} \dots\dots(1)$$

sin embargo, como el flujo de calor es el mismo a través de todo el sistema, podemos considerar únicamente la sección que corresponde al aislante de prueba, es decir:

$$q = \frac{2\pi k_a l (T_1 - T_2)}{\ln(r_2 - r_1)} \dots\dots(2)$$

donde:

- T_1 : Temperatura entre la resistencia y el espécimen.
- T_2 : Temperatura en la superficie exterior del espécimen.
- r_1 : Radio de la resistencia.
- r_2 : Radio exterior del espécimen.
- q : Flujo calor a través del sistema.
- l : Longitud del sistema.
- k_a : Conductividad térmica del espécimen.

Esta ecuación representa el modelo matemático que teóricamente rige el comportamiento del calor a través del aislante de prueba en el equipo de medición. Conociendo el valor de la resistividad y corriente en la resistencia eléctrica se puede calcular la potencia eléctrica como:

$$q = RI^2 \dots\dots(3)$$

donde:

- q : Representa el flujo de calor que se conducirá a través de la muestra de aislante térmico y que es el mismo que se disipa en la resistencia eléctrica.
- R : Resistividad eléctrica de la resistencia.
- I : Corriente eléctrica.

Combinando estas dos ultimas ecuaciones (2 y 3) y despejando " k_a " se obtiene:

$$k_a = \frac{RI^2 \ln(r_2/r_1)}{2\pi l (T_1 - T_2)} \dots\dots(4)$$

de esta forma al medir las temperaturas T_1 y T_2 del sistema se pueden obtener valores experimentales de la conductividad térmica k_a del aislante de prueba a una temperatura media T_m igual a:

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \dots\dots(5)$$

Nota: Los valores de las variables que intervienen en los modelos matemáticos (ecuaciones 4 y 5) de este capítulo se establecerán posteriormente en función de los diseños térmico, mecánico y eléctrico del medidor de conductividad térmica y de las propias mediciones.

Diseño del sistema eléctrico.

El sistema eléctrico constituye una parte esencial del medidor de conductividad térmica en cuestión, no solo porque contempla la resistencia eléctrica que proporciona el calor al equipo sino también por los elementos de medición, control y protección que lo integran y que en conjunto satisfacen una buena parte de las condiciones establecidas en el diseño térmico explicado con anterioridad.

A continuación se hará referencia a cada uno de los elementos del sistema eléctrico, mencionando sus características técnicas y la función que desempeñan en el medidor de conductividad térmica.

Elemento calefactor.

Consiste en una resistencia eléctrica cilíndrica cuyo propósito es proporcionar un flujo radial de calor. Sus características constructivas y el aislamiento en los extremos de la misma garantizan que las pérdidas de calor en la dirección longitudinal sean mínimas.



Especificaciones eléctricas.

- Voltaje de alimentación: 220V de CA.
- Potencia: 2000W.
- Resistividad: 23.8Ω .

Dimensiones.

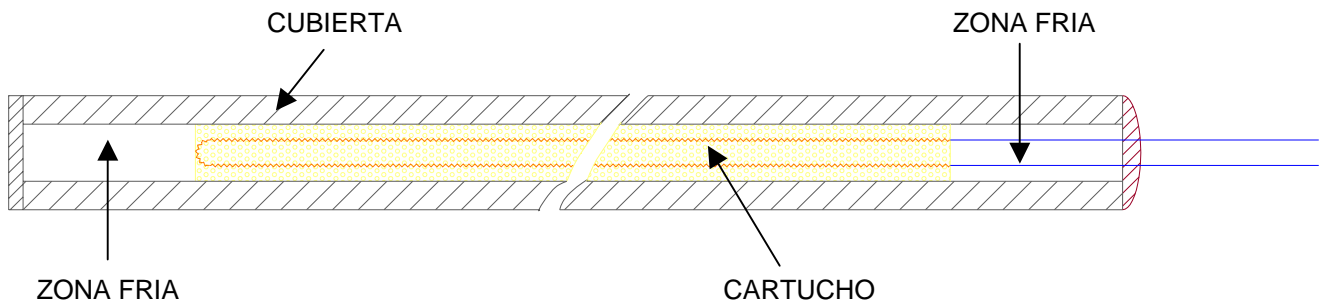
- Longitud (l): 1.15m.
- Diámetro (d): 1.905cm.
- $l/d = 60.36$.
- Superficie de calefacción para el ensayo: 622.41cm^2 .

Materiales de fabricación.

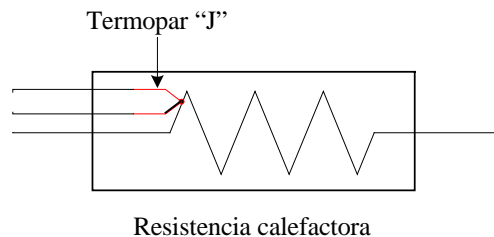
- Cartucho:
 - Resistencia: alambre de nicromel.
 - Aislamiento: asbesto.
- Cubierta: cilindro de acero.

Características constructivas.

- Se tiene internamente, una zona fría en cada extremo para minimizar las perdidas de calor por conducción en la dirección longitudinal:



- Para registrar la temperatura de la resistencia con fines de control, se cuenta con un termopar tipo "J" interno.



- Para conectar la resistencia y el sensor de temperatura al circuito eléctrico, se tiene un conector "Neutrick NL 4FC".

Conector neutrick



Instrumentación y control.

Se debe recordar que la conductividad térmica de los especímenes de materiales aislantes, según el modelo matemático que rige el comportamiento del sistema de medición, se calcula en función de otras variables. Al haber establecido las dimensiones y las características eléctricas del elemento calefactor, las variables asociadas al mismo pasan a ser constantes puesto que dicho elemento no cambia durante el ensayo, con lo que se reduce el número de variables que deberán monitorearse.

Termómetro.

Las temperaturas T_1 (temperatura en la superficie de la resistencia calefactora que corresponde a la temperatura en la superficie interior del espécimen de material aislante) y T_2 (temperatura en la superficie exterior del espécimen de material aislante) son dos de las variables que es necesario monitorear durante la prueba, porque según lo establecido en el diseño térmico, uno de los indicadores de que el sistema se ha estabilizado con respecto al tiempo, es precisamente el hecho de que las mencionadas temperaturas permanezcan constantes. Hay varios tipos de dispositivos comerciales que se utilizan para medir la temperatura, en este caso se emplea el termómetro digital "Fluke 52 K/J" de dos canales para llevar a cabo las lecturas de T_1 y T_2 .



Conector de entrada para termopar K ó J (canal 2).

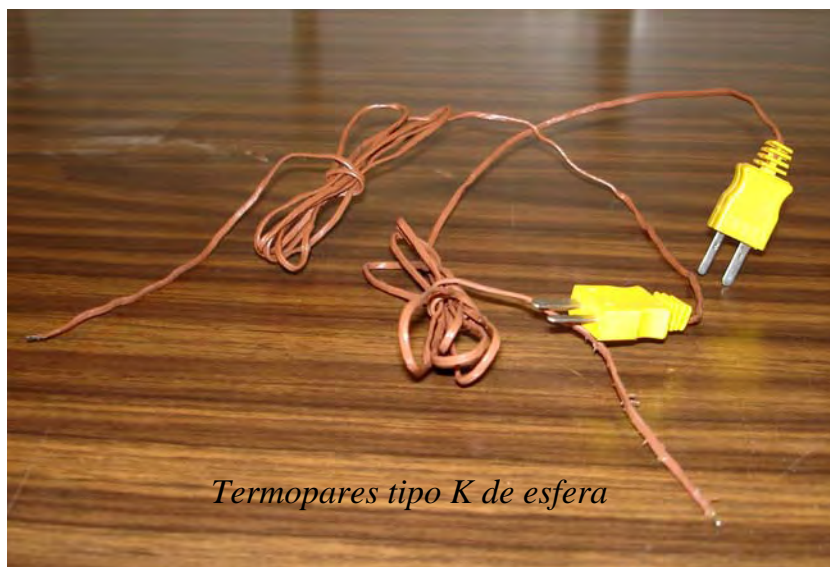
Datos técnicos del termómetro.

- Termopares: este instrumento, controlado por un microprocesador, es un termómetro digital concebido para usar termopares externos de los tipos K o J como sensores de temperatura.
- Rango de medición:
 - Termopar K: -200 °C a +1370 °C.
 - Termopar J: -200 °C a +760 °C.
- Resolución:
 - Alta: 0.1 °C.
 - Baja: 1 °C.
- Precisión:
 - Termopares K: $\pm 0.1\%$ de la lectura.
 - Termopares J: $\pm 0.1\%$ de la lectura.

- Protección de entrada: máximo voltaje de entrada en cualquier combinación de clavijas 60 VCC o 24 rms CA.
- Máximo voltaje común diferencial (voltaje máximo entre T_1 y T_2 durante las lecturas): 1 volt.
- Velocidad de lectura:
 - Un termopar conectado: 1 segundo/lectura.
 - Dos termopares conectados: 1.7 segundos/lectura.
- Límites ambientales de operatividad:
 - Temperatura: 0 °C hasta 50 °C.
 - Humedad:
 - 0 % a 90 % (0 °C a 50 °C).
 - 0 % a 70 % (35 °C a 50 °C).
 - Campos RF: fuertes campos de bajas frecuencias y radiofrecuencias pueden causar lecturas erróneas.
- Peso: 280 g.
- Dimensiones: 2.84x7.49x16.64 cm.
- Pila: estándar de 9V.
- Duración de la pila: 1200 horas, un indicador de pila descargada advierte de que quedan menos de 50 horas de pila útil.
- Conector de entrada: válido para conectores de termopar miniatura del tipo estándar (cuchillas planas con distancia central de 7.9 mm).

► *Termopares tipo K.*

Para captar las temperaturas T_1 y T_2 se emplean termopares K de esfera (incluidos con el termómetro), cuyas especificaciones se enlistan a continuación:



Termopares tipo K de esfera

Conductores.

- Aleación:
 - Conductor positivo: Cromo-níquel (chromel).
 - Conductor negativo: Aluminio-níquel (alumel).
- Calibre: alambre del n° 24 AWG.
- Longitud: 1.2 m.

Aislamiento.

- Material: teflón.
- Temperatura máxima: 260 °C.
- Aislamiento efectivo: 1 KV entre conductores y ambas capas aislantes.
- Voltaje máximo de contacto con seguridad: 24 VCA rmc ó 60 VCD.

Conectores.

- Tipo: Conector amarillo de mini-termopar con 7.9 mm de distancia entre cuchillas.
- Cuchilla angosta: conductor positivo.
- Cuchilla ancha: conductor negativo
- Temperatura máxima: 120 °C.

Limitaciones ambientales.

- Válido para atmósferas limpias, oxidantes o inertes.
- No válido para el vacío a altas temperaturas.
- Se corroe en atmósferas pobres de oxígeno de bajas temperaturas.
- Margen operativo: -40 °C a 260 °C.

Nota: las restricciones operativas se deben principalmente a las limitaciones térmicas de los aisladores del termopar.

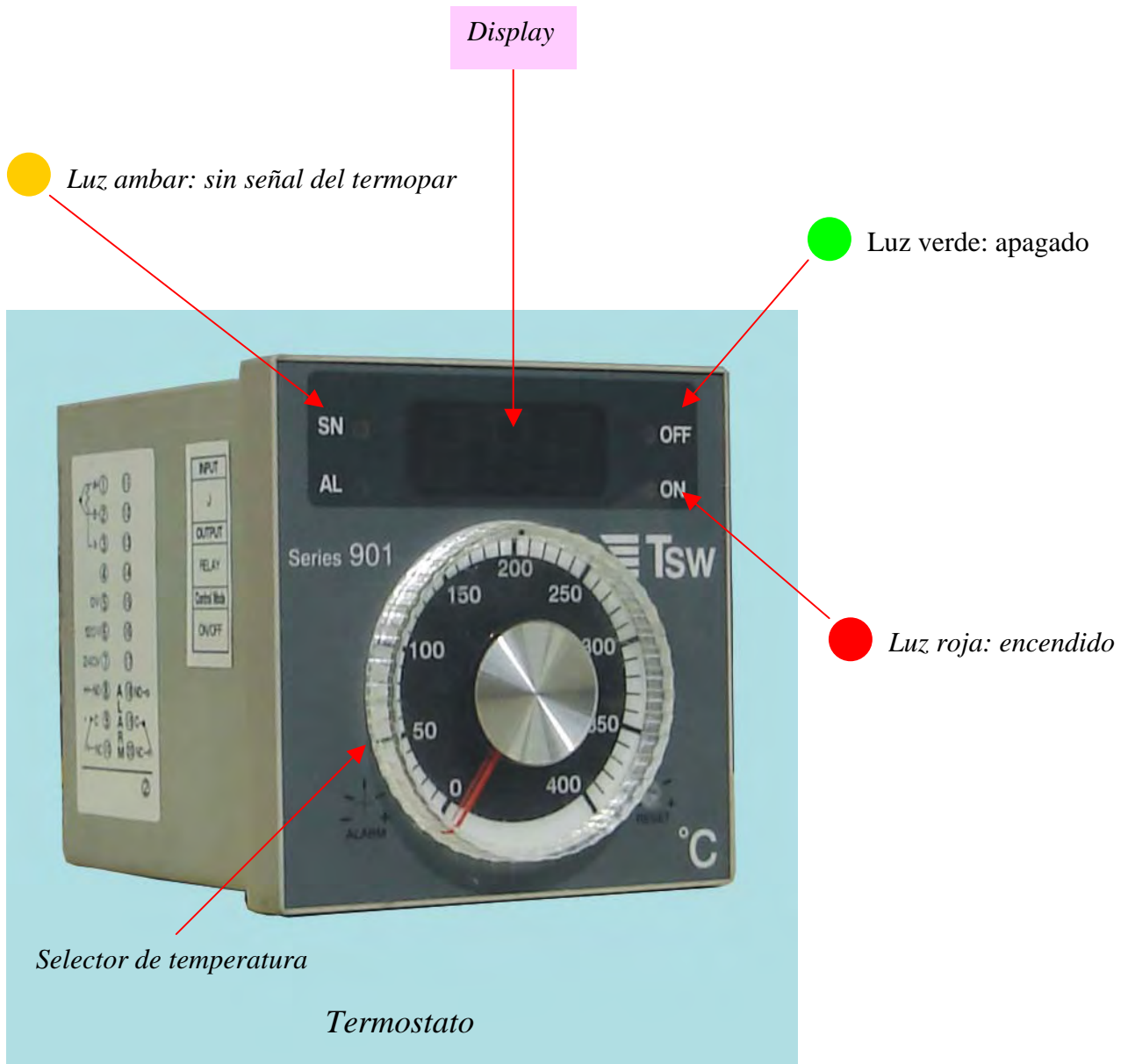
- Tiempo de medición (constante de tiempo): 2 segundos (para aire a temperatura ambiente a una atmósfera, a velocidad de 19.8 m/s).

Características termoeléctricas.

- Salida: 25 °C corresponde a 1.00 mV (empalme interno de referencia a 0 °C).
- Coeficiente Seebeck: 40 a 50 μ V/°C a 25 °C.

