

DISEÑO EXPERIMENTAL, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SENSOR PARA MEDICIÓN DE RADIACIÓN INFRARROJA HACIA EL CIELO EN LA NOCHE EN APLICACIONES HVAC/R.

Experimental design, construction and calibration of a sensor for measurement of infrared radiation towards the sky at night to HVAC applications

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados del estudio para el diseño experimental, construcción y calibración de un sensor para medición de radiación infrarroja hacia el cielo en la noche. Este instrumento es una importante herramienta de diagnóstico que permite estimar un importante componente del balance térmico de edificios y cuartos fríos, con el cual evaluar el funcionamiento global de sistemas de acondicionamiento de aire y/o refrigeración durante su fase de operación o diseño.

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 sensor for measurement of infrared radiation towards the sky at night. This instrument is an important diagnose tool that allows evaluate an important component buildings thermal balance and climatic chambers, with which evaluate the global operation of refrigeration and air conditioning systems during its operation or design phase.

KEYWORDS: Heat flow sensor, instrumentation, uncertainty analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Para estimar las ganancias o pérdidas de energía térmica en Edificios y/o cuartos fríos, se requieren herramientas de diagnóstico que permitan conocer los diferentes componentes de su balance térmico de manera que se puedan implementar medidas correctivas para mejorar sus condiciones de operación y generar un ahorro de energía.

En aplicaciones HVAC/R, un componente importante del balance térmico, poco estudiado hasta ahora, es el flujo de calor por radiación infrarroja hacia el cielo en la noche. La radiación de gran longitud de onda entre una superficie (ventana y paredes exteriores) hacia el ambiente exterior, se puede descomponer en radiación hacia el suelo y hacia el cielo. La temperatura del suelo podría ser medida, pero es muy complicado estimar la temperatura del cielo debido a su dependencia respecto a las condiciones climáticas y sobretodo del índice de claridad del mismo. Generalmente se asume para una noche despejada una temperatura del cielo de -40°C [1], mientras que para cielos nublados, se aproxima a la temperatura del aire. Para mejorar la calidad de los resultados del cálculo del balance térmico en edificios y cuartos fríos, se ha diseñado un sensor que mide en forma

continua la radiación nocturna, con un grado de precisión del 6.1% del flujo de calor medido.

2. DESCRIPCIÓN DEL SENSOR

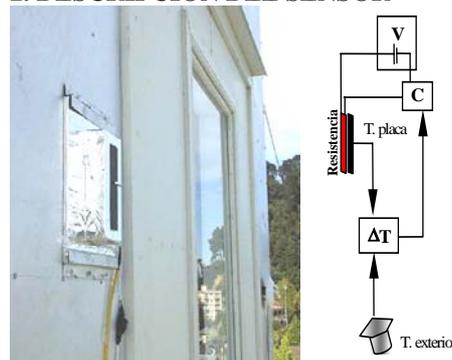


Figura 1. Ubicación y esquema de funcionamiento del sensor de radiación nocturna.

Está formado por una placa de cobre de $12*4*0,25$ cm, pintada de negro en una de sus caras y adherida en la cara opuesta a una resistencia eléctrica (de tamaño similar) mediante una delgada capa de pegamento. Este montaje se incrusta dentro de un bloque de aislante (poliestireno expandido) de $8,5*18*4$ cm, dejando expuesta al aire exterior sólo la superficie pintada de negro de la placa. El bloque se instala luego sobre una base adicional de

aislante de 23*26*1 cm. La superficie exterior del aislante, se recubre con papel aluminio de baja emisividad, que actúa como pantalla radiativa, atenuado el intercambio de calor por radiación con otras superficies [2]. El montaje del sensor y su esquema de funcionamiento se muestran en la Figura 1.

Se mide la diferencia de temperaturas entre el aire exterior y la superficie expuesta de la placa. La resistencia eléctrica se acciona para mantener la placa a la misma temperatura del aire exterior (idealmente $\Delta T = 0^\circ\text{C}$), eliminando teóricamente el flujo de calor por convección entre la placa y el aire. De esta forma la potencia consumida por la resistencia corresponde al flujo de calor por radiación nocturna cedido por la placa.

