

DISEÑO EXPERIMENTAL, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SENSOR DE FLUJO DE CALOR PARA APLICACIONES HVAC/R.

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados del estudio para el diseño experimental, construcción y calibración de un sensor de flujo de calor de utilidad en la detección de flujos de calor muy pequeños en Calefacción, Ventilación, Acondicionamiento de aire y Refrigeración (HVAC/R). Se propone el diseño de un sensor para medir flujos de calor en paredes de edificios y cuartos fríos del orden de 2 a 30 W/(m²K) con una incertidumbre total máxima de 5 % del flujo de calor medido. Actualmente, para otro tipo de aplicaciones, se producen sensores que miden flujos de calor elevados, en los que una incertidumbre de +/- 5 W/(m²K) no es significativa, sin embargo en aplicaciones HVAC/R este nivel de incertidumbre es inaceptable.

PALABRAS CLAVES: Sensor de Flujo de calor, instrumentación, análisis de incertidumbre.

ABSTRACT

This article presents the results of the study for the experimental design, construction and calibration of a heat flow sensor, useful to detection of very small heat flows in Heating, Ventilation, Air conditioning and Refrigeration (HVAC/R). A sensor design is proposed in order to measure heat flows from 2 until 30 W/(m²K) in buildings walls and climatic chambers with a maximal total uncertainty of 5 % of the measured heat flow. At the moment, for another type of applications, sensors are produced to measure highest heat flows, in which an uncertainty of +/- 5 W/(m²K) are not significant, nevertheless in HVAC/R applications this level of uncertainty is unacceptable.

KEYWORDS: Heat flow sensor, instrumentation, uncertainty analysis

1. INTRODUCCIÓN

La crisis energética mundial desatada por la creciente dependencia de combustibles fósiles en la sociedad actual, ha generado una serie de iniciativas que buscan promover el uso racional de la energía y la búsqueda de fuentes alternas de energías renovables y “limpias”.

En lo que respecta al uso racional de la energía, se pretende entre otros objetivos, aumentar la eficiencia de equipos e instalaciones consumidoras de energía, para reducir al mínimo posible su desperdicio. En este aspecto, la industria de la Calefacción, Ventilación, Acondicionamiento de aire y Refrigeración (HVAC/R) representa uno de los sectores con mayor consumo de energía y a su vez uno de los campos en donde el ahorro de energía podría ser bastante significativo.

Con el objeto de estimar las ganancias o pérdidas de energía en Edificios y/o cuartos fríos, se requieren herramientas de diagnóstico que permitan conocer el estado en que se encuentran este tipo de instalaciones, de manera que se puedan implementar medidas correctivas para mejorar sus condiciones de operación y generar una reducción en el consumo de energía.

En aplicaciones HVAC/R, el problema recurrente se presenta especialmente por el deterioro de materiales de

construcción y/o aislamientos térmicos. La dificultad que representa la detección de cambios en las propiedades térmicas de los materiales, acelera su deterioro y genera el correspondiente aumento en el consumo de energía en este tipo de instalaciones.

Dependiendo de las condiciones exteriores, se ha calculado [1] que los flujos de calor presentes en aplicaciones HVAC/R (Paredes de edificios y cuartos fríos) varían de 2 a 30 W/(m²K). Desafortunadamente, este flujo de calor no se puede medir únicamente con sensores de temperatura en cada lado de las paredes y el valor supuesto de su conductividad térmica. Se debe considerar que la temperatura dentro de la pared puede ser incluso mayor que en las superficies debido a su inercia térmica y/o acumulación de energía y cambios en sus propiedades térmicas con el tiempo [2,3,4]. Actualmente, para otro tipo de aplicaciones, se producen sensores que miden flujos de calor elevados, en los que una incertidumbre de +/- 5 W/(m²K) no es significativa, sin embargo en aplicaciones HVAC/R este nivel de incertidumbre es inaceptable. Se propone por lo tanto en este trabajo, el diseño de un sensor para medir flujos de calor del orden de 2 a 30 W/(m²K) con una incertidumbre total de 5 % máximo de la cantidad medida, para ser

NÉSTOR FONSECA DIAZ

Ingeniero Mecánico, M.Sc.