► *Termostato.*

El termostato es un elemento de control que se utiliza para seleccionar la temperatura máxima que ha de alcanzar la resistencia calefactora del medidor de conductividad térmica durante el ensayo, permitiendo de esta forma mantener una temperatura constante en la superficie de dicha resistencia. Como sensor de temperatura se usa un termopar tipo "J" y su señal eléctrica es enviada al termostato, el cual, al detectar baja temperatura mantiene energizado a través del contactor el circuito eléctrico que alimenta al elemento calefactor hasta alcanzar la temperatura seleccionada, en ese momento el circuito se abre (véase el diagrama "conexiones del termostato" al final de este capítulo). Aunque este es un proceso que se repite cíclicamente, rara vez llega a presentarse porque las temperaturas T_1 y T_2 siempre estarán por debajo de la temperatura máxima seleccionada en el termostato, ya que esta medida brinda una mayor estabilidad al flujo de calor que se disipa en la resistencia calefactora.

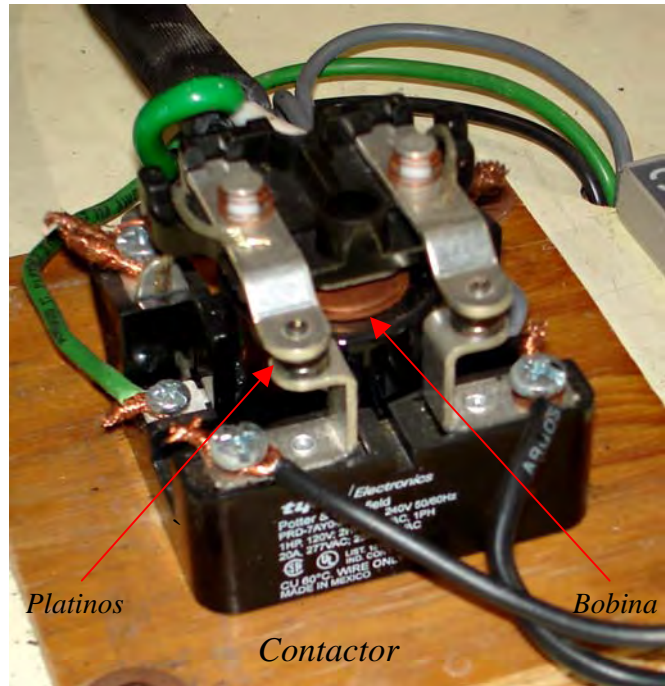


Especificaciones técnicas del termostato.

- Marca: ATTO.
- Modelo: 901-J-400-O/O-I-R.
- Sensor: Termopar tipo J.
- Rango: 0 °C a +400 °C.
- Tipo: ON/OFF.
- Acción: Inversa (calentamiento).
- Salida: Relevador.
- Alimentación: 120/240V CA.

► *Contactor.*

Esta pieza de equipo esta constituida por una bobina y dos pares de platinos. Su tarea es permitir el paso de la corriente eléctrica para hacer funcionar la resistencia calefactora. La acción de cierre y apertura de este elemento es controlada por el termostato.



Especificaciones generales del contactor.

- Marca: *Tyco/Electrónica (Potter & Brunfield).*
- Modelo: PRD-7AYO-240.
- Alimentación: 240V, 50/60Hz.
- Capacidad: 25A, 240VCA.

► *Reóstato.*

Por medio de esta resistencia variable de accionamiento mecánico, se controla la magnitud de la corriente eléctrica del circuito que alimenta a la resistencia calefactora del sistema de medición. Dicha corriente tiene una relación directamente proporcional con el flujo de calor que se disipa en el elemento calefactor del equipo, de ahí la importancia de tener un buen control sobre la misma.



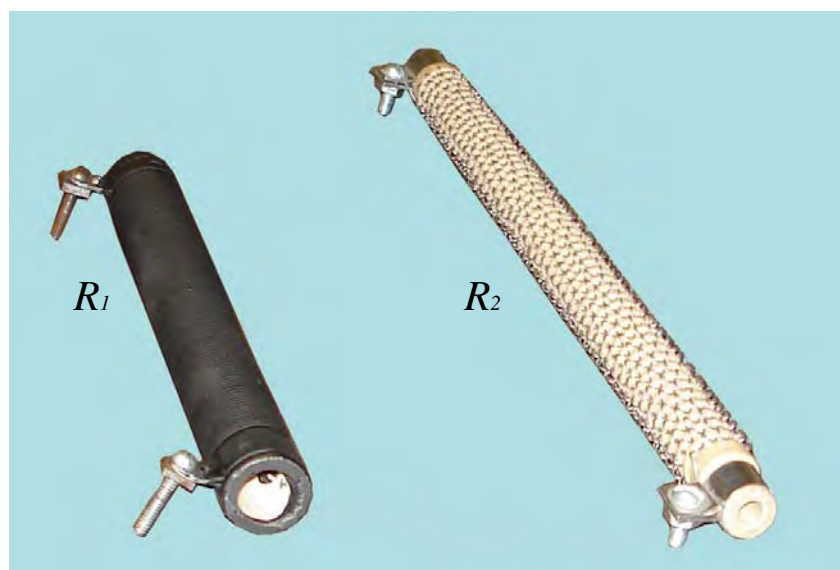
Reóstato

Datos técnicos del reóstato.

- Marca: *WESTINGHOUSE.*
- Resistividad eléctrica: $200\ \Omega$.
- Potencia: 300 Watts.

► *Banco de resistencias fijas.*

Su función radica en reducir la corriente eléctrica que circula a través de la resistencia calefactora, con lo cual también se disminuye el flujo de calor que se disipa en la misma. Las resistencias fijas pueden utilizarse individualmente o simultáneamente conectándolas en serie entre si, o no usarse, según los requerimientos de flujo de calor para la prueba. De momento el banco cuenta con dos resistencias fijas (R_1 y R_2) pudiendo aumentarse su número de ser necesario.



Datos técnicos de las resistencias fijas.

RESISTENCIA FIJA		R ₁	R ₂
ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS	Potencia	100W	1000W
	Resistividad	100Ω	100Ω
DIMENSIONES	Longitud	16.5 cm	25.5 cm
	Diámetro	2.0 cm	2.0 cm
MATERIALES DE FABRICACIÓN	Alambre	Nicromel	Nicromel
	Aislador	Asbesto	Asbesto

► *Amperímetro.*

La corriente eléctrica que circula a través de la resistencia calefactora, es otra de las variables que interviene en el calculo de la conductividad térmica según el modelo matemático que regula el funcionamiento del medidor, por lo tanto también debe monitorearse y para ello se ocupa un multímetro digital en modo amperímetro.



*Selector de funciones.
(Modo Amperímetro)*



Multímetro digital STEREN MUL-270

Especificaciones generales del multímetro.

- Marca: STEREN.
- Modelo: MUL-270.
- Precisión: esta especificada para \pm (% de lectura + número menos significativo de dígitos) a 23 °C con humedad relativa de 75%.
- Método de medición: circuito integrado de gran escala con convertidor de A/D con doble integración.
- Funciones: medidor de voltajes de CD y de CA, medidor de amperajes de CD y de CA, medidor de resistencia eléctrica, medidor de capacitancia,, medidor de frecuencia, medidor de temperatura, probador audible de diodos y de continuidad, probador de transistores bipolares.

- Rango: manual.
- Temperatura de operación: 0 °C a 40 °C.
- Temperatura de almacenaje: -10 °C a 50 °C.
- Pantalla: cristal liquido (LCD), cuenta máxima 1999, actualización de datos 2 segundos.
- Auto apagado después de 15 minutos.
- Alimentación: una batería de 9V alcalina o carbón zinc.
- Dimensiones: 190 x 88 x 34 mm.
- Peso: 223 gramos aproximadamente.

Modo amperímetro de CA.

Rango	Resolución	Precisión
20 mA	10 μ A	\pm 1.0%
200 mA	100 μ A	\pm 1.8%
20 A	10 mA	\pm 3.0%

Medición de amperaje de CA.

1. Conectar la punta de prueba roja al conector hembra (jack) marcado como “mA”, cuando se mida hasta 200 mA; cuando se mida 20 A hay que conectar la punta roja en “A” y la punta negra al conector hembra (jack) marcado como “COM”.



2. Fijar el selector giratorio en la escala de A~ y seleccionar el rango.
3. Si el orden de magnitud de corriente es desconocida, fijar al rango máximo y reducir hasta que la lectura sea adecuada.
4. Nunca exceder los valores máximos indicados.
5. Conectar las puntas de prueba al dispositivo o circuito e iniciar la medición.

Conductores eléctricos y protecciones.

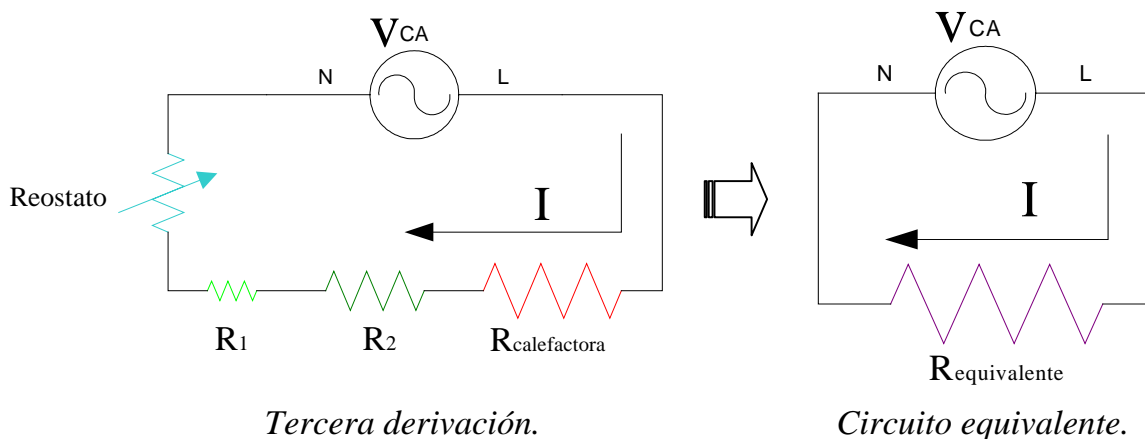
En toda instalación eléctrica es muy importante que la capacidad de las protecciones y el calibre de los cables o alambres por donde ha de circular la corriente eléctrica sea el adecuado para evitar accidentes o gastos innecesarios. Esta sección del presente trabajo corresponde a la memoria de cálculo con la que se determinó el calibre de los conductores que alimentan las cargas eléctricas del circuito.

Las cargas eléctricas del medidor de conductividad térmica se pueden dividir de manera general en dos grupos: resistencias eléctricas y electrónica del circuito, véase la siguiente tabla:

	RESISTENCIAS	ELECTRÓNICA
ELEMENTOS OPERATIVOS	<i>Calefactora</i>	<i>Bobina del contactor</i>
	<i>R₁</i> <i>R₂</i>	
ELEMENTOS DE CONTROL	<i>Reóstato</i>	<i>Termostato</i>

Básicamente se trata de una instalación con un circuito primario y tres circuitos derivados alimentados con 220V de CA (véase “diagrama eléctrico general” al final de este capítulo). El circuito primario provee de energía eléctrica a los tres circuitos derivados, siendo la primera derivación el circuito que alimenta la electrónica del control de temperatura, la segunda derivación suministra energía a la bobina del contactor a través de un relevador instalado en el interior del termostato; y la tercera derivación esta constituida por la resistencia calefactora, el banco de resistencias (R_1 y R_2) y el reóstato conectados en serie y alimentados a través de los platinos del contactor.

Para un circuito en serie, la corriente eléctrica es la misma para todos sus elementos mientras que el voltaje es distinto para cada uno, pero la suma de los mismos es igual al voltaje de la fuente que alimenta dicho circuito. Partiendo de este postulado y considerando que el voltaje de alimentación es constante, se tiene que para la tercera derivación la corriente es la misma para todas las resistencias y la suma de cada uno de los voltajes es igual al voltaje de alimentación (220V CA); por otro lado, considerando la resistencia equivalente del circuito y aplicando la ley de Ohm se obtiene lo siguiente:



$$I = I_{R_{calefactora}} = I_{R_1} = I_{R_2} = I_{R_{reostato}} \dots\dots(1)$$

$$V = V_{R_{calefactora}} + V_{R_1} + V_{R_2} + V_{R_{reostato}} \dots\dots(2)$$

$$R_{equivalente} = R_{calefactora} + R_1 + R_2 + R_{reostato} \dots\dots(3)$$

$$\boxed{V = R_{equivalente} \cdot I} \dots\dots(4)$$

De la ecuación “4” (ley de Ohm) y recordando que V es constante, mientras que $R_{equivalente}$ e I son variables, se concluye que si aumenta la resistencia del circuito la corriente que circula a través de él disminuye, y viceversa si la resistencia disminuye la corriente aumenta. Por lo tanto, la corriente máxima en el circuito estará presente cuando la resistencia equivalente sea mínima siendo este dato el que se tome en cuenta para determinar el calibre de los conductores eléctricos y la capacidad de su protección. Si se toma en cuenta que el reóstato es una resistencia variable, en un momento dado su resistividad eléctrica prácticamente es cero; por otra parte, el banco de resistencias fijas puede no ser parte del circuito dependiendo de la magnitud del flujo de calor que se requiera disipar en la resistencia calefactora, el cual como ya se ha indicado en otras ocasiones está directamente relacionado con la cantidad de corriente eléctrica que circula en el circuito (tercera derivación), esto quiere decir, que el valor mínimo de la resistencia equivalente del circuito no es otro que el de la propia resistencia calefactora.

Despajando a la corriente eléctrica I de la ecuación “4”:

$$I = \frac{V}{R_{equivalente(\min)}} \dots\dots(5)$$

donde:

I = corriente eléctrica.

V = voltaje de alimentación = 220V CA.

$R_{equivalente(\min)}$ = resistencia equivalente mínima = resistencia calefactora = 23.8Ω .

Sustituyendo valores en la ecuación “5”:

$$I = \frac{220V}{23.8\Omega} = 9.24A \text{ es la corriente máxima que circulará en el circuito (derivación 3).}$$

En la tabla que aparece a continuación se presentan los valores de corriente eléctrica máximos recomendados para distintos calibres AWG de conductores aislados. El dato de corriente eléctrica $I=9.24A$, se buscó en la tabla ya mencionada en la columna marcada como: GRUPO A-TEMPERATURA DE SERVICIO-60°C y se encontró que el valor más aproximado a la magnitud de corriente eléctrica calculada es el de 10 amperes, al cual le corresponde una sección AWG del # 16.

