

# REDUCCION DE LA INCERTIDUMBRE EN LA MEDICION DE TEMPERATURA DURANTE UN EXPERIMENTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EBULLICION NUCLEADA

Ignacio R. Martín Domínguez    José A. Pérez Galindo

Instituto Tecnológico de Durango.    Dept. de Metal - Mecánica.  
Felipe Pescador 1830 Ote.  
34080 Durango, Dgo.  
(18) 18 - 5586 ext 126 y 114    Fax: (18) 18 - 4813

## RESUMEN

Se describe un sistema experimental construido para el estudio del inicio y terminación de la ebullición nucleada. Al analizar un detalle constructivo aparentemente sin importancia, se demuestra que puede introducir niveles tales de incertidumbre en las mediciones de temperatura, que invalidarían los resultados obtenidos del sistema. Se desarrolla un procedimiento de calibración que permite reducir la incertidumbre máxima esperada desde casi  $\pm 50^\circ\text{C}$  a solo  $\pm 2.5^\circ\text{C}$ . Se enfatiza la importancia de realizar análisis de incertidumbre durante el diseño de sistemas experimentales.

## INTRODUCCIÓN

Se construyó un circuito cerrado de flujo, para estudiar los fenómenos asociados al inicio de la ebullición nucleada. El objetivo fue observar la evolución de la temperatura de sobrecalentamiento de pared, antes y después del inicio y terminación del mecanismo de ebullición nucleada, para flujo forzado de un refrigerante por una sección de prueba anular.

El objetivo del presente artículo es presentar el análisis de un problema de incertidumbre experimental y la solución del mismo, para resaltar la importancia que debe dársele durante la planeación de un programa experimental. Se mostrará como un detalle constructivo, aparentemente sin importancia, es capaz de introducir errores en las mediciones de tal magnitud que invalidarían cualquier resultado obtenido.

## SISTEMA EXPERIMENTAL

Las características constructivas del circuito experimental

se muestran en la Figura 1. La sección de pruebas se muestra en la Figura 2, y consta de un tubo de cobre interior y uno exterior de vidrio que forma una sección de flujo anular, y permite observar el fenómeno de ebullición en la superficie exterior del tubo de cobre. Un calentador eléctrico ensamblado dentro de un cartucho de cobre, como se muestra en la Figura 3, se utiliza para calentar la sección de prueba y provocar la ebullición del refrigerante en la superficie del tubo de cobre. El cartucho se encuentra colocado en el extremo de un tubo de acero, que sirve para deslizar al cartucho dentro del tubo de cobre y colocarlo en cualquier posición deseada. El cartucho entra ajustadamente dentro del tubo de cobre, y además se aplicó una capa de pasta térmica a base de silicón para mejorar el contacto térmico entre cartucho y tubo de cobre.

Se desea variar la posición del cartucho calentador, con el fin de observar la aparición del mecanismo de ebullición nucleada en cualquier zona de un mismo tubo de prueba y en diferentes tubos posteriormente. Por ello, la instrumentación para la medición de la temperatura en la superficie del tubo de cobre se integró al mismo cartucho, como se muestra en la Figura 2 y en la Figura 4.

Se utilizan 16 termopares, colocados en la superficie del cartucho en cuatro secciones y a intervalos de  $90^\circ$ , como se muestra en la Figura 4 y en la Figura 3, donde se puede observar la posición de los termopares en relación al cartucho calentador, al tubo de cobre y al tubo de vidrio.

## DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema, objeto del presente artículo, consiste en la estimación de la temperatura de la superficie del tubo de cobre, en los puntos situados directamente frente a los

termopares, sobre la dirección radial de cada uno de ellos. La temperatura de la superficie del tubo es una de las variables principales en el estudio de la inyección de la ebullición nucleada, ya que junto con la temperatura de saturación del fluido determinan el sobrecalentamiento de pared.

El interior de los tubos de cobre no es perfectamente cilíndrico. Se comprobó que la distancia entre pares de termopares diametralmente opuestos no era constante para los 8 pares. Además no se puede garantizar que la posición del cartucho sería siempre coaxial con el tubo de cobre.

