

Necesidades industriales en la medición del contenido de humedad en gases

Jesus A. Davila
Lab. Humedad / CENAM
jdavila@cenam.mx



Encuentro Nacional de
Metrología Eléctrica 2009
18-20 de noviembre

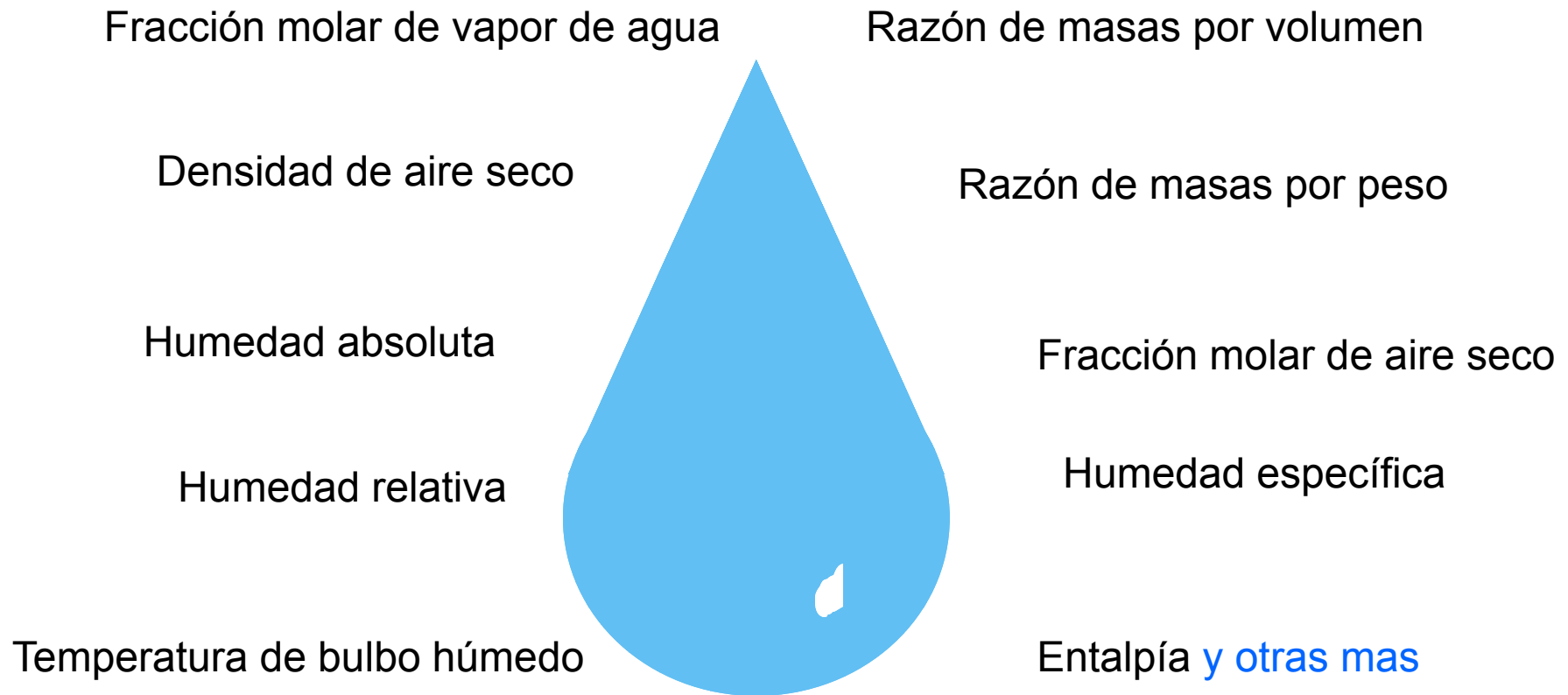
→ Electromagnetismo
→ Temperatura y
Propiedades Termofísicas
→ Tiempo y Frecuencia