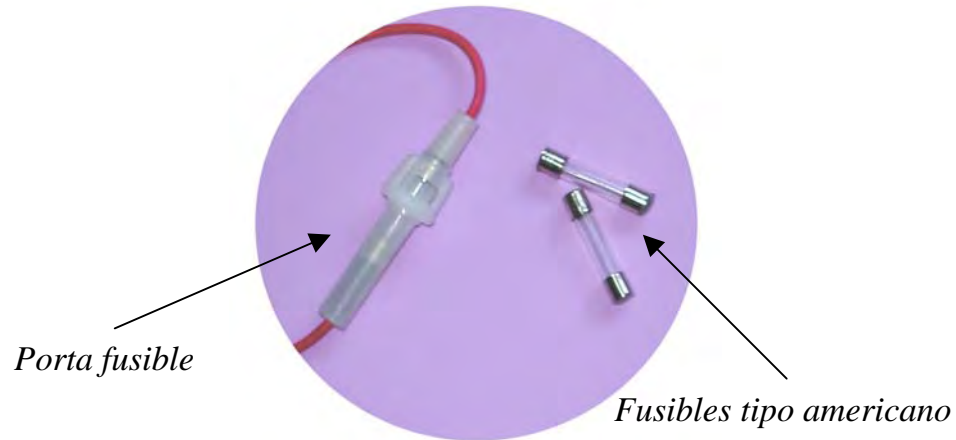
El cableado de la tercera derivación del sistema eléctrico se realizó con conductores calibre 16 AWG como mínimo. Para fines prácticos y tomando en cuenta que la tecnología del termostato y la bobina del contactor requieren corrientes del orden de mili amperes, en los circuitos derivados que energizan a dichos elementos se usó el mismo calibre de conductores que en la tercera derivación del sistema eléctrico.

INTENSIDAD DE CORRIENTE ADMISIBLE PARA CONDUCTORES DE COBRE (Secciones AWG)								
AISLADOS		TEMPERATURA DE SERVICIO:			60°	75°	90°C	
SECCIÓN Nominal (mm ²)	SECCIÓN AWG	GRUPO A TEMPERATURA DE SERVICIO			GRUPO B TEMPERATURA DE SERVICIO			DESNUDO
		60°C	75°C	90°C	60°C	75°C	90°C	
0,32	22	3	3					
0,51	20	5	5					
0,82	18	7,5	7,5					
1,31	16	10	10					
2,08	14	15	15	25	20	20	30	
3,31	12	20	20	30	25	25	40	
5,26	10	30	30	40	40	40	55	
8,36	8	40	45	50	55	65	70	90
13,30	6	55	65	70	80	95	100	130
21,15	4	70	85	90	105	125	135	150
26,67	3	80	100	105	120	145	155	200
33,62	2	95	115	120	140	170	180	230
42,41	1	110	130	140	165	195	210	270
53,49	1/0	125	150	155	195	230	245	310
67,42	2/0	145	175	185	225	265	285	360
85,01	3/0	165	200	210	260	310	330	420
107,2	4/0	195	230	235	300	360	385	490
127,0	250 MCM	215	255	270	340	405	425	540
152,0	300 MCM	240	285	300	375	445	480	610
177,3	350 MCM	260	310	325	420	505	530	670
202,7	400 MCM	280	355	360	455	545	575	730
253,4	500 MCM	320	380	405	475	620	660	840
304,0	600 MCM	355	420	455	515	690	740	
354,7	700 MCM	385	460		630	755		
380,0	750 MCM	400	475	500	655	785	845	
405,4	800 MCM	410	490		680	815		
456,0	900 MCM	435	520		730	870		
506,7	1000 MCM	455	545	585	780	925	1000	
633,4	1250 MCM	495	590		890	1065		
760,1	1500 MCM	520	625		980	1175		
886,7	1750 MCM	545	650		1070	1280		
1013,0	2000 MCM	560	665		1155	1385		

Grupo A: hasta 3 conductores en tubo o en cable o directamente enterrados. Grupo B: conductor simple al aire libre.


De los elementos alimentados con corriente alterna en el medidor de conductividad térmica, el termostato es el mas susceptible a las variaciones de voltaje, por esta razón se instaló en la línea que alimenta su electrónica un fusible tipo americano F0.5A/250V como protección. El circuito derivado que alimenta la resistencia calefactora también fué protegido con un fusible tipo americano F10A/250V. Cabe mencionar que la bobina


del contactor aunque no cuenta directamente con un fusible que la proteja, se debe recordar que es alimentada a través del relevador del termostato, de tal forma que si el termostato se protege, la bobina del contactor automáticamente también queda protegida.

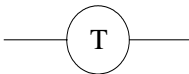


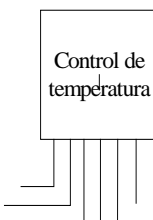
Finalmente, para la alimentación general de los tres circuitos derivados que se han venido detallando, se empleó cable de uso rudo 2X14 AWG. En la tabla anterior puede observarse que para un cable aislado con sección AWG del # 14, la intensidad de la corriente eléctrica correspondiente es de 15 amperes, lo que hace al cable de uso rudo 2X14 AWG adecuado, según el análisis, para los requerimientos eléctricos del medidor de conductividad térmica.

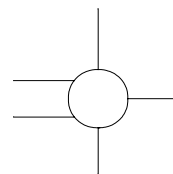
Simbología.


- Resistencia calefactora. 

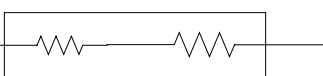
- Termopar. 

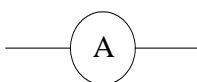
- Termómetro. 


- Termostato. 

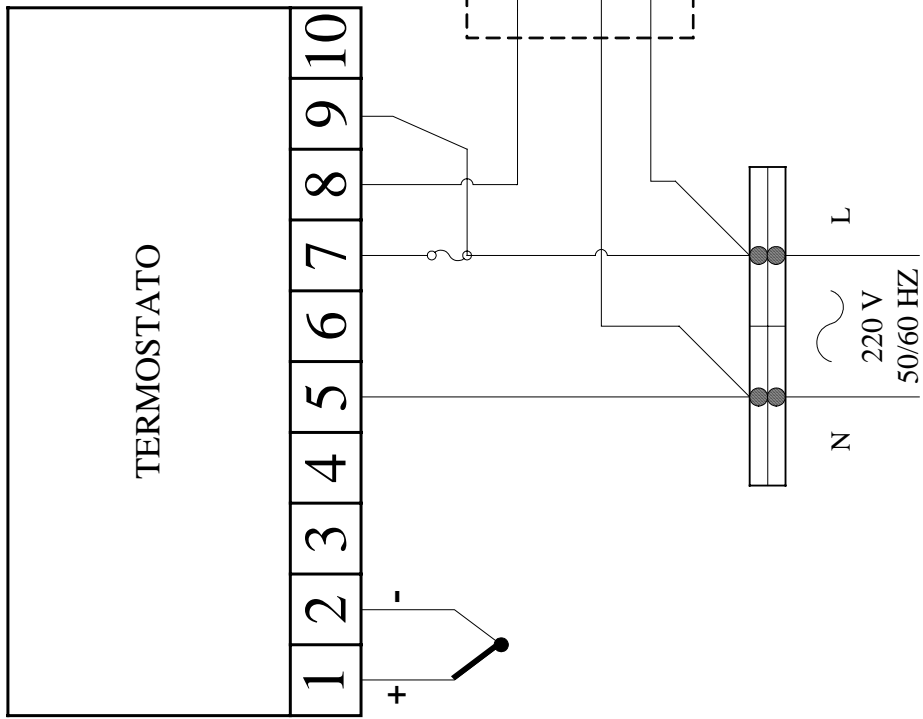
- Contactor. 


- Reóstato. 

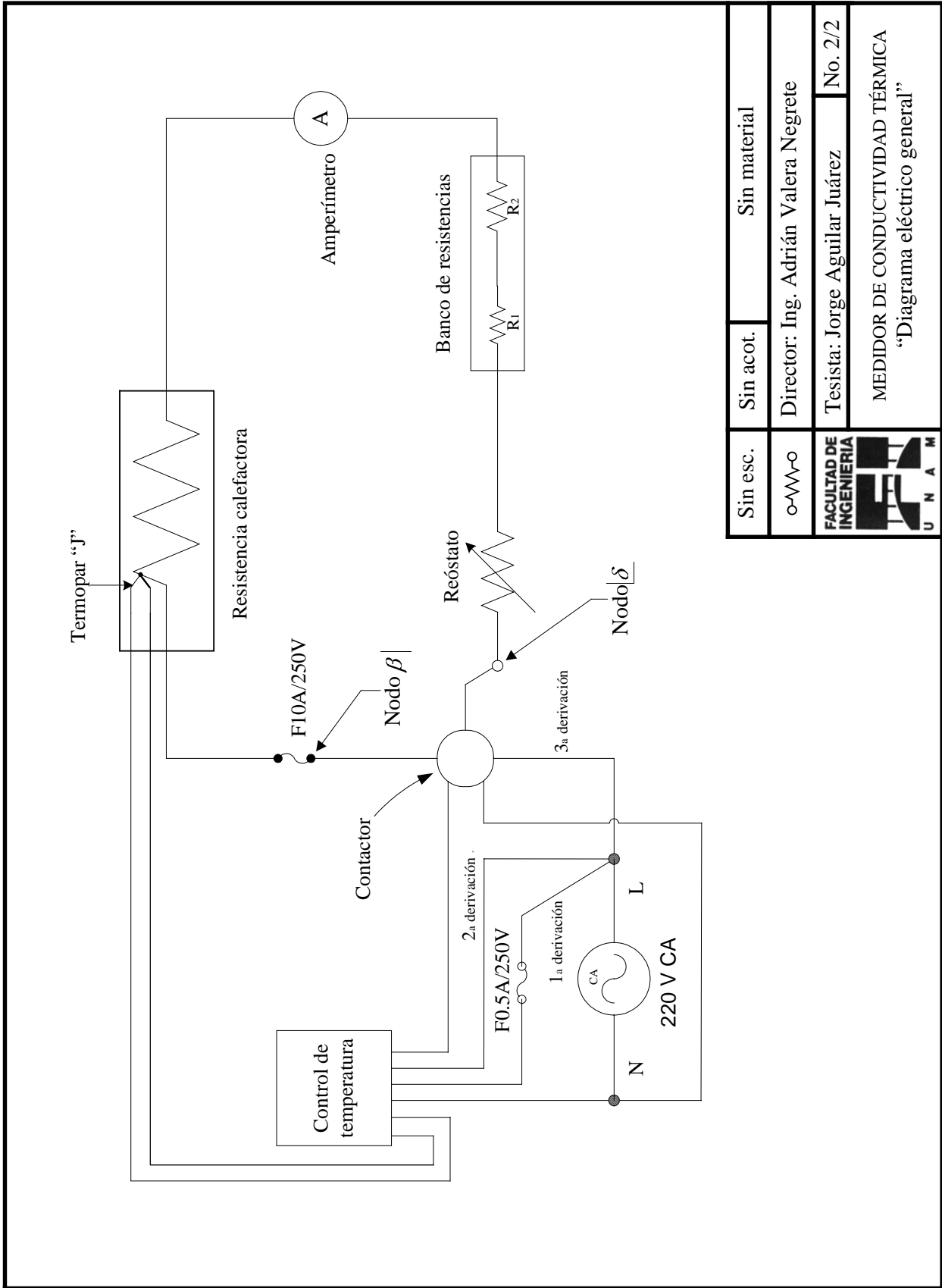
- Banco de resistencias fijas. 

- Amperímetro. 

- Fusible. 



Sin esc.	Sin acot.	Sin material
o-∞-o	Director: Ing. Adrián Valera Negrete	
Tesisista: Jorge Aguilar Juárez		No. 1/2
		
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "Conexiones del termostato"		



Sin esc.	Sin acot.	Sin material
o~o	Director: Ing. Adrián Valera Negrete	No. 2/2
FACULTAD DE INGENIERIA U N A M	Tesista: Jorge Aguilar Juárez	MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "Diagrama eléctrico general"

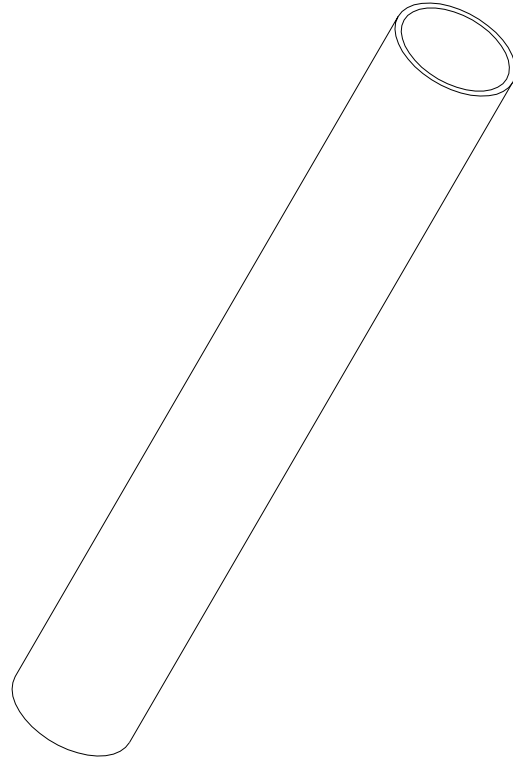
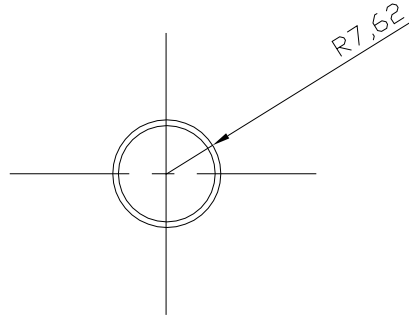
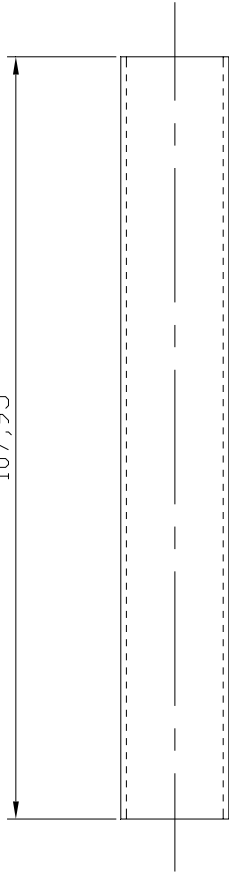
Diseño mecánico.

Como se ha mostrado, la fuente de calor del sistema de medición de conductividad térmica, está compuesta por una resistencia eléctrica cilíndrica, la cual presenta requerimientos físicos tanto de soporte como de resguardo. Estas necesidades, se satisfacen mediante elementos mecánicos que no solo le brindan consistencia estructural al sistema cilíndrico, sino que también contribuyen a reproducir las condiciones del diseño térmico expuesto anteriormente. Con la finalidad de proporcionar una descripción detallada del diseño mecánico del equipo en cuestión, se elaboró la siguiente lista de partes que se complementa con una serie de planos a los que se hace referencia en forma correspondiente.