El ajuste de temperatura, se logra con un controlador on-off, el cual acciona un relé que cierra el circuito de alimentación de la resistencia.

Como la variable a medir es la potencia eléctrica suministrada a la resistencia, es necesario establecer el tiempo real de funcionamiento del ciclo de calentamiento. Para esto, se utiliza el sistema de adquisición de datos, con el cual se registra una señal de voltaje proveniente del circuito de alimentación de la resistencia, que indica si está encendida o apagada. Como la potencia entregada es constante, el promedio de la señal es proporcional a la pérdida por radiación hacia el cielo, durante el intervalo de tiempo considerado para el promedio.

3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Para este análisis se el sensor en posición horizontal, ya que puede ser considerado el caso mas desfavorable.

La incertidumbre en esta medición presenta dos componentes principales. La incertidumbre debida a la transferencia de calor y la incertidumbre en la determinación de la potencia eléctrica suministrada a la resistencia, como única variable medida directamente, debido a que la diferencia de temperatura entre la placa y el aire, es una variable de entrada al controlador; por esta razón, su incertidumbre está relacionado con la transferencia de calor sobre la placa. De acuerdo a lo anterior la incertidumbre total del sensor [3, 4, 5] puede ser expresado como:

$$U_{TS} = \sqrt{U_{TC}^2 + U_{MP}^2} \quad [1]$$

Donde:

U_{TC} = Incertidumbre debida a la transferencia de calor

U_{MP} = Incertidumbre en la medición de la potencia

Incertidumbre debida a la transferencia de calor

En la Figura 2, se observan los flujos de calor que inciden sobre el sensor.

El balance de calor correspondiente a este sistema, considerando nulo el efecto del sol [6] y tomando como

volumen de control el formado por la placa, el pegante y la resistencia, se plantea en la siguiente ecuación:

$$Q_{Rad} = Potencia - Q_{conv} - Q_{cond} - \frac{\Delta E_i}{\Delta t} \quad [\text{W/m}^2] \quad [2]$$

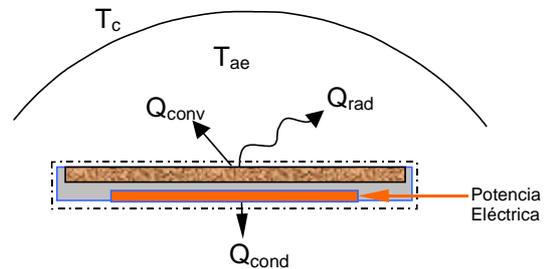


Figura 2. Flujos de calor sobre la zona sensible del sensor, en posición horizontal.

De la ecuación [2] se puede concluir, que para tener una medición precisa del flujo de calor por radiación emitido por la placa en la noche, este debe ser cercano o igual a la potencia suministrada por la resistencia. La incertidumbre debida a la transferencia de calor corresponde por lo tanto a:

$$U_{TC} = Q_{conv} + Q_{cond} + \frac{\Delta E_i}{\Delta t} \quad [\text{W/m}^2] \quad [3]$$

Cálculo del flujo de calor por convección

Este flujo de calor se genera básicamente por la diferencia real de temperatura entre la placa y el aire exterior durante el ciclo de operación del instrumento. Se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{conv} = h(T_p - T_{ae}) \quad [\text{W/m}^2] \quad [4]$$

Para evaluarlo, se asumen las condiciones más desfavorables, es decir, aquellas en el que el coeficiente convectivo y la diferencia de temperatura entre la placa y el aire exterior son máximos. Mediante las ecuaciones [5,6] se calcula el coeficiente convectivo, suponiendo convección forzada [7,8] sobre una superficie plana horizontal de 15 cm. de largo (Figura 3).

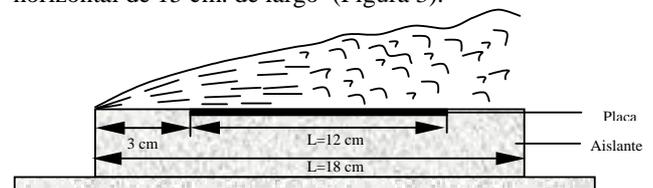


Figura 3. Longitud característica usada en el cálculo del coeficiente convectivo.

$$\overline{Nu}_x = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad [5]$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} * K}{L_c} \quad [6]$$

Con base en las mediciones efectuadas en el banco de ensayos, se asume para este cálculo una velocidad del viento promedio de 1,2 m/s (correspondiente a las

condiciones para el 95% del tiempo de operación del sensor durante la noche) y una temperatura del aire exterior de 7°C.

