

*EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN EL GENERADOR DE HUMEDAD DE DOS PRESIONES, PATRON NACIONAL DE HUMEDAD EN MÉXICO.

Martines-Lopez, E.

Centro Nacional de Metrología, Querétaro, México

Resumen: El Patrón Nacional de Humedad en gases se basa en un generador de humedad de dos presiones. El alcance de este generador va desde $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ en temperatura de punto de rocío y de 10% a 95% de humedad relativa (*HR*)

Este tipo de generador requiere de mediciones de temperatura y presión para determinar los valores de temperatura de punto de rocío y de humedad relativa. Para calcular la incertidumbre de los valores generados es necesario evaluar algunos efectos tales como la razón de flujo másico, la temperatura del laboratorio y la incertidumbre asociada a las ecuaciones a las magnitudes de humedad relacionadas.

En este artículo se describen, el método para realizar la evaluación de las fuentes de incertidumbre involucradas y los resultados obtenidos.

Palabras clave: generador de dos presiones, temperatura de punto de rocío/escarcha, humedad relativa, incertidumbre.

1. INTRODUCCIÓN

Los generadores de humedad de dos presiones y dos temperaturas, los cuales se basan en principios físicos conocidos, son ampliamente usados como patrones nacionales en muchos países. Este tipo de generadores están diseñados para generar flujos de gas con humedad conocida (humedad relativa, temperatura de punto de rocío o escarcha, y otras).

En México el patrón nacional se mantiene en el Centro Nacional de Metrología (CENAM), el cual se basa en un generador (comercial) basado en el principio de dos presiones. Este generador opera desde $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ en temperatura de punto de rocío, de $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en temperatura de punto de escarcha y de 10% a 95% de humedad relativa.

El principio de operación de un generador de dos presiones requiere una fuente de aire de alta presión, la cual debe proveer aire seco y libre de aceite. Este aire presurizado es llevado a un saturador, el cual se encuentra a temperatura controlada. En la salida del saturador se mide la presión y la temperatura (P_s, T_s). Posteriormente la presión del aire saturado se reduce, por medio de una válvula de expansión, hasta aproximadamente la presión atmosférica. Finalmente el aire es conducido hacia la cámara de prueba donde se

mide nuevamente la presión y la temperatura del aire en la cámara (P_c, T_c). En la figura 1 se muestra un diagrama de este tipo de generadores.

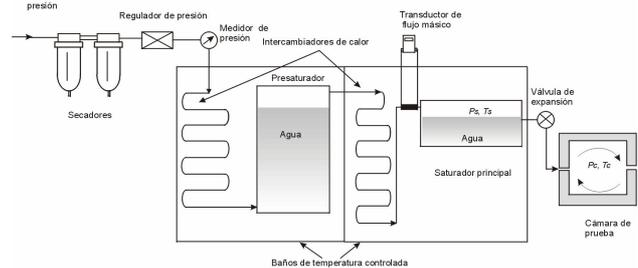


Figura 1 – Diagrama de un generador de humedad de dos presiones

Las condiciones de operación del saturador van de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ en temperatura y de aproximadamente 1034 kPa hasta aproximadamente 81 kPa en presión.

En este trabajo se describe la evaluación de la incertidumbre para las magnitudes de humedad relativa y temperatura de punto de rocío o escarcha, obtenidos en un generador de humedad de dos presiones.

2. MODELOS

2.1 Humedad relativa, (*HR*)

La ecuación que permite calcular la humedad relativa en un generador de dos presiones está dada por:

$$\%HR = \frac{P_c}{P_s} \frac{e(T_s)}{e(T_c)} \frac{f(P_s, T_s)}{f(P_c, T_c)} \cdot 100, \quad (1)$$

donde,

P_c	presión de la cámara de prueba,
P_s	presión del saturador
T_c	temperatura de la cámara de prueba,
T_s	temperatura del saturador,
$e(T_s)$	presión de saturación de vapor de agua a T_s ,
$e(T_c)$	presión de saturación de vapor de agua a T_c
$f(P_s, T_s)$	factor de corrección a P_s, T_s , y
$f(P_c, T_c)$	factor de corrección a P_c, T_c .

