

## ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE DATOS EN INGENIERIA CON ESTUDIO DE CASOS.

### RESUMEN

Este artículo describe y aplica una síntesis de la metodología general para el cálculo de incertidumbre en desarrollos experimentales a nivel de ingeniería. Esto es de particular importancia si se considera que en este tipo de aplicaciones, los resultados de ensayo, son por lo general función de un número considerable de variables, lo que dificulta el análisis. Por otro lado la literatura relacionada con el tema es extensa, compleja, en ocasiones demasiado ambigua y generalmente no analiza este tipo de aplicaciones o estudios de caso, descritos en este artículo.

**PALABRAS CLAVES:** Acondicionamiento de aire, diseño experimental, instrumentación, análisis de incertidumbre.

### ABSTRACT

*This paper presents and applied a synthesis of the general methodology for engineering experimental uncertainty calculation. It is particularly important considering that for this type of applications, the test results are generally function of a considerable number of measured variables, it makes difficult the analysis. On the other hand the related information is extensive, complex, sometimes too ambiguous and generally does not consider this type of applications, here analyzed.*

**KEYWORDS:** Air conditioning, experimental design, instrumentation, uncertainty analysis.

### 1. INTRODUCCIÓN

Cuando se expresa el resultado de la medición de una magnitud, es conveniente (en algunos casos obligatorios) dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de forma que quienes utilizan dicho resultado puedan evaluar su idoneidad. Sin dicha indicación, las mediciones no pueden compararse entre sí, ni con otros valores de referencia dados en especificaciones o normas.

En muchas aplicaciones industriales y comerciales, así como en las áreas del medio ambiente, de la salud y la seguridad, a menudo es necesario proporcionar un intervalo en torno al resultado de medición en el que se espera encontrar la mayor parte de la distribución de valores que pueden ser razonablemente atribuidos a la magnitud a medir.

El método ideal para evaluar y expresar la incertidumbre de medida debe ser capaz de proporcionar tal intervalo, en particular, aquel con la probabilidad o el nivel de confianza que corresponda de forma realista a lo requerido. El método básico para evaluar y expresar la incertidumbre es universal, es decir, aplicable a todo tipo de medición y a todo tipo de datos de entrada. Sin embargo, en el caso particular de experimentación a nivel de ingeniería, evaluar y/o expresar la incertidumbre de medida es un proceso complejo, considerando que las magnitudes de salida son por lo general función de muchas otras variables independientes, medidas directamente durante el proceso, ensayo experimental o

### 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.**

estudio de caso. Estudio de caso podrían ser por ejemplo, la medición experimental del flujo de masa de gases o aire atmosférico en un ducto, o la capacidad de climatización de un equipo CVAC/R. En el primer caso el flujo es función de la densidad (como función de T y P, medidas, considerando el aire como gas ideal), la velocidad y el área son medidas directamente. La capacidad de enfriamiento es función del flujo y la diferencia de entalpías (cuyo estado se define con P y T)

Se requiere en este tipo de aplicaciones, de la experiencia del investigador en cuanto a los detalles del proceso para detectar y sobretodo estimar de manera objetiva, las diferentes contribuciones a la incertidumbre en la magnitud de salida requerida, y poder de esta forma establecer entre otras, conclusiones fiables de las pruebas o ensayos realizados, con el fin de mejorar un determinado diseño, producto o servicio.

La información disponible relacionada con este tipo de aplicaciones desafortunadamente es muy extensa y a veces demasiado ambigua. Se pretende con este trabajo entregar una guía básica sobre la metodología requerida para el cálculo de incertidumbre en ingeniería, algunos criterios útiles en la estimación de la incertidumbre de medición, criterios para el cálculo del factor de cobertura y finalmente se presentan las consideraciones fundamentales en el análisis de la incertidumbre con estudios de caso.