La estimación de la temperatura superficial del tubo de cobre requiere conocer la caída de temperatura a través de la película de pasta térmica, existente entre el cartucho y el tubo de cobre, y a través de la pared del tubo de cobre, todo esto a diferentes densidades de flujo térmico. El calentador eléctrico utilizado es capaz de suministrar hasta 500 W. La conductividad térmica de la pasta de silicón utilizada es solo un 0.6 % de la del cobre, aún cuando es la mejor disponible. Por ello se decidió realizar un análisis detallado de las posibles caídas de temperatura a través de la capa de pasta y la pared del tubo de cobre.

La Figura 5 muestra el perfil de temperatura esperado en el sistema formado por el cartucho y el tubo de cobre. De ahí se observa que la caída de temperatura a través de la capa de pasta térmica es altamente dependiente del espesor de la misma, por lo que se procedió a realizar un análisis más detallado de la incertidumbre introducida en las mediciones de temperatura, debidas al desconocimiento del espesor real de la capa de pasta frente a cada termopar.

## ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Se tomaron mediciones de los diámetros reales entre los 8 pares de termopares, situados diametralmente opuestos sobre la superficie del cartucho calentador. También se tomaron mediciones de diámetros internos en el tubo de cobre, a diferentes ángulos y longitudes internas.

El espesor de la capa de pasta térmica frente a cualquier termopar puede variar desde cero, si se tiene el caso en que el termopar esté en contacto con la superficie interna del tubo de cobre, hasta un máximo que correspondería a la combinación de desalineación máxima del cartucho con diámetro interno máximo del tubo de cobre, para el termopar diametralmente opuesto al que se encontraría en contacto con el tubo. Consecuentemente la caída de temperatura entre cada termopar y la pared del tubo de cobre variará también entre cero y un máximo, para cada potencia eléctrica aplicada al calentador. La Figura 6 muestra lo anterior para varios niveles de potencia eléctrica aplicada.

De la Figura 6 se observa que la diferencia entre la temperatura medida por un termopar y la temperatura existente en la superficie del tubo de cobre puede llegar a ser casi 50° C, cuando se aplican 500 W. Este valor constituye la incertidumbre asociada a las mediciones experimentales de temperatura.

## PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Debido a que en la práctica resulta imposible el medir físicamente el espesor real de pasta térmica frente a cada uno de los 16 termopares existentes, la validez de las mediciones de temperatura obtenidas en esas condiciones quedó severamente cuestionada. Sin embargo, analizando la geometría del problema, se observó que era posible determinar indirectamente la resistencia térmica de la capa de pasta bajo ciertas condiciones, permitiendo establecer un procedimiento de calibración.

Bajo condiciones de convección forzada (flujo monofásico), la simetría de la sección de prueba permite asumir que el coeficiente local de transferencia de calor, en la superficie exterior del tubo de cobre, deberá ser igual para las zonas situadas en una misma sección transversal. Esto es, frente a dos termopares diametralmente opuestos el coeficiente local de transferencia de calor es igual. Si además se considera que la temperatura del flujo es también constante sobre cada sección transversal al flujo y que la transferencia de calor ocurre en dirección radial, desde el calentador eléctrico hacia el fluido en contacto con la superficie exterior del tubo de cobre, entonces cualquier diferencia entre las temperaturas medidas por dos termopares diametralmente opuestos se deberá únicamente a la diferencia entre los espesores de las capas de pasta térmica situadas frente a cada uno de ellos. Esto permite entonces desarrollar un algoritmo de calibración, a ejecutarse al inicio de cada sesión experimental o cuando se varíe la posición del cartucho calentador dentro del tubo de cobre.

