

PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE EN LA ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA DE ENFRIAMIENTO DE ACONDICIONADORES DE AIRE DE RECINTO.

RESUMEN

Este artículo presenta la metodología propuesta para el cálculo de incertidumbre en el resultado de la estimación de la capacidad de enfriamiento, de equipos acondicionadores de aire de recinto, mediante mediciones efectuadas en el laboratorio de pruebas y ensayos de equipos de acondicionamiento de aire LPEA-UTP. El análisis de incertidumbre, busca establecer un grado de confianza o certitud en los resultados de las pruebas y es de particular importancia si se considera que las normas nacionales e internacionales relacionadas con este tipo de análisis, son demasiado ambiguas.

PALABRAS CLAVES: Acondicionamiento de aire, eficiencia energética, análisis de incertidumbre.

ABSTRACT

This paper presents the propose methodology for uncertainty calculation on the result of cooling capacity estimation for rating room air conditioners and packaged terminals air conditioners by means of measurements performed at the air conditioner test laboratory LPEA-UTP. Uncertainty analysis looks for establishing a confidence degree or certainty on the test results and it is particularly important considering that related national and international standards are too ambiguous.

KEYWORDS: Air conditioning, energy efficiency, uncertainty analysis.

1. INTRODUCCIÓN

En cualquier tipo de ensayo de carácter experimental, la importancia del análisis de incertidumbre radica en que permite asegurar al usuario de los resultados (en este caso fabricantes y usuarios de equipos de acondicionamiento de aire), cierto grado de confianza y credibilidad sobre los valores reportados como resultado de las pruebas.

La información disponible en normas nacionales e internacionales relacionadas con este tipo de análisis, consideran procedimientos en donde se combinan tan solo una o dos variables para el análisis de propagación de incertidumbre. Por lo general se presentan ejemplos de aplicación demasiado simples y/o ambiguos. En este documento se presenta una síntesis del método aplicado al cálculo de incertidumbre, cuando el resultado final del ensayo depende de la combinación de un número considerable de mediciones independientes. Se presentan algunos ejemplos, en donde se debe aplicar además el criterio del investigador para la estimación de la incertidumbre; De utilidad en análisis de este tipo, a nivel de experimentación en ingeniería.

El procedimiento general para el cálculo de incertidumbre se encuentra consignado en las referencias [1] y [2]. En este trabajo, se muestra en detalle el análisis de incertidumbre en el cálculo de la potencia de enfriamiento.

CARLOS OROZCO HINCAPIE

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
corozco@utp.edu.co

NÉSTOR FONSECA DIAZ

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
nfonseca@utp.edu.co

Proyecto de Investigación Inscrito en el Centro de Investigaciones de la UTP como 8-05-2.

2 CALCULO DE INCERTIDUMBRE DEL ENSAYO PARA ESTIMAR LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO

La cámara de ensayo del LPEA, esta dividida en tres zonas o cámara independientes denominadas interior, exterior y anillo térmico [3,8,9]. La potencia de enfriamiento se debe calcular mediante el balance térmico de la cámara interior como método principal. La cámara exterior permite efectuar un segundo balance térmico de verificación y el anillo térmico alrededor de la cámara interior asegura estabilidad en las condiciones de humedad y temperatura del balance térmico principal [4]. El análisis de incertidumbre se efectúa para el método principal únicamente.

Para calcular la potencia de enfriamiento (Φ_{tci}) como resultado del ensayo, tenemos la siguiente ecuación producto del balance térmico del recinto interior, el cual cuenta con un equipo de re-acondicionamiento de aire denominado AA1:

$$\Phi_{tci} = \sum Pr + [h_{w;1} + h_{w;2}] \cdot W_r + \phi_{;lp} + \phi_{;lr} \quad [W] \quad [1]$$

Donde:

$\sum Pr$ [W]: Potencia eléctrica de todos los equipos ubicados dentro de la cámara interior. Se mide directamente.

W_r [gr/s]: Flujo de agua suministrada a la cámara por el sistema de humidificación del equipo AA1. Se mide directamente.

$h_{w;1}$ [kJ/kg]: Entalpía del vapor suministrado para mantener la humedad de la cámara interior. Se calcula a la temperatura del agua suministrada al recinto por sistema humidificador del equipo AA1 ($T_{H_2O;hum;AA1}$). **Cuando no se introduce agua**, se calcula a la temperatura del depósito del sistema humidificador de equipo AA1 ($T_{H_2O; tanq;AA1}$).

