

Sistema de Medición de la Conductividad Térmica de Materiales Sólidos Conductores, Diseño y Construcción

L. Lira-Cortés, González Rodríguez, O. J., Méndez-Lango, E.

Centro Nacional de Metrología,
 km 4,5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.
 llira@cenam.mx

RESUMEN

En el Centro Nacional de Metrología se implementó un sistema de medición de conductividad térmica de materiales sólidos conductores. Se desarrollaron los criterios de diseño para la construcción del sistema de medición, que opera bajo una condición de flujo de calor en estado permanente. El sistema utiliza un material de referencia, el cual limita su intervalo de operación por su valor de conductividad y dimensiones geométricas. Se presentan los resultados para la medición de conductividad térmica de una barra de aluminio a una temperatura de 50 °C.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de las propiedades termofísicas de materiales es importante en todos los procesos donde ocurren intercambios de energía, en particular de calor. Para el diseño, operación y mantenimiento de sistemas y equipos mecánicos es importante conocer el valor de estas propiedades en particular la conductividad térmica. Para materiales sólidos conductores térmicos como es el aluminio, hierro, cobre, sus aleaciones y nuevos materiales que se emplean para construir equipos, como por ejemplo, los motores de vehículos automotrices.

Para cubrir esta necesidad de medición en el Centro Nacional de Metrología se desarrolló un sistema para la medición de materiales sólidos conductores térmicos por medio de un método secundario.

En este artículo se presenta el diseño y construcción del sistema de medición. Actualmente se encuentra en desarrollo la extensión del sistema para medir la conductividad térmica de materiales sólidos conductores a temperaturas cercanas a los 500 °C.

2. PRINCIPIO DEL MÉTODO

El método consiste en determinar la conductividad térmica de un material muestra por medio de un material de referencia por una técnica de estado permanente que se conoce como método de barras concéntricas cortadas.

El sistema está formado por una barra de un material de referencia con propiedades bien conocidas, la barra del material con conductividad a determinar y otra barra de material de referencia. La

barra metálica compuesta se encuentra en su exterior cubierta con un material aislante.

En un extremo de la barra compuesta se coloca una fuente de calor y en el extremo opuesto se tiene un sumidero de calor. Entonces, mediante mediciones de temperatura y longitud se puede determinar la conductividad del material muestra. En la Fig. 1 se muestra un diagrama del sistema de barras compuestas.

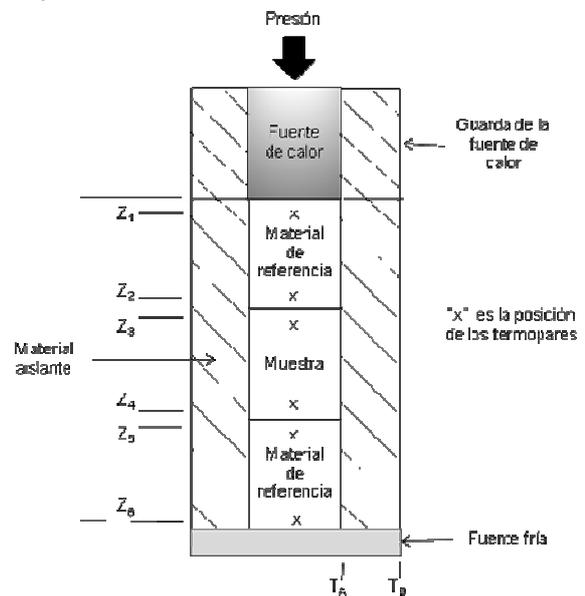


Fig.1. Esquema del método de barras cortadas.

2.1. Formulación Matemática del Sistema

Si se considera el problema de transferencia de calor en régimen de conducción pura, el análisis

inicia a partir de la ecuación diferencial de conducción de calor:

$$\nabla \cdot \vec{q}(\vec{r}, t) + g(\vec{r}, t) = \rho C_P \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

donde $\vec{q}(r, t)$ es el flujo de calor vectorial, $g(\vec{r}, t)$ es la generación de calor dentro del volumen del sólido, C_P es la capacidad calorífica a presión constante, ρ es la densidad y $T(\vec{r}, t)$ es el campo escalar de temperatura que depende del espacio (\vec{r}) y del tiempo (t).

Si el vector flujo de calor se expresa en función del campo escalar de temperatura, entonces se tiene:

$$\vec{q}(\vec{r}, t) = \lambda \nabla T(\vec{r}, t), \quad (2)$$

en donde λ es la conductividad térmica, que se expresa en $W m^{-1} K^{-1}$, entonces la Ec. (1) se puede escribir como:

$$\nabla \cdot [\lambda \nabla T(\vec{r}, t)] + g(\vec{r}, t) = \rho C_P \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t}, \quad (3)$$

que representa la ecuación diferencial de conducción de calor de un sólido homogéneo e isotrópico. Si λ es constante y no existe generación de calor entonces, entonces se obtiene la ecuación de diferencial de difusión o ecuación de Fourier:

$$\lambda \nabla^2 T(\vec{r}, t) = \rho c_P \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t}. \quad (4)$$

La Ec. (4) es la base de todos los métodos experimentales para determinar la conductividad térmica de los materiales.