En cuanto a la diferencia de temperatura entre la placa y el aire, ésta se origina por tres factores [9, 10, 11,12, 1], el rango de operación del controlador, la incertidumbre en la medición de la temperatura del aire exterior durante la noche y la incertidumbre en la medición del voltaje del controlador. De acuerdo a lo anterior puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta T = \Delta T_c + \sqrt{U_{Vol}^2 + U_{Tae}^2} \quad [K] \quad [7]$$

Donde:

ΔT_c = Diferencia de temperatura a la cual se ajusta el controlador (0,2K).

U_{Vol} = Incertidumbre en la medición del voltaje del controlador (según datos del fabricante es de 0,2% de la escala completa). Para esta aplicación, la escala va de 0 a 20 mv, por lo tanto la incertidumbre equivale a 0,2K.

U_{Tae} = Incertidumbre en la medición de la temperatura del aire exterior.

En la medición de temperatura del aire exterior se utiliza el mismo sistema del banco de ensayos. Su incertidumbre se calcula por lo tanto, siguiendo la misma metodología de esta medición, pero eliminando el efecto del sol sobre el balance de calor del sensor. El resultado es el siguiente:

$$U_{Tae} = 0,46K.$$

Reemplazando en la ecuación [7], la diferencia de temperatura máxima es:

$$\Delta T = 0,71K.$$

Resolviendo las ecuaciones [4], [5] y [6] se obtiene:

$$h = 10,6 \text{ W/m}^2K$$

$$Q_{conv} = 7,6 \text{ W/m}^2$$

Cálculo del flujo de calor por conducción

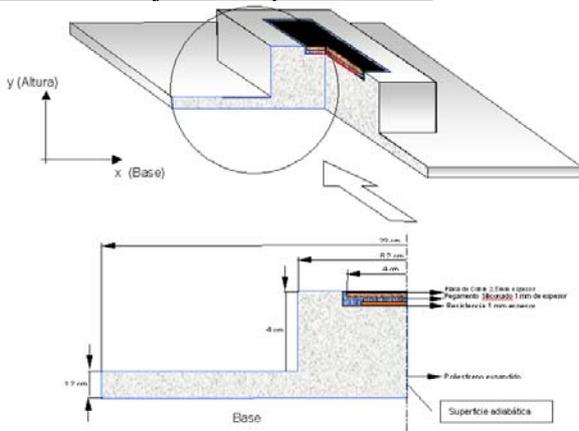


Figura 4. Vista en corte del sensor y detalle de la sección discretizada.

En el sensor ideal el flujo de calor entregado por la resistencia debería transferirse en su totalidad a la placa,

sin embargo, una parte se pierde por conducción hacia el aislante, generando una incertidumbre en el funcionamiento del instrumento. El cálculo de este flujo se realiza mediante un modelo bidimensional de diferencias finitas, por el método explícito, para régimen transiente [7].

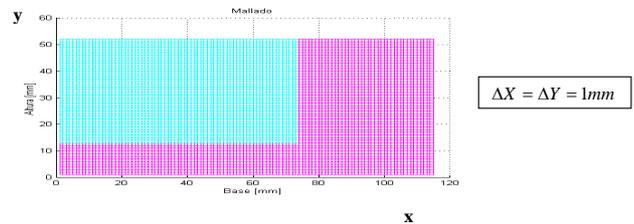


Figura 5. Distribución nodal en la zona discretizada.

El modelo se realiza utilizando el programa MATLAB®. La sección transversal discretizada, (Figura 4) corresponde a la que con mayor probabilidad presentaría efectos bidimensionales de transferencia de calor, considerando la relación entre el espesor de los elementos y la dimensión total del instrumento.

En las Figuras 4 y 5 se muestra una vista de corte del sensor en posición horizontal, las dimensiones del instrumento y la malla correspondiente generada con el programa.