**2. GUIA METODOLÓGICA GENERAL DEL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES.**

Todo reporte de resultados experimentales debe expresarse de la siguiente forma:

$$Y = \bar{Y} \pm U \dots\dots\dots(k_y = \dots) \tag{1}$$

Donde:

$Y$  = Magnitud de salida, resultado cuya incertidumbre se desea estimar. Una estimación del mesurando  $Y$ , denotada como  $y$ , se puede obtener a partir de una relación funcional  $f$ , es decir:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)$$

Usando los argumentos estimados  $x_1, x_2, \dots, x_N$  para los valores de las  $N$  magnitudes independientes (medidas directamente)  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , la estimación de la magnitud resultante puede expresarse como:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

$\bar{Y}$  = Promedio estadístico de la magnitud de salida  $Y$ . La estimación del valor  $y$  puede obtenerse por lo tanto de la media aritmética ( $\bar{Y}$ ) de  $n$  mediciones de  $y$  (cada una de estas con la misma incertidumbre) y estando basada en un grupo completo de valores observados de  $N$  argumentos  $x_i$  obtenidos simultáneamente [1]. Este método es preferible cuando  $f$  es una función no lineal.

$U$  = Incertidumbre expandida en la estimación de la variable  $Y$ , normalmente corresponde al valor consignado en el certificado calibración. La incertidumbre expandida en el resultado del ensayo se calculara por lo tanto mediante la siguiente ecuación:

$$U = u_y * k_y \tag{2}$$

Donde:

$u_y$ : Incertidumbre combinada del mesurando  $Y$ .  
 $k_y$ : Factor de cobertura  $k_y$ , puede variar entre 1 y 3 dependiendo del nivel de confianza.

Para cualquier nivel de confianza, el  $Y$  medido, estará entre  $\bar{Y} - U$  ;  $\bar{Y} + U$ . El factor de cobertura  $k_y$  se calculara a partir de los grados efectivos de libertad. Considerando un nivel de confianza de 95,45%, lo cual concuerda con los reportes de incertidumbre de la instrumentación disponible y significa que el 95,45% de los datos estará como máximo  $\pm 2\sigma$  alejado del valor medio. Si el intervalo o nivel de confianza se requiere del 99,73 el factor de cobertura será de  $\pm 3\sigma$  alejado del valor medio. El procedimiento para calcular  $k_y$  se describe en detalle en la sección 3. Este método se usa para obtener una mejor aproximación de en la definición de los intervalos de confianza, para lo cual no se asume una distribución normal de los datos sino una distribución

Student y el factor de cobertura se determina a partir del coeficiente  $t$  de Student evaluado en el numero de grados de libertad efectivos del estimado de salida, utilizando la formula de Welch-Satterwaite, definida como:

$$k_y = t(v_{ef}). \tag{3}$$

**3. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES COMBINADA  $u_y$**

En la mayoría de los casos el mesurando  $Y$ , no se mide directamente, sino que se determina a partir de magnitudes  $X_1, X_2, \dots, X_N$  medidas, utilizando una relación funcional  $f$ , es decir:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)$$

Donde:

$X_i$ : son las magnitudes de entrada de las variables de las cuales depende la magnitud de salida  $Y$ . El valor estimado de  $X_i$  se representa como  $x_i$ . Para obtener el valor  $u_y$  se utiliza la Ley de propagación de incertidumbre que puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$u_y = \left[ \left( \frac{\partial Y}{\partial X_1} * u_{x1} \right)^2 + \left( \frac{\partial Y}{\partial X_2} * u_{x2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial Y}{\partial X_n} * u_{xN} \right)^2 \right]^{0.5} \tag{4}$$

Los valores  $u_{x_i}$  ( $i=1,2..N$ ) representan las incertidumbres individuales en la medición de cada variable medida directamente.

Cuando las derivadas parciales involucradas en el calculo de  $u_y$ , se encuentren definidas en términos de alguna variable  $x_i$ , se considerara en estos casos para efectos del cálculo, los valores promedio de  $x_i$  de las  $n$  mediciones que se realicen. La incertidumbre combinada para cada variable  $u_{x_i}$  se estima en función de las incertidumbres de tipo A, de calibración, deriva, temperatura, método, resolución a partir de de la siguiente ecuación

$$u_{x_i} = \sqrt{u_{A_{xi}}^2 + u_{cal_{xi}}^2 + u_{deriv_{xi}}^2 + u_{temp_{xi}}^2 + u_{met_{xi}}^2 + u_{res_{xi}}^2} \tag{5}$$