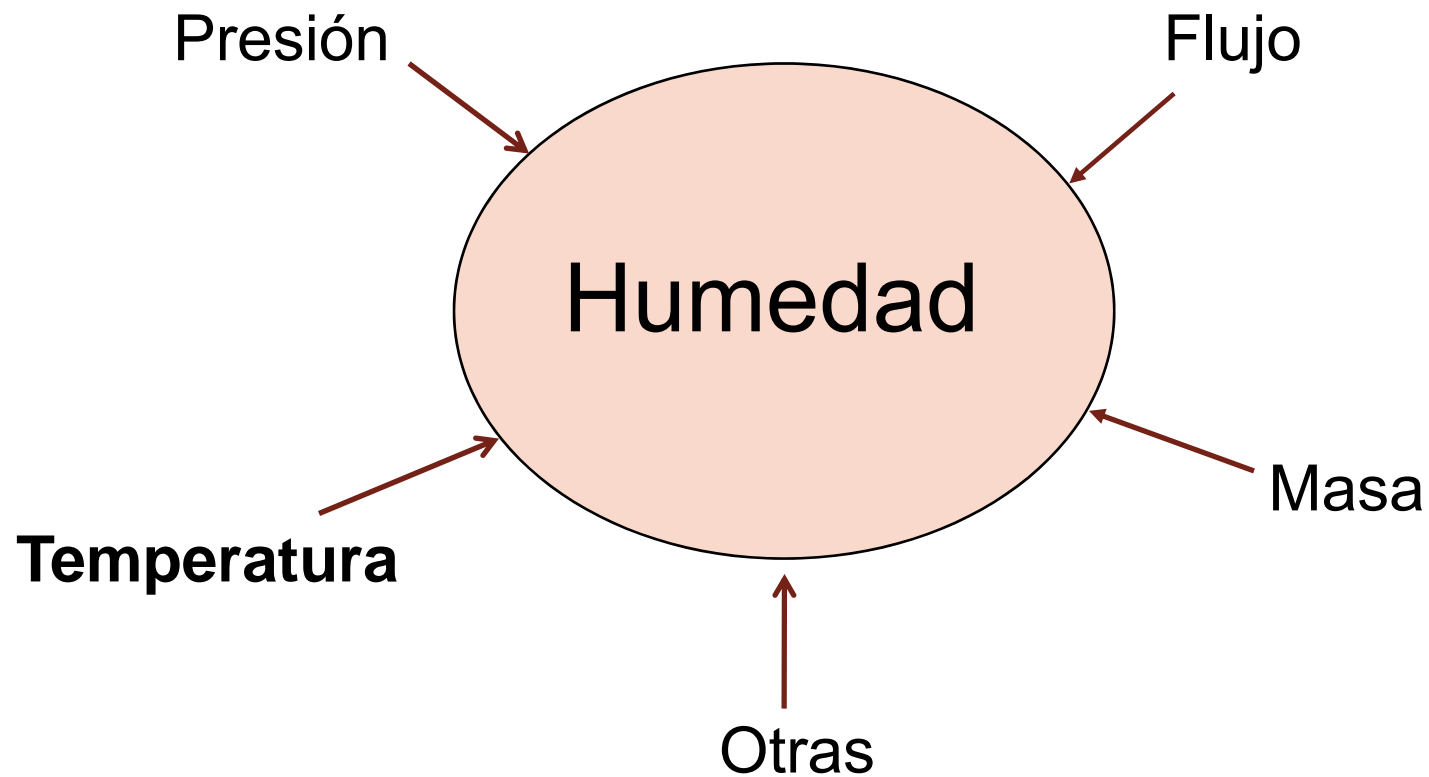
Contenido

- Introducción
- Medición de temperatura de punto de rocío
 - Usos, cuidados y mantenimiento.
 - Corrección por presión.
 - Factores de influencia.
- Medición de temperatura de bulbo húmedo
 - Uso, cuidados y mantenimiento.
 - Corrección por presión.
- Conclusiones

Cantidades relacionadas con el contenido de agua en gases

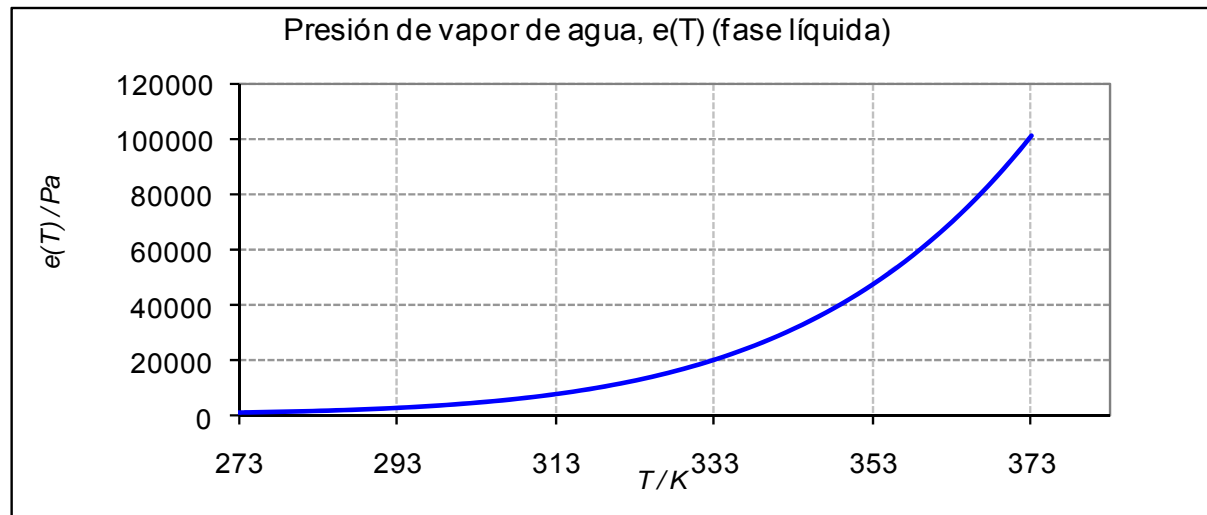


Variables de influencia



Presión de saturación de vapor de agua

Es la máxima presión que puede ser ejercida por el vapor de agua a una temperatura dada.