En el modelo se consideró sólo un cuarto del sensor, tomando el eje de simetría como superficie adiabática. Las condiciones para la simulación son las siguientes:

- Para las superficies laterales verticales sobre el aislante se considera intercambio por radiación con el cielo y el piso.
- Las propiedades de los materiales se suponen constantes para el rango de temperaturas de trabajo del instrumento. En el caso del pegamento y la resistencia éstas fueron proporcionada por los fabricantes.

Para los nodos en los cuales se produce la interfase de un material a otro (Figura 6) se consideró la resistencia térmica equivalente, sin efecto de la resistencia de contacto entre los componentes.

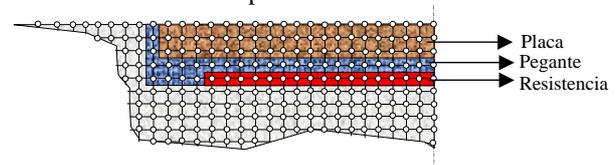


Figura 6. Detalle de la malla en la zona sensible.

Como condiciones de borde se asumió:

- Temperatura inicial de los nodos de 7,4°C.
- Temperatura exterior de 7,5°C; se asumió para el piso y las demás superficies ésta misma temperatura.
- El eje de simetría se considera como una superficie adiabática.
- La base del sensor se consideró a una temperatura inicial un grado menor a la temperatura del aire.

- Potencia suministrada por la resistencia de 380 W/m².
- Dadas las condiciones de borde, en especial el flujo de calor por radiación en la superficie, se utilizó un paso de tiempo de 0,002 segundos para lograr la convergencia.
- La simulación se realizó para un intervalo de tiempo de 700 segundos.

Resultados:

Durante la simulación total (700 segundos) se registran 17 ciclos de operación de la resistencia (calentamiento). En las Figuras 7 y 8 se despliega sobre el eje z, el perfil de temperatura para cada nodo de la malla generada en el plano x-y (Figura 4). Se muestran los instantes de tiempo donde se inicia y termina el calentamiento de la resistencia en el último ciclo de operación.

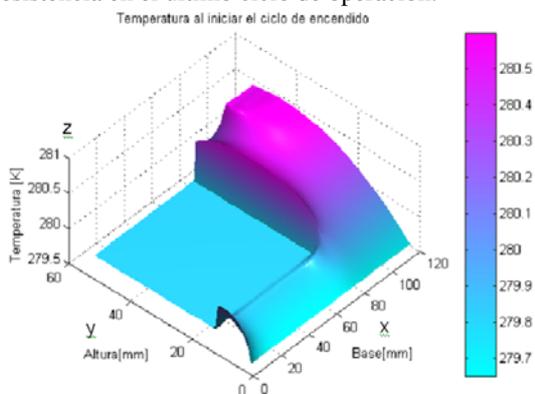


Figura 7. Temperaturas nodales al inicio de ciclo de operación del sensor.

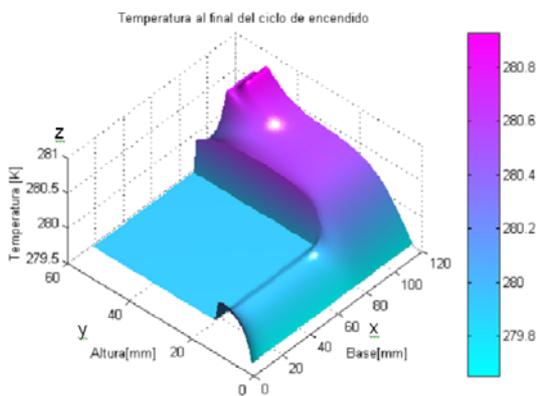


Figura 8. Perfil de temperaturas al inicio y final del ciclo de operación del sensor.

Se puede observar que las temperaturas más altas (280,6 y 280,8K) corresponden a los nodos sobre la resistencia, al inicio y al final de su ciclo de funcionamiento. Esto permite que la placa mantenga siempre una temperatura muy cercana a la del aire (280,65K) (objetivo principal del diseño del instrumento). Finalmente, las temperaturas más bajas están en las superficies exteriores del aislante, especialmente sobre la base del sensor (279,7K). Se puede apreciar además el calentamiento del interior del aislante, lo que representa parte de la incertidumbre del instrumento.