Profesor Auxiliar

Universidad Tecnológica de Pereira

nfonseca@utp.edu.co

JUAN CARLOS BURBANO

Ingeniero Mecánico, M.Sc.

Profesor Asociado.

Universidad Tecnológica de Pereira

jburbano@utp.edu.co

usado como herramienta de diagnóstico en este tipo de aplicaciones.

2. PRINCIPIO DE MEDICIÓN

Debido a la inercia térmica del muro y cambios continuos en las propiedades térmicas de los materiales, el flujo de calor no puede ser medido simplemente con la determinación puntual de la temperatura superficial a cada lado de la pared y un valor predeterminado de su conductividad térmica. Para resolver este problema se diseñó y construyó un sensor de flujo de calor con el cual se busca obtener la diferencia de temperatura entre dos caras de una placa de material muy delgado adherido al muro. Esto último, considerando que en condiciones unidimensionales de estado estable, sin generación de energía, el flujo de calor a través de un material es una constante en la dirección de la transferencia [5,6], por lo tanto el flujo de calor que atraviesa la pared atraviesa también la placa. Para que esto sea aplicable y el material del sensor no perturbe el flujo de calor original que atraviesa el muro, la conductividad de la placa sensor debe ser alta y su espesor muy pequeño, lo que implica una diferencia de temperatura muy pequeña entre sus caras y por ende una señal de voltaje muy débil. Esta diferencia de temperatura es medida usando termocuplas (ver figura 1).

Al conectarse en serie muchas termocuplas, la señal de voltaje registrada por el sensor es amplificada para ser medida con mayor precisión, mediante un voltímetro acoplado a la placa sensor.

El número de termocuplas es calculado por lo tanto en función de la precisión requerida, tamaño del sensor e instrumentos de medición y calibración disponibles.

Para esta aplicación en particular, el sensor está compuesto por una placa delgada de circuito electrónico impreso de 38 cm*13 cm y 4mm de espesor. Sobre cada lado de la placa se imprimen 504 pequeñas placas de cobre, conectadas en serie mediante alambres de cobre y constantan que atraviesan la placa, para formar un número equivalente de termocuplas tipo T en serie. Cada termocupla registra la diferencia de temperatura entre las dos caras del material.

Como ya se mencionó antes, el flujo de calor que atraviesa la pared atraviesa también la placa sensor, sin embargo su reducido espesor y alta conductividad, permiten minimizar el efecto de la inercia térmica del instrumento, para medir con mayor precisión el flujo que atraviesa el muro bajo estudio.

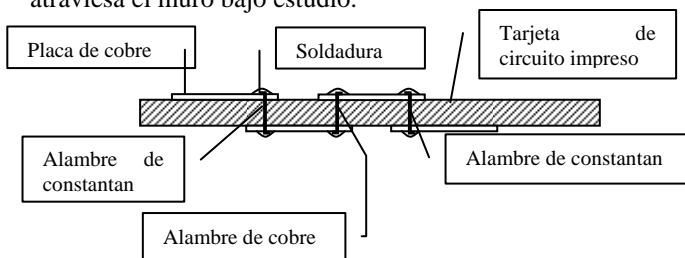


Figura 1. Vista de perfil del sensor de flujo de calor

Una vez realizadas las soldaduras, el sensor presenta irregularidades en la superficie.

En la figura 2, se muestra el sensor antes y después de ser recubierto por una capa de material, usado para evitar la resistencia térmica de contacto del aire, al instalar el sensor sobre el muro.

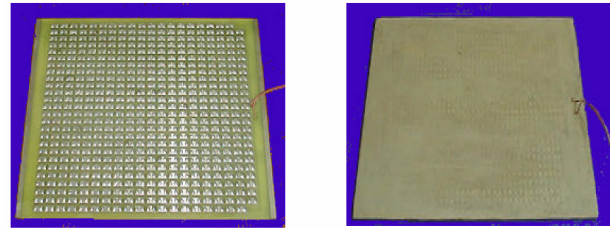


Figura 2. Etapas de fabricación del sensor de flujo de calor

Para reducir la distorsión en el flujo de calor por convección natural, causada por el espesor del sensor sobre el muro, este se recubre con papel adhesivo en la zona del muro donde es instalado.