2.2 Temperatura de punto de rocío o escarcha, T_{df}

La temperatura de punto de rocío o escarcha se obtiene de la solución de la siguiente ecuación para T_{df} ,

$$e(T_{df}) \cdot f(P_c, T_{df}) = e(T_s) f(P_s, T_s) \cdot \frac{P_c}{P_s}. \quad (2)$$

La ecuación (2) se puede solucionar con métodos numéricos.

3. MAGNITUDES DE ENTRADA

De las ecuaciones (1) y (2), la humedad relativa y la temperatura de punto de rocío o escarcha involucran el uso de mediciones de temperatura y presión con sus respectivas incertidumbres. Las mediciones de flujo másico son útiles para evaluar el comportamiento del generador de humedad.

Adicionalmente, se requiere seleccionar la aproximación para calcular la presión de saturación de vapor de agua así como la correspondiente para calcular el factor de corrección, la selección de ambas debe ser acorde a la exactitud requerida en los cálculos.

3.1 Temperatura

Las mediciones de temperatura en el generador de humedad se realizan con cuatro termistores que tienen una resistencia nominal de 10 kΩ a 0 °C, los cuales son calibrados periódicamente con un termómetro de resistencia de platino con trazabilidad al patrón nacional de temperatura mantenido en CENAM.

La incertidumbre de estos sensores es menor que 0,03 °C ($k=2$).

3.2 Presión

Las mediciones de presión se realizan con dos transductores de presión. Las mediciones de presión son trazables a patrones nacionales de presión.

La incertidumbre de calibración es menor que 0,04 % de P_s y menos que 0,032 % de P_c , con $k=2$.

3.3 Presión de saturación de vapor de agua, $e(T)$

Existen varias aproximaciones para calcular la presión de saturación de vapor de agua, sin embargo la mayoría de ellas se basan en la aproximación de Wexler descritas en [1, 2]. Estas aproximaciones se pueden seleccionar de acuerdo a la exactitud requerida. Actualmente, las aproximaciones más usadas para propósitos de alta exactitud son las aproximaciones dadas por Sonntag [3], Hardy [4], Wagner and Pruss [5, 6].

Para el establecimiento del patrón nacional de humedad, en el CENAM, se usó la aproximación de Hardy.

En esta aproximación, la incertidumbre es menor que 0,3 % en el intervalo de -100 °C to 0 °C (hielo), y menos que 0,005% en el intervalo de 0 °C to 100 °C (agua líquida).

3.4 Factor de corrección, $f(P,T)$

El factor de corrección depende de la presión y la temperatura. Este factor corrige la desviación de la presión de saturación de vapor de agua, por considerar que el vapor de agua no ser un gas ideal.

La aproximación más aceptada para el factor de corrección fue dada en [7], la cual tiene una incertidumbre menor que 0,5 % del valor de $f(P,t)$.

3.5 Razón de flujo másico

Las mediciones de flujo másico se realizan con un transductor térmico, el cual fue calibrado con patrones del CENAM. Su incertidumbre de calibración es menor que 0,5 % de su lectura, $k=2$.

4. ANALISIS DE INCERTIDUMBRE

El análisis de incertidumbre fue realizado en base a la Guía para la Expresión de la Incertidumbre (ISO GUM, 1995) [8], tomando en cuenta las principales fuentes de incertidumbre que afectan la salida del generador.

4.1 Modelos

Las principales de fuentes de incertidumbre para determinar la humedad relativa, la temperatura de punto de rocío y escarcha son debidas a las ecuaciones asociadas (1) y (2), las cuales dependen de las mediciones de temperatura y presión. Este análisis se realizó para magnitudes no correlacionadas.