Se observa que el flujo de calor se dirige en mayor proporción hacia el pegante (ver Figura 6), considerando que éste tiene una conductividad térmica mucho mayor. Finalmente la temperatura máxima alcanzada por los nodos del aislante en contacto con la resistencia, es tan sólo 0,35K mayor que la temperatura del aire.

Para calcular el flujo de calor por conducción desde la resistencia hacia la placa y el aislante, se obtiene el promedio del flujo de calor de los nodos de la resistencia hacia la zona correspondiente, durante el intervalo de tiempo de encendido. Su comportamiento para un total de 700 segundos de simulación se muestra en la Figura 9.

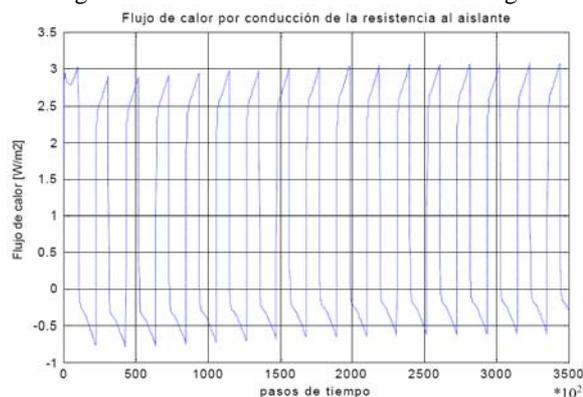
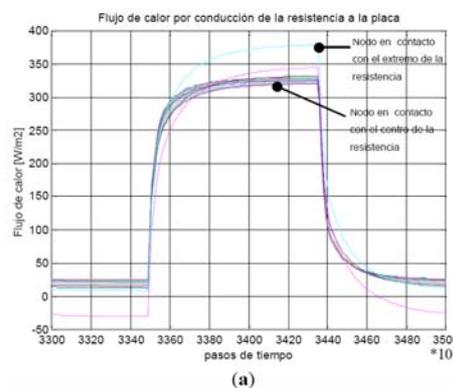


Figura 9. Comportamiento en el tiempo del flujo de calor por conducción.

Se observa durante los primeros ciclos de operación un comportamiento irregular, debido a las condiciones de borde suministradas. Luego entra en régimen, lo que quiere decir que tiende a oscilar en forma periódica con amplitud constante. Los valores negativos indican que existe un período de tiempo durante el enfriamiento en el que la resistencia recibe calor del aislante.

En la Figura 10, se observa el comportamiento del flujo del calor por conducción desde la resistencia hacia la placa y el aislante, durante el último ciclo de operación del instrumento.



(a)

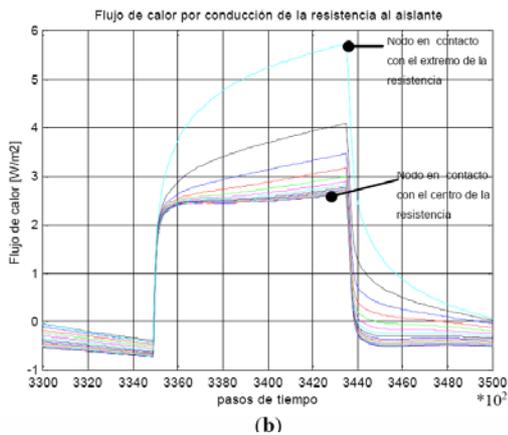


Figura 10. Comportamiento del flujo de calor por conducción durante el último ciclo de operación, para los diferentes nodos ubicados sobre la placa (a) y aislante en contacto con la resistencia (b).

En la Figura 10 b, se puede ver que para los nodos sobre el aislante el flujo de calor aumenta a medida que se acerca al extremo de la resistencia. Este comportamiento justifica la elaboración del modelo bidimensional.