En el caso de un método de estado permanente se tiene:

$$\nabla^2 T(r, t) = 0, \quad (5)$$

si se considera que sólo existe flujo unidimensional se obtiene la ecuación de Fourier:

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dZ}. \quad (6)$$

Si se aplica esta ecuación a cada una de las secciones que componen el sistema se obtiene:

$$\begin{aligned} q_1 &= -\lambda_1 A_1 \frac{\Delta T_1}{\Delta Z_1} \\ q_2 &= -\lambda_2 A_2 \frac{\Delta T_2}{\Delta Z_2} \\ q_3 &= -\lambda_3 A_3 \frac{\Delta T_3}{\Delta Z_3} \end{aligned} \quad (7)$$

si se considera que el área transversal de todos los materiales que forman la barra cortada es la misma y los materiales de las porciones 1 y 3 es el mismo; es decir, el material de referencia del método, se obtiene:

$$\lambda_M = \frac{Z_4 - Z_3}{T_4 - T_3} \left[\frac{\lambda_{R1}}{2} \left(\frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} \right) + \frac{\lambda_{R2}}{2} \left(\frac{T_6 - T_5}{Z_6 - Z_5} \right) \right], \quad (8)$$

donde λ_M , es la conductividad de la muestra.

En la Ec. (8) se considera que el flujo de calor radial a través de la barra compuesta es nulo y que sólo se presentan flujos de calor axial (flujo unidimensional). Si se considera que las distancias son iguales y el material de referencia tiene la misma conductividad, se obtiene:

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_R}{2} \left(\Delta T_1 + \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right). \quad (9)$$

Por lo tanto la aplicación del método está limitada a que los materiales muestra deben tener la misma sección transversal que los materiales de referencia.

En la práctica, siempre existe flujo de calor radial, una forma de minimizar dichas fugas es emplear guardas y es necesario realizar un estudio del sistema considerando que el flujo no es unidimensional.

2.2. Criterios de Diseño del Sistema

Se realiza un análisis del sistema considerando que existe flujo de calor axial y radial, y que el sistema además de la barra sólida de material a evaluar, tiene una barra hueca de material aislante.

El problema a resolver es el de una barra compuesta por un material conductor de referencia en los extremos longitudinales y un material muestra en el centro, toda la barra está envuelta por un material aislante, se considera que existe flujo axial y radial y las dimensiones físicas del problema se muestran en la Fig. 2.

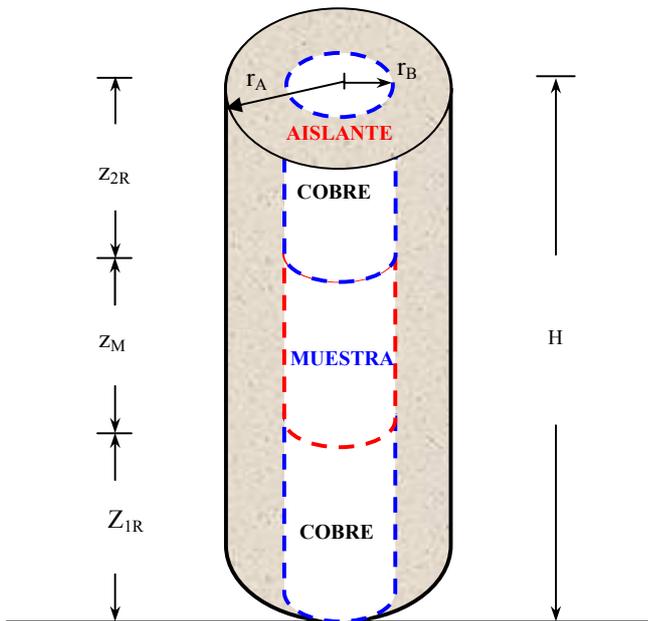


Fig. 2. Modelo físico para una barra compuesta envuelta en aislante.

La ecuación de conducción de calor para la barra cilíndrica en dos dimensiones es:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (10)$$

con las condiciones siguientes en:

$$\begin{aligned} Z = Z_{1R} & \quad T(r, z_{1r}, t) = T_1 \\ Z = Z_{2R} & \quad T(r, z_{2r}, t) = T_2 \\ r = r_R & \quad T(r_R, z, t) = f(z) \\ t = t_0 & \quad T(r, z, t_0) = T_M \end{aligned} \quad (11)$$

$$T_M = \frac{(T_f + T_c)}{2}$$

$$f(z) = T_f + \frac{(T_c - T_f)z}{H}$$

donde \$T_M\$ es la temperatura promedio y \$f(z)\$ es un perfil lineal, \$T_c\$ es la temperatura de la fuente de calor y \$T_f\$ es la temperatura de la fuente fría, \$H\$ es la longitud del sistema, \$z_{1R}\$ y \$z_{2R}\$ son las longitudes de las barras de referencia.

El planteamiento para este problema no homogéneo se puede encontrar al utilizar la formulación de

Green pero la solución analítica no es posible obtenerla. Por lo que se realiza un análisis térmico que permite conocer los campos de temperatura en el sistema, calcular los flujos de calor axial y radial. Este análisis se hace de forma paramétrica con la longitud de la muestra, el material de la muestra y las características de los aislantes.