$h_{w;2}$: [kJ/kg]: Entalpía del condensado que abandona la cámara interior, se calcula a la temperatura de bulbo húmedo del aire a la salida del equipo re-acondicionador AA1 ($T_{a;sal;AA1;bh}$).

Φ_{lp} [W]: Perdidas de calor a través del tabique de separación. Se calcula acorde con ISO-5151 [8].

Φ_{lr} [W]: Perdidas de calor a través de las paredes de la cámara interior, sin considerar el tabique de separación. Se calcula acorde con ISO-5151 [8].

En la ecuación [1], la estimación de las entalpías $h_{w;1}$, $h_{w;2}$ dependen de otras variables, lo que implica que debe hacerse nuevamente el análisis de propagación de incertidumbre para cada una de ellas.

La ecuación [1] representa la relación funcional utilizada para aplicar la ley de propagación de incertidumbre de la variable Φ_{tci} , siguiendo la metodología indicada en la referencia [2]. La incertidumbre de Φ_{tci} , puede ser por lo tanto expresada mediante la siguiente ecuación:

$$u_{\Phi_{tci}} = \sqrt{\left[\frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{Pr}} \cdot u_{Pr}\right]^2 + \left[\frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{Wr}} \cdot u_{Wr}\right]^2 + \left[\frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{h;w1}} \cdot u_{h;w1}\right]^2 + \dots + \left[\frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{h;w2}} \cdot u_{h;w2}\right]^2 + \left[\frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{\Phi_{lp}}}\right]^2 + \left[\frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{u;\phi;\chi}} \cdot u_{u;\phi;\chi}\right]^2} \quad [W] \quad [2]$$

En la ecuación [2], las derivadas parciales de la capacidad de enfriamiento respecto a cada una de las variables que interviene en su cálculo son:

$$\frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{Pr}} = 1; \quad \frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{Wr}} = h_{w;1} - h_{w;2}; \quad \frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{h;w1}} = W_r;$$

$$\frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{h;w2}} = -W_r; \quad \frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{\Phi_{lp}}} = 1; \quad \frac{\delta_{\Phi_{tci}}}{\delta_{u;\phi;\chi}} = 1$$

Las incertidumbres individuales (u_{xi}) de cada una de las variables que intervienen en el cálculo de la ecuación [2], son estimadas a continuación.

2.1 Cálculo de la incertidumbre en la medición de la potencia eléctrica consumida por los equipos en el interior de la cámara: u_{Pr}

Como se mide directamente, se calcula la incertidumbre de esta variable mediante la raíz cuadrada de la suma de

cuadrados de los factores que pueden afectar la medición mediante la siguiente ecuación:

$$u_{Pr} = \sqrt{u_{A;Pr}^2 + u_{cat;Pr}^2 + u_{deriva;Pr}^2 + u_{temp;Pr}^2 + \dots + u_{met;Pr}^2 + u_{res;Pr}^2 + u_{rep;Pr}^2} \quad [W] \quad [3]$$

Todos los componentes de la incertidumbre en la medición de la potencia eléctrica, se calculan siguiendo la metodología expuesta en [1] y [2]. Los valores de exactitud, resolución, calibración y demás valores requeridos, son tomados de los manuales y certificados de calibración del equipo. Para calcular la incertidumbre debida al método, se utiliza en este caso en particular, como limite máximo la potencia consumida por el vatímetro, como distorsión principal causada por el método de medición.

2.2 Cálculo de la incertidumbre en la medición del flujo de agua adicionado al recinto interior por el sistema de humidificación: u_{Wr}

Como se mide directamente, se calcula la incertidumbre de esta variable mediante la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de los factores que pueden afectar la medición mediante la siguiente ecuación:

$$u_{Wr} = \sqrt{u_{A;Wr}^2 + u_{cal;Wr}^2 + u_{deriva;Wr}^2 + u_{temp;Wr}^2 + \dots + u_{met;Wr}^2 + u_{res;Wr}^2 + u_{rep;Wr}^2} \quad [kg/s]$$

Todos los componentes de la incertidumbre en la medición de la potencia eléctrica se calculan siguiendo la metodología expuesta en [1] y [2]. Los valores de exactitud, resolución, calibración y demás valores requeridos, son tomados de los manuales y certificados de calibración del equipo.