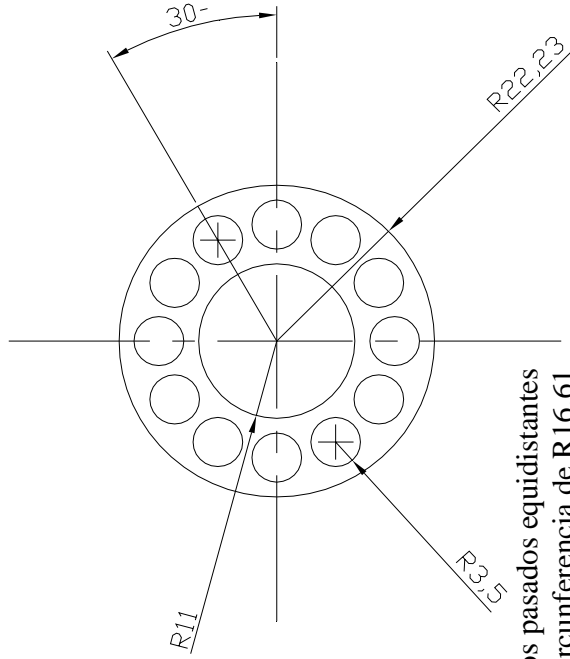
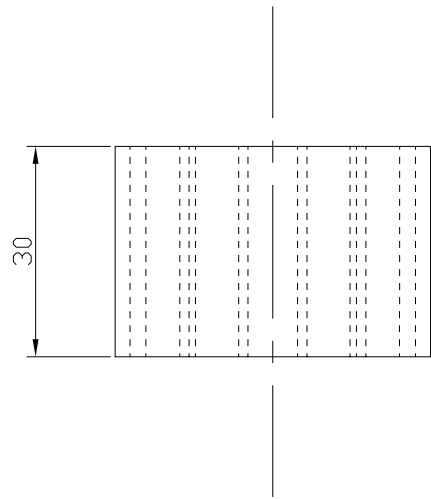
<i>Elemento mecánico</i>	<i>Función</i>	<i>Nº de parte</i>	<i>Nº de plano</i>
Envolvente	Protege de corrientes de aire al sistema.	PM1	1/7
Aislador "A"	No solo aísla térmicamente el extremo izquierdo de la resistencia calefactora, también le sirve como soporte primario.	PM2	2/7
Aislador "B"	Aísla térmicamente el extremo derecho de la resistencia calefactora y le sirve como soporte primario.	PM3	3/7
Soporte "A"	Alberga en su parte central al aislador "A" y sostiene el extremo izquierdo de la resistencia calefactora y de la envolvente.	PM4	4/7
Soporte "B"	Sostiene el extremo derecho de la envolvente.	PM5	5/7
Soporte "C"	En su parte central se ubica el aislador "B" y sostiene el extremo derecho de la resistencia calefactora.	PM6	6/7

El plano No.7/7 muestra en conjunto las partes mecánicas: PM1, PM2, PM3, PM4, PM5 y PM6 ya descritas.

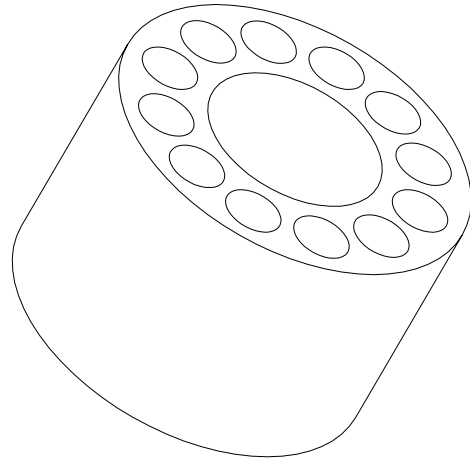
107,95




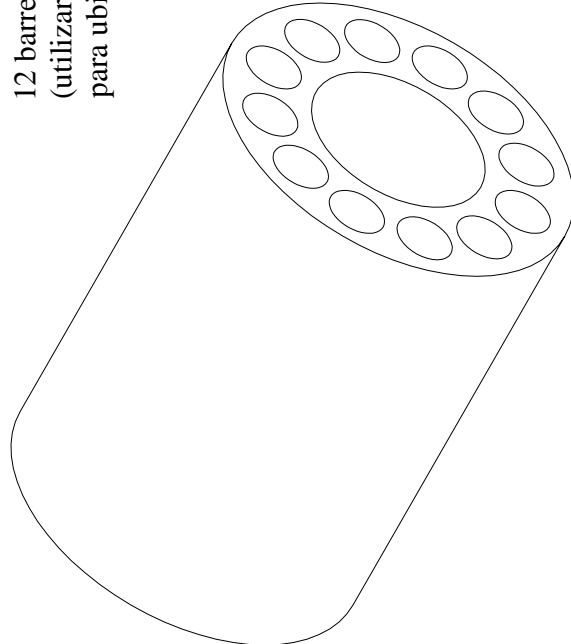
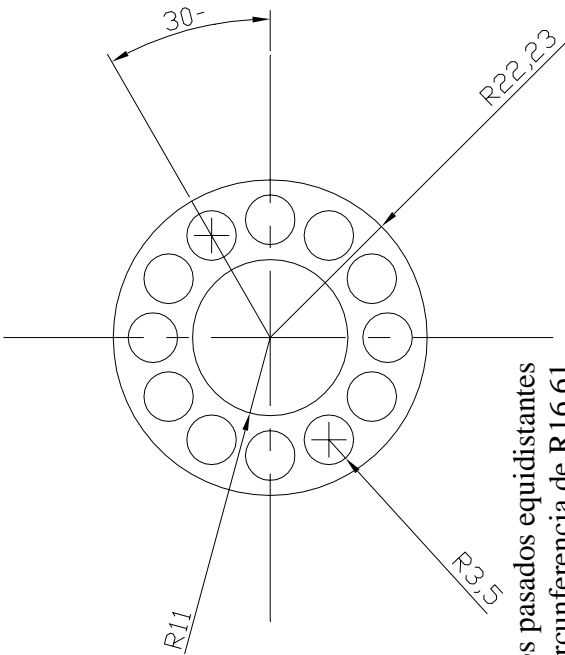
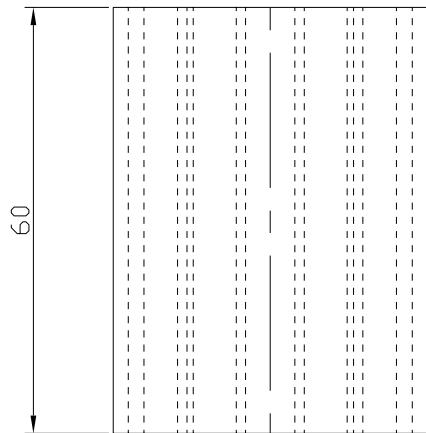
Esc. 1:10	Acot. en cm	Material: acrilico de 8mm de espesor
	Director: Ing. Adrián Valera Negrete	
	Tesista: Jorge Aguilar Juárez	No.1/7
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "Envolvente"		




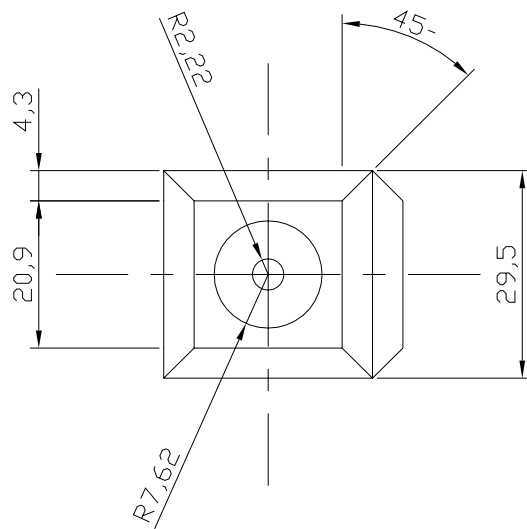
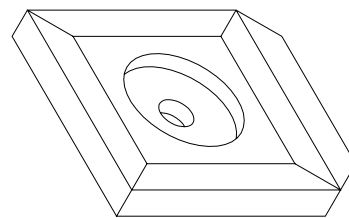
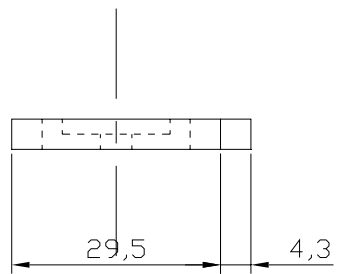
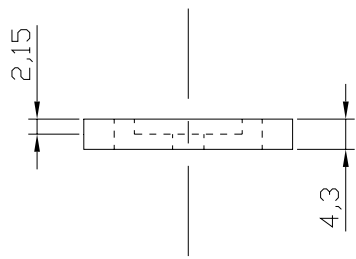
12 barrenos pasados equidistantes
(utilizar circunferencia de R16.61
para ubicar sus centros)



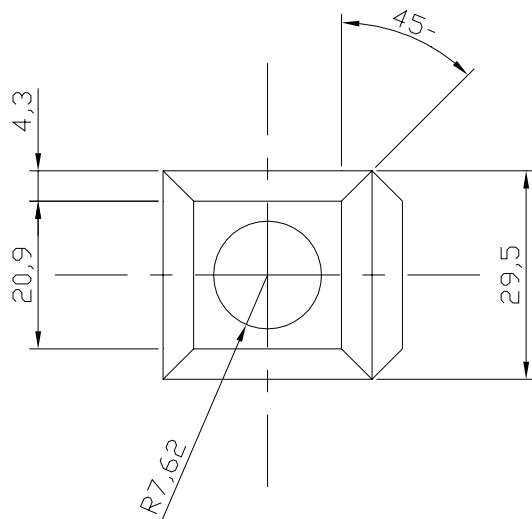
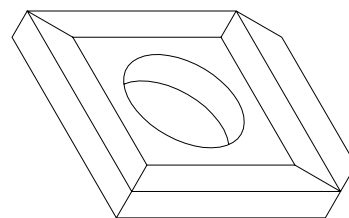
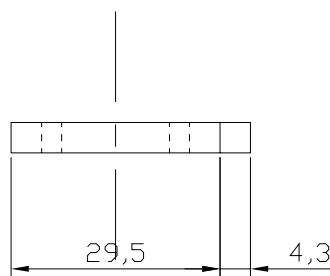
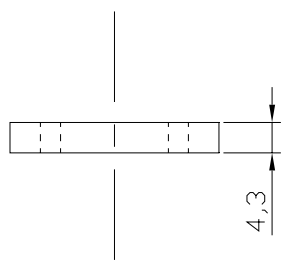
Esc. 1:1	Acot. en mm	Material: asbesto
	Director: Ing. Adrián Valera Negrete	
	Tesista: Jorge Aguilar Juárez	No.2/7
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "Aislador A"		



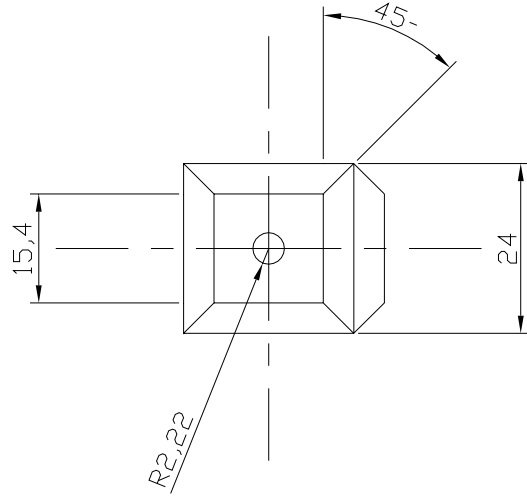
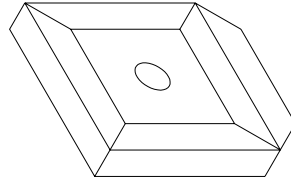
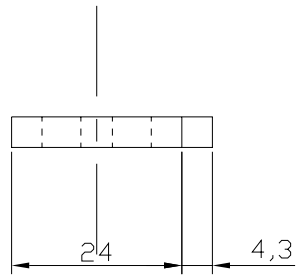
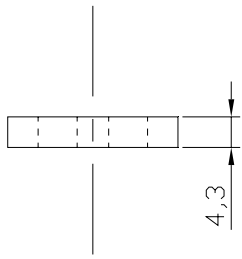
Esc. 1:1	Acot. en mm	Material: asbesto
		
Director: Ing. Adrián Valera Negrete		No.3/7
Tesisista: Jorge Aguilar Juárez		
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "Aislador B"		




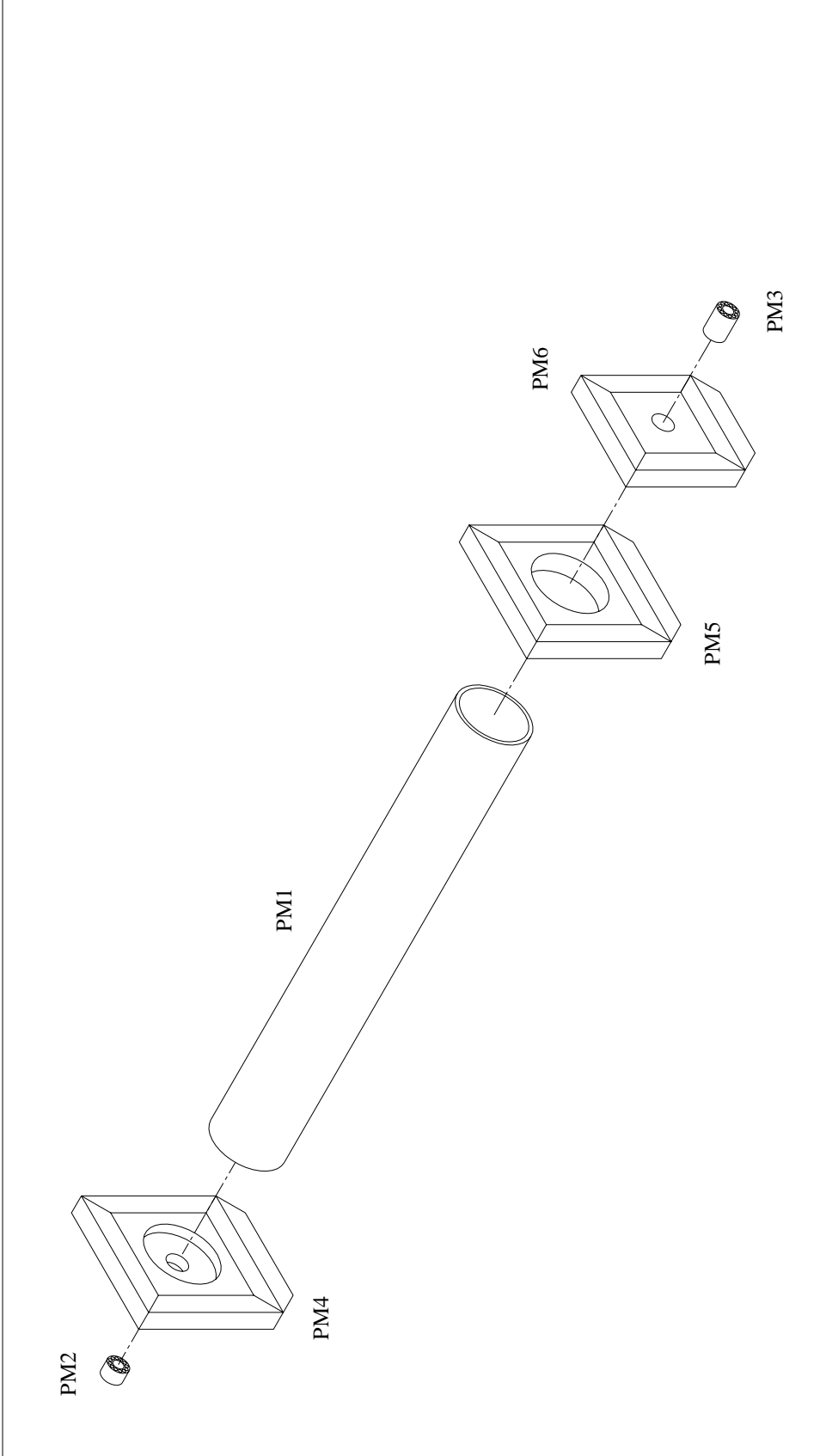
Esc. 1:10	Acot. en cm	Material: placa y perfil de aluminio
	Director: Ing. Adrián Valera Negrete	
	Tesista: Jorge Aguilar Juárez	No.4/7
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "Soporte A"		




Esc. 1:10	Acot. en cm	Material: placa y perfil de aluminio
	Director: Ing. Adrián Valera Negrete	
	Tesista: Jorge Aguilar Juárez	No.5/7
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "Soporte B"		



Esc. 1:10	Acot. en cm	Material: placa y perfil de aluminio
	Director: Ing. Adrián Valera Negrete	
	Tesista: Jorge Aguilar Juárez	No.6/7
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "Soporte C"		



Sin esc.	Sin acot.	Sin material
Director: Ing. Adrián Valera Negrete		
Tesista: Jorge Aguilar Juárez		No. 7/7
FACULTAD DE INGENIERIA  U N A M		
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "Conjunto mecánico"		

CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TERMICA.

