

## DEFINICIONES DE HUMEDAD Y SU EQUIVALENCIA

Enrique Martines L.  
Centro Nacional de Metrología, División de Termometría  
km 4,5 Carretera a Los Cués, El Marquez, Gro., México  
2110500 ext. 3420, emartine@cenam.mx

**Resumen:** El contenido de humedad en gases se puede expresar con distintas magnitudes. Algunas de ellas expresan el contenido de humedad en forma absoluta y otras tienen dependencia con la temperatura ó presión, sin embargo todas ellas son equivalentes.

Las tres magnitudes más usadas en la metrología de humedad son la humedad relativa, la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de punto de rocío. Las dos primeras dependen de la temperatura y presión, la última sólo depende de la presión.

En la actualidad existen instrumentos que tienen la capacidad para mostrar las tres magnitudes antes mencionadas, de las cuales una se mide y las otras se calculan a partir del valor medido.

Esta versatilidad en los instrumentos es de gran utilidad para ciertas aplicaciones, sin embargo se requiere contar con un método independiente para llevar a cabo la conversión, así como realizar propagación de la incertidumbre de la conversión

En este trabajo se describe el proceso de conversión entre la humedad relativa, la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de punto de rocío, así como la propagación de la incertidumbre de la conversión.

### 1. INTRODUCCIÓN

La humedad es una propiedad que describe el contenido de vapor de agua presente en un gas, el cual se puede expresar en términos de varias magnitudes. Algunas de ellas se pueden medir directamente y otras se pueden calcular a partir de magnitudes medidas.

La selección de una magnitud de humedad depende de la aplicación. En meteorología la humedad se expresa con la temperatura de bulbo húmedo, en cambio en un cilindro de gas, el contenido de humedad se expresa con la temperatura de punto de rocío. En otras aplicaciones como cámaras de humedad o cuartos limpios se usa la humedad relativa.

Algunas definiciones son:

- a) Razón de masas ( $r_w$ ): cociente entre la masa de vapor de agua y la masa de gas seco [1].
- b) Temperatura de punto de rocío ( $t_d$ ): es la temperatura a la que se condensa el vapor de agua cuando el gas se enfría a presión constante [1].

c) Temperatura de bulbo húmedo ( $t_w$ ): Temperatura del aire indicada por un termómetro cubierto por un algodón humedecido, el cual es influenciado por la razón de vaporización de agua desde el algodón [2].

d) Humedad relativa ( $HR$ ): cociente entre la fracción molar de vapor de agua en un espacio dado y la fracción molar del vapor de agua en su condición de saturación [1].

La razón de masas sólo depende de la determinación de la masa del vapor de agua y la masa del gas seco, por lo que  $r_w$  es una forma absoluta para determinar el contenido de humedad. La determinación de  $r_w$  se realiza con un higrómetro gravimétrico.

La temperatura de punto de rocío (b) depende de la presión del gas, por lo que para su determinación se debe especificar la presión del gas.

El valor de  $t_w$  tiene dependencia con la presión y la temperatura ya que el proceso de vaporización depende de estas magnitudes. Esta dependencia se muestra en la ecuación empírica que describe el comportamiento del psicrómetro.

La definición dada en d) se puede escribir en términos de la presión del vapor de agua. En la práctica  $HR$  depende de la temperatura y la presión del gas.

Además de las definiciones descritas, existen otras definiciones que sirven para expresar la misma propiedad: el contenido de vapor de agua en un gas..

En el campo de la metrología, las magnitudes más usadas son  $HR$ ,  $t_d$  y  $t_w$ . Cada una de éstas se puede medir con un instrumento en particular.

Debido que hay aplicaciones donde se requiere conocer el contenido de humedad con más de una magnitud, existen instrumentos comerciales que tienen la capacidad de mostrar simultáneamente los valores de  $HR$ ,  $t_d$  y  $t_w$ . En estos casos, sólo uno de ellos proviene de una medición, los otros son valores calculados.

Cuando se usa un valor calculado es conveniente validar el valor calculado y realizar la propagación de la incertidumbre que debe asociarse a éste.

En este trabajo se describe el proceso de conversión para obtener la equivalencia de las tres magnitudes mas usadas en metrología y la incertidumbre de conversión.

**2. PROCESO DE CONVERSIÓN ENTRE  $HR$ ,  $t_d$  Y  $t_w$ .**

En las referencias [3, 4, 5] se describe el proceso para realizar la conversión entre  $HR$ ,  $t_w$  y  $t_d$ .