La presión de vapor de agua en el punto triple del agua es 611,657 Pa.

Presión de saturación de vapor de agua / fase líquida

Ecuaciones de aproximación para presión de vapor de agua

$$e(T_d) = \exp\left(\sum_{i=0}^6 a_i T_d^{i-2} + a_7 \ln T_d\right), \text{ en Pa}$$

| | Wexler (1976, 1977) | Sonntag (1990) | Hardy (1998) |
|-------------|---|---|---|
| a_0 | $-2,9912729 \cdot 10^3$ | 0 | $-2,8365744 \cdot 10^3$ |
| a_1 | $-6,0170128 \cdot 10^3$ | $-6,0969385 \cdot 10^3$ | $-6,028076559 \cdot 10^3$ |
| a_2 | $1,887643854 \cdot 10^1$ | $2,12409642 \cdot 10^1$ | $1,954263612 \cdot 10^1$ |
| a_3 | $-2,8354721 \cdot 10^{-2}$ | $-2,711193 \cdot 10^{-2}$ | $-2,737830188 \cdot 10^{-2}$ |
| a_4 | $1,7838301 \cdot 10^{-5}$ | $1,673952 \cdot 10^{-5}$ | $1,6261698 \cdot 10^{-5}$ |
| a_5 | $-8,4150417 \cdot 10^{-10}$ | 0 | $7,0229056 \cdot 10^{-10}$ |
| a_6 | $4,4412543 \cdot 10^{-13}$ | 0 | $-1,8680009 \cdot 10^{-13}$ |
| a_7 | 2,858487 | 2,433502 | 2,7150305 |
| $U_r(e(T))$ | $\leq 0,005\%$ $0^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}$ | $\leq 0,005\%$ $0^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}$ | $\leq 0,005\%$ $0^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}$ |

Presión de saturación de vapor de agua / fase sólida

Ecuaciones de aproximación para presión de vapor de agua

$$e(T_f) = \exp\left(\sum_{i=0}^6 a_i T_f^{i-2} + a_7 \ln T_f\right), \text{ en Pa}$$

| | Wexler (1976, 1977) | Sonntag (1990) | Hardy (1998) |
|-------------|--|---|--|
| a_0 | 0 | 0 | 0 |
| a_1 | $-5,6745359 \cdot 10^3$ | $-6,0245282 \cdot 10^3$ | $-5,8666426 \cdot 10^3$ |
| a_2 | 6,3925247 | $2,932707 \cdot 10^1$ | $2,232870244 \cdot 10^1$ |
| a_3 | $-9,677843 \cdot 10^{-3}$ | $1,0613868 \cdot 10^{-2}$ | $1,39387003 \cdot 10^{-2}$ |
| a_4 | $6,22157 \cdot 10^{-7}$ | $-1,3198825 \cdot 10^{-5}$ | $-3,4262402 \cdot 10^{-5}$ |
| a_5 | $2,0747825 \cdot 10^{-9}$ | 0 | $2,7040955 \cdot 10^{-8}$ |
| a_6 | $-9,484024 \cdot 10^{-13}$ | 0 | 0 |
| a_7 | 4,1635019 | $-4,9382577 \cdot 10^{-1}$ | $6,7063522 \cdot 10^{-1}$ |
| $U_r(e(T))$ | $\leq (0,01-0,005 \cdot t)\%$ $-100 \text{ °C} \leq t \leq 0,01 \text{ °C}$ | $\leq 0,5\%$ $-100 \text{ °C} \leq t \leq 0,01 \text{ °C}$ | $\leq (0,01-0,005 \cdot t)\%$ $-100 \text{ °C} \leq t \leq 0,01 \text{ °C}$ |