Como no conocemos la conductividad térmica global del sensor, debemos realizar una calibración del instrumento para determinar una ley entre el voltaje medido y el flujo de calor que pasa por el sensor.

3. ANALISIS EXPERIMENTAL

El espesor del sensor será aproximadamente de 4 mm, considerando 2 mm para la placa del circuito impreso y 1 mm de revestimiento a cada lado de la placa.

Para determinar las demás dimensiones del sensor, se debe determinar el número de termocuplas requeridas, considerando que de este factor y la precisión del instrumento de medición de voltaje, depende en gran parte la precisión final del sensor.

La incertidumbre en la medición del flujo de calor ($u_{\text{flujoCalor}}$) depende por lo tanto de la incertidumbre en la medición de voltaje de salida del instrumento, la incertidumbre debida a su calibración respecto a una fuente de calor regulada y conocida, y el efecto de la distorsión del flujo de calor original en el muro, generado por la presencia del sensor. De lo anterior se tiene la incertidumbre puede ser expresada según [7,8] como:

$$u_{\text{flujoCalor}} = \sqrt{u_{\text{voltaje}}^2 + u_{\text{calibracion}}^2 + u_{\text{distorsion}}^2} \quad [1]$$

En general la incertidumbre de medición aumenta en forma inversamente proporcional a la magnitud del flujo de calor. Esto implica que para flujos de calor pequeños como los que se requiere medir, se van a tener señales de voltaje muy bajas, por lo tanto, para este análisis de incertidumbre se considera el caso más desfavorable es decir un flujo de calor del orden de 2 W/m^2 .

3.1 Incertidumbre de calibración

Después de estudiar el efecto de diferentes sistemas de calibración sobre la incertidumbre total, se determinó utilizar la técnica de "foso de calor" [9], para la calibración. Esta técnica consiste en hacer que la mayor

parte del flujo de calor entregado por una fuente de calor regulada y conocida, atraviese el instrumento. Para esto se instala el sensor unido a una resistencia eléctrica muy delgada entre una lámina de aislante de 3 cm y una plancha de cobre de 5 cm. De esta forma el 99% del flujo de calor entregado por la resistencia eléctrica, se dirige hacia el sensor y la plancha de cobre (“foso de calor” de alta conductividad), considerando que en el otro extremo se encuentra con la barrera de aislante de baja conductividad (ver figura 3).

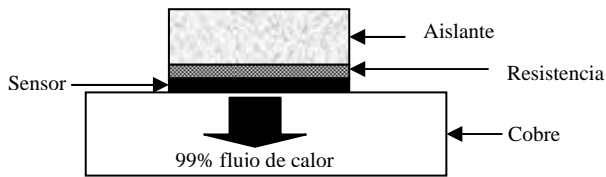


Figura 3. Sistema de calibración

La incertidumbre debida a la calibración esta formada a su vez por la incertidumbre en la medición de la potencia eléctrica suministrada a la resistencia, las pérdidas de calor por el aislante y la incertidumbre en la medición de voltaje del sensor.

Es importante mencionar que el espesor del aislante seccionado (3 cm) para la calibración y las pérdidas de calor a través de este elemento, fueron calculados a partir de un análisis por el método de diferencias finitas del sistema sensor-metal-resistencia-aislante, con el cual se identificó el tiempo total de estabilización del sistema y las pérdidas de calor por el aislante. Se encontró que para un espesor mayor de aislante, si bien reducen las pérdidas de calor, este genera calentamiento de la placa de cobre, la cual deja de actuar en estas condiciones como “foso de calor”.

En la figura 4, se observan, las curvas que representan la variación de la temperatura en el interior del material aislante en función del tiempo. La curva de mayor temperatura representa el comportamiento de los nodos en contacto con la resistencia eléctrica.