El proceso de conversión se resume en los siguientes pasos:

- a) Conocer las condiciones de entrada, es decir la magnitud de humedad conocida ( $\psi$ ), la presión ( $P$ ) y la temperatura ( $t$ ).
- b) Establecer la relación entre ( $\psi$ ) y la magnitud de interés ( $X$ ).
- c) Realizar un análisis y selección de los factores involucrados (ecuaciones de aproximación, y constantes involucradas).
- d) Evaluación numérica del valor de interés  $X$ . Esta evaluación se puede realizar por una sustitución directa o por medio de métodos numéricos.

La forma en que se relacionan  $HR$ ,  $t_d$  y  $t_w$  se describen en la tabla 1.

Valores conocidos				
	$HR, t, P$	$t_d, t, P$	$t_w, t, P$	
Valores calculados	$HR$	1	$HR = \frac{e(t_d)}{e(t)}$ $HR = \frac{e(t_w) - AP \cdot (t - t_w)}{e(t)}$	
	$t_d$	$e(t_d) = e(t) \cdot HR$	1	$e(t_w) - AP \cdot (t - t_w) = e(t_d)$
	$t_w$	$e(t_w) - AP(t - t_w) = e(t) \cdot HR$	$e(t_w) - A \cdot P(t - t_w) = e(t_d)$	1

Tabla 1. Relación entre  $HR$ ,  $t_d$  y  $t_w$ .

Donde:

$e(t)$  es la presión de saturación de vapor de agua a la temperatura ambiente  $t$ ,  $e(t_w)$  es la presión de saturación de vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo  $t_w$ ,  $e(t_d)$  es la presión de saturación de vapor de agua a la temperatura de punto de rocío  $t_d$ ,  $A$  es el coeficiente psicrométrico.

$HR$  se calcula por sustitución directa cuando se conocen  $t_d$  y  $t_w$ . Las relaciones restantes se calculan por métodos numéricos. En [5] se describe el método numérico que se puede emplear para realizar la conversión entre  $t_d$  y  $t_w$ .

En las ecuaciones de la tabla 1 no se consideró el factor que corrige la desviación del vapor de agua respecto de los gases ideales.

**3. INCERTIDUMBRE DE LA CONVERSIÓN**

La propagación de la incertidumbre en la conversión de las magnitudes de humedad se basa en la Guía ISO GUM [6].

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a las ecuaciones descritas en la tabla 2 se obtienen las ecuaciones descritas en la tabla 3.

La propagación de incertidumbre de las magnitudes  $HR$ ,  $t_w$  y  $t_d$  se realizó bajo la suposición de que no existe correlación entre las magnitudes involucradas.

Los coeficientes de sensibilidad involucrados en la propagación de incertidumbre de la conversión se describen en el apéndice I.

**Valores conocidos** →

	<b><math>u(HR)</math></b>	<b><math>u(t_d)</math></b>
<b><math>u(HR)</math></b>	-----	$\left(\frac{uHR}{HR}\right)^2 = \left(\frac{ue(t_d)}{e(t_d)}\right)^2 + \left(\frac{ue(t)}{e(t)}\right)^2$
<b><math>u(t_d)</math></b>	$ut_d = \sqrt{\left(\frac{ue(t)}{e(t)}\right)^2 + \left(\frac{uHR}{HR}\right)^2}$ $ut_d = \sqrt{\left(\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d} \frac{1}{e(t_d)}\right)^2}$	-----
<b><math>u(t_w)</math></b>	$ut_w = \sqrt{\left(\frac{\partial t_w}{\partial t} ut\right)^2 + \left(\frac{\partial t_w}{\partial HR} uHR\right)^2 + \left(\frac{\partial t_w}{\partial P} uP\right)^2 + \left(\frac{\partial t_w}{\partial A} uA\right)^2}$	$ut_w = \sqrt{\left(\frac{\partial t_w}{\partial t} ut\right)^2 + \left(\frac{\partial t_w}{\partial t_d} ut_d\right)^2 + \left(\frac{\partial t_w}{\partial P} uP\right)^2 + \left(\frac{\partial t_w}{\partial A} uA\right)^2}$
	<b><math>u(t_w)</math></b>	-----
<b><math>u(HR)</math></b>	$uHR = \sqrt{\left(\frac{\partial HR}{\partial t} ut\right)^2 + \left(\frac{\partial HR}{\partial t_w} ut_w\right)^2 + \left(\frac{\partial HR}{\partial P} uP\right)^2 + \left(\frac{\partial HR}{\partial A} uA\right)^2}$	-----
<b><math>u(t_d)</math></b>	$ut_d = \sqrt{\left(\frac{\partial t_d}{\partial t_w} ut_w\right)^2 + \left(\frac{\partial t_d}{\partial T} ut\right)^2 + \left(\frac{\partial t_d}{\partial P} uP\right)^2 + \left(\frac{\partial t_d}{\partial A} uA\right)^2}$	-----

↓ **Valores calculados**

Tabla 2. Propagación de incertidumbre en la conversión de  $HR$ ,  $t_w$  y  $t_d$ .