A partir de los resultados entregados por el modelo, se tiene que el flujo de calor transferido al aislante es:

$$Q_{\text{cond aislante}} = 2,69 \text{ W/m}^2$$

Para las condiciones de la simulación, el ciclo de encendido (calentamiento de la resistencia) tiene una duración de **17,2 segundos**. Este valor fue verificado mediante los datos obtenidos del funcionamiento real del instrumento, para las condiciones iniciales suministradas al modelo.

Cálculo de la velocidad de variación de la energía interna

Se calcula mediante el modelo de diferencias finitas de la sección anterior. Su comportamiento, para el tiempo total de la simulación se muestra en la Figura 11.

Nuevamente el efecto de la inestabilidad inicial es notorio. Luego de un tiempo, tiende a oscilar con amplitud constante. Se considera para el cálculo por lo tanto, el último ciclo de la simulación mostrado en la Figura 12, tomando como instantes inicial y final los correspondientes al encendido y apagado de la resistencia.

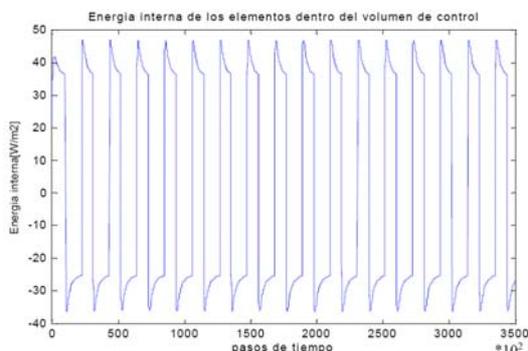


Figura 11. Comportamiento en el tiempo de la velocidad de variación de la energía interna del sensor.

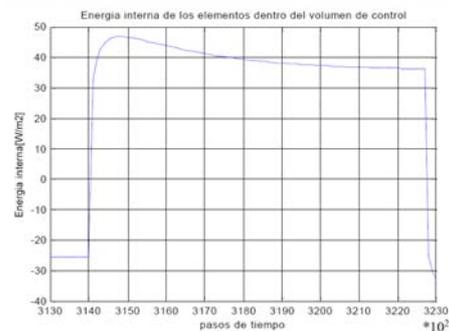


Figura 12. Velocidad de variación de la energía interna para el último ciclo de operación.

La velocidad variación de la energía interna del volumen de control depende en buena medida de las propiedades de los materiales. Como existe cierto grado de incertidumbre en su determinación, se consideró como caso más desfavorable el listado de propiedades que generara la mayor cantidad de energía almacenada, tomando como base la información registrada en la literatura y la suministrada por los fabricantes de cada componente.

Con base en los resultados entregados por el modelo, se tiene que la velocidad de variación de la energía para el volumen de control tiene un valor de:

$$\frac{\Delta E_i}{\Delta t} = 2,59 \text{ W/m}^2$$

Sustituyendo finalmente en la ecuación [3] los resultados expuestos en esta sección, se tiene una incertidumbre por transferencia de calor total del sensor de:

$$U_{TC} = 12,8 \text{ W/m}^2$$

Incertidumbre en la medición de la potencia

La incertidumbre en esta medición puede ser expresada como:

$$U_{mP} = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial V} U_{Vol}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial t} U_{Ft}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial L} U_L\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial a} U_a\right)^2} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad [8]$$

Donde:

U_{Vol} = incertidumbre en la medición de voltaje (0,005 mV)(sistemático).

U_I = Incertidumbre en la medición de la corriente (1 mA)(sistemático).

U_{Ft} = Incertidumbre en la medición del tiempo de operación de la resistencia (aleatorio).

$U_{L,a}$ = Incertidumbre en la medición del largo y ancho de la resistencia (sistemático).

El método usado para determinar el tiempo de operación de la resistencia, genera una incertidumbre debida a que los registros que indican si está encendida o apagada son tomados cada minuto. Existe por lo tanto, la probabilidad de que las mediciones no representen el comportamiento real de esta variable. Para calcular ésta incertidumbre, se compara el valor de la potencia registrada por el sistema de adquisición y la medición continua registrada por un

contador análogo de tiempo de activación del circuito (integrador), del cual se obtienen registros cada 24 horas (usados sólo como dato de verificación).