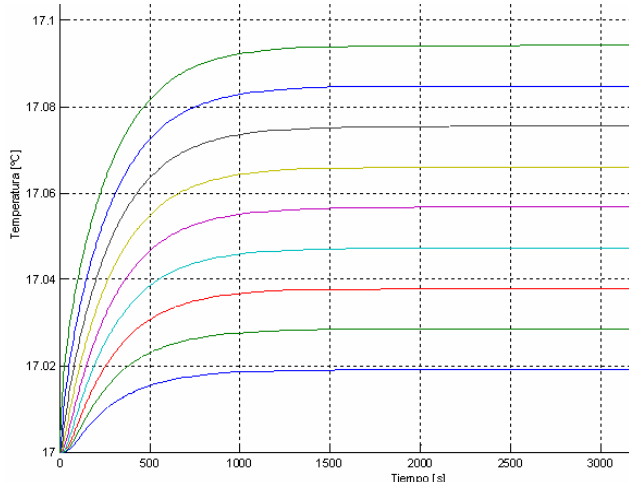


Figura 4. Evolución temporal de la temperatura de los nodos del aislante para el sistema de calibración

Las dimensiones de la resistencia utilizada en la calibración deben ser iguales a las dimensiones del sensor, por lo tanto el tamaño de la resistencia define en parte el número de termocuplas utilizado y el tamaño del sensor.

3.2 Incertidumbre en la medición de voltaje.

La incertidumbre en la medición del voltaje, se calcula a partir de las características del instrumento de medición utilizado para este fin [10, 11]. Un instrumento de alta precisión permite un menor número de termocuplas, sin embargo aumenta considerablemente el costo total del sensor de flujo de calor.

3.3 Incertidumbre debida a la distorsión del flujo de calor original por la presencia del sensor.

Básicamente, se produce por que el sensor actúa como una resistencia térmica adicional, generando una distorsión en el flujo de calor original (especialmente en los bordes del instrumento), además se adiciona la resistencia térmica de la capa de aire que le separa del muro. Su efecto debe ser por lo tanto atenuado mediante un adecuado diseño y montaje.

Con las dimensiones del sensor definidas por la combinación de factores tales como la precisión del instrumento medición de voltaje, tamaño de la resistencia eléctrica de calibración y el número de termocuplas requerido, se puede determinar la incertidumbre generada por la distorsión del flujo de calor inicial cuando se coloca el sensor sobre la pared mediante un modelo bidimensional del sensor y el muro, aplicando el método explícito de diferencias finitas.

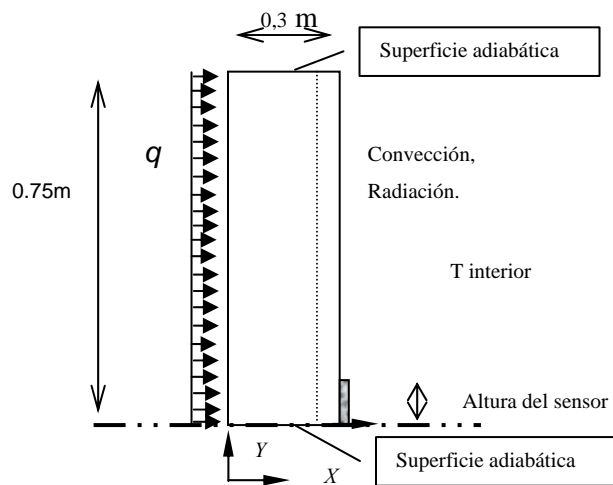


Figura 5. Geometría utilizada para análisis

La geometría del sensor y el muro utilizada en el modelo, se muestra en la figura 5. Se supuso para el análisis que el sensor y el muro tienen un ancho infinito.

Los parámetros del estudio son el flujo de calor, la conductividad del sensor, el largo del sensor y el coeficiente convectivo entre el sensor y el aire.

Se puede expresar la incertidumbre debida a la distorsión del flujo de la siguiente forma:

$$U_{\text{distorsión}} = q_{\text{sensor}} - q \quad [2]$$

Donde q_{sensor} es el flujo promedio que pasa en la zona activa del sensor y q es el flujo de calor que pasaría por la pared si no se hubiese instalado el sensor.