## DESARROLLO ANALÍTICO

La Figura 7 muestra, en escala muy exagerada para la dimensión del claro, la geometría de una sección transversal de la sección de pruebas. La diferencia de temperaturas entre la medida por el termopar,  $T_s$ , y la del fluido fuera de la capa límite,  $T_b$ , está dada por la ecuación (1), (para la longitud total del cartucho,  $L$ , y la potencia aplicada  $q$ ), en donde los términos dentro del paréntesis son las resistencias térmicas del claro con pasta de silicón, la pared del tubo de cobre y la capa límite convectiva, respectivamente. La Figura 8 muestra la equivalencia eléctrica del sistema y en base a ella la ecuación (1) se puede escribir como la ecuación (2). Aplicando la ecuación (2) a los cuatro termopares de una sección transversal se obtienen las ecuaciones (3) a la (6). Despejando  $T_b$  en las ecuaciones (3)-(6), e igualando las correspondientes a termopares diametralmente opuestos (A con C y B con D), se llega a las ecuaciones (7) y (8). Reconociendo que la suma de las resistencias térmicas  $R_{sA}$  y  $R_{sC}$ , así como  $R_{sB}$  y  $R_{sD}$ , permanece constante para cualquier desalineación posible entre el cartucho y el tubo de cobre, y considerando dichas sumas como dos veces el valor promedio, se obtienen las ecuaciones (9) y (10), en donde la resistencia promedio se calcula mediante la ecuación (11).

Despejando  $R_s$  en las ecuaciones (9) y (10), y substituyendo en las ecuaciones (7) y (8), se obtienen las ecuaciones (12)-(15)

Con lo cual se ha introducido un procedimiento de calibración y las temperaturas de pared pueden ser estimadas ahora mediante la ecuación (16), la cual al aplicarse a cada termopar produce las ecuaciones (17)-(20).

La incertidumbre en las ecuaciones (17)-(20) se deriva ahora únicamente de las variaciones en el diámetro interno del tubo de cobre, pero la fuente principal de incertidumbre, la desalineación entre cartucho y tubo, ha sido eliminada.

El procedimiento de calibración se incorporó dentro del programa de adquisición de datos, y se deberá llevar a cabo al inicio de cada sesión experimental y cada vez que se cambie la posición del cartucho respecto al tubo. La única condición para usar el método de calibración es que el sistema se encuentre transfiriendo calor en estado estable bajo condiciones de convección forzada, sin ebullición.

La incertidumbre resultante, después de aplicar el procedimiento de calibración, en la predicción de la temperatura de la pared del tubo de cobre, se puede apreciar en la Figura 9 como las variaciones acotadas arriba y abajo de la línea de caída de temperatura  $T_3 - T_5$ . No es posible eliminar la incertidumbre totalmente, debido a que el diámetro interior del tubo de cobre presenta pequeñas variaciones y por ello la resistencia promedio de la capa de pasta tampoco es una constante. Tomando en cuenta lo anterior, el valor máximo esperado de incertidumbre en la predicción de la temperatura de la pared de transferencia de calor es ahora de solo  $\pm 2.5$  K, operando a 500 W.

## CONCLUSIONES

Se demostró que de no prestarsele atención a las características constructivas de un aparato experimental, las mediciones obtenidas pueden tener un alto grado de incertidumbre. Se mostró como mediante un análisis del comportamiento térmico del dispositivo fue posible desarrollar un algoritmo de calibración, que permitió reducir el nivel de incertidumbre experimental hasta valores aceptables.

$$T_3 - T_b = q \left[ \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi L \kappa_s} + \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi L \kappa_t} + \frac{1}{2\pi r_5 L h} \right] \quad (1)$$

$$T_3 - T_b = q [R_s + R_t + R_{cnv}] \quad (2)$$

$$T_{3A} - T_b = q [R_{sA} + R_t + R_{cnv}] \quad (3)$$

$$T_{3B} - T_b = q [R_{sB} + R_t + R_{cnv}] \quad (4)$$

$$T_{3C} - T_b = q [R_{sC} + R_t + R_{cnv}] \quad (5)$$

$$T_{3D} - T_b = q [R_{sD} + R_t + R_{cnv}] \quad (6)$$

$$R_{sA} = R_{sC} + \frac{1}{q} [T_{3A} - T_{3C}] \quad (7)$$

$$R_{sB} = R_{sD} + \frac{1}{q} [T_{3B} - T_{3D}] \quad (8)$$

$$R_{sA} + R_{sC} = 2 R_{s,prom} \quad (9)$$

$$R_{sB} + R_{sD} = 2 R_{s,prom} \quad (10)$$

$$R_{s,prom} = \frac{R_{s,max} + R_{s,min}}{2} = \frac{\ln\left(\frac{D.I.t,max}{D.E.cart}\right) + \ln\left(\frac{D.I.t,min}{D.E.cart}\right)}{4 \pi L \kappa_s} \quad (11)$$