3. ESTUDIO PARAMÉTRICO

El estudio paramétrico consiste en obtener la distribución de temperatura en el sistema de barra compuesta mas aislante para diferentes condiciones de operación. Como condiciones de operación se refiere a la diferencia de temperatura en los extremos del sistema, características del material de referencia, características del material aislante y características de los materiales muestra.

Para el estudio se consideraron diferencias de temperatura de 20 °C, 50 °C, 100 °C, 200 °C y 300 °C, debido a que ciertos materiales que se ocupan en la industria, como los conductores, se usan a esas temperaturas.

El material de referencia se eligió de forma que, por sus características, fuera altamente conductor, el material seleccionado fue el cobre con un diámetro de 19,1 mm. Para el estudio se considero las barras de cobre con una longitud de 10 cm.

El material aislante que se seleccionó fue fibra de vidrio con un diámetro exterior de 38,2 mm y 57,3 mm. El diámetro interior del material queda acotado por el diámetro del material de referencia. La longitud es variable de acuerdo a las longitudes del material muestra.

Tabla 1. Materiales que se utilizan como muestra para el estudio paramétrico. Valores tomados de la literatura [5].

Material	Conductividad térmica / W m ⁻¹ K ⁻¹
Cobre	386
Oro	317
Aluminio	204
Zinc	112.2
Estaño	69
Plomo	35
Acero Inoxidable	15
Baquelita	1.4
Fibra de Vidrio	0.046

Para los materiales muestra se seleccionaron desde materiales altamente conductores hasta materiales aislantes con diferentes longitudes.

El diámetro del material bajo prueba es igual al diámetro del material de referencia. Las longitudes de los materiales muestra para el análisis térmico son: 1 cm, 2,5 cm, 5,0 cm, 7,5 cm y 10 cm.

En los resultados del análisis se reporta el error del sistema por flujo de calor radial. Este error se define como la fracción de flujo de calor radial respecto al flujo axial en la posición donde se presenta el flujo radial máximo.

En la Fig. 3 se presenta un esquema de sección de la barra compuesta. Se señalan tres flujos de calor radial y axial locales en el sistema; si $q_{\text{radial-2}}$ fuera el máximo respecto a los otros flujos radiales, el error será la fracción de $q_{\text{radial-2}}$ respecto a $q_{\text{axial-2}}$.

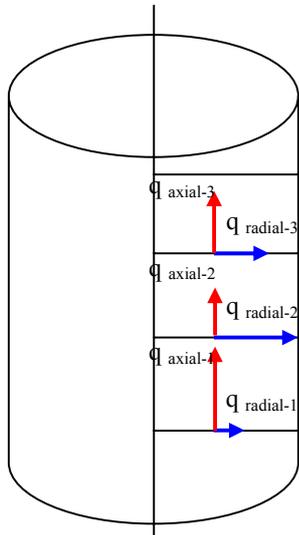


Fig. 3. Representación de flujos de calor.

3.1. Error Máximo por Longitud de la Muestra y Diferencia de Temperatura

En la Fig. 4 se muestran los resultados del error relativo que se calculo para una diferencia de temperatura de 20 °C y un espesor del aislante de 38,2 mm.

Para estas condiciones se obtuvo que para tres de los metales Cu, Au y Al el error fue desde 0,05 % hasta 0,10 %; para los metales Zn, Sn, y Pb fue desde 0,05 % hasta 0,4 %; para el acero inoxidable fue desde 0.1 % hasta 0,9 % y para los aislantes desde 1 % al 6 % para la baquelita y desde 20 % al 30 % para la fibra de vidrio.

De este resultado se concluye que el método no es adecuado para la medición de sólidos conductores.

Para ellos es mejor medir con el método de plato caliente con guarda [8] con el que se pueden obtener errores de diseño menores al 0,1%.

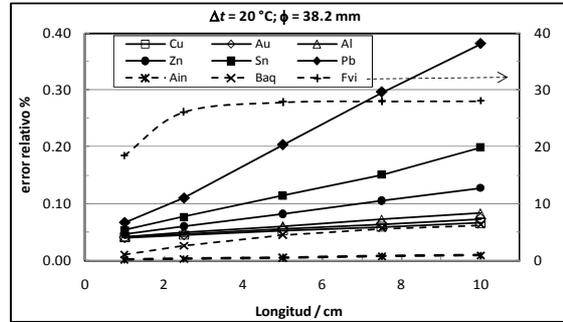


Fig. 4. Error relativo porcentual calculado para 8 materiales: 6 metales (Cu, Au, Al, Zn, Sn y Pb), una aleación (acero inoxidable; AIn), y dos aislantes (baquelita; Baq y fibra de vidrio; Fvi). Los valores de error de los seis metales están graficados en el eje principal (izquierda); Los valores de error para el resto de los materiales están graficados en el eje secundario (derecha).

En el apéndice al final de este artículo se muestran las tablas con los valores para los materiales indicados y para las diferencias de temperatura de 100 °C, 200 °C y 300 °C. En la Fig. 5 se presentan los resultados para 300 °C.