La zona activa del sensor es definida como la zona del sensor en la cual el flujo de calor no varía más de 5% del flujo de calor que pasa por la mitad del sensor.

El efecto de la intensidad del flujo de calor, para una longitud del sensor de 10 cm y un coeficiente convectivo entre el sensor y el aire de 2.5 W/(m²K), presenta los resultados indicados en la tabla 1.

k [W/(mK)]	$u_{\text{distorsión rel Q}}$ [%] para $q = 2$ [W/(m ²)]	$u_{\text{distorsión rel Q}}$ [%] para $q = 20$ [W/(m ²)]
0.05	-18.11	-18.245
0.1	-10.315	-10.405
0.2	-5.61	-5.66
0.3	-3.927	-3.964
0.4	-3.0635	-3.0925
0.5	-2.5375	-2.5615
0.6	-2.184	-2.205
0.7	-1.9295	-1.948
0.8	-1.738	-1.755
0.9	-1.5885	-1.604
1	-1.4685	-1.483
1.2	-1.2885	-1.301
1.4	-1.159	-1.1705

Tabla 1. Efecto de la intensidad de flujo y conductividad térmica sobre la incertidumbre por distorsión

Los resultados indican que la intensidad del flujo no tiene una influencia significativa en la incertidumbre y que a mayor conductividad (k) del sensor, la incertidumbre por distorsión del flujo disminuye.

Efecto de la longitud del sensor. Para un coeficiente convectivo entre el sensor y el aire de 2.5 W/(m²K), tenemos los siguientes resultados (figura 6).

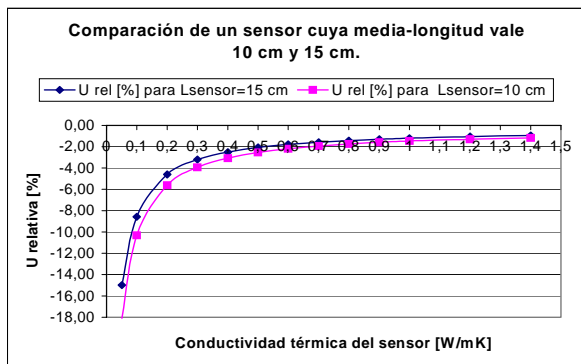


Figura 6. Efecto de la longitud del sensor

Se observa que mientras más grande es el sensor, más pequeña es la incertidumbre por distorsión del flujo, lo que es confirmado en la referencia [9]. Los resultados del

modelo indican que la mayor distorsión, se presenta en los bordes del sensor, lo que puede ser atenuado aumentando su tamaño.

En cuanto a la conductividad térmica se observa que para $k = 0.6$ W/mK, se presenta una diferencia de 0.4 % entre las dos longitudes del sensor.

El coeficiente convectivo entre el sensor y el aire que lo rodea no está claramente definido. Si se considera que es igual al coeficiente convectivo entre el aire y la pared, se puede observar su influencia en la incertidumbre en la figura 7, para $q = 2$ W/(m²), $k_{\text{sensor}} = 0.6$ W/(mK). $L_{\text{sensor}} = 10$ cm

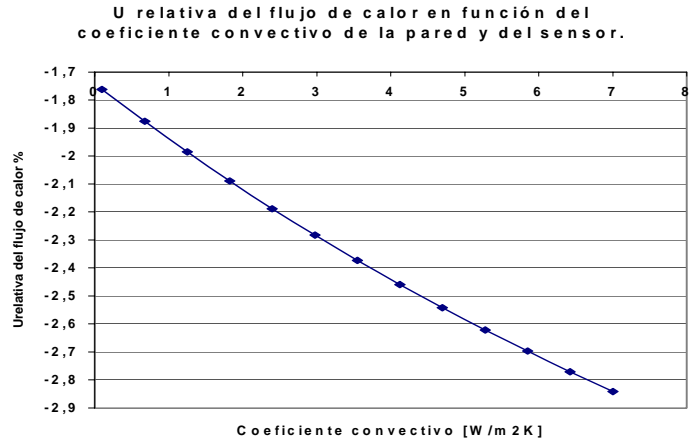


Figura 7. Efecto del coeficiente convectivo entre el sensor y la pared.