Para calcular la incertidumbre debida al método de medición, se utiliza en este caso, como limite máximo la máxima variación en el flujo de agua causada por el agua que podría quedar adherida o reevaporarse en el sistema de drenaje utilizado por el sistema de medición. Se estima experimentalmente y se asume el valor máximo probable, considerando que el sistema se encuentra estabilizado en el momento de realizar el ensayo, es decir que el flujo de agua debe ser relativamente constante.

2.3 Cálculo de la incertidumbre en la medición de las pérdidas por las paredes interiores (sin el tabique de separación): $u_{\Phi_{lr}}$

Esta variable se estima a partir de la calibración de la cámara interior. Cada una de las cámaras (interior y exterior) debe ser calibrada por separado por lo menos cada dos años como se recomienda en la norma NTC 4295 [5].

El procedimiento básico para la calibración de la cámara interior se describe en [4, 8] y básicamente entrega como resultado la medición de potencia eléctrica. Como esta variable se mide directamente, mediante un vatímetro, se tiene que su incertidumbre puede ser estimada de manera similar a la incertidumbre de la potencia suministrada a la

cámara interior descrita en el numeral 2.1 de este documento, considerando que se utilizara el mismo tipo de instrumento de medición.

2.4 Cálculo de la incertidumbre en la medición de las pérdidas por el tabique de separación: $u_{\phi;lp}$

Esta variable se calcula a partir de la medición directa de las pérdidas de calor por las paredes interiores ϕ_{lr} (sin el tabique de separación) y pérdidas de calor totales (ϕ_{lt}) (incluido el tabique de separación). Este último flujo de calor se estima mediante el mismo procedimiento de calibración de la cámara calorimétrica aplicado para ϕ_{lr} , descrito previamente. Se calcula las pérdidas de calor por el tabique de separación como:

$$\phi_{lp} = \phi_{lt} - \phi_{lr} \quad [W]$$

La ecuación anterior representa la relación funcional utilizada para aplicar la ley de propagación de incertidumbre en el cálculo de las pérdidas de calor a través de tabique de separación, la cual puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$u_{\phi;lp} = \sqrt{\left[\frac{\delta_{\phi;lp}}{\delta_{\phi;lt}} \cdot u_{\phi;lt} \right]^2 + \left[\frac{\delta_{\phi;lr}}{\delta_{\phi;lr}} \cdot u_{\phi;lr} \right]^2} \quad [W]$$

Las derivadas parciales de la ecuación anterior son:

$$\frac{\delta_{\phi;lp}}{\delta_{\phi;lt}} = 1$$

$$\frac{\delta_{\phi;lp}}{\delta_{\phi;lr}} = -1$$

El cálculo de la incertidumbre $u_{\phi;lr}$ fue descrito previamente en la sección 2.3 y de manera similar se calcula la incertidumbre en la medición de las pérdidas de calor totales $u_{\phi;lt}$.

2.5 Cálculo de incertidumbre de la entalpía del agua suministrada para mantener la humedad del recinto interior: $u_{hw;1}$

La entalpía del agua suministrada por el sistema de humidificación puede ser estimada mediante la siguiente ecuación polinomial, como función de la temperatura del agua [6]:

$$h_{w;1;AA1} = 0,22948531 + 4,187 \cdot T_{H2O;sal;AA1} - \dots + 0,0001435 \cdot T_{H2O;sal;AA1}^2 + 0,000001552 \cdot T_{H2O;sal;AA1}^3 \quad [kJ/kg]$$

La ecuación anterior representa la relación funcional utilizada para aplicar la ley de propagación de incertidumbre en el cálculo de la entalpía del agua, la cual puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$u_{hw;1} = \sqrt{\left[\frac{\delta_{h;w1}}{\delta_{T;H2O;hum;AA1}} \cdot u_{T;H2O;hum;AA1} \right]^2} \quad [kJ/kg]$$

Donde la derivada parcial de la entalpía del agua respecto a la temperatura es:

$$\frac{\delta_{h;w1}}{\delta_{T;H2O;hum;AA1}} = 4,194 - 2 \cdot 0,0005072 \cdot T_{H2O;hum;AA1} + \dots + 3 \cdot 0,000008044 \cdot T_{H2O;hum;AA1}^2$$