4.1.1 Incertidumbre de HR, $u_1(HR)$

La incertidumbre asociada a la ecuación (1) está dada por la siguiente ecuación:

$$u(HR) = \sqrt{\left(\frac{\partial HR}{\partial P_s} \cdot uP_s\right)^2 + \left(\frac{\partial HR}{\partial P_c} \cdot uP_c\right)^2 + \left(\frac{\partial HR}{\partial e(T_s)} \cdot ue(T_s)\right)^2 + \left(\frac{\partial HR}{\partial e(T_c)} \cdot ue(T_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial HR}{\partial f(P_s, T_s)} \cdot uf(P_s, T_s)\right)^2 + \left(\frac{\partial HR}{\partial f(P_c, T_c)} \cdot uf(P_c, T_c)\right)^2} \quad (3)$$

donde,

$$ue(T_s) = \sqrt{\left(\frac{\partial e(T_s)}{\partial T_s} uT_s\right)^2 + u^2 e_s} \quad (4)$$

$$ue(T_c) = \sqrt{\left(\frac{\partial e(T_c)}{\partial T_c} uT_c\right)^2 + u^2 e_c} \quad (5)$$

$$uf(P_s, T_s) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(P_s, T_s)}{\partial P_s} uP_s\right)^2 + \left(\frac{\partial f(P_s, T_s)}{\partial T_s} uT_s\right)^2 + u^2 f_s} \quad (6)$$

$$uf(P_c, T_c) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(P_c, T_c)}{\partial P_c} uP_c\right)^2 + \left(\frac{\partial f(P_c, T_c)}{\partial T_c} uT_c\right)^2 + u^2 f_c} \quad (7)$$

$$\frac{\partial HR}{\partial P_s} = -\frac{P_c}{P_s^2} \frac{f(P_s, T_s) e(T_s)}{f(P_c, T_c) e(T_c)}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial HR}{\partial P_c} = \frac{1}{P_s} \frac{f(P_s, T_s) e(T_s)}{f(P_c, T_c) e(T_c)}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial HR}{\partial e(T_s)} = \frac{P_c}{P_s} \frac{f(P_s, T_s)}{f(P_c, T_c) e(T_c)}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial HR}{\partial e(T_c)} = -\frac{P_c}{P_s} \frac{f(P_s, T_s) e(T_s)}{f(P_c, T_c) e^2(T_c)}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial HR}{\partial f(P_s, T_s)} = \frac{P_c}{P_s} \frac{e(T_s)}{f(P_c, T_c) e(T_c)}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial HR}{\partial f(P_c, T_c)} = -\frac{P_c}{P_s} \frac{f(P_s, T_s) e(T_s)}{f^2(P_c, T_c) e(T_c)}, \quad (13)$$

y, ue_c , es la incertidumbre debida a la aproximación usada para $e(T_c)$; ue_s , es la incertidumbre debida a la aproximación usada para $e(T_s)$; uf_c , es la incertidumbre debida a la aproximación usada para $f(P_c, T_c)$, y uf_s , es la incertidumbre debida a la aproximación usada para $f(P_s, T_s)$.

4.1.2 Incertidumbre de $T_{d/f}$, $u_1(T_{d/f})$

De la ley de propagación de incertidumbres aplicada a la ecuación (2) se obtiene:

$$u_{T_{d/f}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{d/f}}{\partial e(T_s)} \bullet ue(T_s) \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{d/f}}{\partial f(P_s, T_s)} \bullet uf(P_s, T_s) \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{d/f}}{\partial P_s} \bullet uP_s \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{d/f}}{\partial P_c} \bullet uP_c \right)^2}, \quad (14)$$

donde:

$ue(T_s)$ y $uf(P_s, T_s)$ son similares a las ecuaciones (4) y (6) respectivamente.