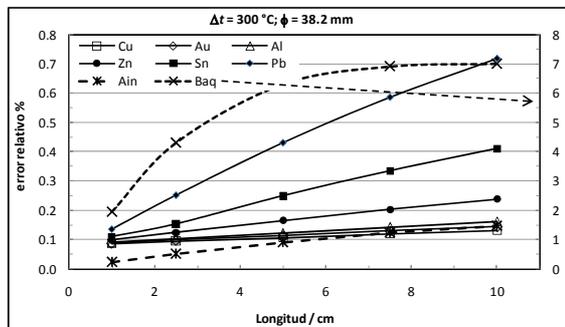


Fig. 5. Error relativo porcentual calculado para 6 metales puros (Cu, Au, Al, Zn, Sn y Pb), acero inoxidable (AIn) y baquelita (Baq). Los valores de error de los seis metales están graficados en el eje principal (izquierda); Los valores de error para AIn y Baq están graficados en el eje secundario (derecha).

Como se muestra en la Fig. 5, se encontró que el error máximo para Cu, Au, Al, Zn y Sn está por debajo del 0,5 %; para el Pb menor a 0,8 %; para el acero inoxidable el 1,5 % y del 7 % para la baquelita.

El error disminuye con la longitud de la muestra bajo estudio. Por otro lado, la dependencia aumenta conforme la conductividad térmica del material disminuye, en consecuencia, las mejores condiciones experimentales son aquellas donde la longitud de la barra bajo estudio sea lo más corta posible y para materiales sólidos conductores.

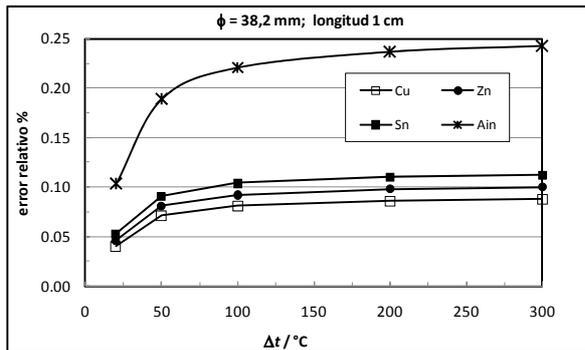


Fig. 6. Dependencia del error como función de la diferencia de temperatura para cuatro materiales. Las muestras son de 1,0 cm de largo y la cubierta de aislante es de 38,2 mm.

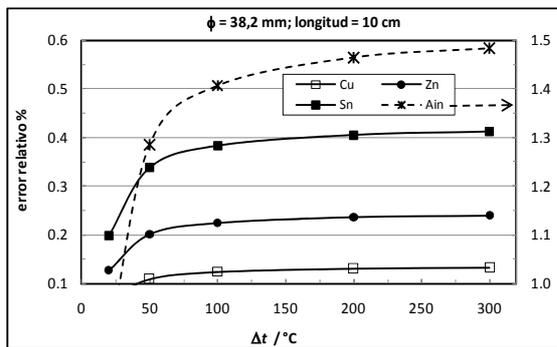


Fig. 7. Dependencia del error como función de la diferencia de temperatura para cuatro materiales. Los valores para Cu, Zn y Sn están graficados en el eje principal; el acero inoxidable está graficado sobre el eje secundaria (izquierda).

En la Fig. 6 se muestra la dependencia del error como función de la temperatura para Cu, Zn, Sn y acero inoxidable. Los valores están calculados para un aislante de 38,2 mm y muestra de 1,0 cm de longitud. Se observa que el error crece rápidamente para diferencias de temperatura entre 0 °C y 100 °C y luego tiende a un valor máximo. Este valor máximo puede usarse como la cota máxima de error del método bajo las condiciones establecidas en el estudio. En este caso se tienen errores máximos de 0,075 % para Cu; 0,085 % para Zn, 0,10 % para Sn y 0,24 % para el acero inoxidable.

De manera similar se hizo el análisis para longitudes de 2,5 cm, 5,0 cm, 7,5 cm y 10,0 cm. Las tablas de valores se encuentran en el apéndice al final de este artículo. En la Fig. 7 se muestra la dependencia del error porcentual para muestras de 10,0 cm, con aislante de 38,2 cm.

En este caso se encontró que los errores máximos son 0,13 % para Cu; 0,25 % para Zn; 0,41 % para Sn y 1,5 % para acero inoxidable.

3.1.1. Perfiles de Temperatura

En la Fig. 8 se presenta el perfil de temperatura para una barra de aluminio de 0,01 m de radio, con aislante de 0,01 m de espesor, la diferencia de temperatura entre la fuente fría y la caliente es 300 °C. Por simetría de los resultados se presentan desde el centro de la barra hasta el radio exterior.

En la Fig. 8 el material bajo prueba está entre dos muestras de referencia de cobre, una colocada en contacto con la fuente fría (desde 0 m a 0,1 m, en el eje vertical y desde 0 m hasta 0,01 m, en el eje horizontal) y, la otra en contacto con la fuente caliente (desde 0,2 m hasta 0,3 m, en el eje vertical y desde 0 hasta 0,01 m en el eje horizontal).