2.5.1 Cálculo de la incertidumbre en la medición de la temperatura del agua $u_{T;H2O;hum;AA1}$

Puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$u_{T;H2O;hum;AA1} = \sqrt{u_{A;T;H2O;hum;AA1}^2 + u_{cal;T;H2O;hum;AA1}^2 + u_{driva;T;H2O;hum;AA1}^2 + \dots + u_{res;T;H2O;hum;AA1}^2 + u_{rep;T;H2O;hum;AA1}^2 + \dots + u_{tem;T;H2O;hum;AA1}^2 + u_{met;T;H2O;hum;AA1}^2}$$

Las contribuciones de las diferentes fuentes de incertidumbre se calculan siguiendo la metodología general del cálculo de incertidumbre presentada en [1] y [2], utilizando la información de catálogos y certificados de calibración de los instrumentos y sensores de temperatura

La incertidumbre debida al método en este caso puede expresarse a su vez como:

$$u_{met;T;H2O;hum;AA1} = \sqrt{u_{TC;T;H2O;hum;AA1}^2 + u_{vol;T;H2O;hum;AA1}^2 + \dots + u_{PT100;T;H2O;hum;AA1}^2}$$

Cada contribución pueden ser estimados a partir de la experiencia e información de fabricantes como:

$u_{TC;T;H2O;hum;AA1} = 0.05 [^{\circ}C]$: Incertidumbre debida a la transferencia de calor. Esta incertidumbre, considera las posibles alteraciones en la medición por efecto de la radiación térmica de elementos cercanos al sensor, el efecto térmico de aleta del cable y la variación de la energía interna del instrumento. Esto impide que la lectura del instrumento sea realmente la temperatura del agua. Se estima mediante un balance térmico del sensor que considere estos efectos y los tipos de blindaje del sensor [6].

$u_{vol;T;H2O;hum;AA1} = 0.01 [^{\circ}C]$: Incertidumbre en la medición de la señal de voltaje de salida como resultado de la medición de resistencia del sensor PT100. Como el sistema de adquisición toma solo señales en corriente o voltaje, se debe considerar el efecto de la frecuencia de integración del modulo de adquisición y el error en el polinomio de conversión de voltaje en temperatura [6]. Este valor viene dado por el fabricante del sensor.

$u_{PT100;T;H2O;hum;AA1} = 0.01 [^{\circ}C]$ Incertidumbre causada por el tipo de sensor (termómetro de resistencia PT100). 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 errores difíciles de evaluar y sobretodo de detectar [6].

De lo indicado en [6], se puede concluir que el error asociado a la PT100, tomando las medidas necesarias de precaución durante el montaje e inspección periódica de su estado, es del orden de 0.01 °C.

2.6 Cálculo de incertidumbre de la entalpía del aire a la salida del equipo de acondicionamiento del aire de la cámara interior: $u_{hw,2}$

La entalpía del aire a la salida del equipo de AA1, puede ser expresada en función de la temperatura de bulbo seco del aire a la salida del equipo AA1 de la cámara interior [°C] y el contenido de humedad del aire (w) [kg /kg aire seco] mediante la siguiente ecuación:

$$h_{w,2} = 1,006 \cdot T_{a;sal;AA1;bs} + w \cdot (2501 + 1,805 \cdot T_{a;sal;AA1;bs}) \text{ [kJ/kg]}$$

La ecuación anterior representa la relación funcional utilizada para aplicar la ley de propagación de incertidumbre en el cálculo de la entalpía del aire a la salida del equipo AA1, la cual puede ser por lo tanto expresada por la siguiente ecuación:

$$u_{hw,2} = \sqrt{\left[\frac{\delta_{h;w2}}{\delta_{T;a;sal;AA1;bs}} \cdot u_{T;T;a;sal;AA1;bs} \right]^2 + \left[\frac{\delta_{h;w2}}{\delta_w} \cdot u_w \right]^2} \text{ [J/kg]}$$