Los coeficientes de sensibilidad son los siguientes:

$$\frac{\partial T_{d/f}}{\partial e(T_s)} = \frac{P_c}{P_s} \frac{f(P_s, T_s)}{f(P_c, T_d) \frac{\partial e(T_d)}{\partial T_d} + e(T_d) \frac{\partial f(P_c, T_d)}{\partial T_d}}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_{d/f}}{\partial f(P_s, T_s)} = \frac{P_c}{P_s} \frac{e(T_s)}{f(P_c, T_d) \frac{\partial e(T_d)}{\partial T_d} + e(T_d) \frac{\partial f(P_c, T_d)}{\partial T_d}}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial T_{d/f}}{\partial P_s} = -\frac{P_c}{P_s^2} \frac{e(T_s) f(P_s, T_s)}{f(P_c, T_d) \frac{\partial e(T_d)}{\partial T_d} + e(T_d) \frac{\partial f(P_c, T_d)}{\partial T_d}}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_{d/f}}{\partial P_c} = \frac{1}{P_s} \frac{e(T_s) f(P_s, T_s)}{f(P_c, T_d) \frac{\partial e(T_d)}{\partial T_d} + e(T_d) \frac{\partial f(P_c, T_d)}{\partial T_d}}. \quad (18)$$

4.2 Otras fuentes de incertidumbre

Adicionalmente, existen otras fuentes de incertidumbre que deben ser consideradas en el análisis final para evaluar el comportamiento del generador de humedad, entre ellas se encuentran: la estabilidad a corto plazo, la razón de flujo másico y la temperatura ambiente.

4.2.1 Estabilidad a corto plazo (u_2)

Esta fuente de incertidumbre de la variación en intervalos cortos de las magnitudes de humedad involucradas. Su valor se calculó de mediciones realizadas en periodos de 1h.

4.2.2 Razón de flujo másico (u_3)

La salida del generador de humedad es afectado por la razón de flujo másico, la cual puede seleccionarse en el intervalo de 5 L·min⁻¹ a 20 L·min⁻¹.

La figura 2 muestra el efecto de la razón de flujo másico, medido en dos valores de temperatura de punto rocío (-22 °C y 20 °C) a distintas condiciones de flujo.

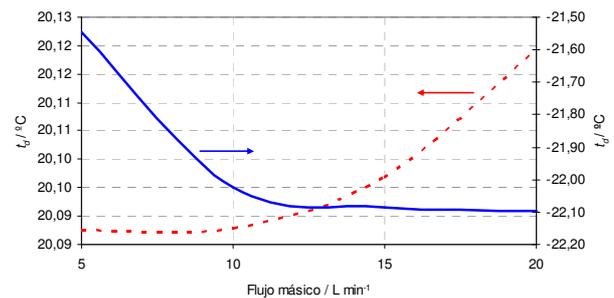


Figure 2-Dependencia de la temperatura de punto de rocío y escarcha con el flujo másico.

El comportamiento mostrado en la figura 2 fue confirmado usando un medidor de punto de rocío de espejo frío.

Para evaluar la incertidumbre debida a este efecto, la temperatura de punto de rocío se midió en al menos dos valores de flujo. Posteriormente se calculó el coeficiente de flujo y luego su incertidumbre. Los valores calculados para el coeficiente de flujo másico se encuentran entre -0,02 °C·(L·min⁻¹)⁻¹ y 0,02 °C·(L·min⁻¹)⁻¹.

4.2.3 Temperatura ambiente (u_4)

Durante la operación del generador se observó que los valores generados por éste son afectados por cambios en la temperatura ambiente (ver figura 3).

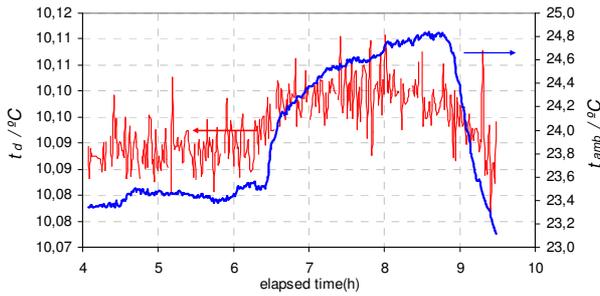


Figura 3- Efecto de la temperatura ambiente (t_{amb}) en la temperatura de punto de rocío.

