

ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA DEL AIRE PARA APLICACIONES HVAC/R.

Experimental design performed to inner and outer air temperature measurement useful to hvac/r applications

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados del análisis experimental en la medición de temperatura del aire interior y exterior de utilidad para aplicaciones HVAC/R (Calefacción, Ventilación, acondicionamiento de aire y refrigeración). En este tipo de aplicaciones la temperatura representa uno de los principales parámetros de diseño y operación de componentes y sistemas, con el cual evaluar su funcionamiento global. Se requiere por lo tanto sistemas de medición que garanticen cierto grado de certitud en los resultados, para mejorar su eficiencia y condiciones de funcionamiento.

PALABRAS CLAVES: Temperatura del aire, instrumentación, análisis de incertidumbre.

ABSTRACT

This paper present the results of the experimental design performed to inner and outer air temperature measurement useful to HVAC/R applications (Heating, Ventilation, air conditioning and refrigeration). In this type of applications the temperature represents one of the main design and operation parameters of components and systems, with which to evaluate its global operation. Therefore requires measurement systems that guarantee some certainty degree at the results, to improve its efficiency and operation condition.

KEYWORDS: Air temperature, instrumentation, uncertainty analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Las temperaturas del aire interior y exterior en un recinto climatizado, son variables indispensables con las cuales fijar las condiciones de operación en equipos, componentes y sistemas de acondicionamiento de aire y refrigeración, para el confort humano y conservación de productos. El resultado de su medición es por lo tanto considerado como parámetro de diseño, control y optimización en instalaciones HVAC/R. Se requiere en ambos casos, un sistema de medición que asegure el mínimo de incertidumbre posible. En este aspecto, resulta muy importante la selección adecuada del tipo de sensor implementado para su medición. Para este análisis, se optó por un sistema que utiliza la termocupla como sensor, por su alto nivel de aceptación y uso extensivo en aplicaciones HVAC/R. Esto ultimo debido en parte a la facilidad con la que puede ser incorporada a un sistema de adquisición de datos, su bajo costo y razonable precisión (cuando se conocen sus limitaciones y ventajas).

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

2. TEMPERATURA DEL AIRE INTERIOR

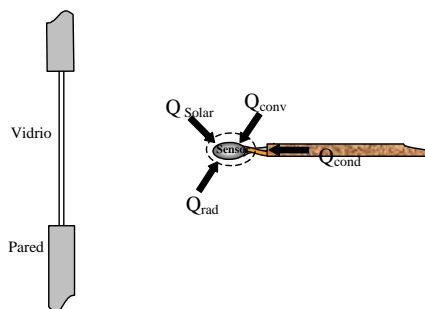


Figura 1. Flujos de calor sobre el sensor.

$$\Delta E_t = Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{cond} + Q_{solar} \quad [1]$$

Tomando como volumen de control el indicado en la Figura 1, se plantea mediante la ecuación [1] el balance de calor sobre la termocupla.

La ecuación [1], puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\frac{mCAT}{\Delta t} = A_s h_c (T_{ai} - T_s) + A_s F_{sp} \sigma \epsilon_p (T_{os}^4 - T_s^4) + Q_{cond} + Q_{solar} \quad [2]$$

De la ecuación anterior se puede concluir, que para tener una medición precisa de la temperatura del aire (idealmente $T_{ai} = T_s$), el diseño del sistema de medición debe tratar de atenuar los efectos del calor por conducción a través del cable, variación de la energía interna y radiación sobre el sensor.