Cada uno de los componentes de esta ecuación se describe en detalle en la sección 2.1. Finalmente la incertidumbre expandida de cada variable medida directamente  $U_{x_i}$ , se define como:

$$U_{x_i} = u_{x_i} * k_i + b_{max\_i} \tag{6}$$

El valor  $b_{max\_i}$  se adiciona, solo en el caso de no realizar las correcciones debidas a la calibración del instrumento con el cual se registra  $x_i$ . El valor  $b_{max\_i}$  corresponde al límite máximo de la corrección no realizada sobre  $x_i$  (cuando por alguna razón, el instrumento sigue siendo

utilizado sin corregir su salida por efecto de la calibración).

Los factores de cobertura  $k_i$  de cada variable medida directamente ( $x_i$ ), se calculan a partir de los grados efectivos de libertad  $V_{ef_{xi}}$  de cada variable  $x_i$ , utilizando la formula de Welch-Satterwaite.

$$V_{ef_{xi}} = \frac{(u_{xi})^4}{\frac{(u_{A_{xi}})^4}{n-1} + \frac{(u_{cal_{xi}})^4}{\infty} + \frac{(u_{deriva_{xi}})^4}{\infty} + \frac{(u_{tem_{xi}})^4}{\infty} + \frac{(u_{met_{xi}})^4}{\infty} + \frac{(u_{res_{xi}})^4}{\infty} + \frac{(u_{rep_{xi}})^4}{\infty}} \quad (7)$$

### 3.1 Tipos de Incertidumbre.

La incertidumbre del resultado de una medición se puede expresar como una desviación estándar, de esta manera recibe el nombre de incertidumbre estándar. Esta se puede clasificar en evaluación TIPO A, la cual se obtiene mediante métodos estadísticos y evaluación TIPO B, obtenida por otros medios, como los citados en las componentes de la incertidumbre combinada de cada variable independiente, como son: de calibración, deriva, temperatura, método, resolución. A continuación se analiza como determinar cada una de ellas.

#### 3.1.1 Incertidumbre tipo A.

Se calcula mediante análisis estadístico, para cada variable que ha sido medida directamente usando la siguiente ecuación:

$$u_{A_{xi}} = \frac{\sigma'_{(n-1)}}{\sqrt{n}}$$

Donde  $n$ , es el número de repeticiones en una prueba y  $\sigma'_{n-1}$  es la desviación estándar de las repeticiones o mediciones. Definiendo la desviación estándar para una muestra pequeña ( $n < 20$ ) como:

$$\sigma'_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (8)$$

Donde:

$x_i$ : Valores registrados de cada variable medida directamente.

$\bar{X}$ : Promedio estadístico de las mediciones  $x_i$

#### 3.1.2 Incertidumbre debida a la calibración.

En esta se establece las correcciones y las incertidumbres asociadas a la calibración, para un factor de cobertura determinado en las condiciones de calibración ( $k_{cal}$ ). Esta contribución es valida, solo cuando se realicen correcciones (es decir que el valor registrado con el instrumento este fuera del rango de aceptación del instrumento patrón durante la calibración y se corrija su salida). La desviación típica debida a la calibración se

calculara como el intervalo de incertidumbre expandida dada en el certificado de calibración  $U_{cal}$  dividido por el factor de cobertura asociado a la calibración  $k_{cal}$ .

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k_{cal}}$$

$U_{cal}$  = Incertidumbre expandida que depende del instrumento y viene dada en el certificado de calibración.

$k_{cal}$  = Factor de cobertura para la calibración, viene dada en el certificado de calibración.