Medición de temperatura de punto de rocío



**Encuentro Nacional de
Metrología Eléctrica 2009**
18-20 de noviembre

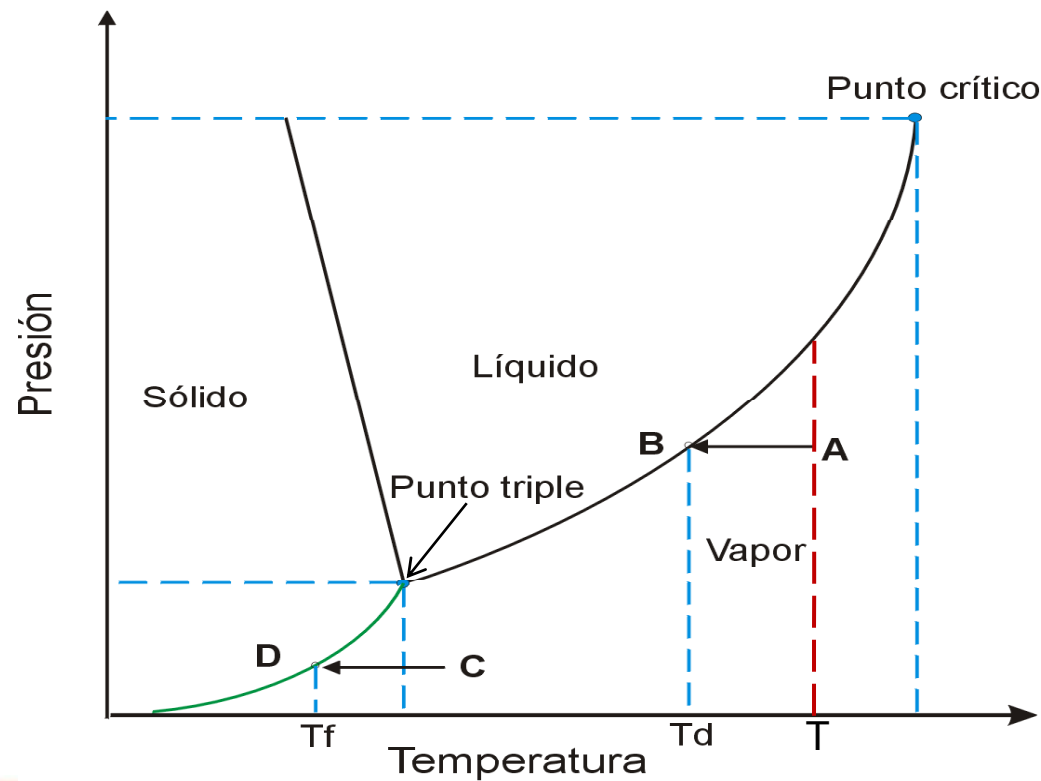
↪ Electromagnetismo
↪ Temperatura y
Propiedades Termofísicas
↪ Tiempo y Frecuencia



Temperatura de punto de rocío / escarcha

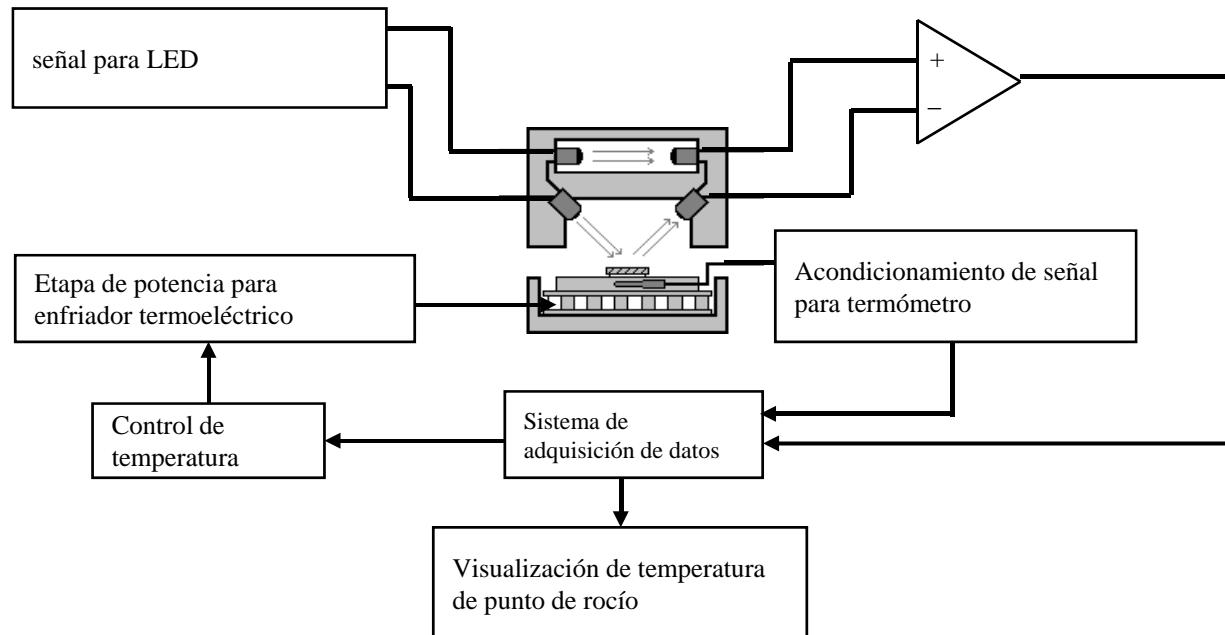
Temperatura a la cual la mezcla gas-vapor de agua debe ser enfriada isobáricamente para inducir condensación o solidificación.

En esta condición, la presión de vapor de agua alcanza su condición de saturación.