2.1 Consideraciones preliminares de diseño:

Al analizar la ecuación 2, se deben tener en cuenta los siguientes factores en el diseño experimental:

- ❖ Al elevar el coeficiente convectivo entre la superficie del sensor y el aire, se reduce la diferencia de temperatura entre ellas, por lo tanto la incertidumbre en la medición disminuye.
- ❖ Con un área pequeña del sensor (diámetro reducido) el flujo de calor por convección aumenta, debido a que el coeficiente convectivo crece cuando la longitud característica (en este caso el diámetro) disminuye. Además, se asegura una distribución homogénea de temperatura, es decir un gradiente de temperatura entre la superficie y el interior del sensor muy pequeño, por lo tanto la diferencia de temperatura debe ocurrir virtualmente entre el interior del sensor y el aire.
- ❖ Se debe tratar de disminuir al máximo el flujo de calor por conducción a través del cable, es decir, hacer que éste se encuentre a una temperatura cercana a la del sensor.
- ❖ Por último, se debe tratar de eliminar todos los efectos de la radiación solar.

2.2 Selección del sistema

Como consecuencia directa de los resultados del cálculo de incertidumbre y las consideraciones preliminares de diseño descritas previamente, se optó por un sistema de medición compuesto por tres pantallas protectoras de la termocupla, formadas por cilindros concéntricos y un escudo adicional con 1cm de aislamiento como protección contra la radiación solar directa (Figuras 2 y 3).

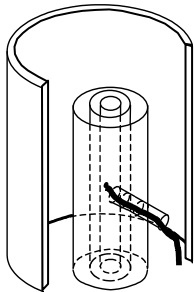


Figura 2. Sistema de pantallas y escudo.

En la literatura disponible sobre el tema [1,2,3,4,5], se recomienda el uso de un ventilador sobre la sonda, para aumentar el flujo de calor por convección. En este caso,

se descartó esta alternativa, considerando que se podría presentar una distorsión en el flujo de calor por convección en las paredes interiores del recinto de ensayo, generada por el funcionamiento de los ventiladores.

El voltaje entregado por la termocupla, para el rango de temperaturas de trabajo del sensor, oscila alrededor de 1mV. Para esta escala, se optó por un módulo de adquisición de datos como instrumento de medición, dado su considerable grado de precisión y la calidad y facilidad en el procesamiento de la información al ser incorporado a un sistema de adquisición de datos.

2.3 Descripción detallada del sistema

Para la elaboración de las pantallas se utilizó un tubo de acero inoxidable en el exterior y dos tubos interiores en aluminio de 48 mm, 27 mm y 16.5 mm de diámetro respectivamente. La elección del material y el tipo de acabado, se realizó con el objeto de obtener una emisividad muy baja (Figura 3).

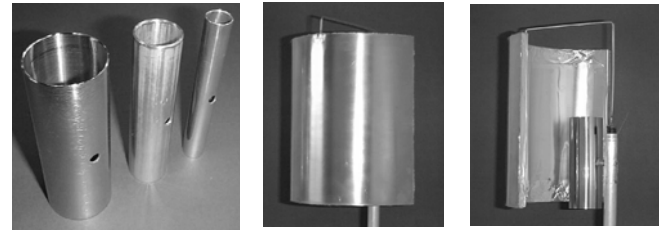


Figura 3. Sistema de medición de la temperatura del aire interior

El escudo de protección contra la radiación solar directa, está formado por una placa curva exterior de acero inoxidable de 17 cm de radio, recubierta en el interior con una capa de aislante de un centímetro de espesor y una lámina delgada de aluminio (Figura 3). El objetivo del aislante intermedio es reducir el efecto del calentamiento por acción del sol sobre la superficie exterior del escudo, minimizando así su efecto sobre el sistema.

Para atenuar el efecto de la radiación solar y la radiación de las paredes sobre el cable de la termocupla, éste se hace pasar por un tubo de aluminio que a la vez actúa como soporte de todo el sistema (Figura 3).