#### 3.1.3 Incertidumbre debida a la deriva

Se interpreta la deriva, como la máxima variación en las características de medición de un instrumento en un intervalo de tiempo (entre calibraciones), no especificadas de otra forma. Cuando todavía se desconoce este parámetro (instrumento nuevo), el cálculo de incertidumbre debida a la deriva, se puede efectuar a partir de la exactitud del instrumento como:

$$u_{deriva} = exactitud / \sqrt{3} \quad \text{ó} \quad u_{deriva} = deriva_{max} / \sqrt{3},$$

Cuando se tiene suficiente historia de calibraciones del equipo de medición, se calcula como la máxima deriva histórica entre certificados consecutivos. La deriva de un instrumento entre dos calibraciones se estima para un intervalo dado, como la diferencia entre la corrección en la calibración  $n$  menos la corrección en la calibración  $n-1$ , en valor absoluto. Por lo tanto

$$deriva_{max} = |C_n - C_{n-1}|_{max}$$

$C_n$  y  $C_{n-1}$  deben restarse algebraicamente (considerando su signo) antes de considerarse el valor absoluto de esta diferencia.

Es importante considerar, que si la información que se tiene acerca de la variabilidad de los posibles valores del valor estimado solo permite determinar el limites inferior  $a_-$  y superior  $a_+$  y la probabilidad de que caiga dentro es 1 y la probabilidad de que el valor este fuera de esos limites es cero, se dice que la distribución es rectangular y en estos casos el mejor estimativo para la incertidumbre es:

$$u_{xi} = \frac{a_- + a_+}{2\sqrt{3}}$$

Cuando los límites son simétricos  $a_- = a_+$  se tiene:

$$u_{xi} = \frac{2a}{2\sqrt{3}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

**Las incertidumbres producidas por deriva, temperatura, método, resolución tienen este comportamiento.**

**3.1.4 Incertidumbre debida a la temperatura.**

La temperatura suele influir sobre el equipo de medida. Si esta incertidumbre no viene expresamente definida por el fabricante, ni se conoce o espera algún tipo de influencia, no se considera como contribución, siempre que se trabaje dentro de los márgenes de temperatura para los que este garantizado el equipo. En el caso de que el fabricante la defina como contribución a la incertidumbre, se considera como un límite máximo, salvo que se especifique de otra forma y se define como:

$$u_{temp} = \frac{Limite\ max\ imo}{\sqrt{3}} = \frac{C_T * \Delta T_{max} * X}{\sqrt{3}}$$

$C_T$  = Coeficiente térmico del instrumento, viene dado en el certificado de calibración y cuantifica el efecto de la temperatura ambiente sobre el instrumento.

$\Delta T_{max}$  = Máxima variación de temperatura. Es equivalente a la diferencia entre la temperatura de calibración del instrumento y su temperatura de operación.

$X$  = Valor registrado por el instrumento de medición.

**3.1.5 Incertidumbre debida al método de medición**

La incertidumbre asociada al método, evalúa el efecto de posibles alteraciones en la lectura causadas por el diseño o método de medición del instrumento. Por ejemplo al medir temperatura del aire en un ambiente, para efectos de calculo se asume que es homogénea en todo el recinto, sin embargo por efecto del funcionamiento de los equipos se puede presentar estratificación, es decir temperaturas diferentes dentro del espacio, lo cual genera una contribución a la incertidumbre. En general la incertidumbre debida al método se puede evaluar como:

$$u_{met} = \frac{Limite\ max\ imo}{\sqrt{3}}$$

El límite máximo representa la máxima variación que se podría presentar por efecto del método de medición (por lo general basado en la experiencia de quien realiza el ensayo, mediante mediciones de contraste o información del fabricante de los instrumentos). En el caso particular del ejemplo relacionado con la medición de temperatura del aire en una habitación, se puede considerar por ejemplo como límite máximo, la máxima diferencia entre los sensores de medición ubicados a 1.2 m (donde se ubica la zona de termo regulación en humanos) y la lectura de un sensor de chequeo cerca del techo.

**3.1.6 Incertidumbre debida a la resolución.**

En los equipos digitales se considera como una unidad del dígito menos significativo. Su contribución será:

$$u_{res} = \frac{resolución}{p \sqrt{3}}$$

El valor de  $p$  es 2 para instrumentos digitales y para análogos el número de veces que el espesor de una aguja o una marca quejan entre divisiones, como puede ser el caso de manómetros análogos para medir presión, es decir el número hipotético de divisiones que podría tener ese intervalo.