Medidor de temperatura de punto de rocío / escarcha

Medidores de temperatura de punto de rocío por espejo enfriado



Características generales de un medidor de t_d / t_f

Alcance de medición: -90 °C a 100 °C

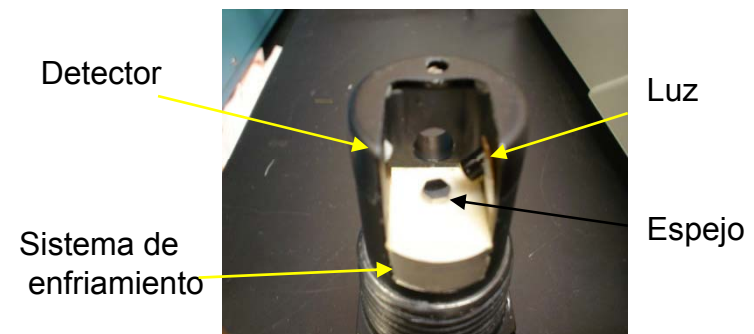
Exactitud: de 0.2 °C a 4 °C

Ventajas:

- Instrumento primario*
- Instrumento de alta exactitud
- No presenta derivas
- No presenta histéresis
- No depende de la temperatura del gas.

Desventajas:

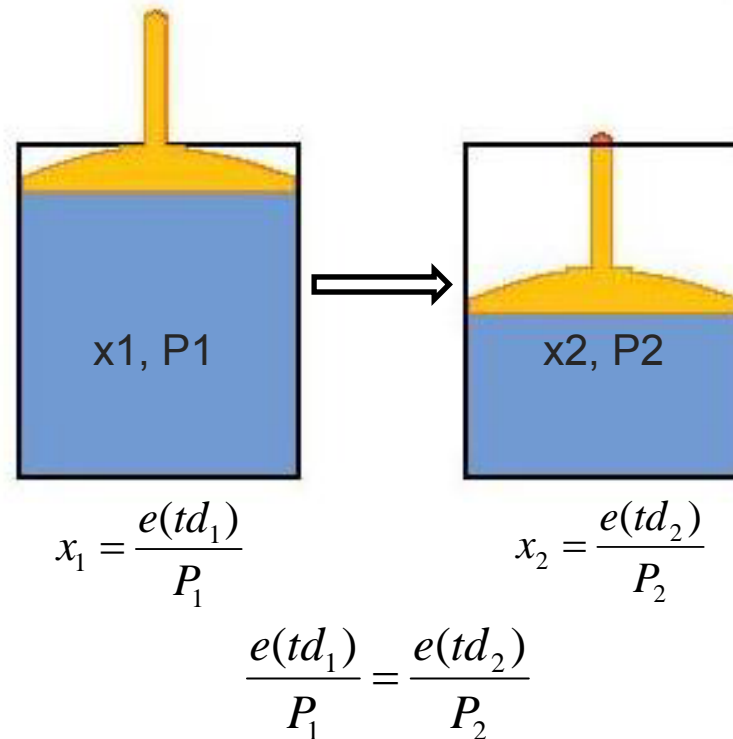
- Costo elevado
- Mantenimiento especializado
- Uso e instalación especializado



Consideraciones para mediciones confiables

- Flujo, debe ser menor a 1 Lt/min
- Limpieza del espejo
- Materiales no higroscópicos para su instalación
- **Corregir efecto por presión**
- **A temperaturas menores de 0 °C identificar si es agua líquida (rocío) ó agua sólida (escarcha).**