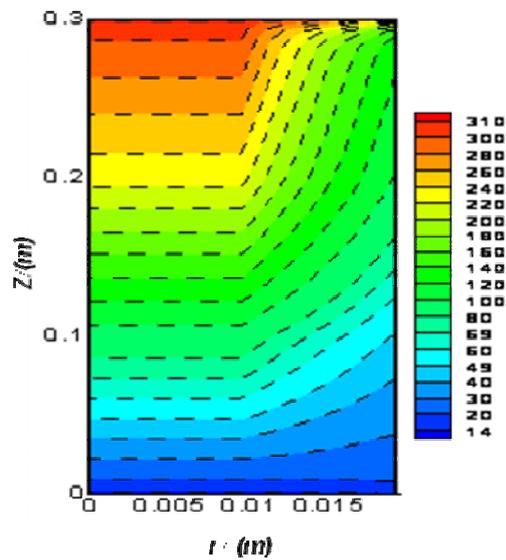


Fig. 8. Perfil de temperatura para una muestra de aluminio.

En la Fig. 8 se aprecia que en las barras los perfiles de temperaturas son lineales para cualquier línea paralela al eje de simetría; las pérdidas por flujo de calor radial son minimizadas por el aislante. La conducción de calor es axial a lo largo de las barras

y el flujo radial es mínimo. De esta manera, se confirma que la ecuación de trabajo, para determinar la conductividad térmica, es válida con cierto error por diseño.

En la Fig. 9 se presenta el perfil de temperatura $t(z)$ para cualquier línea paralela al eje del cilindro que se encuentre entre el centro y la frontera de la barra con el aislante y a lo largo de las barras (de referencia y bajo estudio).

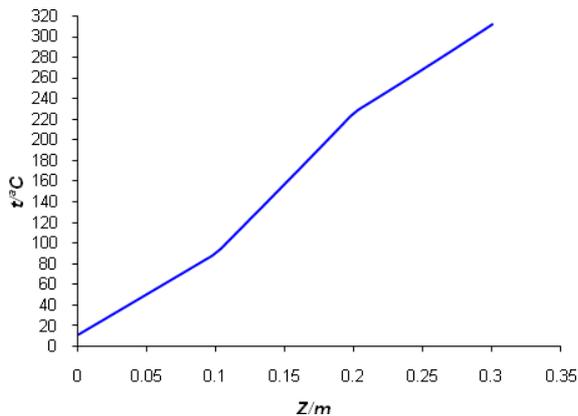


Fig. 9. Perfil de temperatura de una barra muestra de aluminio con barras de referencia de cobre.

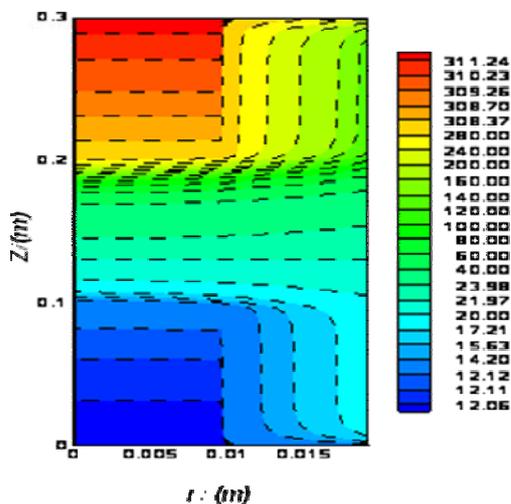


Fig. 10. Perfil de temperatura para una muestra de fibra de vidrio (aislante térmico).

Se aprecia que los gradientes son lineales en cada una de las barras. El cambio de pendiente entre la barra de referencia (Cu) y la muestra (Al) se debe a la diferencia en valores de sus propiedades termofísicas.

A manera de contraste, en la Fig. 10 se presentan los perfiles de temperatura de una muestra de fibra de vidrio (aislante térmico), colocada entre las barras de referencia de cobre, y para las mismas condiciones experimentales descritas en la Fig. 8.

En este caso se observa que los perfiles de temperatura no son estratificados gradualmente y se generan gradientes radiales de temperatura en la zona del material de referencia que provocan flujos de calor radiales.

También se observa que el gradiente axial se concentra en el material de la muestra debido a que es un material aislante (fibra de vidrio) en comparación al material de referencia (Cu).

En la Fig. 11 se graficó para fibra de vidrio el valor de la temperatura como función de la posición, dentro de la zona de medición definida por cualquier línea que este a un radio menor a la intercara barra – aislante.

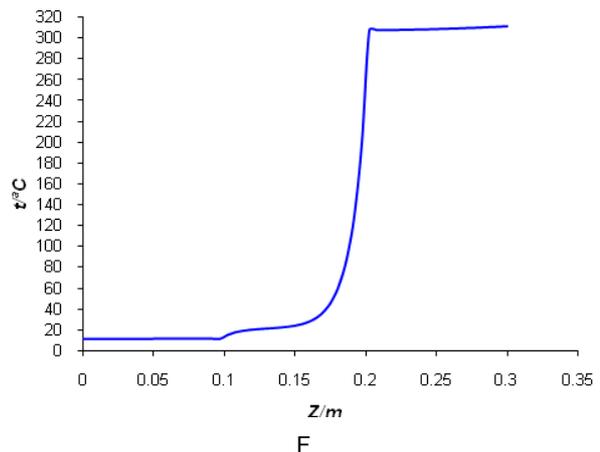


Fig. 11. Se presenta el perfil de temperatura para una muestra de aislante (fibra de vidrio) en condiciones experimentales similares a las descritas para la Fig. 10.