**4. CALCULO DEL FACTOR DE COBERTURA  $k_y$**

Para poder calcular la incertidumbre expandida de la variable  $Y$  (requerida como resultado de los ensayos) se tiene la siguiente ecuación:

$$U = u_y * k_y$$

Es necesario calcular el factor de cobertura  $k_y$  (**factor de cobertura de la variable que va a ser reportada como resultado del ensayo**). Este factor se estima a partir del cálculo de los grados efectivos de libertad para la variable  $Y$ , mediante la siguiente expresión:

$$V_{ef\ y} = \frac{(u_y)^4}{\frac{(u_{x1})^4 * \left(\frac{\partial Y}{\partial x_1}\right)^4}{V_{x1}} + \frac{(u_{x2})^4 * \left(\frac{\partial Y}{\partial x_2}\right)^4}{V_{x2}} + \dots + \frac{(u_{xN})^4 * \left(\frac{\partial Y}{\partial x_N}\right)^4}{V_{xN}}}$$

A partir del número de grados de libertad efectivos se obtendrá el factor de cobertura  $k_y$  de la tabla 1, para diferentes niveles de confianza: 68,27 %, 95,45 % y 99,73. Obsérvese que el factor de cobertura es 1, 2 y 3 para un número de datos infinito en los tres niveles de confianza analizados.

$V_{ef}$	1	2	3	4	9	10	20	50	$\infty$
<b>68,27%</b>	1,84	1,32	1,2	1,14	1,06	1,05	1,03	1,01	1
<b>95,45%</b>	13,97	4,53	3,31	2,87	2,13	2,28	2,13	2,05	2
<b>99,73%</b>	235,8	19,21	9,22	6,62	4,09	3,96	3,42	3,16	3

Tabla 1. Factor de cobertura  $k_y$  como función de los grados efectivos de libertad.

A partir de los grados efectivos de libertad  $V_{ef\ y}$  y los valores de la tabla 1, se obtiene finalmente  $k_y$  y por ende el valor de la expandida  $U$ , para entregar finalmente el resultado de la estimación del resultado de los ensayos como:

En el caso de que algunas de las magnitudes de entrada  $X_i$  a su vez sean función de otras variable, se volverá a aplicar este proceso aplicando la ley de propagación de incertidumbre a la expresión que define  $X_i$  y calculado la incertidumbre combinada para cada variable medida

$$Y = \bar{Y} \pm U \dots \dots \dots (k_y = \dots) \text{ directamente } u(x_i). \text{ Este}$$

procedimiento se repetirá hasta llegar a la definición de las variables en función solamente de las variables medidas directamente durante los ensayos.

## 5. CONSIDERACIONES IMPORTANTES EN EL ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE.

En general, la incertidumbre en la medición de una variable, depende no solamente de la precisión y características de los sensores individuales utilizados en su medición, sino también de los errores del método, derivados de su interacción con el sistema que requiere ser instrumentado. De este tipo de error se presentan dos clases principales:

1. Errores por distorsiones en el sistema, debidos a cambios en el comportamiento de la variable, causados por la presencia del sensor. Por ejemplo, la distorsión en la medición de flujo de calor o flujo de aire por presencia de los sensores.
2. Errores por interacción entre el sensor y el sistema, debidos generalmente a que el sensor debe responder a más de un parámetro del sistema. Por ejemplo, el efecto de la radiación y la conducción sobre el sensor en la medición de temperatura del aire.

El diseño de un determinado sistema de medición, debe ir por lo tanto, más allá de la selección de la instrumentación basada en el error individual de cada sensor. Este factor perdería totalmente su efecto sobre la incertidumbre asociada, si durante el diseño experimental no se tiene clara la fenomenología de la variable que debe ser medida y su interacción con el sistema. En este análisis es fundamental la experiencia del investigador con el fin de estimar las contribuciones a la incertidumbre de muchos factores inherentes a la medición en particular, que de otra manera sería imposible de detectar

### 5.1 Estudios de caso

Se analizarán dos casos específicos: El análisis de incertidumbre en la medición de temperatura con una PT100 y la medición de un flujo de masa. Este análisis y sobre todo el nivel de detalle requerido, debe aplicarse en todas las variables que intervienen en el cálculo de la magnitud de salida del ensayo experimental.