Con los diseños térmico, eléctrico y mecánico proyectados, se procedió a la fabricación del medidor de conductividad térmica para aislantes térmicos.

Lo primero que se hizo, fue construir con placa y perfil de aluminio remachados (foto 1), los tres soportes del sistema cilíndrico. Un tubo de acrílico cortado a la medida, dio origen a la envolvente que protege de efectos convectivos a la resistencia calefactora, siendo esta última, diseñada y manufacturada específicamente, para satisfacer las necesidades planteadas en el diseño térmico en lo referente al flujo de calor. Los aisladores de la resistencia calefactora, son productos de línea que únicamente se cortaron a la medida. Mediante ajuste mecánico, se acoplaron los aisladores y la envolvente a los soportes del sistema (se empleó silicón para sellar las uniones, foto 2).



Foto 1. Perfil y placa remachados.



Foto 2. Ensamblajes sellados con silicón.

En segundo lugar, se acondicionó a manera de banco de pruebas, una mesa de 1m de ancho por 1.82m de largo. En ella se instalaron: el conjunto mecánico descrito en el párrafo anterior, el termostato, el contactor y el banco de resistencias fijas, usando en todos los casos, tornillos con tuercas como elementos de fijación.

El tercer paso de la etapa constructiva, consistió en instalar el cableado y protecciones del sistema eléctrico del equipo. Por ser elementos fijos, las conexiones del contactor, las resistencias fijas (R_1 y R_2) y el termostato, se efectuaron mediante mordazas (fotos 3, 4 y 5 respectivamente); en tanto que las conexiones de la resistencia calefactora, el reóstato, el amperímetro y el termómetro se llevan a cabo a través de conectores hembra y macho (fotos 6, 7, 8 y 9 respectivamente), porque se necesita que los elementos de este segundo grupo sean móviles, especialmente la resistencia calefactora, que debe desmontarse del sistema cilíndrico para instalar la muestra del material termoaislante que se someterá a la prueba.



Foto 3. Conexión del contactor.



Foto 4. Conexión de R_2 .



Foto 5. Conexiones del termostato.



Foto 6. Conectores neutrick de la resistencia calefactora.



Foto 7. Conectores banana del reóstato.



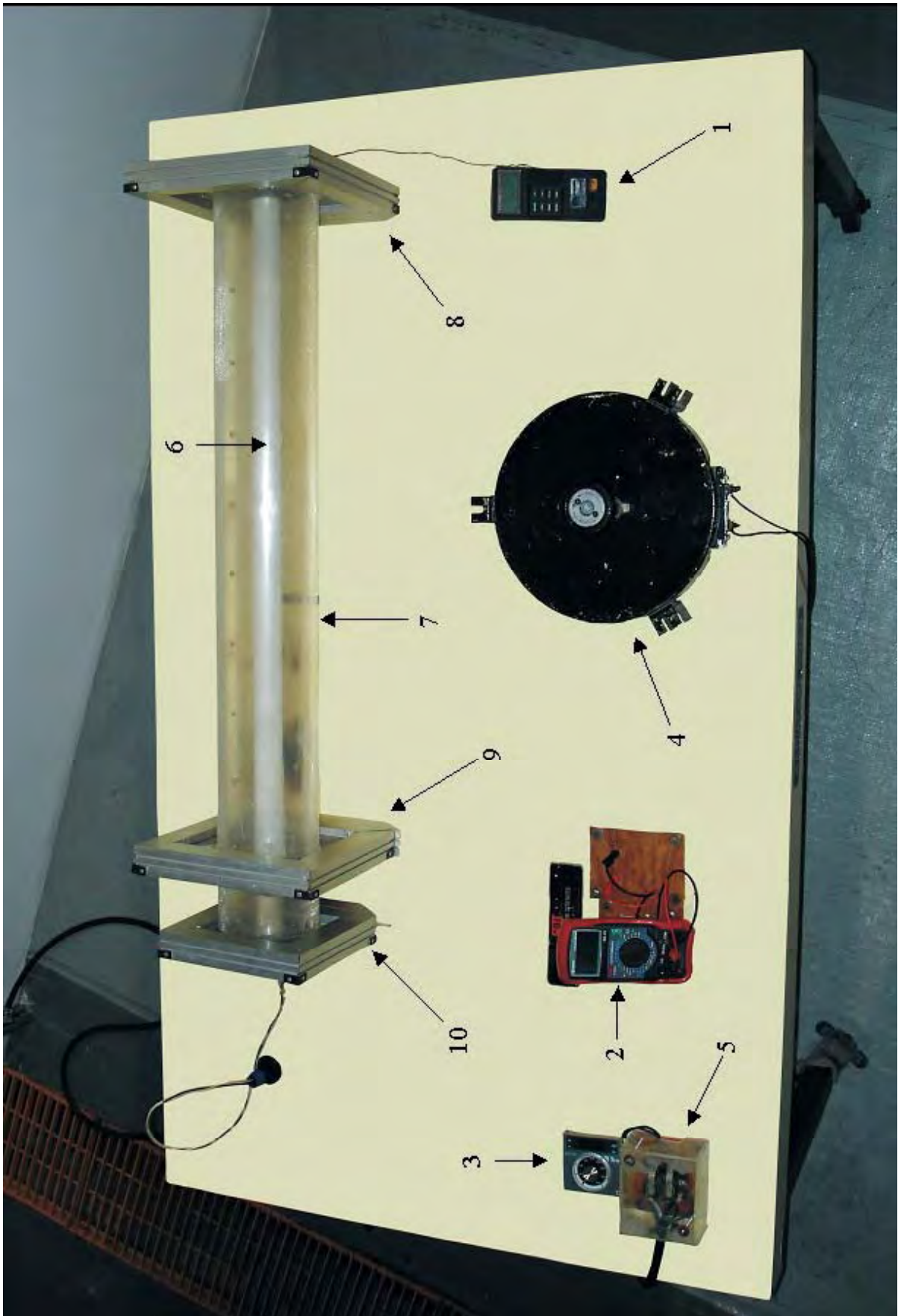
Foto 8. Conectores banana del amperímetro.



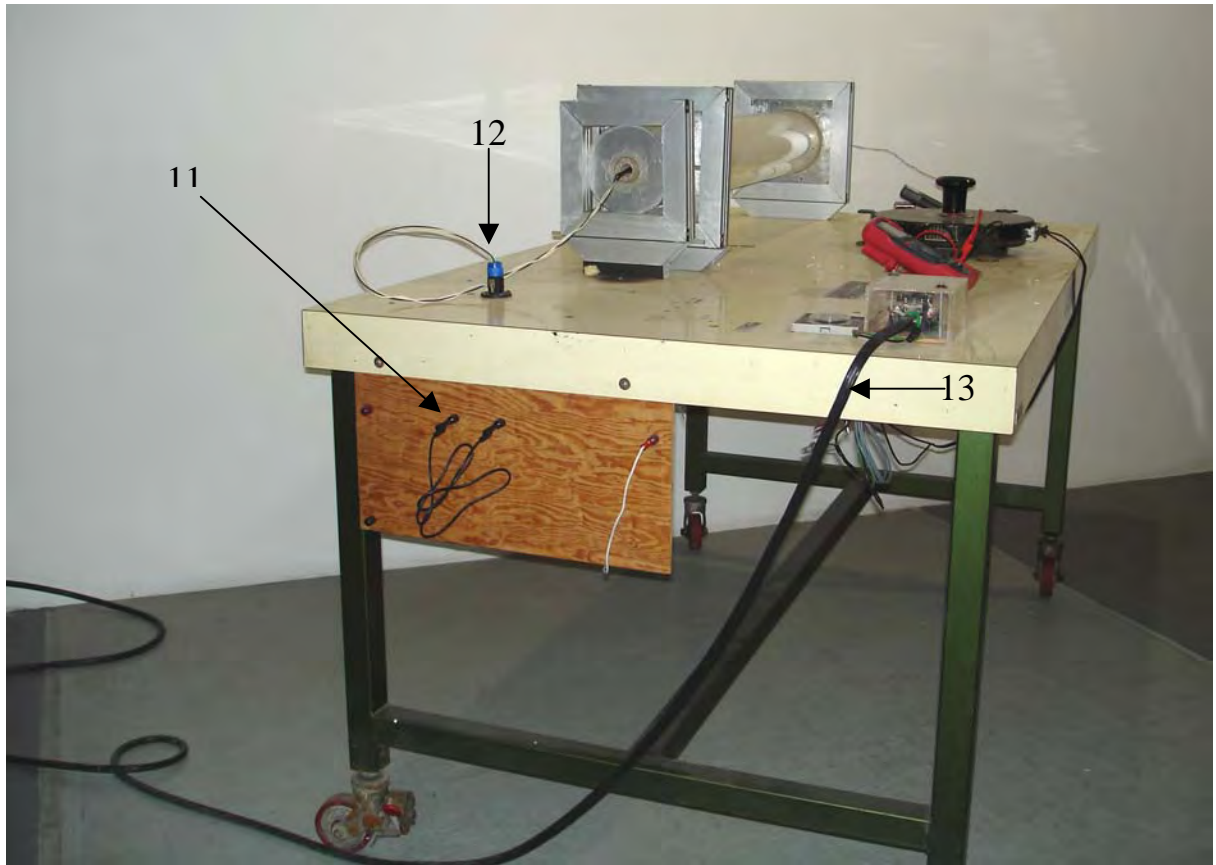
Foto 9. Conectores mini-termopar del termómetro.

A continuación, se presentan una guía de localización de partes, constituida por una tabla y dos fotografías que muestran de manera general la configuración del medidor de conductividad térmica.

<i>P A R T E S</i>	<i>NÚMEROS DE IDENTIFICACIÓN</i>
<i>Termómetro</i>	1
<i>Amperímetro</i>	2
<i>Termostato</i>	3
<i>Reóstato</i>	4
<i>Contactador</i>	5
<i>Resistencia calefactora</i>	6
<i>Envolverte</i>	7
<i>Soporte "A"</i>	8
<i>Soporte "B"</i>	9
<i>Soporte "C"</i>	10
<i>Conectores del reóstato y del banco de resistencias fijas</i>	11
<i>Conector de la resistencia calefactora</i>	12
<i>Cable de línea</i>	13



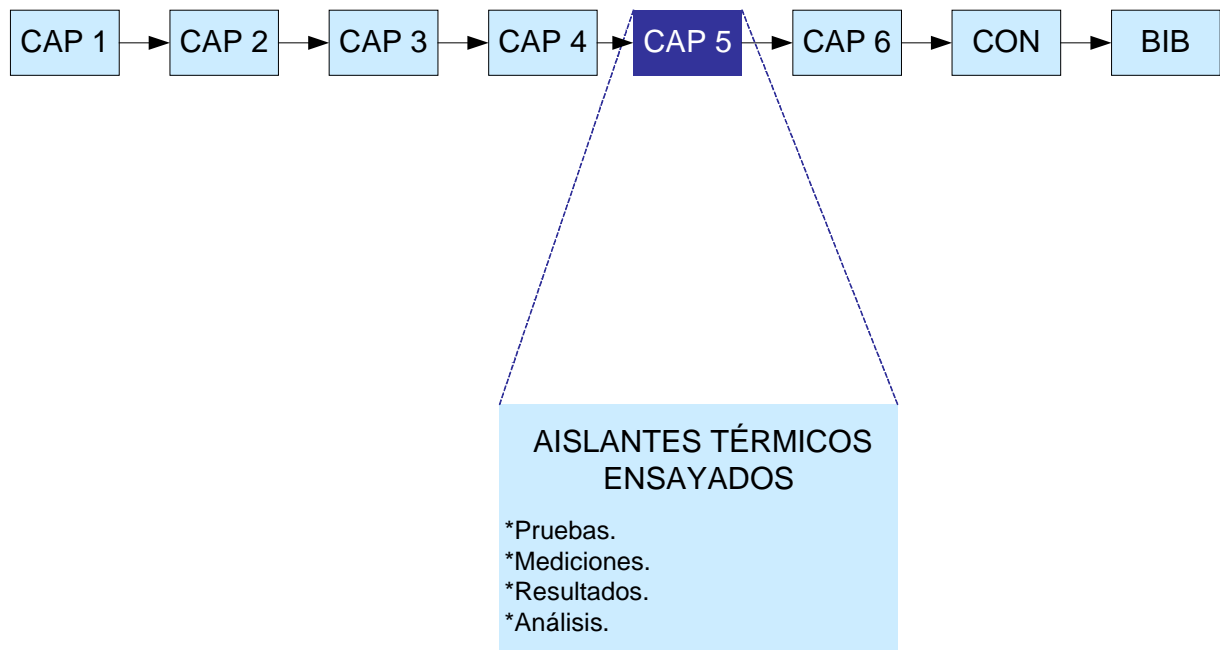
Vista de planta del medidor de conductividad térmica para aislantes térmicos.



Vista lateral derecha del medidor de conductividad térmica para aislantes térmicos.

Capítulo 5

Pruebas, mediciones y análisis de resultados



PRUEBAS, MEDICIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Pruebas.

Como todo prototipo, el sistema de medición de conductividad térmica construido, requirió de una serie de pruebas para verificar su operación y hacer los ajustes necesarios para corregir el equipo y el método de medición, porque el ensayo se realizó con una metodología desarrollada paralelamente a las pruebas de este tipo de medidor.

