

CRITERIOS DE DISEÑO TÉRMICO PARA UN INSTRUMENTO QUE UTILIZA LA TÉCNICA TRANSITORIA DEL HILO CALIENTE

Leonel Lira-Cortés, Saúl García Duarte, Luis Castro Silva
 Centro Nacional de Metrología
 km 4.5 Carretera a los Cués Municipio El Marqués 76246, Querétaro, México
 +52 442 2110545 lira@cenam.mx

Resumen: En un experimento de hilo caliente transitorio, la conductividad térmica del fluido se obtiene a partir de las mediciones de la historia de la temperatura de una sección central de un alambre de radio r_o , el cual actúa como una fuente de calor, q , por unidad de longitud. Los criterios de diseño térmico se usan para construir el instrumento con el fin de obtener las menores desviaciones.

1. INTRODUCCIÓN

Un método primario de medición, es un método cuya operación está completamente descrita y entendida, para el cual se puede escribir su incertidumbre en términos del Sistema Internacional y cuyos resultados son aceptados sin referencia a algún estándar de la cantidad a ser medida.

En un experimento de hilo caliente transitorio, la conductividad térmica del fluido se obtiene a partir de las mediciones de la historia de la temperatura de una sección central de un alambre de radio r_o , el cual actúa como una fuente de calor, q , por unidad de longitud. La conductividad térmica de un estado termodinámico (T_r, P_r) se deriva de tales mediciones por la aplicación de la ecuación de trabajo

$$\Delta T_{id} = \Delta T_{iw} + \sum \delta T_i = \frac{q}{4\pi\lambda(T_r, \rho_r)} \ln \frac{4\alpha t}{r_o^2 C}$$

donde T_r es la temperatura y ρ_r es la densidad correspondiente a la presión de equilibrio P_i , en un instrumento propiamente diseñado, operando bajo condiciones bien elegidas, las correcciones a ser aplicadas al incremento de la temperatura se pueden reducir justo a dos, las propiedades físicas del alambre y la frontera exterior de recipiente del alambre. Ambas de esas correcciones pueden ser tratadas aditivamente y pueden por sí mismas permanecer pequeñas por un adecuado diseño.

2. LA TÉCNICA TRANSITORIA DEL HILO CALIENTE

El modelo ideal para esta técnica consiste de una línea fuente de energía, de longitud infinita, en posición vertical, con capacidad calorífica cero y conductividad térmica infinita que se encuentra inmersa en un fluido isotrópico, infinito, con

propiedades independientes de la temperatura y en equilibrio termodinámico con la línea fuente en $t=0$. La transferencia de energía de la línea fuente hacia el fluido, en dirección radial, se supone conductiva.

Si la línea fuente se reemplaza por un alambre cilíndrico de radio r_o , para el cual se supone una temperatura uniforme igual a la del fluido del modelo ideal en $r = r_o$, entonces para pequeños valores de $r/4\alpha t$, se obtiene

$$\Delta T_{id}(r_o, T) = T(r_o, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_o^2 C} \right) + \frac{r_o^2}{4\alpha t} \right] + \dots$$

donde $C = \exp(\gamma)$. Si el radio se elige tal que el segundo término del lado derecho de la ecuación sea menor que 0.01% de ΔT_{id} , es claro que en este arreglo ideal, el incremento de la temperatura del alambre está dado por [1]:

$$\Delta T_{id}(r_o, T) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_o^2 C} \right) \right]$$

Esta es la ecuación de trabajo fundamental de la técnica transitoria de hilo caliente, esta permite obtener la conductividad térmica del fluido a partir de la pendiente de la línea recta ΔT_{id} , vs $\ln t$. La difusividad térmica se puede obtener de la intercepción o del valor absoluto de ΔT_{id} , en un tiempo fijo.

3. CORRECCIONES AL MODELO IDEAL

En cualquier instrumento real, la fuente de calor es un alambre de metal de longitud finita, el cual también sirve como termómetro. Así, el incremento de temperatura en el alambre ΔT_w , se desvía del valor ideal aun en la superficie del alambre. Los resultados se expresan en forma de pequeñas

correcciones, δT_i , que se aplica al incremento de temperatura medido, ΔT_w , tal que:

$$\Delta T_{id} = \Delta T_{iw} + \sum \delta T_i$$

Los valores de las diferentes correcciones se han evaluado y se presentan por diversos autores [2], recientemente se han analizado para permitir determinar algún criterio de diseño térmico [3] y se presentan en la tabla I

Tabla I. Desviaciones de la idealidad en la técnica transitoria del hilo caliente.