Donde las derivadas parciales de la entalpía respecto a la temperatura y contenido de humedad son:

$$\frac{\delta_{h;w2}}{\delta_{T;a;sal;AA1;bs}} = 1,006 + w \cdot 1,805$$

$$\frac{\delta_{h;w2}}{\delta_w} = 2501 + 1,805 \cdot T_{a;sal;AA1;bs}$$

2.6.1 Incertidumbre en la medición de la temperatura del bulbo seco del aire: $u_{T;T;a;sal;AA1;bs}$

Puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$u_{T;sal;AA1;bs} = \sqrt{u_{A;T;sal;AA1;bs}^2 + u_{cal;T;sal;AA1;bs}^2 + u_{ deriva;T;sal;AA1;bs}^2 + \dots} \\ \dots u_{temp;T;a;sal;AA1;bs}^2 + u_{mt;T;a;sal;AA1;bs}^2 + \dots \\ \dots u_{res;T;a;sal;AA1;bs}^2 + u_{rep;T;a;sal;AA1;bs}^2 \text{ [°C]}$$

En este caso la incertidumbre debida al método puede ser expresada como:

$$u_{mt;T;a;sal;AA1;bs} = \sqrt{u_{TC;T;a;sal;AA1;bs}^2 + u_{vol;T;a;sal;AA1;bs}^2 + \dots} \\ \dots u_{PT100;T;a;sal;AA1;bs}^2 + u_{estrat;T;a;sal;AA1;bs}^2$$

Los términos de esta ecuación son avaluados de forma similar a la medición de temperatura del agua calculada previamente en el numeral 2.5.1. La única diferencia es el efecto adicional de la posible estratificación de la temperatura del aire en el recinto que puede ser estimada como:

$u_{estrat;T;a;sal;AA1;bs} = 0.01 \text{ [°C]}$ Este valor es estimado considerando mediciones a diferentes alturas dentro del local. Se considera que debido al sistema de distribución de los ductos de ventilación, el efecto de esta variable es pequeño.

2.6.2 Calculo de incertidumbre en la estimación del contenido de humedad: u_w

Para estimar el contenido de humedad del aire se debe medir **una** de las siguientes variables:

- Humedad relativa.
- Temperatura de dew point.
- Temperatura de bulbo húmedo.

A partir de una de estas mediciones y la medición de la presión barométrica se puede estimar el contenido de humedad del aire usando las ecuaciones teórico experimentales con las cuales se ha generado la carta psicrométrica del aire.

Experimentalmente se ha demostrado que la menor incertidumbre en la estimación del contenido de humedad del aire se obtiene al medir la temperatura de dew point [7]. Aunque este sistema de medición es sin duda el más costoso, entrega sin embargo los mejores resultados, por lo tanto se selecciona para el LPEA, esta variable y sistema de medición para calcular el contenido de humedad a partir de ella, mediante la siguiente ecuación:

$$w = 0,62198 \cdot \left[\frac{P_v}{P_b - P_v} \right] \text{ kg}_{agua}/\text{kg}_{aire seco} \text{ [4]}$$

Donde P_b es la presión barométrica del aire en [Pa], y P_v es la presión parcial del vapor en [Pa] calculada a partir de la siguiente expresión, en función de la temperatura de dew point T_{dp} en [C].

$$p_v = \exp \left[\frac{C_8}{T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15} + C_9 + C_{10} \cdot (T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15) + \dots \right] \\ C_{11} \cdot (T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15)^2 + C_{12} \cdot (T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15)^2 + \dots \\ \dots C_{13} \cdot \ln(T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15)^2 \text{ [5]}$$

Con:

$$C_8 = -5800,2206$$

$$C_9 = 1,3914993$$

$$C_{10} = -0,048640239$$

$$C_{11} = 0,000041764768$$

$$C_{12} = -1,4452093 \times 10^{-8}$$

$$C_{13} = 6,5459673$$

La ecuación [4], representa la relación funcional utilizada para aplicar la ley de propagación de incertidumbre en el cálculo del contenido de humedad del aire a la salida del equipo AA1, la cual puede ser por lo tanto expresada mediante la siguiente ecuación:

$$u_w = \sqrt{\left[\frac{\delta_w}{\delta_{pv}} \cdot u_{pv} \right]^2 + \left[\frac{\delta_w}{\delta_{pb}} \cdot u_{pb} \right]^2} \text{ [kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}]$$

Donde las derivadas parciales del contenido de humedad con respecto a las presiones son:

$$\frac{\delta_w}{\delta_{pv}} = -0,62198 \cdot \frac{P_b}{(P_b - P_v)^2}$$

$$\frac{\delta_w}{\delta_{pv}} = 0,62198 \cdot \frac{P_v}{(P_b - P_v)^2}$$

2.6.3 Calculo de incertidumbre en la estimación de la presión parcial del vapor: u_{pv}

Las incertidumbres en la estimación de la presión parcial del vapor se calculan, utilizando como relación funcional la ecuación [5]

$$u_{pv} = \sqrt{\left[\frac{\delta_{pv}}{\delta_{T;a;sal;AA1;dp}} \cdot u_{T;a;sal;AA1;dp} \right]^2} \text{ [Pa]}$$