El sistema de pantallas completo (incluyendo el escudo), se muestra a manera de ejemplo, para el caso de un calorímetro usado como banco de pruebas de ventanas, diseñado a escala natural. Este calorímetro, permite simular el comportamiento térmico de un local inmerso dentro de un edificio, con sólo un muro y ventana expuestos al ambiente exterior, como se indica en la figura 4 [1]. Los sensores de temperatura del aire interior, se instalan a 1,20 m del piso del recinto, en dos mediciones independientes separadas 90 cm entre sí. Teniendo en cuenta que la señal de salida de la termocupla es un voltaje muy pequeño, se deben tomar

las precauciones necesarias para evitar que campos magnéticos inducidos por flujos de corriente pasen cerca de los cables de la termocupla y afecten la medición.

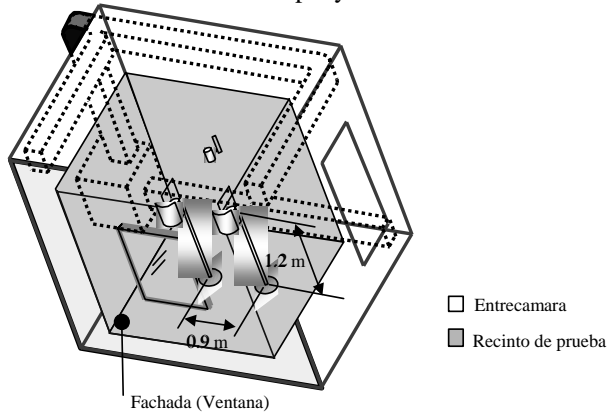


Figura 4. Ubicación de los sensores de medición de la temperatura del aire interior.

2.4 Cálculo de incertidumbre

Aplicando la técnica clásica de propagación de incertidumbre [6,7], la incertidumbre en esta medición puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$U_{T_{ai}} = \sqrt{U_{TC}^2 + U_{Vol}^2 + U_{Term}^2 + U_{Est}^2} \quad [K] \quad [3]$$

Donde:

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

U_{Vol} = Incertidumbre en la medición del voltaje de salida de la termocupla.

U_{Est} = Incertidumbre debida a la estratificación de la temperatura del aire interior.

U_{Term} = Incertidumbres asociadas a la termocupla: Composición, envejecimiento, campos magnéticos.

Incertidumbre debida a la transferencia de calor

Para estimar esta incertidumbre, se elabora un modelo de calculo en régimen permanente del sistema de medición (pantallas, escudo y sensor), para las condiciones más desfavorables (radiación solar máxima registrada) (Figura 5).

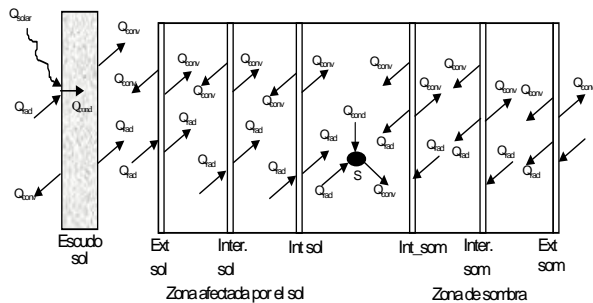


Figura 5. Flujos de calor actuando sobre el sistema de medición.

La incertidumbre debida a la transferencia de calor, corresponde a la diferencia entre la temperatura del sensor calculada por el modelo y la temperatura del aire suministrada como dato de entrada.

$$U_{TC} = T_s - T_{ai}$$

Las consideraciones tomadas para el modelo son las siguientes:

Se asume para el cálculo que el sol al ingresar por la ventana, sólo incide sobre el escudo y la mitad del área del sistema de pantallas.

Únicamente se considera flujo de calor por conducción en el escudo protector y el cable de la termocupla, esto implica que se asume espesor despreciable de las pantallas.

Como la incertidumbre en la medición de la temperatura del aire aumenta cuando el coeficiente convectivo disminuye, se tomará para el análisis de incertidumbre como condición más desfavorable, la mitad de los valores estimados mediante las correlaciones existentes. Esto equivale a asignar una incertidumbre del 100% en su determinación, acorde con el nivel de incertidumbre comúnmente estimado en este tipo de cálculos.