Temperatura de punto de rocío / efecto por presión



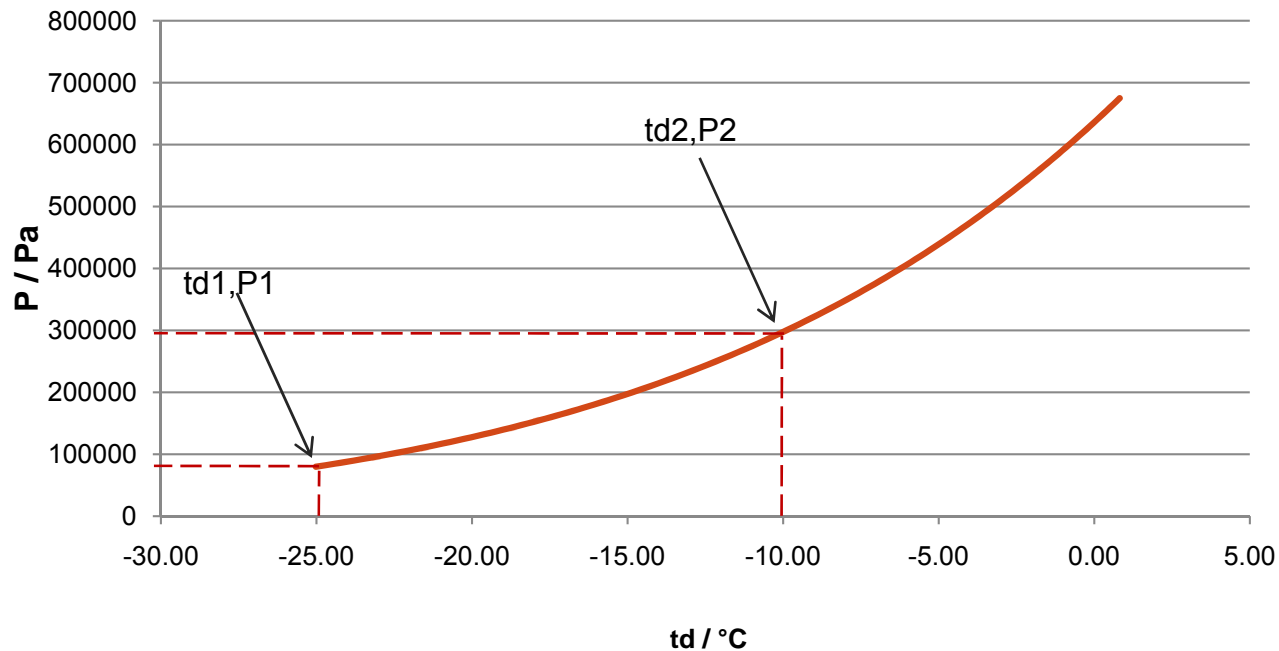
$$e(td_2) f(P_2, td_2) = e(td_1) \cdot f(P_1, td_1) \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

Enrique Martines, Leonel Lira, 2008. "Cálculo de la temperatura de punto de rocío a diferentes valores de presión". Simposio de Metrología 2008.

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA, CENAM,
DERECHOS RESERVADOS 2009

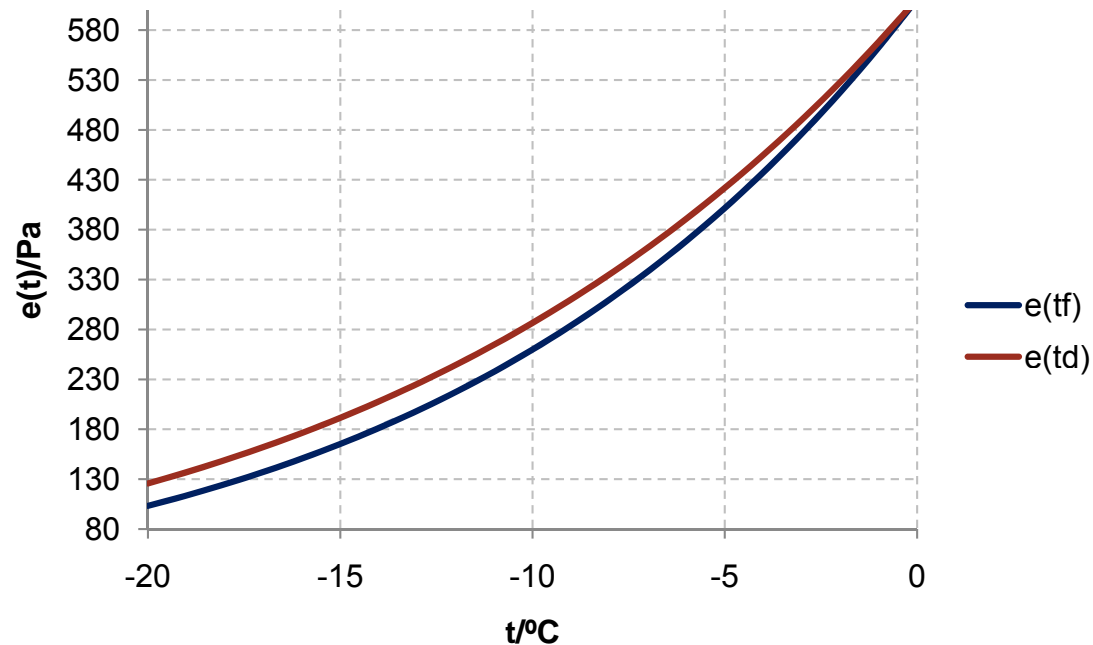
Temperatura de punto de rocío / efecto por presión

Efecto de presión a la temperatura de punto de rocío



Agua superenfriada

- Las moléculas de vapor de agua tiene la propiedad de mantenerse líquida a temperaturas debajo de 0 °C y se conoce como agua superenfriada.