Para un rango probable de coeficiente convectivo en convección natural, tenemos que la incertidumbre de distorsión podría variar entre 2 y 2.5 %.

Si se considera ahora que el sensor produce turbulencia, el h del sensor aumenta. En cuyo caso las condiciones serían las siguientes:

$q = 2$ W/(m²), $L = 10$ cm, $h_{\text{pared}} = 2.5$ W/(m²K), $h_{\text{sensor}} = 5$ W/(m²K).

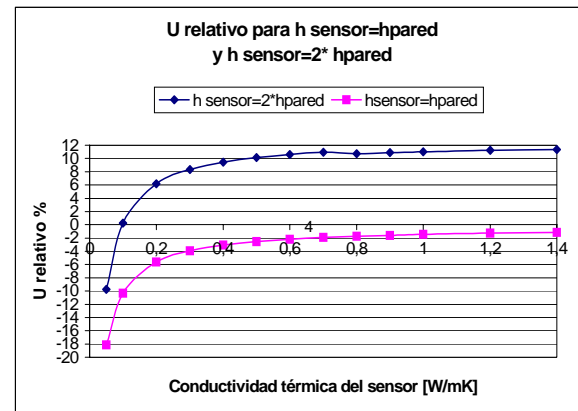


Figura 8. Efecto turbulencia

La incertidumbre calculada para estas condiciones se muestra en la figura 8.

Cuando el signo de la incertidumbre es positivo, el flujo que pasa por el sensor es mayor al flujo que pasa

normalmente en la pared. Esto se debe al hecho que la resistencia térmica global es más pequeña cuando el h convectivo aumenta.

Para evitar este efecto, se podría colocar el sensor directamente dentro de la pared (Figura 9). En este caso tendríamos las siguientes condiciones:

Para $q = 2 \text{ W/(m}^2\text{)}$, $h = 2.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $L = 10 \text{ cm}$, se tienen los siguientes resultados.

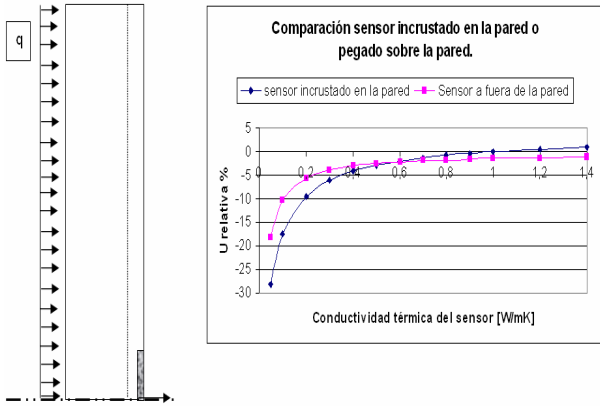


Figura 9. Sensor incrustado

La incertidumbre es cero cuando se tiene $k_{\text{sensor}}=k_{\text{pared}}$.

Comparado con el sensor sobrepuesto, es beneficioso incrustar el sensor cuando su conductividad térmica es mayor de 0.6 W/mK . Pero aparece el problema de resistencia de contacto entre la pared y el sensor. Es difícil saber en estas condiciones si el sensor está bien adherido.

Calculo de la capa límite De manera sencilla, se calcula el espesor de la capa límite según Incropera [5].

Para convección natural y una longitud de pared de $L=1.2 \text{ m}$, obtenemos un $Gr=6E9$ para $\Delta T=3K$. El espesor de la capa límite es de

$$\delta = \frac{6 * L}{(Gr / 4)^{1/4}} = 0.06 \text{ m [3]}$$

Por lo tanto para el espesor seleccionado, el sensor sobrepuesto, no debería producir turbulencia e influir en el coeficiente convectivo.

Otro resultado interesante del modelo bidimensional de diferencias finitas es que el flujo trata de evitar el sensor porque la resistencia térmica global es más grande que a través de solo la pared. Por esta razón, el flujo disminuye en los bordes de la placa sensor y aumenta en la pared. Como el flujo, tratan de evitar el sensor, en los bordes esta distorsión genera una componente adicional del flujo de calor en el sentido de Y que hace que la incertidumbre por distorsión aumente en esta zona.