El cálculo de los coeficientes convectivos en cada superficie, se debe realizar mediante la resolución simultánea e iterativa del sistema de ecuaciones producto del balance de calor sobre el sistema. Esto debido a que todas las propiedades del aire y diferencias de temperatura involucrados en este cálculo, dependen del valor de la temperatura en cada superficie, y a su vez, éstas dependen de la temperatura del sensor, entregada como salida por el modelo.

Para el cálculo de los coeficientes convectivos en la zona anular de las pantallas, se asume la correlación de W. Elebanns [8] para $Ra < 10^6$; sin embargo, ésta es sólo una aproximación, ya que en ningún caso el flujo se encuentra plenamente desarrollado, debido a que el cilindro es muy corto.

Para el cálculo de la radiación en las zonas anulares, se asume la configuración de cilindros de longitud infinita donde el efecto sobre los extremos es despreciable.

De acuerdo al esquema presentado en la Figura 5, se establecen los respectivos balances de calor para cada componente del sistema. Los datos de entrada del modelo son los siguientes:

Temperatura superficial de las paredes del recinto, de la ventana y del aire, tomadas de las mediciones realizadas en el banco de ensayos.

Geometría de los componentes del sistema y propiedades de los materiales y del aire.

Al resolver el sistema de ecuaciones, producto del balance de calor sobre cada componente del sistema para una temperatura del aire interior de 24°C, se obtiene como resultado una incertidumbre debida a la transferencia de calor sobre el sistema de medición de:

$$U_{TC} = 0,10K.$$

Incertidumbre en la medición del voltaje

Para el rango de voltaje de 0 a 20mV y frecuencia de integración de 20 ms, el módulo de adquisición de datos usado para esta medición presenta una incertidumbre de:

$$U_{Vol} = 0,02\% \text{ de la lectura más } 5\mu V.$$

Aplicando el siguiente polinomio de conversión de temperatura a voltaje [9], se obtiene el valor del voltaje equivalente a la temperatura del sensor entregado por el modelo.

$$V_{tot} = \frac{b0 \cdot T^0 + b1 \cdot T^1 + b2 \cdot T^2 + b3 \cdot T^3 + b4 \cdot T^4 + b5 \cdot T^5 + b6 \cdot T^6 + b7 \cdot T^7 + b8 \cdot T^8}{1000}$$

Con: $b0=0$

$$\begin{aligned} b1 &= 3,8740773840e1 & b2 &= 3,3190198092e-2 \\ b3 &= 2,0714183645e-4 & b4 &= -2,1945834823e-6 \\ b5 &= 1,1031900550e-8 & b6 &= -3,0927581898e-11 \\ b7 &= 4,5653337165e-14 & b8 &= -2,7616878040e-17 \end{aligned}$$

La temperatura debe estar en grados Celsius y el voltaje en volts.

La incertidumbre en la medición de voltaje corresponde por lo tanto a:

$$U_{Vol} = 0,0000051V$$

Aplicando nuevamente el polinomio se tiene que equivale a:

$$U_{Vol} = 0,23K$$

Incertidumbre asociada a la termocupla

La salida de voltaje entregada por este tipo de sensor, depende básicamente de los materiales que lo componen, sus propiedades termoeléctricas y la diferencia de temperatura que origina la señal. Cualquier tipo de alteración en estos parámetros, genera incertidumbres difíciles de evaluar y sobretodo de detectar [10]. Estas alteraciones se deben generalmente a:

Oxidación de los materiales, típicamente producida por penetración de la humedad en la cubierta aislante de la termocupla ó sobre la zona sensible (descubierta de aislante) por la acción del aire.

Modificaciones en su composición, causadas por efecto de impurezas durante su fabricación.