Para evaluar este efecto, fue necesario cambiar la temperatura del laboratorio y observó el comportamiento del de la salida del generador.

Los valores de los coeficientes de temperatura obtenidos se encuentran entre: $dt_d/dt = 0,02 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ y $dHR/dt = 0,06 \text{ \%HR}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$.

5. RESULTADOS

En las siguientes tablas se muestran los resultados de las fuentes de incertidumbre evaluadas.

5.1 Temperatura de punto de escarcha

El análisis de incertidumbre para la temperatura de punto de escarcha se realizó en los puntos $-24 \text{ } ^\circ\text{C}$, $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$, $-15 \text{ } ^\circ\text{C}$, $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$ and $-5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 – Fuentes de incertidumbre ($u_1, u_2, u_3, y u_4$) para t_f .

$t_f / ^\circ\text{C}$	Fuentes de incertidumbre, $^\circ\text{C}$				
	u_1	u_2	u_3	u_4	U
-23,81	0,04	0,033	0,003	0,002	0,10
-19,76	0,03	0,005	0,003	0,001	0,07
-14,79	0,03	0,004	0,003	0,003	0,07
-10,01	0,03	0,006	0,003	0,000	0,06

U es la incertidumbre expandida

5.2 Temperatura de punto de rocío

El análisis de incertidumbre para temperatura de punto de rocío se realizó cada $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ en el intervalo que va de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ to $64 \text{ } ^\circ\text{C}$ en temperatura de punto de rocío. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 – Resultados de incertidumbre obtenidos para t_d

$t_d / ^\circ\text{C}$	Fuentes de incertidumbre, $^\circ\text{C}$				
	u_1	u_2	u_3	u_4	U
0,05	0,018	0,003	0,003	0,000	0,04
10,08	0,021	0,005	0,003	0,000	0,04
20,09	0,025	0,005	0,003	0,001	0,05
29,76	0,030	0,012	0,003	0,002	0,07
39,81	0,028	0,011	0,003	0,002	0,06
49,76	0,026	0,011	0,003	0,002	0,06
59,87	0,034	0,012	0,003	0,003	0,07
63,77	0,063	0,020	0,003	0,003	0,19

De la tabla anterior se puede observar que el valor de incertidumbre a $64 \text{ } ^\circ\text{C}$ se duplica respecto a los otros puntos, esto se debe a la inestabilidad de temperatura en el saturador a esa condición.

Para verificar los valores generados de temperatura de punto de rocío, se colocó con un medidor de punto de rocío calibrado, en la salida del generador. En la figura 4 se muestran los límites de incertidumbre ($+U_{t_d}$, $-U_{t_d}$) para t_{df} .

En esta figura se observa que diferencia entre los valores generados y los valores medidos se encuentran entre los límites de la incertidumbre.

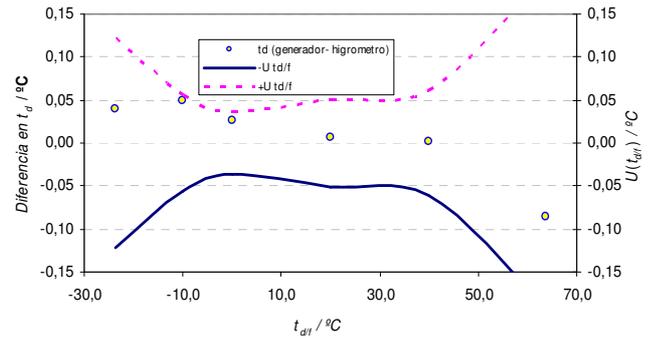


Figura 4- Concordancia entre los valores generados y medidos para t_{df} en generador de humedad del CENAM.