Temperatura de punto de rocío / escarcha

- **Diferencias entre la temperatura de punto de rocío y la temperatura de punto de escarcha**

| Punto de escarcha /°C | Punto de rocío /°C | Diferencia /°C |
|-----------------------|--------------------|----------------|
| 0 | 0 | 0 |
| -5 | -5,6 | -0,6 |
| -10 | -11,2 | -1,2 |
| -15 | -16,7 | -1,7 |
| -20 | -22,2 | -2,2 |
| -25 | -27,7 | -2,7 |
| -30 | -33,1 | -3,1 |
| -35 | -38,4 | -3,4 |
| -40 | -43,7 | -3,7 |

Medición de temperatura de bulbo húmedo



**Encuentro Nacional de
Metrología Eléctrica 2009**
18-20 de noviembre

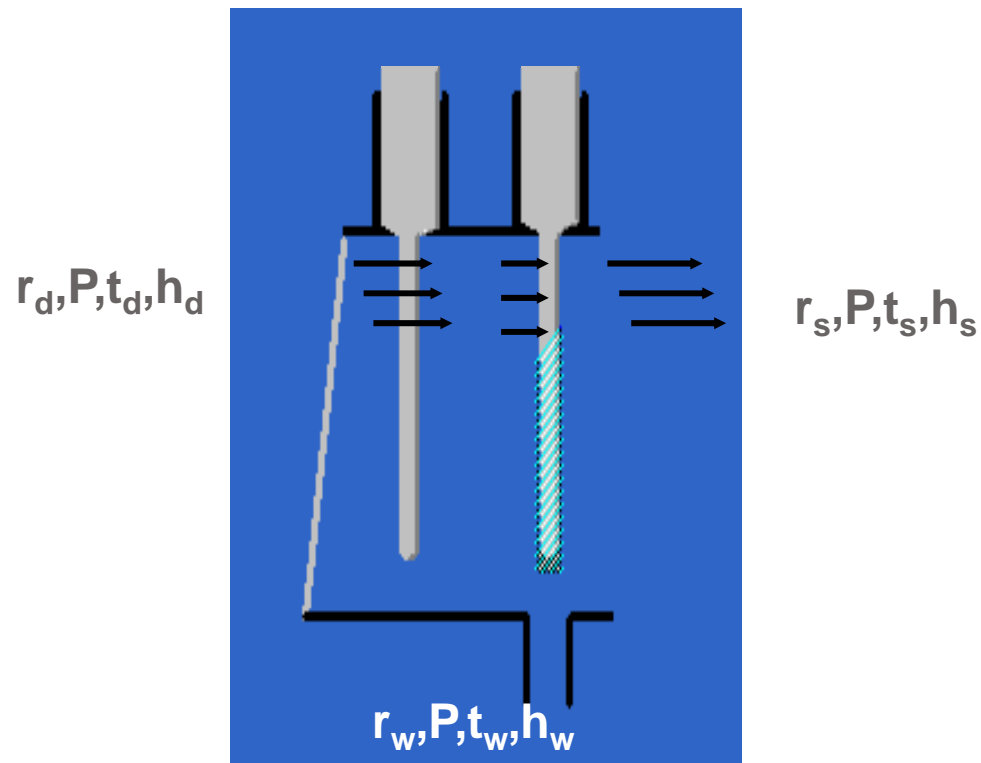
↪ Electromagnetismo
↪ Temperatura y
Propiedades Termofísicas
↪ Tiempo y Frecuencia



Temperatura de bulbo húmedo

Temperatura del bulbo húmedo

Temperatura indicada por un termómetro cubierto con un paño de algodón humedecido y sobre el cual se hace pasar aire.



Psicrómetro

Alcance de medición: 10 %HR a 98 %HR

Exactitud: de 1 %HR a 3 %HR

Ventajas:

- No presenta derivas
- No presenta histéresis
- Fácil operación y mantenimiento

Desventajas:

- Susceptible a contaminación
- Frágil
- No se adapta a todas las necesidades



Humedad relativa a partir de t y t_w

Ecuación de un psicrómetro que relaciona la humedad relativa y la temperatura de bulbo húmedo es:

$$\% HR = \frac{e(t_w) - A \cdot P \cdot (t - t_w)}{e(t)} \cdot 100$$

Donde A es el coeficiente psicrométrico. La aproximación mas conocida para A fue dada por Ferrel, está dada de la siguiente manera:

$$A = 6,6 \times 10^{-4} (1 + 0,00115 t_w)$$

$e(t_w)$ es la presión parcial de vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo,