Cambios en la estructura cristalográfica de los metales, por efecto del trabajo en frío durante el proceso de fabricación o por cambios demasiado bruscos de temperatura en alguna zona del alambre durante su operación.

La señal original puede ser afectada por la presencia de campos magnéticos generados por cables de alimentación de otros equipos, pasando cerca de los alambres de la termocupla y/o por la diferencia entre la conexión a tierra

del lugar donde esta emplazada la termocupla y el instrumento de medición, lo cual genera flujos de corriente circulando por el alambre (corrientes parásitas). Incertidumbre en la determinación de la temperatura de referencia.

El efecto de la oxidación por penetración de humedad en la cubierta de aislante para el tipo de termocupla utilizada, se considera despreciable, dadas las características de la cubierta y la información suministrada por el fabricante en cuanto a su excelente grado de resistencia a la humedad.

Para proteger de oxidación la zona sensible de la termocupla carente de aislante, ASHRAE [11] recomienda el uso de una unión soldada (soldadura de estaño de diámetro reducido). Esta unión genera sin embargo, cambios en el tiempo de respuesta del sensor. Para esta aplicación, considerando que se toman registros cada minuto con los que se obtienen promedios horarios, el efecto del aumento del volumen del sensor sobre su tiempo de respuesta se considera despreciable.

El tipo de aislante de la cubierta, la precaución de no pasar cables de alimentación de otros equipos cerca de los alambres de la termocupla y el hecho de tener los módulos de adquisición y las paredes conectadas a tierra para evitar el efecto de la electricidad estática, permiten reducir al máximo la probabilidad de que se presenten alteraciones en la señal de voltaje por efecto de corrientes parásitas y/o campos magnéticos, dada la dificultad en su detección y sobretodo su estimación a nivel del análisis de incertidumbre.

Como la señal de voltaje generada por la termocupla corresponde a la diferencia de temperatura entre sus extremos, es necesario conocer de forma precisa una de las dos temperaturas. El módulo de adquisición cuenta con un punto frío de referencia, la diferencia de temperatura entre éste punto y la temperatura de interés, se calcula con un polinomio de aproximación incorporado al módulo, el cual establece la relación directa entre la señal de voltaje y la temperatura registrada. La incorporación de la temperatura de referencia y la aproximación del polinomio generan una incertidumbre, suministrada por el fabricante del módulo, para la escala de voltaje, tipo de termocupla y tiempo de integración de la señal. En este caso es del orden de 0,4K. Finalmente, los alambres de la termocupla en general son producidos bajo estrictas normas de calidad. Según la norma ASTM estándar E-20 [12] la incertidumbre estimada en la composición, producto de las impurezas en los metales base y el proceso de fabricación (para una termocupla tipo T especial marca OMEGA, con cubierta de aislante teflón y material cerámico) [13], no debe superar 0,5K. Como el interés en este estudio es calcular diferencias de temperatura y se utiliza para todas las mediciones termocupla del mismo rollo, la incertidumbre por composición se hace despreciable.

De lo anterior se puede concluir que la incertidumbre asociada a la termocupla, tomando las medidas necesarias de precaución durante el montaje e inspección periódica de su estado, es de:

$$U_{Ter} = 0.4K$$

Incertidumbre debida a la estratificación

Para determinar esta incertidumbre, se mide en forma independiente la temperatura del aire interior a 0,1cm del techo y 1,20 m del piso. De los datos obtenidos en el banco de ensayos del ejemplo propuesto [1], se tiene que la diferencia entre estas mediciones presenta un comportamiento relativamente regular, siendo máxima para las horas de más calor durante el día, donde alcanza valores de hasta 2,1°C, como se muestra en la figura 6 (24 de febrero al 2 de marzo del año 2001).