La derivada se calcula como:

$$\frac{\delta_{pv}}{\delta_{T;a;sal;AA1;dp}} = \exp\left[\frac{C_8}{T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15} + C_9 + C_{10} \cdot (T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15) + \dots \right]$$

$$C_{11} \cdot (T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15)^2 + C_{12} \cdot (T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15)^3 + \dots \\ \dots C_{13} \cdot \ln(+273,15)^2 \cdot \delta_{T;a;sal;AA1;dp}$$

Donde la derivada interna se expresa como:

$$\delta_{T;a;sal;AA1;dp} = \frac{-C_8}{(T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15)^2} + C_{10} + \dots$$

$$\dots - 2 \cdot C_{11} \cdot (T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15) + 3 \cdot C_{12} \cdot (T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15)^2 \dots \\ \dots + 3 \cdot C_{12} \cdot (T_{a;sal;AA1;dp} + 273,15)^2$$

La incertidumbre en la medición de la temperatura de dew point se calcula a continuación.

2.6.4 Calculo de incertidumbre en la estimación la temperatura de dew point: $u_{T;a;sal;AA1;dp}$

Se calcula siguiendo la misma metodología presentada previamente para la medición de temperatura de bulbo seco del aire $u_{T;T;a;sal;AA1;bs}$ mediante la siguiente ecuación:

$$u_{T;a;sal;AA1;dp} = \sqrt{u_{A;T;a;sal;AA1;dp}^2 + u_{cal;T;a;sal;AA1;dp}^2 + u_{deriva;T;a;sal;AA1;dp}^2 + \dots \\ \dots u_{temp;T;a;sal;AA1;dp}^2 + u_{met;T;a;sal;AA1;dp}^2 + u_{res;T;a;sal;AA1;dp}^2 + u_{rep;T;a;sal;AA1;dp}^2}$$

El efecto de la incertidumbre debida al método considera también en este caso el efecto de la estratificación, por lo tanto puede ser expresada como:

$$u_{met;T;a;sal;AA1;dp} = \sqrt{u_{TC;T;a;sal;AA1;dp}^2 + u_{vol;T;a;sal;AA1;dp}^2 + \dots \\ \dots + u_{PT100;T;a;sal;AA1;dp}^2 + u_{estrat;T;a;sal;AA1;dp}^2}$$

El límite máximo para estimar el efecto de la estratificación se evalúa en forma similar al caso de la incertidumbre de $u_{T;T;a;sal;AA1;bs}$

2.6.5 Calculo de incertidumbre en la estimación de la presión barométrica local: u_{pb}

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$u_{pb} = \sqrt{U_{A;pb}^2 + u_{cal;pb}^2 + u_{deriva;pb}^2 + \dots \\ \dots + U_{temp;pb}^2 + u_{res;pb}^2 + u_{rep;pb}^2}$$

Los términos de esta ecuación se calculan siguiendo la metodología propuesta en las referencias [1] y [2], mediante la información disponible del equipo de medición suministrada en catálogos y certificado de calibración. En este caso se considera despreciable el efecto de la incertidumbre debida al método de medición.

3 CALCULO DEL VALOR FINAL DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA $U_{\phi_{ci}}$

3.1 Calculo del factor de cobertura en la determinación de la potencia de enfriamiento $k_{\phi_{ci}}$

Para poder calcular la incertidumbre expandida de la variable ϕ_{ci} (requerida como resultado de los ensayos) se tiene la siguiente ecuación:

$$U_{\phi_{ici}} = u_{\phi_{ici}} * k_{\phi_{ici}}$$

Es necesario estimar el factor de cobertura $k_{\phi_{ici}}$. Este factor se debe calcular a partir del cálculo de los grados efectivos de libertad para la variable ϕ_{ici} , mediante la siguiente expresión:

$$V_{\phi_{ici}} = \frac{(u_{\phi_{ici}})^4}{\frac{(u_{Pr})^4}{V_{Pr}} + \frac{(u_{Wr})^4}{V_{Wr}} + \frac{(u_{h_{w1}})^4}{V_{h_{w1}}} + \frac{(u_{h_{w2}})^4}{V_{h_{w2}}} + \frac{(u_{\phi_p})^4}{V_{\phi_p}} + \frac{(u_{\phi_r})^4}{V_{\phi_r}}}$$