4. Análisis de resultados preliminares.

En la figura 10, se puede observar el comportamiento de la incertidumbre del sensor y sus componentes, en

función de su conductividad térmica. Se observa en general que la medición crítica (es decir la que mas aporta a la incertidumbre total) es la certidumbre en la medición de voltaje. Esta incertidumbre tiene un efecto directo durante la operación del instrumento y su calibración. Se observa que la incertidumbre de calibración, a partir de una conductividad térmica del sensor de 0.6 W/mK es debida solamente a la incertidumbre en la medición del voltaje del sensor durante este proceso. Entonces, si se puede reducir esta incertidumbre, se reduciría notablemente la incertidumbre total del sensor.

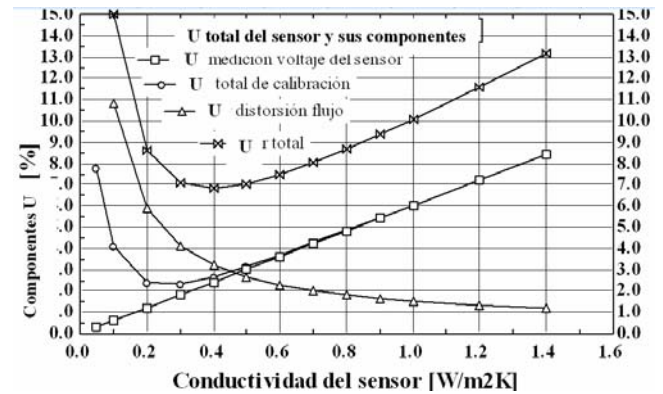


Figura 10. Incertidumbre total del sensor y sus componentes

Se puede reducir esta incertidumbre de dos formas:

- aumentando el numero de termocuplas del sensor para obtener un voltaje mayor y poder medirlo con mayor precisión. Esto trae el inconveniente de tener un sensor más grande y dispendioso en construir.
- Cambiar el instrumento de medición del voltaje del sensor y elegir uno de mayor precisión.

5. Evaluación final de la incertidumbre.

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para la selección del instrumento de medición de voltaje son: la incertidumbre máxima admisible del sensor, costo del instrumento de medición de voltaje y número de termocuplas óptimo para un tamaño del sensor adecuado.

Es importante tener en cuenta que una limitante para el tamaño del sensor es el tamaño de la resistencia para la calibración.

Para la selección partimos de las siguientes condiciones:

- Incertidumbre máxima admisible del sensor del 5% del flujo de calor medido.
- Flujo de calor suministrado por la resistencia: 2 W/m^2 (para tener la mayor incertidumbre posible)
- Resistencia: 57.6Ω de dimensiones: $38 \text{ cm} * 13 \text{ cm}$, Para un número de termocuplas de 504.
- Lecturas de Voltaje: $744 \mu \text{ V}$ (corresponde a la lectura mínima de voltaje en el sensor para un flujo de 2 W/m^2).

- para la calibración el espesor del aislante de 3cms seleccionado con base en el análisis del tiempo mínimo de estabilización de la temperatura para régimen estacionario y espesor del metal: 5cms

Iterando en los programas elaborados para el cálculo de incertidumbre, para diferentes tipos de instrumentos de medición de voltaje teniendo en cuenta los criterios y condiciones anteriores, se seleccionó un multímetro con las siguientes características:

Rango: 200 mV, resolución: $1 \mu V$, precisión: 0.007% de la lectura más dos dígitos.