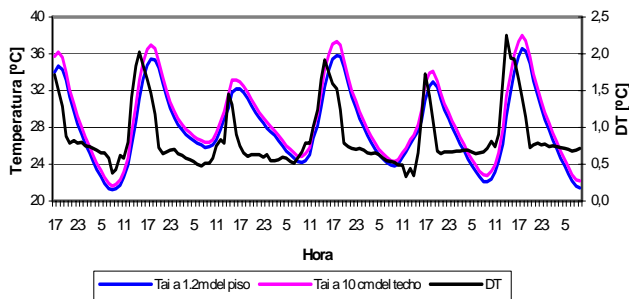


Figura 6. Efecto de la estratificación de la temperatura interior del aire.

Sin embargo, el 95% del tiempo la diferencia de temperatura es del orden de 0,75°C, por lo tanto este valor se asume como el caso más desfavorable en el análisis de incertidumbre.

Reemplazando los anteriores valores en la ecuación [3] se tiene que la incertidumbre total en la medición de la temperatura del aire interior es:

$$U_{Tai} = 0,88K$$

3. TEMPERATURA DEL AIRE EXTERIOR

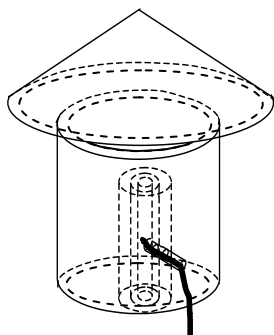


Figura 7. Sistema de pantallas y cubierta

3.1 Selección del sistema

Se conserva el mismo sistema de pantallas, tipo de sensor e instrumento de medición usados en la medición en el interior. Las únicas modificaciones consisten en el reemplazo del escudo por una cubierta que actúa como

protección adicional contra los efectos de la radiación y a la vez resguarda el sensor de la lluvia (Figura 7).

3.2 Descripción detallada del sistema

La cubierta de protección, esta formada por un cilindro y un techo cónico de acero inoxidable de 19,5 y 24,5 cm de diámetro respectivamente, recubiertos en su interior con una capa de aislante de un centímetro y papel aluminio (Figura 8).



Figura 8. Sistema de medición, de la temperatura del aire exterior

El sistema de pantallas completo, incluyendo la cubierta, se instala para el caso del ejemplo propuesto a 1,20m del piso exterior del banco de ensayos y se fija mediante un soporte a la plataforma sobre la cual se instaló el banco de ensayos (Figura 8).

Para proteger el cable de la termocupla de la intemperie y evitar el efecto que esto podría causar en la señal de salida, se utiliza una cubierta plástica en la zona donde éste se encuentra expuesto.

3.3 Cálculo de incertidumbre

La incertidumbre total en la medición de temperatura del aire exterior, puede ser expresada mediante la ecuación [3], considerando nulo el efecto de la estratificación del aire. Las demás variantes con respecto al caso anterior se exponen a continuación.

Para el cálculo de esta incertidumbre, se elabora un modelo en régimen permanente del sistema de medición (pantallas, cubierta y sensor), para las condiciones más desfavorables (radiación solar máxima registrada) (Figura 9).

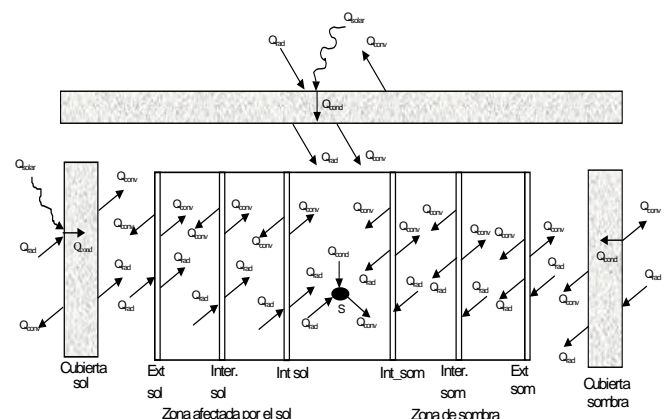


Figura 9. Flujos de calor actuando sobre el sistema de medición

Siguiendo la misma metodología y consideraciones, planteadas para la medición de la temperatura del aire interior, se presentan en el análisis sólo las siguientes modificaciones y/o adiciones:

Se considera el efecto del techo de la cubierta, por lo tanto se realizan dos balances de calor adicionales (superficie superior e inferior del techo), para determinar el efecto de la conducción en este elemento.