A partir de los grados efectivos de libertad $V_{\phi_{ici}}$ y los valores tabulados en la referencia [2], se obtiene finalmente $k_{\phi_{ici}}$ y por ende el valor de la expandida $U_{\phi_{ici}}$, para entregar finalmente el resultado de la estimación del resultado de los ensayos como:

$$Y = \bar{Y} \pm U_{\phi_{ici}} \dots\dots\dots(k_{\phi_{ici}} = \dots)$$

Los grados efectivos de libertad de cada una de las variables involucradas en el cálculo de ϕ_{ici} se estiman siguiendo la metodología descrita en las referencias [1] y [2], mediante la siguientes ecuaciones:

$$V_{ef_{Pr}} = \frac{(u_{Pr})^4}{\frac{(U_{A-Pr})^4}{n-1}}$$

$$V_{ef_{Wr}} = \frac{(u_{Wr})^4}{\frac{(U_{A-Wr})^4}{n-1}}$$

$$V_{ef_{\phi_p}} = \frac{(u_{\phi_p})^4}{\frac{(U_{A-\phi_p})^4}{n-1}}$$

$$V_{ef_{\phi_r}} = \frac{(u_{\phi_r})^4}{\frac{(U_{A-\phi_r})^4}{n-1}}$$

En el caso de los grados de libertad efectivos en el cálculo de las entalpías h_{w1} y h_{w2} , como estas dependen de muchas otras variables se asume que tienden a infinito:

$$V_{ef_{h_{w1}}} = \infty$$

$$V_{ef_{h_{w2}}} = \infty$$

4. CONCLUSIONES

Se ha planteado el resultado del estudio para el análisis de incertidumbre experimental, del ensayo para estimar la

capacidad de enfriamiento de equipos de acondicionamiento de aire de recinto en el laboratorio LPEA-UTP. Esto es de particular importancias si se considera la ambigüedad existente sobre el tema en las normas nacionales e internacionales relacionadas con este tipo de análisis. El nivel de detalle presentado en este documento, permitirá implementar un programa de cálculo que utilice como datos de entrada, las mediciones del ensayo, recolectada por el sistema de adquisición de datos del LPEA-UTP.

En muchos casos, el análisis de propagación de incertidumbre depende de la experiencia del investigador al estimar algunos parámetros necesarios para el cálculo. Se enumeran por lo tanto diferentes ejemplos de estimación que podrían ser útiles en al ámbito de mediciones a nivel de ingeniería en especial en el área de las ciencias térmicas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. ICONTEC, Norma Nacional GTC 51. Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones. Bogota, Colombia, 1997.
- [2]. OROZCO Carlos, FONSECA Néstor. Análisis experimental de datos en ingeniería con estudios de caso. Revista Scientia et Técnica No 32, 2006.
- [3]. OROZCO Carlos, FONSECA Néstor. Diseño del laboratorio de pruebas y ensayos de equipos de acondicionamiento de aire LPEA-UTP. Revista Scientia et Técnica No 31, 2006.
- [4]. OROZCO Carlos, FONSECA Néstor. Aspectos normativos, legales y método de ensayo en las pruebas de equipos de acondicionamiento de aire de recinto. Revista Scientia et Técnica No 30, 2006.
- [5]. ICONTEC, Norma Nacional NTC- 4295. Método de ensayo para la clasificación de acondicionadores de aire para recinto. Bogotá 2005.
- [6]. FONSECA Néstor. Estudio experimental del balance térmico de una ventana, Tesis de Maestría, Universidad de Concepción Chile, 2002.
- [7]. SLAYZAK, Steven J, RYAN, Joseph P. Instrument uncertainty effect on calculation of absolute humidity using dew point, wet-bulb, and relative humidity sensors. National Renewable Energy Laboratory Center for Building and thermal Energy Systems. Colorado USA. 2001.
- [8]. NORMA ISO 5151 Non-ducted air conditioners and heat pumps – Testing and rating performance.
- [9]. ANSI/ASHRAE 16-1988 (RA99) “Method of Testing for Rating Room air Conditioners and Packaged Terminal Air Conditioners”.