

## ESTIMACION DEL ERROR OPERACIONAL DE UN TRANSDUCTOR DE FLUJO DE CALOR

Mariela Cristina Vieytes\*, Vicente Leonardo Volantino, José Víctor Moruga.  
 Unidad Técnica Habitabilidad Higrotérmica, CECON, INTI.  
 Casilla de correo 157 (1650) San Martín, Prov. Buenos Aires, ARGENTINA  
 Fax: 753-5784 - E-mail: vvolutanti@inti.gov.ar

### RESUMEN

En este trabajo se analiza teóricamente el error operacional que se comete en las mediciones "in situ" del flujo de calor que atraviesa una pared dada. Dichos cálculos se realizan para una placa transductora de flujo de calor (fluxímetro) colocada en la superficie de dos paredes de comportamiento térmico muy diferente. Luego se comparan los resultados y se obtienen conclusiones sobre la confiabilidad de las mediciones en uno y otro caso.

### INTRODUCCION

En el INTI se está abordando la tarea de certificación de distintos materiales y productos industriales. En el ámbito de la construcción, el CECON (Centro de investigación y desarrollo en construcciones) por su parte, está haciendo lo propio en diferentes líneas de acción. Una de ellas es la referida a la certificación energética de edificios, para lo cual se está trabajando en el análisis de los valores de transmitancia y resistencia térmica de los elementos de la envolvente. Por este motivo es necesario desarrollar técnicas de medición y procedimientos de evaluación con el instrumental portátil que existe actualmente en nuestros laboratorios.

Para la determinación de las magnitudes físicas mencionadas, es necesario conocer la densidad de flujo de calor que atraviesa el elemento a estudiar. La misma es medida con un transductor de flujo de calor. Este dispositivo consiste de una placa cuya región central es la zona de medición, rodeada por una región de guarda que contribuye a que el flujo de calor sea perpendicular a la superficie detectora[4]. Toda la placa posee un revestimiento que protege los componentes del sensor. La región de medición emplea juntas de unos 2000 pares de termocuplas Cobre-Constantan sobre los lados opuestos del material interior. Cuando un flujo de calor atraviesa la placa, una diferencia de temperaturas se establece en las juntas de las termocuplas generando una fuerza electromotriz que es directamente proporcional al flujo pasante. Un esquema del detector puede observarse en la Figura 1.

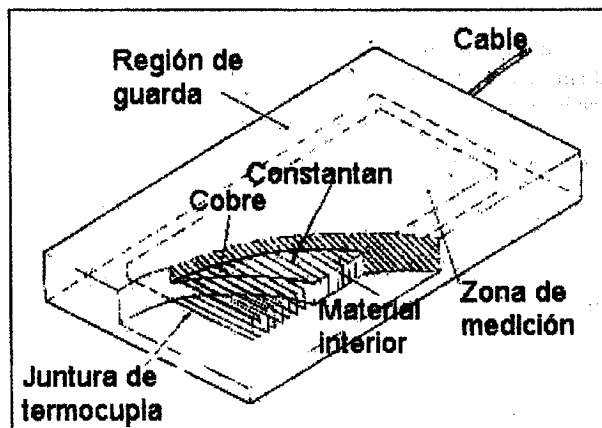


Figura 1: Esquema del fluxímetro.

Existen dos fuentes principales de error, la calibración del fluxímetro para el cual es necesario determinar el factor de proporcionalidad entre la fem inducida y el flujo de calor[3], y el llamado error operacional, que es el objeto de este estudio.

Si el fluxímetro fuera ideal, es decir infinitamente delgado y de las dimensiones de la pared a medir, el error operacional no existiría. Por lo tanto, el mismo es ocasionado por las dimensiones finitas que posee la placa, ya que desvía tanto las isotermas como el flujo de calor del elemento a medir con respecto a los valores originales a ser medidos. De lo mencionado se desprende que placas que posean un espesor mucho menor con respecto a sus otras dimensiones ofrecerán un error operacional menor.