Corr.	Fuente	Recomendación
δT_1	Propiedades. Físicas del hilo	Aplicar corrección y seleccionar la escala de tiempo
δT_2	Frontera exterior	Aplicar corrección
δT_3	Trabajo de compresión	Trabajar donde no es significativo
δT_4	Convección radial y disipación viscosa	Seleccionar escala de tiempo
δT_5	Corrección de radiación	Trabajar donde no es significativo
δT_6	Salto de temperatura	Trabajar donde no es significativo
δT_7	Propiedades del fluido	En la temperatura de referencia
δT_8	Propiedades del fluido (región crítica)	Aplicar corrección
δT_9	Error por truncamiento	Despreciable por diseño
δT_{10}	Cubierta del alambre	Aplicar corrección

Si se consideran las propiedades y dimensiones finitas del hilo, es decir, el hecho que el alambre no tiene radio cero, r_o , tiene capacidad calorífica finita, $(c_p)_w$ y tiene una conductividad térmica, λ_w . Una parte de la energía generada dentro del alambre se usa para incrementar su propia temperatura y no simplemente aquella del fluido que lo rodea. Como un resultado se tiene la corrección por propiedades termofísicas finitas del alambre, δT_1 , la cual decrece con el incremento del tiempo, se debe aplicar al incremento de temperatura. La cual está dada por:

$$\delta T_1 = \frac{q}{4\pi\lambda} \frac{r_o^2 [(\rho c_p)_w - \rho c_p]}{2\lambda t} \ln \frac{4\alpha t}{r_o^2 C} \frac{r_o^2}{2\alpha t} + \frac{r_o^2}{4\alpha_w t} \frac{\lambda}{2\lambda_w}$$

donde α es la difusividad térmica del material del alambre. La ecuación se puede simplificar para incluir únicamente términos dependientes del tiempo para la evaluación de la conductividad térmica. Si se

elige adecuadamente el radio del alambre, r_o y se mide en un tiempo mayor que 100 ms, la magnitud de esta corrección se puede limitar a ser máximo de 0.5 % del incremento de temperatura.

A causa de que el fluido muestra está contenido en un recipiente, existe una frontera exterior finita que debe considerarse. Por simplicidad la frontera debe ser cilíndrica y con un radio b . Durante la parte inicial de las mediciones, la onda térmica transitoria que se expande hacia fuera del alambre no se ve afectada por la presencia de la frontera. Conforme el tiempo evoluciona, el calor en $r=b$ incrementa la temperatura de la pared por una cantidad no despreciable causando que la temperatura del alambre se incremente hasta caer abajo del modelo ideal. La corrección por la frontera externa δT_2 , se tiene que sumar al incremento de temperatura medido del alambre, δT_2 , está dado por:

$$\delta T_2 = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{4\alpha t}{b^2 C} + 0 \sum_{v=1}^{\infty} e^{g_v \alpha t / b^2} (\pi Y(g_v))^2$$

donde g_v , son las raíces de $J(g_v) = 0$ y $Y(g_v)$ son funciones de Bessel. La corrección se incrementa conforme transcurre el tiempo, pero por medio de una adecuada selección del radio de las fronteras exteriores y el tiempo de medición, las correcciones se pueden hacer pequeñas, para instrumentos que operan gases y líquidos y generalmente es menor que 0.1 % del ΔT_{id} .

4. CONCLUSIÓN

Se encontró que solo dos de las desviaciones estudiadas permiten obtener algún criterio de diseño. Su conocimiento permite además de diseñar un equipo con ciertas características, encontrar condiciones de operación que permiten mantener las desviaciones mínimas, además permite evaluar otros instrumentos al aplicar dichos criterios.

REFERENCIAS

[1]. H. S. Carslaw y J. C. Jaeger, "Conduction of heat in solids", 2nd. Ed., Oxford University Press, 1959.
 [2]. J.J. Healy, J.J. de Groot y J. Kestin, "The Theory of the Transient Hot-Wire Method for Measuring Thermal Conductivity", Physica, Series C. **V. 82**, p. 393, (1976).
 [3]. Francisco Morales Cuevas, "Diseño de un aparato para medir la conductividad térmica de fluidos", Tesis de maestría. Abril de 1998.