El cálculo sobre la cubierta lateral, es básicamente el mismo realizado para el escudo de la sección anterior, la única modificación es la adición del balance para la zona de sombra.

Como la incertidumbre en la medición aumenta cuando el coeficiente convectivo disminuye, se tomara para el análisis de incertidumbre, como condición más desfavorable, nulo el efecto de la velocidad del viento (convección natural).

De acuerdo al esquema presentado en la figura 9, se establecen los respectivos balances de calor sobre los componentes del sistema de medición. Al resolver el sistema de ecuaciones, para una temperatura del aire exterior de 33°C (condición crítica en la cual la incertidumbre es máxima), se obtiene una incertidumbre debida a la transferencia de calor sobre el sistema de medición de:

$$U_{TC} = 0,095K$$

Para la incertidumbre en la medición de voltaje se sigue el mismo procedimiento descrito para la temperatura del aire interior; por lo tanto se tiene que:

$$U_{Vol} = 0,23K$$

La incertidumbre debida a la termocupla básicamente es la misma de la sección 2 de este documento; la única diferencia podría presentarse por el envejecimiento del cable y la humedad, causada por encontrarse expuesta a la intemperie. Para evitar esto, se introduce el cable de la termocupla dentro de un conducto plástico que lo protege del efecto del sol y de la lluvia. Considerando esta medida adicional, se asume el mismo valor de la incertidumbre en la termocupla de la sección anterior.

$$U_{Ter} = 0,4K$$

Reemplazando los anteriores valores en la ecuación [3] y considerando en este caso nula la incertidumbre debida a la estratificación del aire, se tiene que la incertidumbre total en la medición de la temperatura del aire exterior es:

$$U_{Tae} = 0,47K$$

4. CONCLUSIONES.

Se ha planteado el diseño experimental para la medición de la temperatura del aire en el interior y exterior en recintos para aplicaciones HVACR. Se identifican y evalúa el peso de las fuentes más significativas de incertidumbre en este tipo de mediciones y se propone el diseño de sistemas de medición que buscan reducir la

incertidumbre global en la medición, para obtener una mejor estimación de estas variables, considerando su notable influencia en cualquier análisis térmico a nivel de sistema de control y optimación de la instalación.

5. 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] KINZIE P.A. Thermocouple temperature measurement, Wiley, New York, 1973.
- [4] Ernest O.Doebelin.1990. Measurement systems application and design, Mc.Graw Hill.Boston.
- [5] James W. Dally.1984. Instrumentation Engineering measurement, Wiley, New York.
- [6] ASHRAE. Engineering Analisis of Experimental Data, ASHRAE Guideline, ASHRAE. Atlanta USA, 1986.
- [7] 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.
- [8] GRASSO, M. Precision analysis of guarded hot plate window system used to measure heat transfer through window, ASHRAE Trans. Vol .90 part 1, pp 92-103. 1984.
- [9] HOLMAN, J.P. Experimental methods for engineers, McGraw-Hill, New York, N. Y, 1985.
- [10] HOWAR Lawrence. Error acumulation in thermocouple thermotry, The Boeing Company-Symposium on temperature, 5 th, Washington D.C, 1996.
- [11] ASHRAE, Handbook-Fundamentals, ASHRAE, Atlanta U.S.A, 200.
- [12] KINZIE P.A. Thermocouple temperature measurement, Wiley, New York, 1973.
- [13] OMEGA. The temperature Handbook, VOL 28. 1992