\* Becaria del CECON

Puesto que en algunos casos el error operacional puede alcanzar el 50%, es necesario establecer el orden de magnitud que posee en el rango de materiales que comúnmente se presentan en la práctica. La definición de dicho error es, según la norma ISO 9869[2]:

$$e = (q - q') / q' \quad (1)$$

donde  $q$  es la densidad de flujo de calor medida con el fluxímetro y  $q'$  es la que atravesaría la pared sin el fluxímetro.

## METODO DE CALCULO

Para estimar el error operacional se debe resolver la ecuación diferencial bidimensional del calor en estado estacionario:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2)$$

donde  $T$  es la temperatura de la pared,  $\nabla^2$  es el operador Laplaciano. Es necesario imponer las condiciones de contorno correspondientes al problema que se quiere tratar, es decir la temperatura del aire a cada lado de la pared y la ecuación de balance térmico:

$$q = (Eh_r + h_c) (T_n - T_s) \quad (3)$$

donde  $q$  es la densidad de calor que atraviesa la pared o el fluxímetro (según sea el caso a resolver),  $E$  es el coeficiente de emisividad periférica,  $h_r$  el coeficiente de transmisión de calor por radiación,  $h_c$  el coeficiente de transmisión de calor por convección,  $T_s$  es la temperatura superficial de la pared o el fluxímetro (según la situación a resolver), y  $T_n$  es la temperatura ambiental. Las definiciones de estas cantidades según la norma ISO 9869[2] son:

$$h_r = 4 \sigma T_m^3 \quad (4)$$

$$T_m \equiv (T_r + T_s) / 2 \quad (5)$$

$$T_n = [Eh_r / (Eh_r + h_c)] T_r + [h_c / (Eh_r + h_c)] T_a \quad (6)$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ),  $T_m$  es la temperatura radiante media absoluta,  $T_r$  es la temperatura radiante media,  $T_a$  es la temperatura del aire.

Estos cálculos se realizan tanto para la pared sin la placa transductora, como con ella. Un método analítico aproximado se obtiene utilizando las funciones de Green[1].

En este caso, la ecuación (2) se resolvió a través de un código de cálculo que permite conocer los valores de la temperatura sobre la superficie y la transmitancia térmica del material a medir, bajo las condiciones de contorno impuestas. Debido a que se analiza el caso de la pared sin ningún elemento enfrentado a ella, se puede considerar que la temperatura radiante media es la del aire. Esto simplifica la ecuación de la temperatura ambiente ya que coincide con el valor de la del aire.

La transmitancia térmica se relaciona con el flujo de calor de la siguiente manera:

$$K = q / (T_{ni} - T_{ne}) \quad (7)$$

donde  $K$  es la transmitancia térmica,  $q$  es la densidad de flujo de calor que atraviesa la pared (en dirección perpendicular a la superficie),  $T_{ni}$  y  $T_{ne}$  son las temperaturas ambiente del interior y exterior a la pared respectivamente.

Si se hace uso de la ecuación (7) para la pared sin sensor y con sensor, es posible expresar el error operacional de la siguiente forma:

$$e = [K (T_i - T_e) - K' (T_i' - T_e')] / K' (T_i' - T_e') \quad (8)$$

donde las variables primadas corresponden a la pared sin el fluxímetro. Como en este caso las temperaturas ambientales a ambos lados corresponden a las del aire, la ecuación (8) se reduce a:

$$e = [K - K'] / K' \quad (9)$$

Por lo tanto una forma de estimar cuan grande es el error que se comete, es observando el cambio del coeficiente de transmitancia térmica. Si se lograra que dicho coeficiente no varíe al colocar el fluxímetro, se estaría anulando el error operacional.

## RESULTADOS

Con la idea de estimar el orden de magnitud del error en todo el rango de materiales que se presentan en la práctica, se estudiarán dos casos extremos.