En este caso se observa que el gradiente mayor está en la zona de la muestra y su comportamiento es no lineal: entre 0,1 m y 0,15 m tiene un comportamiento y otro diferente entre 0,15 m y 0,2 m. En este caso la hipótesis de trabajo (uniformidad del gradiente) no se observa y, en consecuencia este método, para medir la conductividad térmica, no es adecuado para este material y, en general, para los aislantes.

De los resultados anteriores se encontró que la distribución más uniforme de temperatura en las barras del sistema se halla si el valor de la

conductividad térmica de las barras de referencia es cercano al valor de la barra bajo estudio.

3.2. Resultados con Material Aislante de 57,3 mm

En otro conjunto de cálculos se evaluó el error máximo por diseño, por flujo radial de calor, para diferentes temperaturas, diferentes longitudes del material muestra y un espesor de material aislante de 57,3 mm. Las tablas para los materiales estudiados se presentan en el apéndice de este artículo.

Al hacer un tratamiento similar a la sección anterior, se encontró que, para una diferencia de temperatura de 20 °C, todos los metales, incluido el acero inoxidable, los errores máximos son menores a 0,75 %; la baquelita tiene un error entre el 1 % y el 6 % la fibra de vidrio tiene errores de hasta el 27 %.

Los errores por flujo de calor radial con respecto a los resultados cuando se usó aislante de 38,2 mm, disminuyeron para la mayoría de los casos excepto para la fibra de vidrio, donde el cambio del espesor en el material aislante no modificó los resultados previos.

Se encontró que, en general, al aumentar el espesor del aislante del sistema no se modifican significativamente los errores por flujo de calor radial.

3.3. Dimensiones del Sistema

Se encontró que las mejores condiciones de medición son para gradientes o diferencias de temperatura entre las fuentes lo más cercana a cero y para las longitudes más pequeñas. Sin embargo, se debe considerar que el "mapeo" experimental de la temperatura se hace con termopares cementados sobre la superficie de las barras.

Si se considera que la incertidumbre típica de un termopar no es mejor que 0,01 °C, entonces se tiene que mientras mayor sea la diferencia de temperatura y la longitud de las barras se obtendrán las mejores condiciones de medición, respecto a la incertidumbre en temperatura.

En consecuencia se establece una competencia entre el tamaño del error por flujo de calor radial y la incertidumbre en la medición de temperatura. En nuestro caso se ha escogido una longitud de 10 cm para las barras de referencia así como para la barra bajo estudio.

4. EXPERIMENTAL

Uno de los primeros problemas experimentales es el escoger las dimensiones de la fuente de calor (resistencia calefactora). Como muchos de los materiales conductores (metales) se maquilan con medidas imperiales (pulgadas) se decidió que el diámetro de la fuente de calor fuera 25,4 mm (equivalente a una pulgada).

En la construcción del primer prototipo se usaron barras de aluminio de 25,4 mm de diámetro y 5 cm de longitud. La barra del material bajo estudio tiene el mismo diámetro y longitud.

Las barras se cubrieron con material aislante que puede ser poliestireno extruido o fibra de vidrio de 75 mm de espesor (Fig. 12).

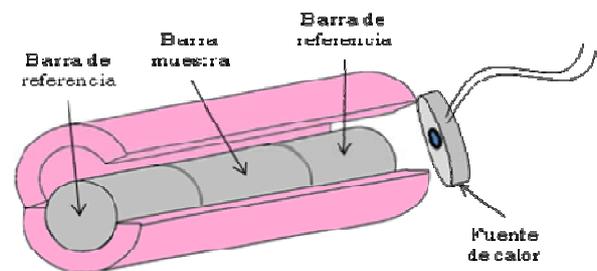


Fig. 12. Sistema de medición de barras.

En un extremo de la barra se colocó la fuente de calor que es una resistencia eléctrica plana de 25,4 mm de diámetro con valor nominal de 3,7 Ω y como fuente fría se usó el medio ambiente.

Se escribió un programa para adquirir los datos de la prueba, el cual también controla la intensidad de corriente que se le proporciona a la fuente de calor.

El sistema de medición consta de siete termopares tipo T. La fem de cada termopar es medida con un multímetro de alta exactitud (8 $\frac{1}{2}$ dígitos) y un selector de 8 canales. La señal del multímetro es registrada por el programa y el selector de canales es controlado por el mismo programa. En la Fig. 13 se presenta un esquema del sistema de medición.

Los valores de temperatura de cada termopar se grafican y se procede a tomar lecturas una vez que sus valores son constantes en el tiempo.

Los datos se usan para determinar el valor de conductividad térmica del material vía la Ec. 9.