$e(t)$ es la presión parcial de vapor de agua a la temperatura ambiente,

P es la presión ambiente,

t temperatura ambiente

t_w temperatura de bulbo húmedo

Temperatura de bulbo húmedo

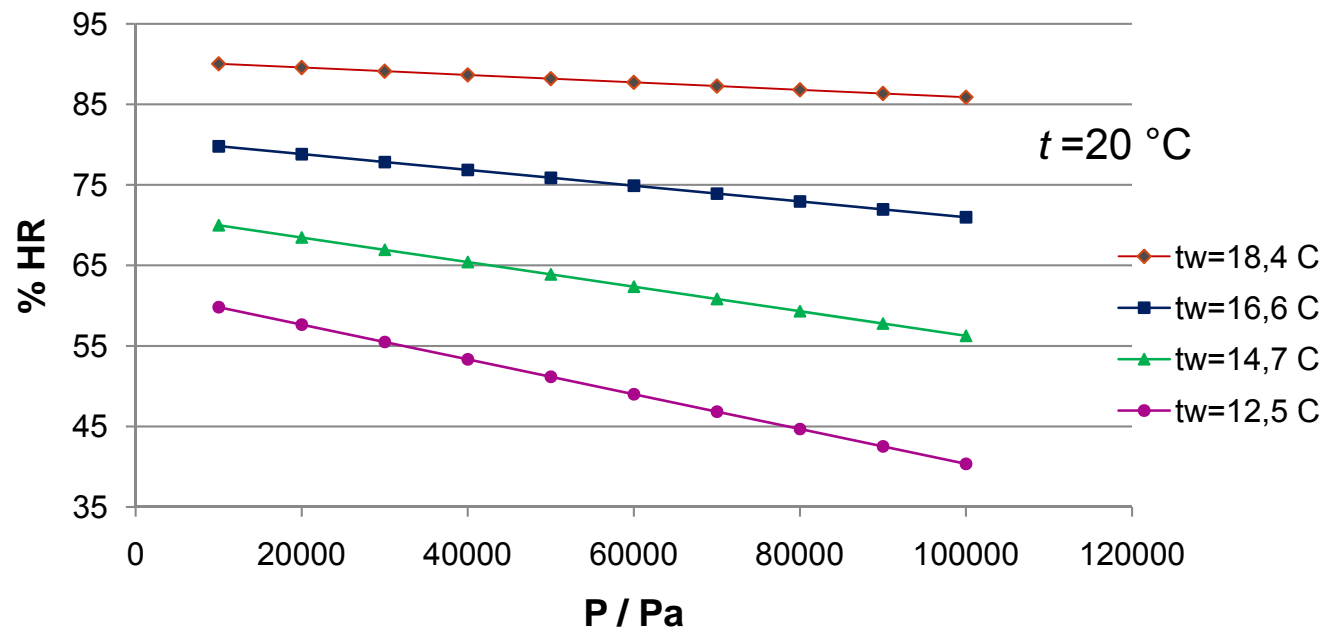
Para una “lectura” rápida de humedad relativa, generalmente se usan tablas psicrométricas.



Estas tablas generalmente están calculadas a un valor de presión,
101 325 Pa

Efecto de presión

- Efecto de presión en la determinación de humedad relativa a partir de medición de t_w y t .



Corrección por presión

Corrección por presión de acuerdo a AST E 337-84

$$\%HR = \%HR_0 + B \cdot (t - t_w) \cdot (101325 - P)$$

Donde %HR es el valor de humedad relativa corregido; %HR₀ es el valor de humedad relativa obtenido de la carta psicrometrica; B es un factor de correccion.

| t / °C | Factor de corrección B* (x10 ⁻⁵) |
|--------|---|
| 1 | 10 |
| 3 | 8,72 |
| 5 | 7,58 |
| 7 | 6,61 |
| 9 | 5,78 |
| 11 | 5,06 |
| 13 | 4,44 |
| 15 | 3,91 |
| 17 | 3,45 |
| 19 | 3,05 |
| 21 | 2,7 |
| 23 | 2,39 |
| 25 | 2,12 |
| 27 | 1,89 |
| 29 | 1,68 |
| 31 | 1,5 |
| 33 | 1,34 |
| 35 | 1,21 |

Comparación de resultados

Comparación de valores de humedad relativa obtenidos con carta psicrométrica, carta psicrométrica corregido y ecuación de Ferrell.
P=80 000

| $t / ^\circ\text{C}$ | $tw / ^\circ\text{C}$ | % HR | | |
|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| | | Tabla ASTM (sin corrección) | Tabla ASTM (con corrección) | Con ec. de Ferrell |
| 20 | 18,4 | 86 | 86,9 | 86,8 |
| 20 | 16,6 | 71 | 73,0 | 72,9 |
| 20 | 14,7 | 56 | 59,1 | 59,3 |
| 20 | 12,5 | 40 | 44,3 | 44,7 |

Variables de influencia

- Variables de influencia en la determinación de humedad relativa con psicrómetros.
 - Velocidad del aire
 - Pureza de agua
 - Contaminación
 - Funda del bulbo húmedo
 - Efecto de radiación.
 - otros

Conclusiones

- Se presentaron algunos conceptos de humedad.
- Se presentaron las consideraciones necesarias para obtener mediciones confiables en la medición de temperatura de punto de rocío con instrumentos de espejo enfriado.
- Es necesario considerar el efecto de presión cuando exista una diferencia de presión entre el proceso donde está la muestra de gas y el sistema de medición.

Conclusiones

- Se presentaron algunas consideraciones prácticas para la determinación de humedad relativa con psicrómetros.
- Al usar tablas psicrométricas se debe corregir el valor de humedad relativa por efecto de presión.