**4. EJEMPLOS**

**4.1 Calibración de un higrómetro capacitivo usando como patrón un medidor de punto de rocío.**

La calibración se realizó con un medidor de punto de rocío cuya incertidumbre es de 0,1 °C ( $k=1$ ), a una temperatura en la cámara de 22 °C y una presión de 81kPa. La temperatura dentro de la cámara se midió con un termómetro cuya incertidumbre es de 0,05 °C ( $k=1$ ). Las lecturas obtenidas del instrumento bajo calibración se registraron en %HR, mientras que las del instrumento patrón en °C. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos.

Instrumento patrón		Instrumento bajo calibración
$t_d / ^\circ C$	$t(^{\circ}C)$	%HR
3,64	22,01	30,2
7,79	22,00	40,1
11,11	22,05	50,0
13,88	22,02	59,9
16,28	22,01	69,8

Tabla 3. Resultados de calibración de un higrómetro capacitivo.

Para concluir el proceso de calibración es conveniente realizar la conversión de los resultados del patrón en términos de %HR. Adicionalmente es necesario obtener la incertidumbre propagada de la misma.

La conversión se lleva a cabo aplicando las ecuaciones de la tabla 1 y la propagación de de la incertidumbre aplicando las ecuaciones de la tabla 2. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.

Instrumento patrón			Instrumento bajo calibración	
$t_d(^{\circ}C)$	%HR	$u_{conv}$ (%HR)	%HR	Corr (%HR)
3,64	30,0	0,4	30,2	-0,2
7,79	40,0	0,6	40,1	-0,1
11,11	49,8	0,7	50,0	-0,2
13,88	59,9	0,8	59,9	0,0
16,28	70,0	0,9	69,8	-0,2

Tabla 4. Conversión de los valores del patrón a unidades de %HR.

$u_{conv}$  es la incertidumbre del patrón en %HR,  $Corr$  es la corrección calculada del instrumento bajo calibración.

La incertidumbre en cada punto de calibración se obtiene combinando la incertidumbre de conversión  $u_{conv}$  con las contribuciones del instrumento bajo calibración.

#### 4.2 Cálculo de $t_d$ a partir de $HR$

El valor de  $t_d$  equivalente a un valor de  $HR$  se puede obtener de la tabla 1.

Para el intervalo de 10 % a 98 % de humedad relativa a una temperatura de 22 °C, los valores correspondientes de  $t_d$  se encuentran entre -11 °C y 21,7 °C. En la figura 1 se muestra gráficamente la conversión de  $HR$  a valores de  $t_d$  y la incertidumbre propagada debida a la conversión.

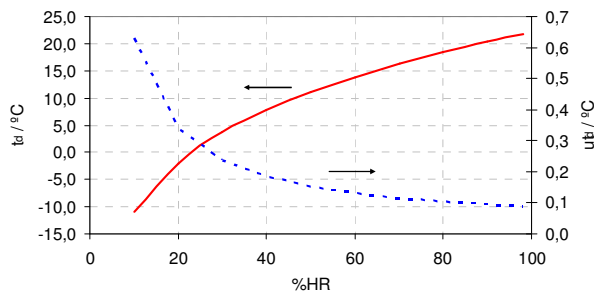


Figura 1. Conversión de valores de  $HR$  a valores de  $t_d$ .

Los valores de incertidumbre de  $t_d$  mostrados en la figura 1 fueron calculados considerando que  $u_{HR}=0,5\%$  y  $u_t=0,03$  °C.

#### 4.3. Relación de $t_w$ y $t_d$ .

En la figura 2 se muestra una gráfica que relaciona  $t_w$  y  $t_d$ . Esta gráfica fue generada para diferentes valores conocidos de  $t_d$  con su incertidumbre asociada y en ella se muestran los valores equivalentes en  $t_w$  y su incertidumbre propagada.