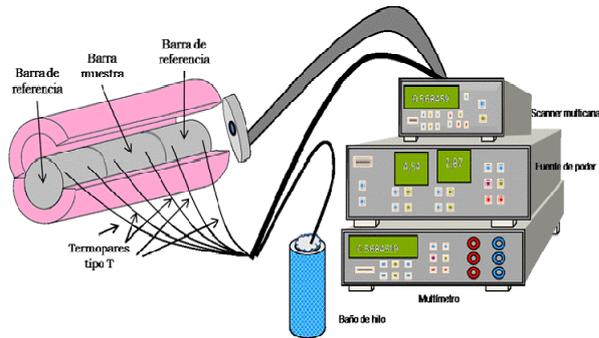


Fig. 13. Sistema de barra compuesta.

5 RESULTADOS

Se realizaron cinco corridas a 50 °C, de una barra de aluminio. En la Tabla 2 se muestran los resultados de estas pruebas.

Tabla 2. Conductividad térmica de barra de aluminio.

	1	2	3	4	5
Temp Ambiente / °C	21.18	23.87	24.05	22.59	22.78
Temp fuente de calor / °C	66.12	69.93	62.32	62.40	66.60
Temp la barra / °C	41.15	46.78	49.00	48.12	52.31
Conductividad térmica W / K m	239.80	237.80	241.55	245.13	244.50

Los resultados muestran un error de 15 % respecto a los valores de la literatura, y una incertidumbre del 5 %.

6. TRABAJO A FUTURO

De los resultados obtenidos, se va a modificar el sistema para que alcance temperatura hasta 500 °C con un diseño análogo. Algunas características del sistema son:

La fuente caliente es un calefactor hecho de una barra de aluminio de 4 cm de longitud y cuyo diámetro es igual al material de referencia, con un devanado de alambre de inconel de 1,6 m de longitud y un valor de 2,4 Ω. El calefactor es alimentado por una fuente de corriente directa que permite obtener temperaturas desde 20 °C hasta 500 °C.

Para la fuente fría se uso un plato de cobre con un serpentín del mismo material, con diámetro de 10

cm, donde existe un flujo constante de agua, la cual se enfría mediante un baño de recirculación que opera de -30 °C a 60 °C.

La barra se cubrió con un caparazón en forma de tubo de PVC de 10 cm de diámetro, cuyo interior se forro con material aislante de fibra de vidrio, el diámetro interior queda acotado por el diámetro del material de referencia.

7. CONCLUSIONES

El sistema es adecuado para determinar la conductividad térmica de materiales conductores con un error de diseño del orden 2 %.

El sistema no es adecuado para medir materiales de conductividad pobre del orden de la unidad y menor pues el error de diseño es muy grande.

Los materiales muestras deben ser de una longitud igual o menor a la longitud de los materiales de referencia.

Aumentar el espesor del material aislante no reduce significativamente el error.

Para tener un error de diseño menor al 2 % a altas temperaturas; la muestra debe ser de la misma longitud que las barras de referencia.

Se alcanzó un mejor entendimiento de los principios y cuidados para la construcción de aparatos que operen bajo el método de barras cortadas.

Los valores de conductividad térmica de las pruebas preliminares del sistema proporcionan valores con un error del 15 %, los cuales se encuentran fuera de especificaciones.

Estos resultados se deben a que la guarda no está funcionando bien y existe un flujo de calor radial, es decir carece de un buen aislamiento térmico. El sistema se ve influenciado por la variación del medio ambiente.

El nuevo sistema evita estos efectos y así obtener una menor incertidumbre.

REFERENCIAS

[1] ASTM E1225-99 “Standard Test Method for thermal conductivity of solids by the guarded comparative longitudinal heat flow technique”.

- [2] ASTM C 177 "Standard Method for Steady-State heat flux measurement and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus.
- [3] ASTM E220 "Test method for calibration of thermocouples by comparison techniques.
- [4] ASTM E230 Temperature-Electromotive force (EMF) tables for standardized thermocouples.
- [5] N. Ozisik, Heat Conduction, John Wiley and Sons, 1980.
- [6] H. Carslaw, J. Jaeger, Conduction in solids, Oxford University Press, 1990.
- [7] A. Papadopoulos, State of art in thermal insulation material and aims for future developments, Energy Building 37, 2005.
- [8] L. Lira, E. Méndez, Medición de la conductividad térmica de materiales aislantes en CENAM, Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica, 2007, CENAM, Querétaro.

APÉNDICE

En las tablas siguientes se presentan los errores porcentuales máximos debido a flujos de calor radial para cada diferencia de temperatura.