En el capítulo anterior, se describió la configuración que hasta el momento tiene el prototipo diseñado para determinar la conductividad térmica de los aislantes térmicos, pero no siempre fue así, algunos de los elementos que lo integran se fueron implementando como resultado de las pruebas. A continuación, y en orden cronológico, se describe una breve semblanza de aquellos aspectos que han sido factores determinantes en la calibración del medidor de conductividad térmica.

La primera vez que se puso en operación el equipo, este no contaba con el banco de resistencias fijas ni con el reóstato. La resistencia calefactora trabajó a potencia máxima y aumentó rápidamente la temperatura; a pesar de que el termostato puso fuera de operación en la temperatura seleccionada a la fuente de calor del sistema, la inercia térmica era tan grande que la temperatura en la superficie de la resistencia seguía en aumento y alejándose del valor predeterminado. Evidentemente se requirió de un calentamiento más lento que para reducir la inercia térmica del sistema, fue entonces cuando se implementó el reóstato. Este elemento permite controlar la magnitud de la corriente eléctrica que circula a través de la resistencia calefactora y por lo tanto el flujo de calor.

El reóstato mejoró la estabilidad del sistema, pero la inercia térmica aun no era aceptable, entonces se decidió crear un banco de resistencias fijas, el cual se conectó en serie con el reóstato y la resistencia calefactora. Este arreglo hizo posible manejar valores de corriente eléctrica más pequeños, con lo cual, la inercia térmica se redujo drásticamente; **siendo la magnitud mínima de corriente eléctrica 0.43 amperes, este valor garantiza que la temperatura en la superficie de la resistencia calefactora, será superior a la temperatura ambiente de la ciudad de México.**

Una vez minimizada la inercia térmica en el sistema, se detectó una nueva dificultad, se registraron temperaturas mayores en la superficie exterior del aislante de prueba que en la superficie de la fuente de calor. Se procedió a medir la temperatura en la superficie de la resistencia calefactora con un termómetro externo y se determinó que el termopar "J" instalado en el interior de la resistencia calefactora y encargado de registrar la temperatura en la superficie de la misma, presentaba un funcionamiento inadecuado: la temperatura que se registraba en el display del termostato no correspondía a la temperatura en la superficie de la resistencia calefactora. Para superar este percance, se instaló un termopar tipo "K" directamente entre la superficie de la fuente de calor y el aislante de prueba, la señal de este sensor la recibe el termómetro digital de dos canales descrito en el capítulo anterior.

Se siguieron haciendo pruebas y aunque el funcionamiento del equipo había mejorado, el desempeño del control automático de temperatura era inadecuado. Este control actúa dentro de un margen de temperaturas, es decir, abre y cierra el circuito eléctrico que provee de energía a la fuente de calor del sistema dentro de ciertos límites de temperatura, pero dichos límites de temperatura ($\pm 2^{\circ}C$) resultaron

demasiado amplios para lograr los valores de conductividad térmica que se estaban buscando. Para reducir ese margen, se reajustó el termostato pero no se pudieron cerrar mas los límites de temperatura que ya se tenían. Después de analizarlo, se propusieron dos opciones: uno, sustituir el control automático de temperatura por uno más preciso; y dos, modificar el método de medición. La primera alternativa, implicaba un gasto económico que no se tenía previsto y por otro lado no resolvía totalmente las necesidades que se tenían en cuanto a la estabilidad del sistema, el flujo de calor seguiría siendo intermitente por muy preciso que fuese el termostato. La segunda propuesta consistía en hacer unos cambios en la metodología utilizada para llevar a cabo el ensayo, con el propósito de eliminar el flujo de calor intermitente. Considerando que no se requería de ninguna adecuación extra en la configuración del equipo y buscando siempre un mejor control y estabilidad de las variables del sistema, se eligió adecuar el método de medición: en lugar de tratar de mantener en un valor predeterminado la temperatura de la superficie de la fuente de calor a partir de ajustar regularmente la corriente eléctrica con el reóstato, ahora se fija dicha corriente eléctrica en un valor predefinido ¹**(con base en la experiencia se recomienda iniciar la prueba con 0.43A que es el valor mínimo de corriente eléctrica que permite el equipo, e incrementarla en una décima de ampere cada vez)** y se aguarda a que se estabilicen las temperaturas en la superficie de la resistencia calefactora y en la superficie exterior del espécimen de material aislante, es decir, se mantiene fijo el valor de I y las temperaturas T_1 y T_2 las proporciona el sistema una vez que se estabiliza. El control automático de temperatura en estas condiciones cambia su función, y ahora únicamente se encarga de evitar que la temperatura en la superficie de la fuente de calor del sistema, no exceda la temperatura máxima de trabajo del espécimen sometido a ensayo; con esto se asegura que la corriente eléctrica seleccionada para la prueba no produzca un flujo de calor tal que pudiera quemar la muestra de material aislante.

Con los cambios efectuados en la metodología, se volvió a realizar el ensayo, y en un intervalo de tiempo de aproximadamente dos horas se estabilizó el equipo con excelentes resultados, no solo se eliminaron el flujo de calor intermitente y la inercia térmica del sistema (ya que en ningún momento deja de funcionar la resistencia eléctrica empleada como fuente de calor), también se obtuvieron valores de conductividad térmica que concuerdan con los datos proporcionados por el fabricante para las mismas temperaturas promedio.

Con la finalidad de generar información para seguir evaluando el desempeño del medidor de conductividad térmica, se llevó a cabo el ensayo en una muestra de un segundo material aislante. Este espécimen de prueba, a diferencia del usado anteriormente, presentó dificultades para montarlo en el equipo: el material venía en forma de tubería con ranura engomada con un diámetro interno del $\frac{1}{2}$ pulgada mientras que el diámetro de la resistencia calefactora es de $\frac{3}{4}$ de pulgada, aunque de inicio se lograba cerrar la unión del espécimen, el calor producía una expansión en la misma y al no sellar perfectamente se generaban importantes fugas de calor a lo largo del sistema que incidían en forma negativa en los resultados. Para resolver este problema se colocó alrededor del material aislante una chaqueta ajustable fabricada en tela, la cual mantuvo sellada la unión, evitándose así las fugas de calor. Se ha hecho mención a esta situación para resaltar la importancia particular que tiene la preparación de las muestras de material aislante que se someterán al ensayo, posteriormente se hace un

apartado especial en el que se dan a conocer detalles específicos al respecto. Los resultados obtenidos en este ensayo también fueron satisfactorios.

Esta es la reseña de la evolución que ha tenido a la fecha, el medidor de conductividad térmica para aislantes térmicos, rediseñado, construido y probado en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Mediciones.

En cualquier variable que se pretenda medir de manera confiable, es muy importante la reproducibilidad del fenómeno y que las mediciones se lleven a cabo de la misma forma las veces que sea necesario e incluso por distintas personas. La determinación de la conductividad térmica en materiales aislantes, por tanto, depende no sólo del equipo en sí mismo, sino que se requiere también de una serie de preparativos, observaciones, condiciones, cuidados, etc. para llevar a cabo las mediciones, es decir se necesita un “método de ensayo”. Como se ha comentado anteriormente, el medidor de conductividad térmica para aislantes térmicos, tiene un principio de medición distinto a sus homólogos de línea y por lo tanto el ensayo también se realiza con una metodología concebida específicamente para este equipo y que de manera resumida se expone en forma de diagrama de flujo en la página siguiente.

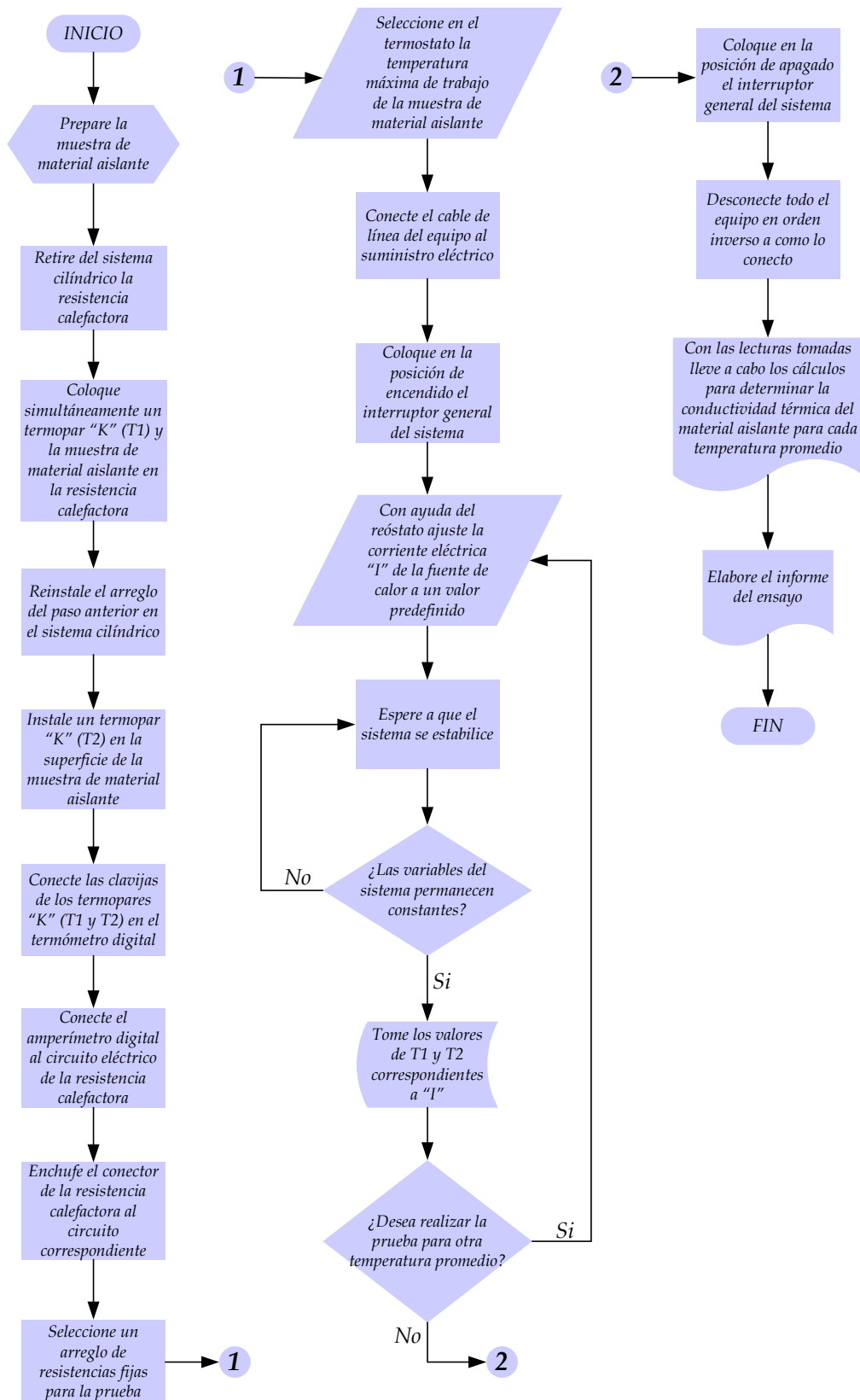
Preparación de las muestras.

En lo que se refiere a la preparación de las muestras de material aislante para el ensayo, se deben considerar los aspectos que a continuación se enumeran:

- I. El material debe estar libre de impurezas superficiales.
- II. Las muestras deben suministrarse en forma de: medias cañas, tubos cerrados, o tubería abisagrada (ranurada).
- III. Las muestras deben tener un diámetro interno de 19.05mm.
- IV. El espécimen de ensayo debe tener 1.04m de longitud.



Método de ensayo para determinar la conductividad térmica de aislantes térmicos.



Aislantes térmicos utilizados para las pruebas.

Para las pruebas realizadas al medidor de conductividad térmica, se emplearon muestras de dos materiales cuyas fichas técnicas (información proporcionada por "Nomaco KFlex") se indican a continuación:

- l) *GF-Insul tube (hule)*. Es un aislante térmico preformado de celda cerrada, flexible y de color negro, diseñado para el ahorro de energía. Está disponible en forma tubular con diferentes espesores de pared: 3/8", 1/2", 3/4" ó 1" y en diámetros desde 3/8" hasta 8". Se puede utilizar en líneas de agua helada, aire acondicionado y refrigeración.



Tubería cerrada

Datos técnicos.

Características físicas	Temperatura promedio	GF-Insul Tube	Métodos de prueba
Conductividad térmica (k) W/mK	32 °C	0.041	ASTM C 177
	24 °C	0.040	ASTM C 177
	10 °C	0.039	ASTM C 177
Alcance de temperatura de operación	Superior Inferior	104 °C -57 °C	
Permeabilidad de vapor de agua capa seca perm-in		0.10	
Absorción de agua % aumento de peso		5%	
Resistencia al ozono		Pasa	
Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua μ			>5000
Factor de resistencia a los químicos y solventes			Bueno
Resistencia al moho/erosión de aire		Pasa	UL 181

II) *GF-Nomalock (poliolefina)*. Es un aislante térmico de polímero espumado de alta ingeniería diseñado para aplicaciones industriales, criogénicas, comerciales, subterráneas y residenciales. Disponible en color blanco y negro, en tramos de 1.83m de largo de tubería abisagrada y preengomada de 3/8" a 4" de diámetro y espesor de pared de 3/8", 1/2" y 1"; para diámetros de 6", 8", 10" y 12" el aislante viene en tramos de 1.22m de largo de tubería preformada sin pegamento.



Tubería con ranura engomada

Datos técnicos.

Propiedades técnicas	Unidades	Propiedades	Métodos de prueba
Estructura de celda		cerrada	
Densidad	kg/m ³	24	ASTM D1622 ASTM D-3575
Conductividad térmica @ 24 °C	W/mK	0.03604	ASTM C-177 ASTM C-518
Transmisión de vapor de agua	Perms-in	0.0	ASTM E-96
Propagación de flama		25 ó menos	ASTM E-84
Densidad de humo		50 ó menos	ASTM E-84
Límite superior de temperatura	°C	98.8	
Límite inferior de temperatura	°C	-201	
Resistencia a la difusión de vapor de agua	μ	>16000	DIN 52615
Encogimiento lineal @ 93 °C	%	<40	ASTM C-548
Resistencia química y a solventes		excelente	ASTM D-543 ASTM D-471
Resistencia a la tensión	kN/m	8.75	ASTM D-412 ASTM D-1623
Elongación	%	200	ASTM D-412
Resistencia al rasgado	kN/m	1.92	ASTM D-624
Defrección de carga @ 34.47 kPa	%	25	ASTM D-1056
Resistencia al ozono		excelente	ASTM D-1171
Olor		inodoro	ASTM D-739
Resistencia al moho/erosión del aire		excelente	UL 181 UMCS 10-1

Variables y constantes del sistema de medición.