$$R_{sA} = R_{s,prom} + \frac{1}{2q} (T_{3A} - T_{3C}) \quad (12)$$

$$R_{sB} = R_{s,prom} + \frac{1}{2q} (T_{3B} - T_{3D}) \quad (13)$$

$$R_{sC} = R_{s,prom} - \frac{1}{2q} (T_{3A} - T_{3C}) \quad (14)$$

$$R_{sD} = R_{s,prom} - \frac{1}{2q} (T_{3B} - T_{3D}) \quad (15)$$

$$T_{3A} - T_{5A} = q (R_{sA} + R_t) \quad (16)$$

$$T_{5A} = T_{3A} - q (R_{sA} + R_t) \quad (17)$$

$$T_{5B} = T_{3B} - q (R_{sB} + R_t) \quad (18)$$

$$T_{5C} = T_{3C} - q (R_{sC} + R_t) \quad (19)$$

$$T_{5D} = T_{3D} - q (R_{sD} + R_t) \quad (20)$$

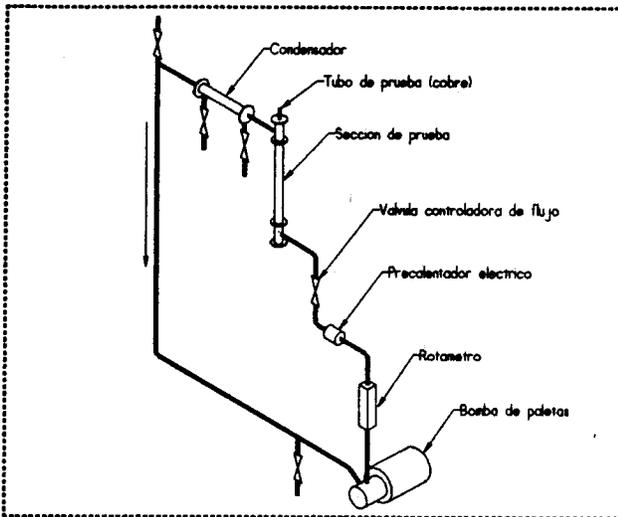


Figura 1. Circuito de flujo experimental

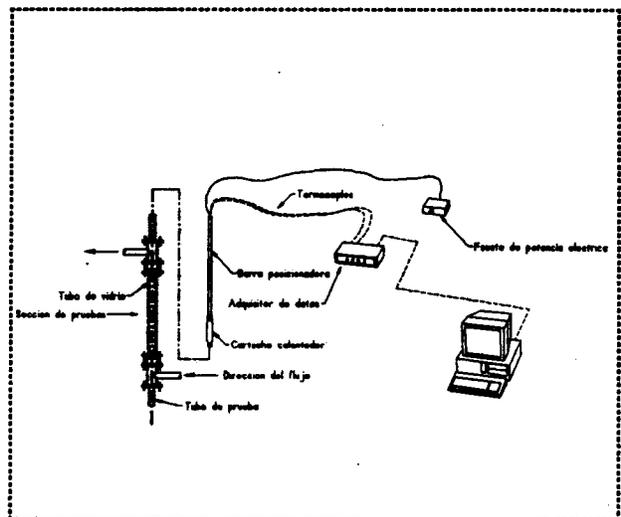


Figura 2. Esquema de la sección de pruebas, con instrumentación

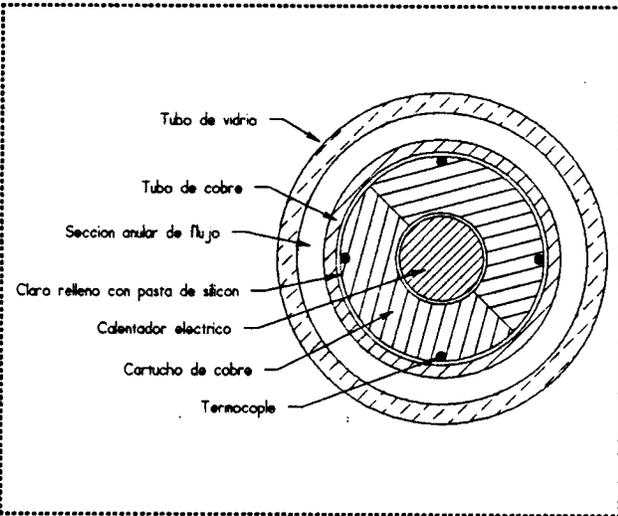


Figura 3. Corte de la sección de pruebas

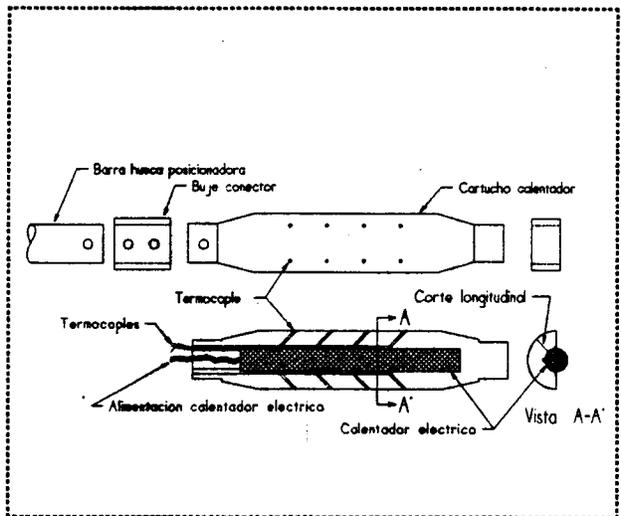


Figura 4. Cartucho calentador con instrumentación

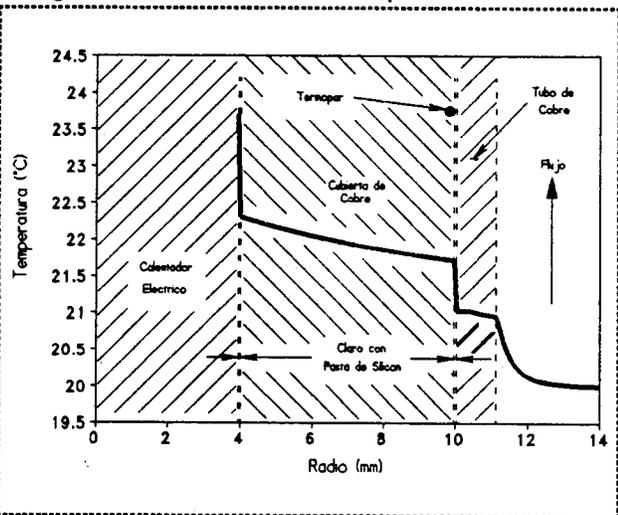


Figura 5. Distribución de temperaturas radial en la sección de pruebas

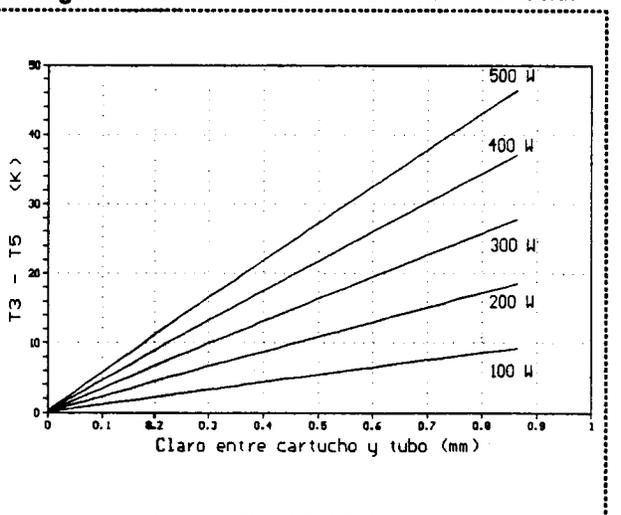