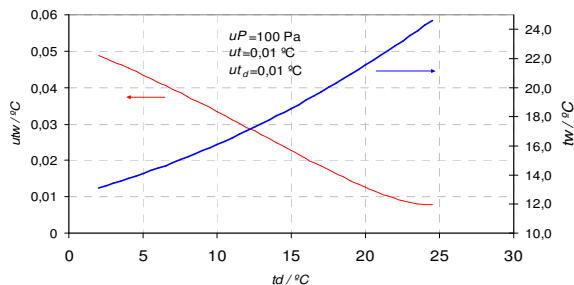


Figura 2. Valores de  $t_w$  calculados a partir de valores conocidos de  $t_d$  y sus incertidumbres correspondientes. Los valores fueron calculados para  $P=101,325$  kPa,  $t=25$  °C y  $A=6,6 \times 10^{-4} (1+0,00115 t_w) \pm 1\%$  A.

## 5. CONCLUSIONES

La conversión entre las magnitudes de humedad en un gas es importante por las diversas aplicaciones que tiene tanto en la industria como en la metrología, por esta razón es necesario contar con una metodología para realizar la conversión.

De los seis casos presentados, en dos de ellos la magnitud de interés se puede calcular directamente, en los otros la conversión se realiza aplicando un método iterativo tal como se describe en [5]

En ambos casos, tanto en la conversión como en la propagación de incertidumbre es conveniente conocer todas las magnitudes involucradas y evaluar su influencia en los resultados.

No obstante la importancia que tiene el conocer la incertidumbre de la conversión en un caso dado, es muy conveniente interpretar los resultados obtenidos en términos del experimento realizado así como considerar las fuentes adicionales de incertidumbre involucradas en el mismo.

## REFERENCIAS

1. Quinn, F., The most common problem of moisture/humidity measurement and control. Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium of Humidity and Moisture; Washington, ISA, 1985.
2. BS 1339-1:2002, Part 1: Terms, definitions and formulae, British Standard, 2002.
3. J A. Davila-Pacheco, E Martines-Lopez, Propagación de incertidumbre en la conversión de algunas magnitudes de humedad, *Simposio de Metrología*, 2006.
4. J Lowell-Smith, Propagation of uncertainty in humidity measurement, *Tempmeko2001*, Vol 2 pp.911-916, 2001.
5. E. Martines-López, L. Lira-Cortés, J.A, Dávila-Pacheco, Analysis of the uncertainty propagation of the conversion between dew point temperature and wet bulb temperature, *Tempmeko2007* (2007). Artículo bajo revisión.
6. ISO GUM, "Guide to the expression of the uncertainty in Measurement". *BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML* (1995).

7. R Hardy, "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 (1998).

**Apéndice I.** Coeficientes de descritos en la tabla 2.

$$\frac{\partial t_w}{\partial t_d} = \frac{\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d}}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}, \quad \frac{\partial t_d}{\partial t_w} = \frac{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}{\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d}},$$

$$\frac{\partial t_w}{\partial P} = \frac{A(t-t_w)}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}, \quad \frac{\partial t_d}{\partial P} = \frac{-A(t-t_w)}{\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d}},$$

$$\frac{\partial t_w}{\partial t} = \frac{AP}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}, \quad \frac{\partial t_d}{\partial t} = \frac{-AP}{\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d}},$$

$$\frac{\partial t_w}{\partial A} = \frac{P(t-t_w)}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}, \quad \frac{\partial t_d}{\partial A} = \frac{-P(t-t_w)}{\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d}},$$

$$\frac{\partial t_w}{\partial t} = \frac{[(HR/100)(\partial e(t)/\partial t) + AP]}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP},$$

$$\frac{\partial t_w}{\partial HR} = \frac{e(t)/100}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}, \quad \frac{\partial t_w}{\partial P} = \frac{A[t-t_w]}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP},$$

$$\frac{\partial t_w}{\partial A} = \frac{P[t-t_w]}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}, \quad \frac{\partial HR}{\partial A} = \frac{1}{e(t)}[-P(t-t_w)],$$

$$\frac{\partial HR}{\partial t} = \frac{e(t)[-AP] - \frac{\partial e(t)}{\partial t}[e(t_w) - AP(t-t_w)]}{e^2(t)},$$

$$\frac{\partial HR}{\partial t_w} = \frac{1}{e(t)} \left[ \frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP \right], \quad \frac{\partial HR}{\partial P} = \frac{1}{e(t)} [-A(t-t_w)].$$