El primero es un panel sandwich de chapa galvanizada como revestimiento con núcleo de poliuretano rígido de 0,1m de espesor. Esta es una pared que típicamente se utiliza en cámaras frigoríficas.

El segundo es una pared de hormigón armado estructural de 0,1m de espesor. Esta pared representa el caso de un sistema muy conductor de calor, cuya utilización se ha podido comprobar en la construcción de viviendas de interés social.

En los dos cálculos se utilizaron las mismas temperaturas, siendo la interior de 18°C (condición de invierno para el nivel mínimo de confort higrotérmico) y la exterior de 0.7°C (temperatura exterior de diseño para una localidad del conurbano bonaerense), y áreas de 1m<sup>2</sup>. En las Tablas 1 y 2 se pueden observar los parámetros característicos para ambas situaciones.

Tabla 1. Parámetros característicos para el caso aislante.

Material	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Capacidad calorífica específica (Wh/Kg K)
Aire	0.025	1.29	0.25
Fluómetro	0.200	1000	0.27
Poliuretano rígido	0.020	35	0.27
Chapa galvanizada	58	7800	0.123

Tabla 2. Parámetros característicos para el caso conductor.

Material	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Capacidad calorífica específica (Wh/Kg K)
Aire	0.025	1.29	0.25
Fluómetro	0.200	1000	0.27
Hormigón armado estructural	1.630	2400	0.24

En las Figuras 2 y 3 se muestra la distribución de temperatura en los dos casos analizados, mientras que los resultados de los cálculos se presentan en las Tablas 3 y 4 respectivamente.

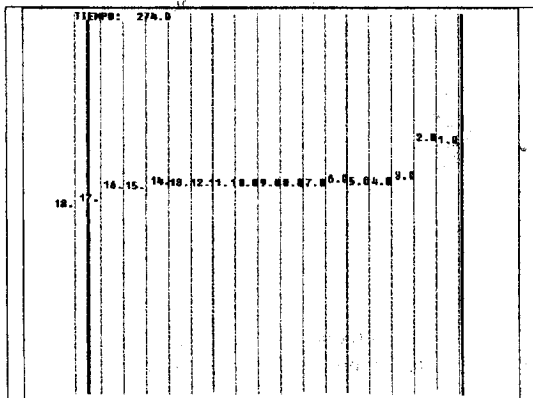


Figura 2a: Panel sandwich con núcleo de poliuretano.

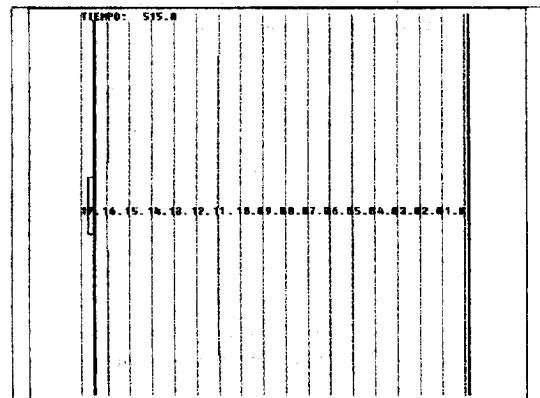


Figura 2b: Idem con sensor de flujo de calor.

Tabla 3: Resultados obtenidos para panel sandwich con núcleo de poliuretano.

K (W / m <sup>2</sup> K)	K' (W / m <sup>2</sup> K)	e (%)
0,190	0,192	1,0

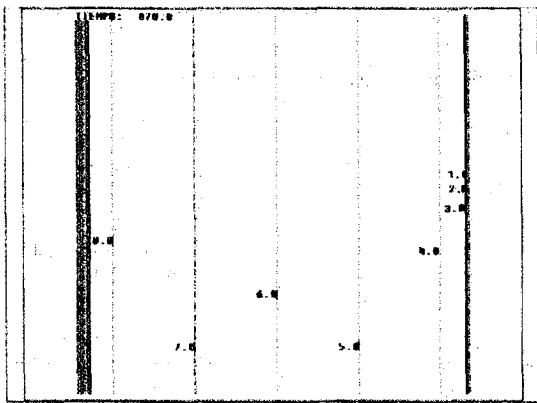


Figura 3a: Pared de hormigón armado estructural.