Para la medición de potencia durante la calibración (voltaje y resistencia), rango: 20V, resolución: $1 \mu V$, precisión: 0.006% de la lectura más dos dígitos

Para este diseño en particular, se utiliza un voltímetro de precisión media mencionado previamente, con el cual se tiene una incertidumbre:

$$u_{\text{voltaje}} = 1.94 \% \text{ del flujo de calor registrado.}$$

Para estas condiciones, la ecuación resultante del proceso de calibración del flujo de calor (q) y la incertidumbre obtenida son:

$$q[\text{W/m}^2] = 25104.923 * \text{lectura de Voltaje [V]} \quad [4]$$

$$u_{\text{calibración}} = 3.09 \% \text{ del flujo de calor registrado.}$$

Finalmente, el resultado de la incertidumbre por distorsión, a partir de las dimensiones del sensor y resistencia seleccionados en función del número de termocuplas es el siguiente:

$$u_{\text{cdistorcion}} = 2.3 \% \text{ del flujo de calor registrado.}$$

Remplazando en la ecuación [1] se obtiene finalmente una incertidumbre total en la medición de flujo de calor de:

$$u_{\text{flujoCalor}} = 4.3\% \text{ del flujo de calor registrado. Para un sensor de conductividad } 0.6 \text{ W/m}^2\text{K.}$$

Bajo estas condiciones el comportamiento final de la incertidumbre del sensor diseñado y sus componentes se puede observar en la figura 11.

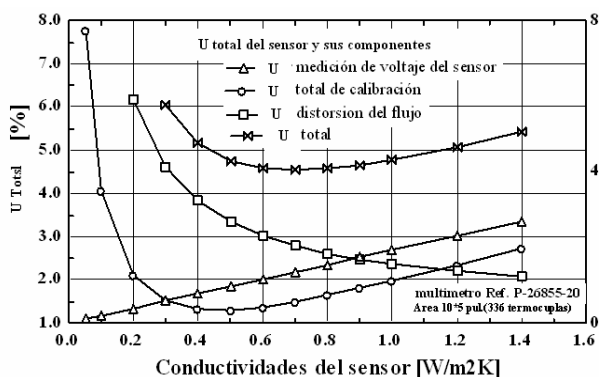


Figura 11. Incertidumbre total y sus componentes.

6. CONCLUSIONES.

Se ha planteado la metodología y resultados del análisis experimental para el diseño de un sensor de flujo de calor de utilidad en el campo de la climatización. Este sensor permite medir flujos de calor del orden de 2 a 30 W/(m²K) con una incertidumbre total máxima de 5 % de la cantidad medida.

Para este diseño en particular, se observa que la medición de voltaje como señal de salida del sensor, representa el parámetro crítico para lograr los niveles de precisión requeridos, ya que influye directamente durante el proceso de calibración y dimensionamiento del sensor. Se debe buscar por lo tanto un compromiso entre la exactitud requerida y costo final del sensor, considerando que un sensor pequeño y preciso requiere un instrumento de medición de voltaje muy preciso y por ende costoso.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] FONSECA, Néstor. Estudio experimental del balance térmico de una ventana, Tesis de Maestría, Universidad de Concepción Chile, 2002.
- [2] ASHRAE STANDARD 41.1-1986 (RA 91) Standard Method for temperature Measurement. Atlanta USA, 1991
- [3] KREINTH, F. Principles of Heat transfer, International Textbook, Scranton, a, 1985.
- [4] HOLMAN, J.P. Experimental methods for engineers, McGraw-Hill, New York, N. Y, 1985
- [5] INCROPERA, F. P. And DeWitt, D.P, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Son, New York, 1996.
- [6] ASHRAE, Handbook-Fundamentals, ASHRAE, Atlanta U.S.A, 2001.
- [7] ASHRAE. Engineering Analysis of Experimental Data, ASHRAE Guideline, ASHRAE. Atlanta USA, 1986
- [8] FISSORE, A. Cálculo de error en las mediciones, análisis crítico y nuevas proposiciones, XVI Jornadas de transferencia de Calor y Materia Congreso. Universidad de Chile, Santiago, Chile, 1999.
- [9] HUKSEFLUX THERMAL SENSORS. Application and specification of heat flux sensors, Version 9904, 1999.
- [10] HOWAR Lawrence. Error accumulation in thermocouple thermotry, The Boeing Company-Symposium on temperature,5 th, Washington D.C, 1996.
- [11] KINZIE P.A. Thermocouple temperature measurement, Wiley, New York, 1973.