5.3 Humedad relativa

El análisis de incertidumbre para la humedad relativa se realizó en los puntos 10 \%HR , 30 \%HR , 60 \%HR y 95 \%RH . La tabla 3 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 3 – Fuentes de Incertidumbre para HR .

%HR	Fuentes de incertidumbre, %HR				
	u_1	u_2	u_3	u_4	U
9,96	0,06	0,006	0,017	0,001	0,12
29,87	0,16	0,007	0,003	0,002	0,32
60,14	0,32	0,043	0,022	0,002	0,64
94,45	0,50	0,04	0,048	0,002	1,00

Los valores de incertidumbre descritos en la tabla 3 fueron obtenidos a $t_s \approx t_c = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$.

6. VALIDACIÓN

Para la validación de los resultados obtenidos en las tablas antes descritas, el mismo análisis se realizó usando el método descrito por Huang en [9]. Con ambos métodos se obtuvieron resultados similares.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se describió el análisis de incertidumbre para el generador de dos presiones usado en el CENAM.

En el análisis de incertidumbre se consideraron las siguientes fuentes de incertidumbre: el modelo, la

* Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el *5th International Symposium on Humidity and Moisture, ISHM 2006*. En consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores

estabilidad a corto plazo, el flujo másico y la temperatura ambiente.

La incertidumbre expandida para temperatura de punto de rocío en el intervalo de 0 °C a 60 °C se encuentra entre 0,04 °C y 0,07 °C, en 64 °C la incertidumbre obtenida fue menor que 0,2 °C. Mientras que en temperatura de punto de escarcha en el intervalo de -24 °C a 0 °C fue menor que 0,1 °C.

En humedad relativa en el intervalo de 10 % a 95 % la incertidumbre fue menor que 1 % con $k=2$.

Finalmente los resultados obtenidos se validaron usando el método descrito por Huang [9]. Con ambos métodos se encontraron resultados similares.

REFERENCES

- [1] Wexler, A. Greenspan, L., 1976, "Vapour pressure formulation for water in the range 0 to 100 degrees C". Journal of Research of NBS; 80A, pp.775-785.
- [2] Wexler, A., 1977, "Vapour pressure formulation for ice". Journal of Research of NBS; 81A, pp. 5-20.
- [3] Sonntag D., 1998, "The history of formulation and measurements of saturation water vapour pressure". Third International Symposium of Humidity and Moisture; 1, pp.93-102.
- [4] Hardy, R. 1998, "ITS-90 formulations for vapour pressure, frost point temperature, dewpoint temperature and enhancement factors in the ranged -100 to +100 C". Third International Symposium of Humidity and Moisture; 1, pp.214-222.
- [5] Wagner, W., and Pruss A., 1993, "International equations for saturation Properties of Ordinary water substance, revised according to the International Temperature Scale of 1990". J. Phys. Chem. Ref. Data; 22(3), pp.783-787.
- [6] Wagner, W., and Pruss, A., 1994, "International equations for pressure along the melting and along the sublimation curve of ordinary water substance". J. Phys. Chem. Ref. Data; 23(3), pp.515-560.
- [7] Greenspan, L., 1975, "Functional Equations for the Enhancement Factors for CO₂-free Moist air". Journal of Research of NBS; 80A, pp.41-44.
- [8] ISO GUM, 1995 "Guide to expression of the uncertainty in Measurement". BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML.
- [9] Huang P, 1998, "Determining uncertainties of relative humidity, dew/frost-point temperature, and mixing ratio in a humidity standard generator". Proceedings of 3rd international symposium of humidity and moisture; 1, London pp.149-158.

Author: Enrique Martines-Lopez Humidity Laboratory, Centro Nacional de Metrología, – CENAM. Km 4,5 Carretera a Los Cués, El Marqués, Querétaro, Mexico. Phone: + 52 442-2110500, ext. 3420, Fax: + 52 442-2110548, E-mail: emartine@cenam.mx.