Antes de proceder con las lecturas del ensayo para determinar la conductividad térmica de las muestras de materiales aislantes, se debe definir el tipo de cada uno de los parámetros que intervienen en el experimento.

a) *Parámetros variables*: radio exterior de las muestras (r_2), corriente eléctrica suministrada a la fuente de calor (I), temperatura entre la fuente de calor y el espécimen (T_1) y temperatura en la superficie exterior del espécimen (T_2).

b) *Parámetros constantes*: resistividad eléctrica de la fuente de calor (R), radio de la fuente de calor (r_1), longitud de la superficie de transferencia de calor para el ensayo o longitud del sistema (l), donde:

$$R = 23.8 \Omega$$

$$r_1 = 0.95 \text{ cm}$$

$$l = 1.04 \text{ m}$$

Lecturas registradas durante el ensayo.

I) *GF-Insul tube (hule)*.

r_2 (cm)	I (A)	T_1 (°C)	T_2 (°C)
1.8	0.45	47.7	36.6
1.8	0.70	65.0	39.1
1.8	0.75	83.5	55.4
1.8	0.77	94.4	65.9

II) *GF-Nomalock (poliolefina)*.

r_2 (cm)	I (A)	T_1 (°C)	T_2 (°C)
1.8	0.43	48.7	37.1
1.8	0.50	57.2	42.1
1.8	0.62	71.4	48.6
1.8	0.72	84.4	55.4
1.8	0.77	90.7	59.1
1.8	0.85	99.9	62.6

Análisis de resultados.

Resultados.

Las ecuaciones empleadas para determinar la temperatura media o promedio y la conductividad térmica de las muestras de materiales aislantes, se definieron en la etapa de diseño térmico y son las siguientes:

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$k_a = \frac{RI^2 \ln(r_2/r_1)}{2\pi l (T_1 - T_2)}$$

donde:

T_m : Temperatura media o promedio.

K_a : Conductividad térmica del espécimen.

Con el propósito de facilitar las operaciones matemáticas, estas ecuaciones se programaron en una hoja de cálculo de "Microsoft Excel" para cada aislante térmico ensayado. Por medio de una tabla y una gráfica se hizo un comparativo entre los resultados y los datos de conductividad térmica del fabricante.

l) *GF-Insul tube (hule).*

✓ *Hoja de cálculo.*

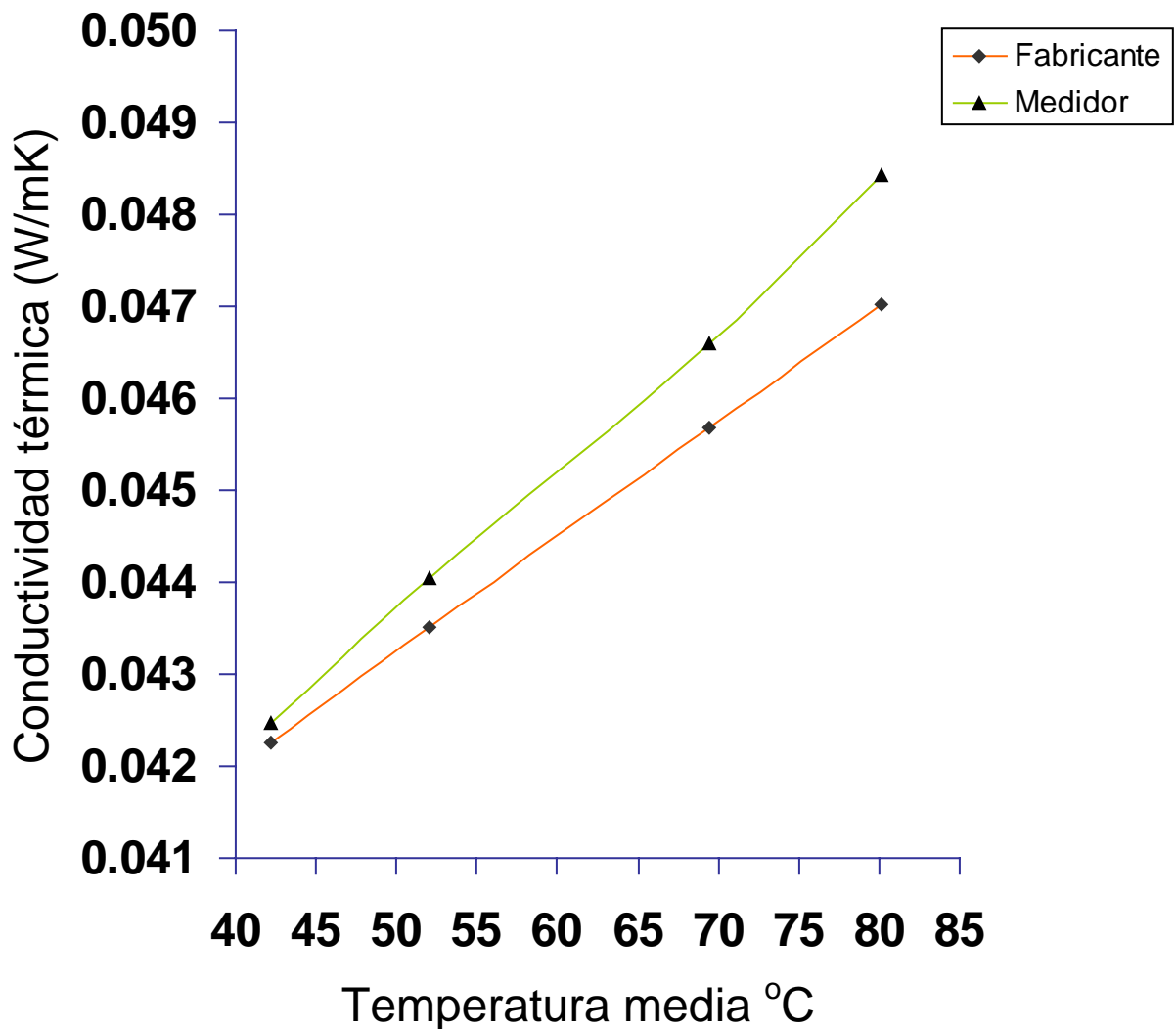
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Conductividad		= ka							
1	<i>l</i>	<i>T₁</i>	<i>T₂</i>	<i>T_m</i>	<i>k_a</i>				
2	0.45	47.7	36.6	42.15	0.04246				
3	0.70	65.0	39.1	52.05	0.04404				
4	0.75	83.5	55.4	69.45	0.04659				
5	0.77	94.4	65.9	80.15	0.04842				
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									

✓ *Tabla de datos.*

T_m (°C)	k_a (W/mK)	K_f (W/mK)	%Diferencia
42.15	0.04246	0.04226	0.47
52.05	0.04404	0.04351	1.21
69.45	0.04659	0.04568	1.99
80.15	0.04842	0.04702	2.97

✓ *Gráfica.*

Aislante: GF-Insul tube (hule)



II) GF-Nomalock (poliolefina).

✓ Hoja de cálculo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	l	T_1	T_2	T_m	k_a				
2	0.43	48.7	37.1	42.90	0.03710				
3	0.50	57.2	42.1	49.65	0.03854				
4	0.62	71.4	48.6	60.00	0.03924				
5	0.72	84.4	55.4	69.90	0.04161				
6	0.77	90.7	59.1	74.90	0.04367				
7	0.85	99.9	62.6	81.25	0.04509				
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									

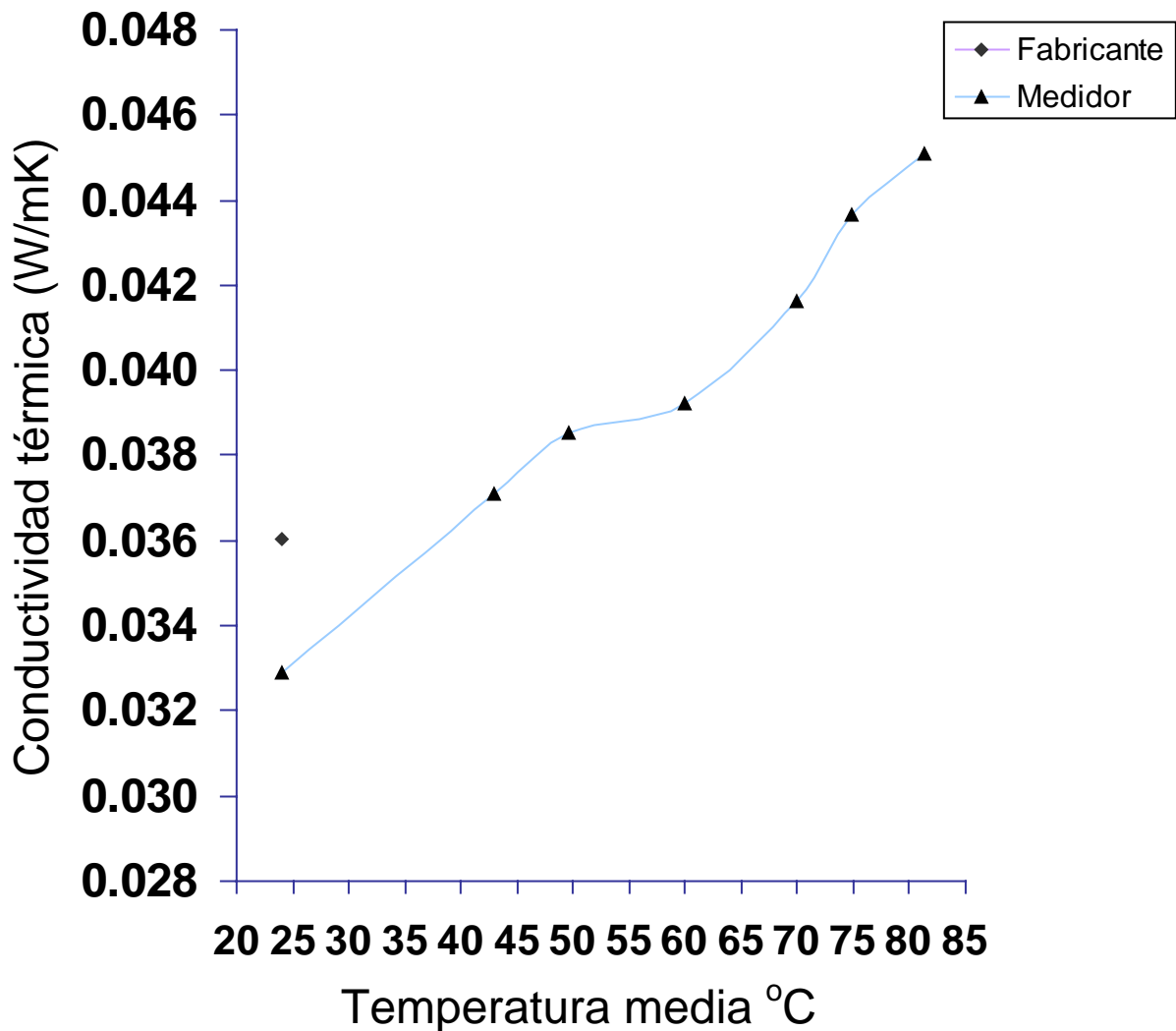
✓ Tabla de datos.

T_m (°C)	k_a (W/mK)	K_f (W/mK)	%Diferencia
24.00	0.03289	0.03604	-8.74
42.90	0.03710		
49.65	0.03854		
60.00	0.03924		
69.90	0.04161		
74.90	0.04367		
81.25	0.04509		

Nota: el fabricante solo proporcionó un dato de conductividad térmica para este material, lo cual imposibilitó interpolar o extrapolar para las temperaturas promedio tabuladas. Sin embargo, se hizo el comparativo del dato del fabricante con el valor de conductividad térmica que correspondería al equipo de medición a la misma temperatura media.

✓ Gráfica.

Aislante: GF-Nomalock (poliolefina)



Análisis.

Considerando que el método de ensayo utilizado por el medidor de conductividad térmica es una versión equivalente del método empleado por el fabricante para determinar la conductividad térmica de los materiales probados, es válido llevar a cabo el análisis de resultados basado en comparar los datos que provee el fabricante y los valores de conductividad térmica obtenidos con el medidor.

En el caso del aislante "GF-Insul tube (hule)" se puede observar en su gráfica que la mayor dispersión se presentó en los valores de conductividad térmica que

corresponden a una temperatura media de 80.15 °C, para los cuales se calculó el siguiente porcentaje de diferencia:

$$\% \text{Diferencia} = \frac{k_a - k_f}{k_f} \times 100 = \frac{0.04842 - 0.04702}{0.04702} \times 100 = 2.97$$

donde:

k_a : Conductividad térmica del espécimen.

k_f : Conductividad térmica proporcionada por el fabricante.

Esto quiere decir que la conductividad térmica obtenida con el medidor es 2.97% mayor que el dato del fabricante para la misma temperatura media.

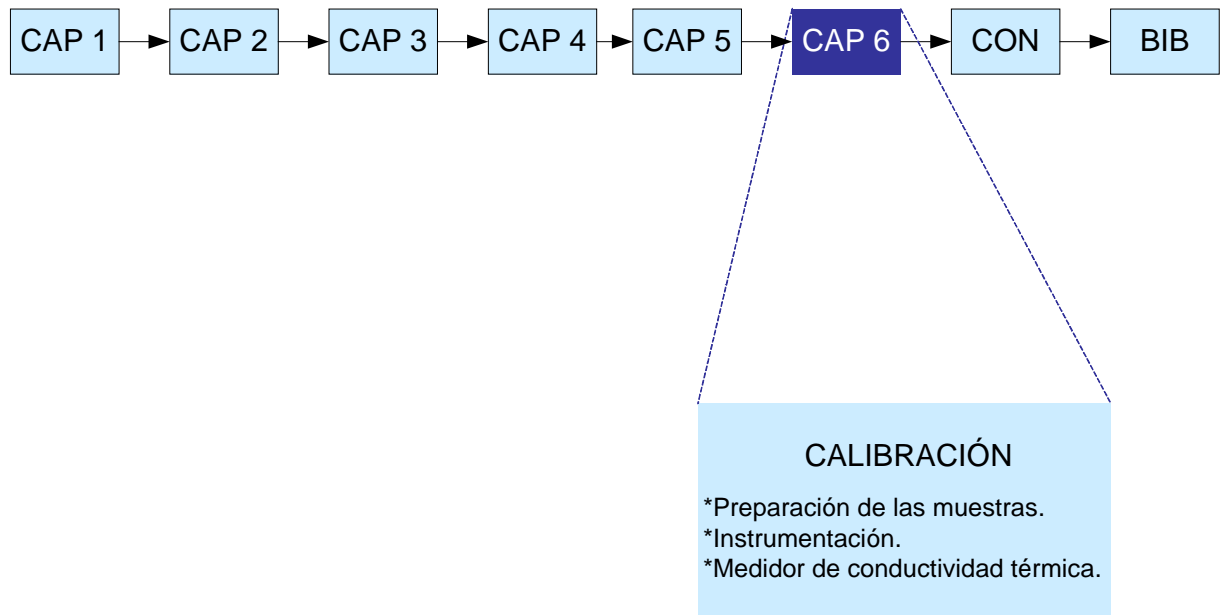
Procediendo del mismo modo para el aislante térmico “GF-Nomalock (poliolefina)”, para una temperatura media de 24 °C se obtuvo el siguiente porcentaje de diferencia:

$$\% \text{Diferencia} = \frac{0.03289 - 0.03604}{0.03604} \times 100 = -8.74$$

Esto significa que el valor de conductividad térmica calculada es 8.74% menor que el dato del fabricante para la misma temperatura promedio, pero si se toma en cuenta que para este aislante térmico el fabricante indica que se puede tener un valor de conductividad térmica menor al que él esta reportando, entonces el porcentaje de diferencia en estas circunstancias también sería menor.