Cobre										
Longitud (cm)	Ø=38,2 mm					Ø=57,3 mm				
	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C
1	0.040	0.071	0.081	0.086	0.088	0.026	0.050	0.058	0.062	0.064
2.5	0.044	0.078	0.089	0.094	0.096	0.030	0.056	0.065	0.069	0.071
5	0.052	0.089	0.101	0.107	0.109	0.036	0.065	0.075	0.080	0.081
7.5	0.059	0.099	0.112	0.119	0.121	0.042	0.074	0.085	0.090	0.092
10	0.066	0.109	0.124	0.131	0.133	0.048	0.083	0.095	0.101	0.102

Oro										
Longitud (cm)	Ø=38,2 mm					Ø=57,3 mm				
	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C
1	0.041	0.072	0.082	0.088	0.089	0.026	0.051	0.059	0.063	0.065
2.5	0.046	0.080	0.092	0.097	0.099	0.031	0.058	0.067	0.072	0.073
5	0.055	0.094	0.107	0.113	0.115	0.038	0.069	0.080	0.085	0.087
7.5	0.064	0.107	0.121	0.128	0.130	0.046	0.081	0.092	0.098	0.099
10	0.073	0.120	0.135	0.143	0.145	0.053	0.091	0.104	0.110	0.112

Aluminio										
Longitud (cm)	Ø=38,2 mm					Ø=57,3 mm				
	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C
1	0.042	0.074	0.084	0.090	0.092	0.027	0.052	0.061	0.065	0.066
2.5	0.049	0.085	0.096	0.102	0.104	0.033	0.061	0.071	0.076	0.077
5	0.060	0.102	0.116	0.123	0.125	0.043	0.076	0.087	0.093	0.095
7.5	0.072	0.119	0.135	0.142	0.145	0.052	0.091	0.103	0.110	0.112
10	0.083	0.136	0.153	0.161	0.164	0.062	0.105	0.119	0.126	0.128

Zinc										
Longitud (cm)	Ø=38,2 mm					Ø=57,3 mm				
	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C
1	0.046	0.081	0.092	0.098	0.100	0.030	0.058	0.067	0.072	0.073
2.5	0.060	0.102	0.116	0.123	0.125	0.042	0.075	0.086	0.092	0.094
5	0.082	0.136	0.154	0.163	0.166	0.060	0.104	0.118	0.126	0.133
7.5	0.105	0.169	0.190	0.201	0.204	0.079	0.137	0.159	0.170	0.173
10	0.127	0.201	0.224	0.236	0.239	0.097	0.169	0.194	0.207	0.211

Estaño										
Longitud (cm)	Ø=38,2 mm					Ø=57,3 mm				
	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C
1	0.053	0.091	0.104	0.110	0.112	0.035	0.066	0.076	0.081	0.083
2.5	0.076	0.127	0.144	0.152	0.155	0.054	0.095	0.116	0.125	0.128
5	0.114	0.199	0.230	0.246	0.251	0.086	0.164	0.190	0.203	0.207
7.5	0.151	0.272	0.310	0.330	0.336	0.129	0.226	0.257	0.273	0.278
10	0.199	0.338	0.383	0.405	0.412	0.167	0.282	0.319	0.337	0.343

Plomo										
Longitud (cm)	Ø=38,2 mm					Ø=57,3 mm				
	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C
1	0.066	0.112	0.127	0.135	0.137	0.046	0.083	0.099	0.107	0.110
2.5	0.109	0.190	0.231	0.248	0.253	0.085	0.165	0.191	0.204	0.208
5	0.203	0.324	0.400	0.424	0.432	0.172	0.293	0.333	0.352	0.359
7.5	0.296	0.436	0.547	0.578	0.587	0.251	0.407	0.458	0.483	0.491
10	0.381	0.527	0.674	0.708	0.719	0.323	0.508	0.567	0.595	0.605

Acero Inoxidable										
Longitud (cm)	Ø=38,2 mm					Ø=57,3 mm				
	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C
1	0.103	0.189	0.221	0.237	0.243	0.076	0.156	0.182	0.195	0.199
2.5	0.244	0.422	0.480	0.509	0.519	0.209	0.353	0.400	0.424	0.432
5	0.482	0.770	0.862	0.908	0.923	0.412	0.649	0.725	0.763	0.775
7.5	0.692	1.058	1.171	1.226	1.244	0.592	0.897	0.993	1.039	1.055
10	0.876	1.285	1.406	1.464	1.483	0.748	1.098	1.204	1.255	1.271

Baquelita										
Longitud (cm)	Ø=38,2 mm					Ø=57,3 mm				
	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C
1	1.007	1.621	1.821	1.919	1.952	0.871	1.374	1.537	1.619	1.646
2.5	2.531	3.721	4.080	4.253	4.310	2.202	3.209	3.518	3.668	3.717
5	4.451	5.765	6.105	6.261	6.311	3.922	5.132	5.456	5.607	5.655
7.5	5.604	6.566	6.785	6.882	6.913	5.014	5.988	6.218	6.322	6.354
10	6.214	6.813	6.939	6.993	7.010	5.641	6.307	6.451	6.514	6.534

Fibra de vidrio										
Longitud (cm)	Ø=38,2 mm					Ø=57,3 mm				
	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C	ΔT=20 °C	ΔT=50 °C	ΔT=100 °C	ΔT=200 °C	ΔT=300 °C
1	18.516	22.491	23.422	23.837	23.969	17.047	20.937	21.882	22.308	22.444
2.5	26.128	27.051	27.230	27.307	27.330	25.030	26.167	26.393	26.490	26.520
5	27.843	27.914	27.927	27.933	27.934	27.214	27.354	27.380	27.391	27.394
7.5	28.015	28.024	28.026	28.026	28.026	27.534	27.565	27.571	27.573	27.574
10	28.038	28.024	28.040	28.0408	28.040	27.614	27.624	27.626	27.627	27.627