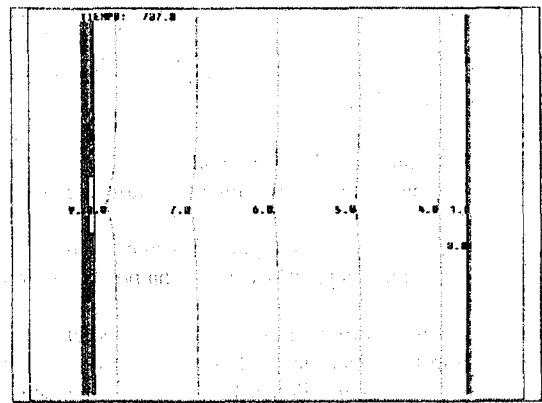


Figura 3b: Idem con sensor de flujo de calor.

Tabla 4: Resultados obtenidos para pared de hormigón armado estructural.

$K$ ( $W / m^2 K$ )	$K'$ ( $W / m^2 K$ )	$e$ (%)
4,15	4,32	3,9

### CONCLUSIONES

Los errores que se presentan en mediciones in situ de la transmitancia térmica se originan en diversos aspectos del proceso de medición. Pueden contarse entre ellos los cambios cíclicos de temperatura, los cambios en las temperaturas medias de cada ciclo, la relación entre las dimensiones del fluxímetro y las de la pared a ensayar, la ubicación del fluxímetro (puentes térmicos, roturas de la pared, etc.), influencia de las magnitudes climáticas, y las intrínsecas del detector usado que son las analizadas en este trabajo. La suma de todas ellas puede dar una exactitud en las mediciones realizadas que varía entre el 14% y el 28%, según la norma ISO 9869[2]. Es claro entonces, que el error operacional debe ser lo suficientemente pequeño como para que la medición pueda llevarse a cabo eficientemente.

Los resultados obtenidos en las Tablas 3 y 4 aseguran que el error operacional, tanto en los casos estudiados como en los casos con transmitancia térmica comprendida entre ellos, no aportará errores que hagan que los resultados carezcan de sentido. Además pueden compararse estos valores entre sí, resultando más exacto medir una pared aislante contra una conductora de calor. Estos resultados pueden relacionarse con los obtenidos en trabajos anteriores[1]. En la Figura 4 se observa que no hay perturbaciones del flujo de calor en un material perfectamente aislante mientras que si las hay, y son máximas, para uno idealmente conductor.

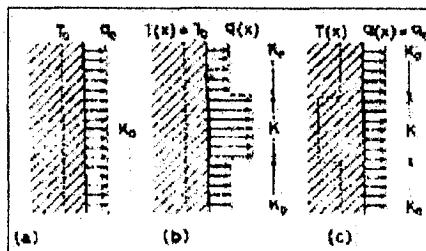


Figura 4: a) Pared sin sensor con un flujo de calor uniforme y perpendicular a la misma. b) Pared perfectamente conductora con sensor. c) Pared perfectamente aislante con sensor.

### REFERENCIAS

- [1] Baba T, Ono A, Hattori S, Analysis of operational errors of heat flux transducers placed on wall surfaces. Rev. Sci. Instrum., 56 (1985).
- [2] ISO 9869, Thermal insulation- building elements- In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.
- [3] ASADES'96, 05.9, Sistema de medición in situ para la evaluación de patologías higrotérmicas en la construcción, V. Volantino, G. Carlo.
- [4] ASTM C 1046-91, Standard practice for In situ measurement of heat flux and temperature on building envelope components.