#### 5.1.1 Medición con un 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 sobre todo de detectar [2], [3]. Estas alteraciones se deben generalmente a:

- Oxidación de los materiales, típicamente producida por penetración de la humedad en la cubierta aislante de la PT100. Se minimiza utilizando de fundas en tubo de platino, selladas con vidrio herméticamente

sellado. Esta incertidumbre depende del tipo de proceso donde será usado el sensor. Algunos fabricantes evalúan su efecto y entregan un intervalo de tiempo límite dentro del cual es seguro usar el sensor con su correspondiente valor de incertidumbre asociada.

- Modificaciones en su composición, causadas por efecto de impurezas durante su fabricación. Los materiales seleccionados para este tipo de sensores, no cambia sus propiedades físicas y químicas para el rango de temperatura seleccionado. Es por esto que esta incertidumbre es muy baja para este tipo de termómetros.
- 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. Las PT100 antes de ser comercializadas son recocidas para relajar el sensor de tensiones mecánicas que puedan modificar el valor de la resistencia y por ende de la temperatura.
- 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 PT100 y/o por la diferencia entre la conexión a tierra del lugar donde está emplazada la PT100 y el instrumento de medición, lo cual genera flujos de corriente circulando por el alambre (corrientes parásitas). Esto puede evitarse con un adecuado diseño de la prueba, con la precaución de no pasar cables de alimentación de otros equipos cerca de los alambres de la PT100 y tener los módulos de adquisición de datos y las paredes conectadas a tierra, para evitar el efecto de la electricidad estática. Esto permite reducir al máximo la probabilidad alteraciones en la señal de voltaje por efecto de corrientes parásitas y/o campos magnéticos, dada la dificultad en su detección y sobre todo su estimación a nivel del análisis de error.
- Efectos de transferencia de calor indeseables sobre el sensor. En el caso del acondicionamiento de aire, se pueden presentar por ejemplo gradientes de temperatura en el medio a instrumentar, efecto de aleta térmica, del cable del sensor sobre la lectura, efecto de la radiación solar o de otra superficie sobre el sensor.

#### 5.1.2. Medición del flujo de masa de aire en un túnel

El flujo de masa está definido como:  $\dot{m} = \rho VA$ , es decir el producto de la densidad, por la velocidad por el área transversal del túnel. El valor verdadero de esta medición está dado por:  $\dot{m} = \bar{m} \pm dm$ , siendo el primer término la media promedio de la repetición de la medición y el segundo la incertidumbre de la medición, la cual se calculará aplicando la ecuación

$$dm = u_m = \left[ \left( \frac{\partial m}{\partial \rho} u_\rho \right)^2 + \left( \frac{\partial m}{\partial V} u_V \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial m}{\partial A} u_A \right)^2 \right]^{0.5}$$

Para este cálculo caso se puede asumir que las incertidumbres de calibración y deriva de cada variable son iguales. Se ha considerando solo las incertidumbres tipo A, calibración, deriva y resolución, teniendo en cuenta como nulo la incertidumbre por efecto de temperatura en los equipo de medida.

\* **En el caso de la velocidad**, se tiene:

$$\mu_V = \sqrt{u_{A,V}^2 + 2 u_{cal,V}^2 + u_{res,V}^2}$$

\* **Para el caso del área:** A = W H (ancho x alto del ducto):

$$u_A = \left[ \left( \frac{\partial A}{\partial H} u_H \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial W} u_W \right)^2 \right]^{0.5}, \text{ en este caso:}$$

$$u_A = \left[ 2 \left( \frac{\partial A}{\partial H} u_H \right)^2 \right]^{0.5} = \sqrt{2} \frac{\partial A}{\partial W} u_W = \sqrt{2} H u_H$$

y la incertidumbre de la longitud medida:

$$u_H = \sqrt{u_{A,H}^2 + 2 u_{cal,H}^2 + u_{res,H}^2}$$

\* **Para el caso de la densidad:**  $\rho = P / (RT)$

$$u_\rho = \left[ \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} u_P \right)^2 + \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} u_T \right)^2 \right]^{0.5}$$