De acuerdo a lo anterior, la incertidumbre en la determinación del factor de tiempo de activación del circuito puede ser expresado como:

$$U_{Ft} = \sqrt{U_F^2 + U_{Inte}^2} \text{ [adimensional]} \quad [9]$$

Donde:

U_F = Incertidumbre en el cálculo del factor de tiempo usando el sistema de adquisición de datos.

U_{Inte} = Incertidumbre del integrador.

La incertidumbre en la determinación del factor equivale a:

$$U_F = \frac{\text{Valor}_{Integrador} - \text{Valor}_{promedio(RNH)}}{\text{Valor}_{Integrador}} \text{ [adimensional]} \quad [10]$$

Con base en datos experimentales, se presenta en la Tabla 1, el comportamiento de esta incertidumbre para diferentes condiciones climáticas y los valores máximos y mínimos registrados por el sensor.

Noche	Nubosidad	RNH	Consumo	Incertidumbre
Feb-01	[Octas]	[W/m2]	RN [W/m2]	Sistema %
15-16	0	112,40	109,4	2,7
26-27	5	49,70	46,6	6,5
25-27	8	52,90	54	2,1
24-25	1	105,80	99,7	6,1
.8-9	0	81,80	87,7	6,7
.9-10	4	72,10	73	1,2
.10-11	0	76,70	77	0,5

Tabla 1. Incertidumbre en la determinación del factor de tiempo.

La nubosidad indicada [RNH y Consumo RN (Integrador)] corresponde a promedios horarios para el día y la noche. Como se observa, las condiciones de operación del instrumento son muy variadas, por lo tanto se asume como condición más desfavorable, para el 95% del tiempo, una incertidumbre promedio de:

$U_F = 6,5\%$ del factor de tiempo calculado por el sistema de adquisición.

La incertidumbre del integrador de tiempo incorporado al circuito, de acuerdo a información suministrada por el fabricante es:

$U_{Inte} = 2\%$ de la lectura (incertidumbre del instrumento)+ 0,01h (apreciación).

Evaluando las ecuaciones [8],[9] y [10] para los valores antes mencionados, se tiene una incertidumbre total en la medición de la potencia de:

$U_{mP} = 4,9\%$ de la potencia registrada.

Reemplazando finalmente en la ecuación [1], la incertidumbre total del instrumento equivale a una incertidumbre total respecto al sensor ideal de:

$$U_{TS} = 5,9\%$$

4. 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 de edificios y sistemas comunitarios. Este sensor permite medir flujos de calor del orden de 2 a 30 W/(m²K) con una incertidumbre total máxima de 6.1 % de la cantidad medida.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SAAVEDRA, Claudio, FISSORE, Adelqui. MOTTARD, J. 2000. "Diseño de un banco de ensayos para la validación de un modelo de diseño térmico de ventanas", Congreso de ar condicionado, refrigeracao aquecimento e ventilacao do mercosul, Mercofrio, Brasil, 2000.
- [2] FONSECA Néstor. Estudio experimental del balance térmico de una ventana, Tesis de Maestría, Universidad de Concepción Chile, 2002.
- [3] ASHRAE. Engineering Analisis of Experimental Data, ASHRAE Guideline, ASHRAE, Atlanta USA, 1986.
- [4] FISSORE, Adelqui. 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.
- [5] JAMES, W. DALLY. Instrumentation Engineering measurement, Wiley, New York, 1984.
- [6] KREINTH. F. Principies of Heat transfer, International Textbook, Scranton,Pa, 1985
- [7] INCROPERA, F. P. And DeWitt, D.P. 1996. Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Son, New York, 1996.
- [8] ASHRAE, Handbook-Fundamentals, ASHRAE, Atlanta U.S.A, 2001.
- [9] HOWAR Lawrence. Error acumulation in thermocouple thermotry, The Boeing Company-Symposium on temperature, 5 th, Washington D.C, 1971.
- [10] KINZIE P.A. Thermocouple temperature measurement, Wiley, New York, 1973.
- [11] ASHRAE STANDARD 41.1-1986 (RA 91) Standard Method for temperature Measurement, Atlanta USA, 1991.
- [12] HOLMAN J.P. Experimental methods for engineers, McGraw-Hill, New York, N. Y, 1985.