Figura 6. Incertidumbre en la medición de temperaturas

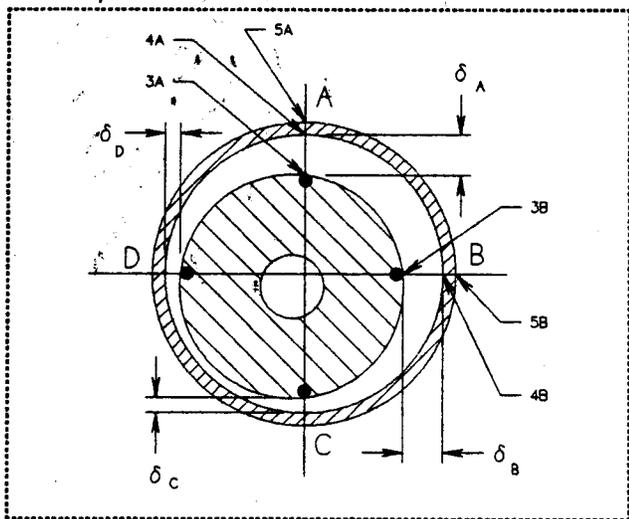


Figura 7. Efecto de la desalineación entre el cartucho y el tubo de cobre (escala muy exagerada)

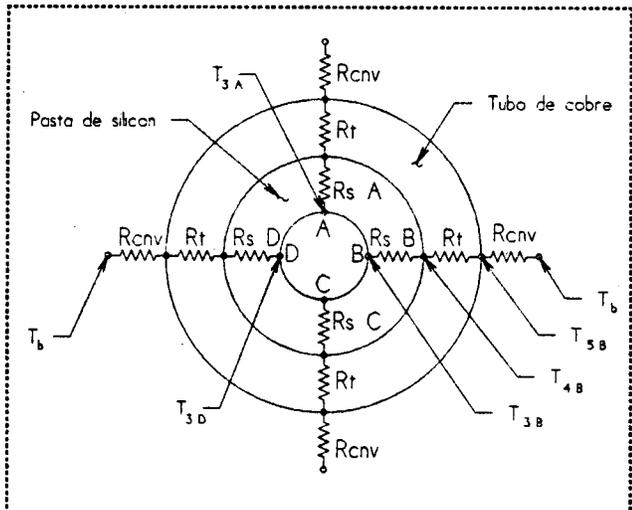


Figura 8. Equivalencia eléctrica de las resistencias térmicas

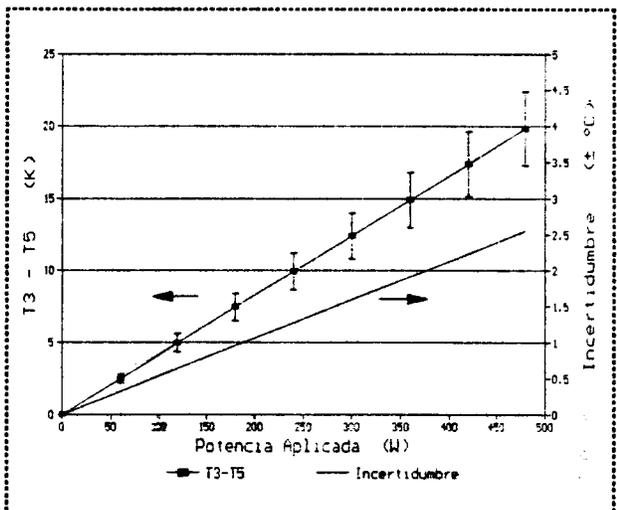


Figura 9. Incertidumbre final



# ENERGÍA SOLAR

Del 2 al 6 de Octubre de 1995  
En la Universidad Autónoma de Baja California Sur  
La Paz, Baja California Sur



## MEMORIA