Capítulo 6

Calibración del equipo



CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

En este capítulo, se indican de manera general las acciones necesarias para dar uniformidad y precisión a las lecturas realizadas con el medidor de conductividad térmica para aislantes térmicos. Si bien no es necesario conocer las propiedades de algún material de referencia para la calibración del equipo, ya que este emplea un método de medición absoluta, si se toman en cuenta los aspectos que a continuación se enumeran:

- I. **La preparación de las muestras.** Si las muestras no cumplen con las características establecidas en cuanto a forma y dimensiones, esto constituye un factor que altera los resultados debido a que se producen fugas de calor en el sistema.
- II. **La instrumentación.** Este rubro es esencial ya que la calibración de cada uno de los instrumentos del medidor de conductividad térmica influye de manera contundente en la calidad de los resultados, sobre todo si se considera que se está operando con una resolución de décimas de grado centígrado en el caso del termómetro y con una resolución de centésimas de ampere tratándose del amperímetro, por tanto, el correcto funcionamiento de estos equipos en particular es fundamental:
 - *Calibración del termómetro digital (Fluke 52 K/J).* La calibración del equipo es interna y debe efectuarse una vez al año para asegurar su precisión dentro de las especificaciones que le son propias. La calibración del instrumento debe realizarse por un centro de servicio autorizado, ya que para este procedimiento es necesario controlar las condiciones ambientales y tener las herramientas y los patrones certificados de referencia.
 - *Instalación de los termopares “K” en el sistema cilíndrico.* La instalación de los dos termopares es otro de los factores críticos; hay que asegurarse que cada sensor haga contacto perfectamente y exclusivamente con la superficie que le corresponde en el arreglo cilíndrico. En las mediciones de temperatura, pueden producirse errores si existe una conexión térmica insuficiente entre los termopares y las superficies de la resistencia calefactora y del material aislante.
 - *Calibración del multímetro digital (Steren Mul-270) modo amperímetro.* La calibración de este equipo es interna y se recomienda llevarla a cabo una vez por año en un ambiente controlado (temperatura ambiente de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, con humedad relativa $<80\%$) por personal especializado para calibrar instrumentos de medición.
 - *Control automático de temperatura (ATTO 901-J-400-O/O-I-R).* A pesar de que este instrumento no incide en la precisión de los resultados, su calibración es necesaria, ya que evita que los especímenes de prueba se degraden por exceso de temperatura.

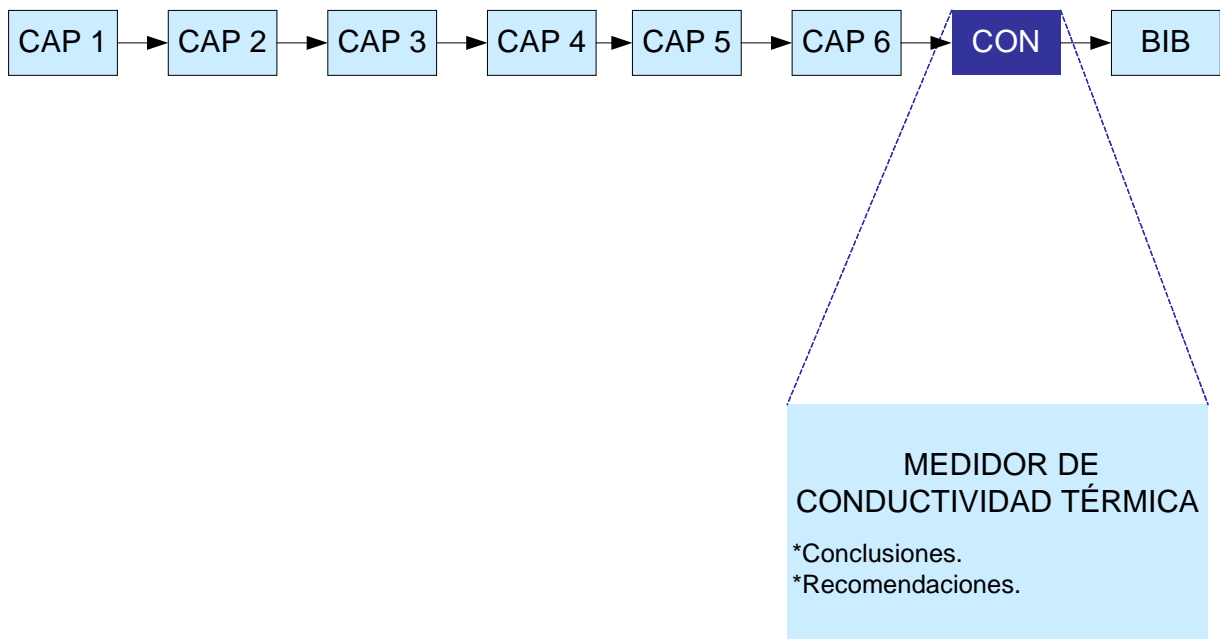
Notas:

1. Aunque los fabricantes de instrumentos de medición recomiendan recalibrar sus equipos cada 12 meses, el plazo de validez de una calibración es un parámetro que debe ser definido por el propio usuario con base a los registros de las mediciones. Si el instrumento presenta una gran variación (inestabilidad) entre las mediciones realizadas, el usuario puede optar en reducir el intervalo entre las calibraciones, pero, si el instrumento presenta una baja variación (buena estabilidad) entre dichas mediciones, el plazo de calibración puede ser extendido.
 2. Medir con el termómetro o amperímetro descalibrado, representa una fuente de error que puede desviar drásticamente los resultados del ensayo.
- III. ***El equipo de medición de conductividad térmica.*** Las lecturas deben llevarse a cabo en el momento en que las variables del sistema permanezcan constantes con respecto al tiempo. El periodo en que el sistema se estabiliza, oscila de 2 a 2.5 horas aproximadamente.

La confiabilidad de las mediciones depende totalmente del control de la prueba, es decir, las temperaturas " T_1 y T_2 " solo deben variar cuando se modifica la magnitud de la corriente eléctrica " I " de acuerdo a lo indicado en el capítulo anterior¹, cualquier otra fluctuación es causa de invalidez de los resultados.



Conclusiones Y recomendaciones



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

La reproducibilidad de las pruebas efectuadas y la repetibilidad de los resultados, demostró una estabilidad en los patrones de respuesta del medidor de conductividad térmica, lo cual implica que el instrumento de medición es confiable.

Por otra parte, existe una equivalencia cuantitativa (como lo revela el análisis de resultados) entre el método de prueba utilizado con el medidor de conductividad térmica y el método de prueba normalizado (ASTM C 177) que respalda los datos de conductividad térmica proporcionados por el fabricante de los aislamientos térmicos ensayados. Con base a estos resultados satisfactorios, tanto el método de ensayo como los valores de conductividad térmica obtenidos con el mismo, pueden considerarse válidos.

Recomendaciones.

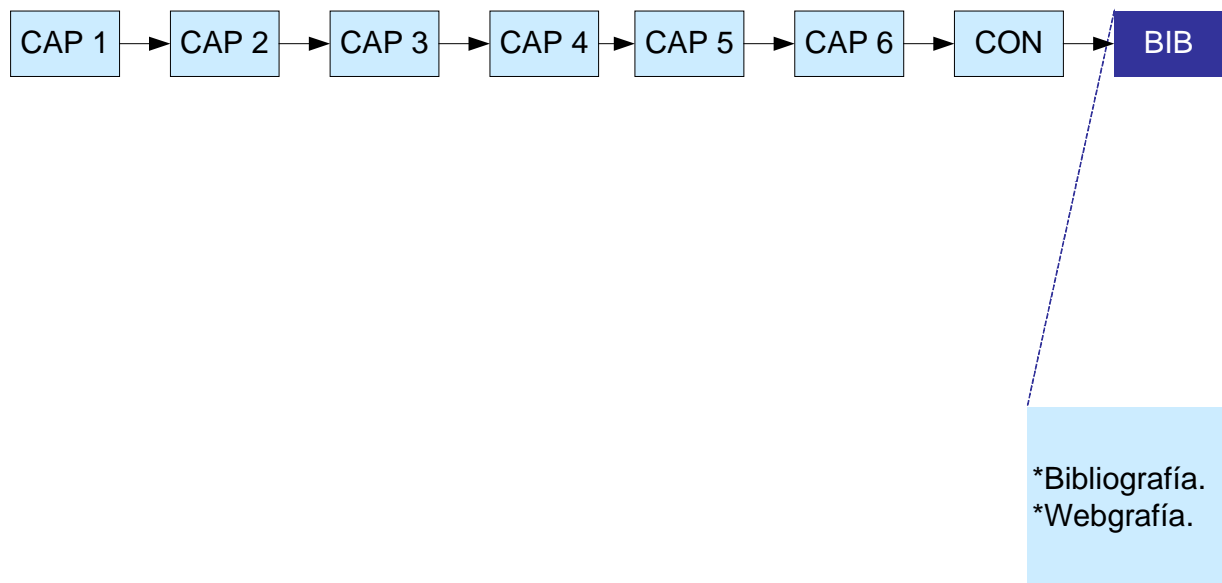
Debido a la necesidad del registro de temperaturas constantes en el medidor de conductividad térmica, se requiere de tiempo para efectuar el ensayo, sobre todo para varias temperaturas promedio. Una prueba para 5 temperaturas promedio de una muestra, tiene una duración efectiva de 10 a 12.5 horas, la cual se debe realizar de preferencia en una misma sesión para tener un mayor control del equipo y de las condiciones en que se están desarrollando dichas mediciones.

Por ser el medidor de conductividad térmica un sistema con diseño modular (elementos e instrumentación móviles) se le puede incluir como parte de su equipamiento, una unidad analógico-digital para registrar, almacenar y procesar los datos a través de una interfase para computadora.

En general, el obtener la conductividad térmica (desconocida) de un material aislante a cierta temperatura media a partir de una sola medición no es suficiente; sin embargo, en el caso de los resultados obtenidos con el medidor para una muestra de cada uno de los 2 aislantes ensayados, se contó con los datos de conductividad térmica publicados por el fabricante para llevar a cabo el análisis comparativo; por lo que para determinar la conductividad térmica de cualquier material aislante, se recomienda realizar la prueba al menos en 3 muestras del mismo material y aplicar herramientas estadísticas para evaluar la incertidumbre de las mediciones.



Bibliografía



BIBLIOGRAFÍA

- Cervantes de Gortari J. (1999). "Fundamentos de transferencia de calor". Ed. Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo de Cultura Económica. México. Pag. 23-27.
- Eckert E. R. G. y Drake R. M. (1972). "Analysis of heat and mass transfer". International student edition. Ed. McGraw-Hill. Japan. Pag. 760-763.
- Hernández Sampieri Roberto, Fernández-Collado Carlos y Baptista Lucio Pilar (2006). "Metodología de la investigación". Ed. McGraw-Hill Interamericana. México. Pag. 1-30.
- Holman J. P. (1992). "Transferencia de calor". Ed. Continental, S. A. De C. V. México. Pag. 17-18, 22-27, 44-47.
- Incropera F. P. y DeWitt D. P. (1990). "Fundamentals of heat and mass transfer". Ed. John Wiley & Sons. Singapore. Pag. 96-99.
- Isachenko V. Osipova V. y Sukomel A. (1979). "Transmisión del calor". Ed. Marcombo. Barcelona-España. Pag. 14-15, 22-31.
- Kern D. Q. (1995). "Procesos de transferencia de calor". Ed. Continental, S. A. de C. V. México Pag. 19-23.
- Kreith F. (1970). "Principios de transferencia de calor". Ed. Herrero Hermanos, Sucesores, S. A. México. Pag. 7-14.
- Kreith F. y Bohn M. S. (2001). "Principios de transferencia de calor". Sexta edición. Ed. Thomson-Learning. México. Pag. 1-11, 41-47.
- Michalski L., Eckersdorf K. y McGhee J. (1991). "Temperature measurement". Ed. John Wiley & Sons. England. Pag. 41-77.
- Torrella Alcaraz E., Pinazo Ojer J. M. y Cabello López R. (1999). "Transmisión de calor". Ed. Universidad Politécnica de Valencia-Servicio de Publicaciones. Valencia-España. Pag. 15-22.

WEBGRAFÍA

Carbonell Cortés Pablo J. é Hilario Caballero Adolfo. "Empleo de la incertidumbre estimada por calibración según ISO 9000 en el diseño de lazos robustos de regulación". Recuperado el 12 de diciembre del 2007, de <http://personales.alc.upv.es/~pjcarbon/pdf/ja99.pdf>

CENIDET. "Línea de Investigación en Térmica". Recuperado el 18 de octubre del 2005, de <http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-mec/proyecto.html>

CENIDET. "Proyectos de Investigación". Recuperado el 18 de octubre del 2005, de <http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-mec/proyecto.html>

CONAE. "Laboratorios de prueba Acreditados y Aprobados". Recuperado el 7 de febrero del 2006, de http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_734_laboratorios_de_prue

CONAE. "Norma Oficial Mexicana NOM-018-ENER-1997, aislantes térmicos para edificaciones, características, límites y métodos de prueba". Recuperado el 14 de marzo del 2006, de <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4523/7/NOM018ENER1997.pdf>

CONAE. "Organismos de certificación, acreditados por la EMA y aprobados por CONAE". Recuperado el 7 de febrero del 2006, de http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_731_organismos_de_certif

CONAE. "Proceso de acreditación de un laboratorio de pruebas". Recuperado el 7 de febrero del 2006, de http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_732_proceso_de_acreditac

Glassfiber. "Productos-Hule-Tubo cerrado". Recuperado el 12 de mayo del 2005, de <http://www.glassfiber.com>

Glassfiber. "Productos-Polioléfina-Tubo ranurado con pegamento Nomalock". Recuperado el 12 de mayo del 2005, de <http://www.glassfiber.com>

P. A. Hilton Ltd. "Registro y comprobación de datos". Recuperado el 25 de enero del 2006, de http://www.p-a-hilton.co.uk/Spanish/Products/Registro_y_Comprobacion/registro_y_comprobacion.html

PROCOBRE. "Conductores Eléctricos". Recuperado el 17 de abril del 2007, de http://www.procobre.peru.org/c_condelect.pdf

Martínez Fuentes Víctor. "Propiedades Termofísicas". Recuperado el 18 de octubre del 2005, de <http://www.prodigyweb.net.mx/vema00/termofis.htm>

Martínez Fuentes Víctor. "Incertidumbre de la medición". Recuperado el 5 de enero del 2008, de <http://www.prodigyweb.net.mx/vema00/incertidumbre.htm>

MINIPA. “¿Lo que yo debo saber sobre la calibración de los productos Minipa?”.
Recuperado el 12 de diciembre del 2007, de <http://www.minipa.net/esp/FAQ/faq.asp>