La incertidumbre por la medición de la presión atmosférica, provocada por un barómetro será:

$$\mu_P = \sqrt{u_{A,P}^2 + 2 u_{cal,P}^2 + u_{res,P}^2}$$

La incertidumbre al medir la temperatura del aire será:

$$\mu_T = \sqrt{u_{A,T}^2 + 2 u_{cal,T}^2 + u_{res,T}^2}$$

Para poder aplicar las siguientes relaciones matemáticas debemos hacer el siguiente análisis de los datos obtenidos. Usando los datos del experimento:

Pto	V (m/s)	W (m.m.)	H (m.m.)	T (°C)	P (kPa)
1	1,98	252	252	25,1	86,107
2	2,02	252	252	25,2	86,112
3	1,96	252	252	25,2	86,112
4	2,13	252	252	25,2	86,112
5	2,03	252	252	25,4	86,121
6	2,07	252	252	25,4	86,121

Teniendo en cuenta los datos de los instrumentos:

Variable	Resolución	Exactitud	Rango
V (m/s)	0,1 m/s	3%	3 m/s
T(°C)	0,2 °C	0,2 °C	50 °C
W, H	1 mm	1mm	300 mm
P (Pa)	10 Pa	10 Pa	101325

Las incertidumbres tipo A, para V, A, T y P son:

	V (m/s)	W	H	T (°C)	P(Pa)
Prom.	2,0317	252	252	25,25	86114
σn-1	0,0618	0	0	0,1225	5,8
u <sub>A</sub>	0,025	0	0	0,055	2,6

Aplicando las ecuaciones y calculando incertidumbres:  $u_V = 0,0836$  m/s;  $u_H = 0,866$ m.m;  $u_A = 308,5$  m.m<sup>2</sup>

$u_P = 10,32$  Pa;  $u_T = 0,1875$  C;  $u_\rho = 6,43 \times 10^{-4}$  kg / m<sup>3</sup>

$u_m = 0,05585$ ;  $\bar{m} = 1,006$  2,032 0,0635 = 0,1297kg / s

$\dot{m} = \bar{m} \pm 2 u_m = 0,1297 \pm 0,05585$ kg / s .

Los cálculos se verificaron con el programa en EES. (Engineering Equation solver)

### 6. CONCLUSIONES.

Se ha planteado la metodología general para el análisis de incertidumbre en desarrollos experimentales en ingeniería, en donde los resultados de ensayo, son por lo general función de un número considerable de variables. La estimación de la incertidumbre permite un mayor grado de confiabilidad de los resultados y es un indicativo del peso y la seriedad de los resultados obtenidos.

La incertidumbre en la medición de una variable, depende no solamente de la precisión y de las características de los sensores individuales utilizados en su medición, sino también de los errores del método, derivados de su interacción con el sistema instrumentado. La experiencia del investigador es fundamental, con el fin de estimar de la mejor manera el efecto y/o contribuciones de muchos factores inherentes a cada medición en particular, que de otra manera sería imposible de detectar.

### 7. BIBLIOGRAFÍA

[1] ICONTEC, Norma Nacional GTC 51. Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones. Bogota, Colombia, 1997.  
 [2] OROZCO Carlos, FONSECA Néstor. Procedimiento para el cálculo de incertidumbre en la estimación de la potencia de enfriamiento de acondicionadores de aire de recinto. Revista Scientia et Técnica No 32, 2006.  
 [3] FONSECA Néstor. Estudio experimental del balance térmico de una ventana, Tesis de Maestría, Universidad de Concepción Chile, 2002. [4]. 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.  
 [5] NORMA ISO 5151 Non-ducted air conditioners and heat pumps – Testing and rating performance.  
 [6] ANSI/ASHRAE 16-1988 (RA99) “Method of Testing for Rating Room air Conditioners and Packaged Terminal Air Conditioners”.  
 [7] LLAMOSA Luis Enrique et al. Aspectos metrológicos fundamentales para la acreditación de un laboratorio de patronamiento eléctrico. Pereira, Colombia: POSTEGRAPH S.A., 2005, pp. 220. Proyecto UTP y SENA-COLCIENCIAS.