



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES PSICROMÉTRICAS

**Apellidos y nombre:** Velázquez Martí, Borja ([borvemar@dmta.upv.es](mailto:borvemar@dmta.upv.es))<sup>1</sup>

**Departamento/Centro:** <sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria  
Universitat Politècnica de València

## Índice general

1. Resumen de las ideas clave	2
2. Introducción	2
3. Objetivos	2
4. Temperatura en bulbo seco y bulbo húmedo	2
5. Humedad relativa del aire	3
6. Humedad absoluta	4
7. Temperatura de rocío	5
8. Entalpía del aire húmedo	6
9. Volumen específico	7
10. Diagrama psicrométrico	7
11. Cierre	9
12. Ejercicios propuestos	10
13. Simbología	10
14. Bibliografía	10

## 1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se describen los métodos de medida y relaciones analíticas entre las variables psicrométricas, que son las que definen el estado de los sistemas formados por la mezcla de aire y vapor de agua. Las variables psicrométricas son fundamentalmente la temperatura en bulbo seco, temperatura en bulbo húmedo, humedad absoluta, humedad relativa, volumen específico y entalpía específica. El conocimiento de las variables psicrométricas es fundamental para definir las condiciones ambientales de un recinto. Una vez definido el estado inicial del ambiente, se podrán definir los procesos a realizar sobre la mezcla aire-vapor para poder acondicionarlo a un estado deseado. Al conjunto de acciones a realizar sobre la mezcla de gases se denominan *transformaciones psicrométricas*, que en su conjunto definen el control climático del recinto. En este documento aprenderemos a determinar las variables psicrométricas que definen el estado inicial de la mezcla, y a su vez, nos permiten fijar las condiciones finales deseadas en un sistema climáticamente controlado.

## 2 Introducción

La atmósfera que nos rodea está formada esencialmente por una mezcla de aire y vapor de agua. Ambos gases en un recinto suponen un sistema termodinámico sujeto a control. El diseño de los sistemas de climatización tiene como objeto mantener el sistema en un estado de confort definido por unas variables que han de mantenerse dentro de determinados rangos considerados aceptables. Las variables de estado que definen el sistema aire-vapor de agua se denominan variables psicrométricas. Éstas son fundamentalmente su temperatura en bulbo seco, temperatura en bulbo húmedo, humedad absoluta, humedad relativa, volumen específico, entalpía específica. En este artículo se exponen las ecuaciones que relacionan estas variables de forma analítica, y se explica su representación en el diagrama psicrométrico Carrier.

## 3 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

1. Definir los conceptos de temperatura en bulbo seco y temperatura en bulbo húmedo.
2. Calcular la presión de vapor saturado en el aire y temperatura de rocío.
3. Definir los conceptos de humedad absoluta del aire y humedad relativa del aire.
4. Calcular la humedad absoluta a partir de la temperatura en bulbo seco y humedad relativa
5. Calcular la entalpía específica de la mezcla aire-vapor de agua.
6. Representar las variables psicrométricas en el diagrama psicrométrico Carrier.

## 4 Temperatura en bulbo seco y bulbo húmedo

La temperatura es una manifestación física del estado vibracional de las partículas que configuran la materia. Está relacionada con la energía interna contenida en la misma. La temperatura se mide con instrumentos denominados termómetros. Existen fundamentalmente dos tipos de termómetros: los basados en un bulbo de mercurio que se dilata al aumentar la temperatura; y los basados en la diferencia de potencial existente entre dos metales en contacto, cuyo valor se modifica también con la temperatura, llamados *termopares*. En ambos casos se precisa calibración para establecer la escala y las unidades de medida.

En un termómetro de mercurio en el que el bulbo está completamente seco, la diferencia de temperatura entre el mismo y el ambiente hace que el mercurio absorba o ceda calor, dilatándose o contrayéndose. La variación de volumen se producirá hasta que la temperatura del mercurio y la ambiental se igualen. La medición del volumen que ocupa el mercurio dentro de un tubo permite fijar una escala de temperatura. La temperatura registrada en estas condiciones se denomina *temperatura en bulbo seco*.

En la escala grados Celsius a la temperatura en la que se produce la congelación del agua a presión atmosférica a nivel del mar se le da el valor de 0°C, y a la temperatura a la que se produce la ebullición del agua en esas mismas condiciones se le da el valor de 100°C. En la escala Kelvin el valor de temperatura en el que no existe vibración de partículas se denomina *cero absoluto*, 0 K, que equivale a -273,15°C.

Cuando en un termómetro de mercurio el bulbo está envuelto de un material poroso humectado, la diferencia de temperatura entre el agua y el ambiente provoca que se produzca una absorción de calor, el cual se emplea parcialmente en la evaporación del agua. El proceso de evaporación continuará hasta que exista un equilibrio entre la humedad del material y la humedad ambiental. La temperatura registrada por el termómetro en estas condiciones será la temperatura de aire saturado, y se denomina *temperatura en bulbo húmedo*. Para que la humedad del material empapado permanezca constante, se suele aportar una fuente de agua desde un depósito del cual el agua asciende a través del material por capilaridad.

La temperatura de saturación depende de la temperatura en bulbo seco y humedad relativa del aire que envuelve el material poroso. Por tanto, la diferencia entre la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo se utilizan para medir la humedad relativa del aire, constituyendo un aparato denominado *higrómetro*.

## 5 Humedad relativa del aire

Denominamos *humedad relativa del aire* al cociente entre la fracción molar del vapor de agua en el aire ( $\chi_{vapor}$ ) y la fracción molar del agua en aire saturado a una temperatura ( $\chi_{vapor\ saturado}$ ), expresado en porcentaje.

$$HR_{aire} = \frac{\chi_{vapor}}{\chi_{vapor\ saturado}} \cdot 100$$

La fracción molar del agua en el aire es la relación que hay entre el número de moles del agua y el número total de moles de partículas en la mezcla.

$$\chi_{vapor} = \frac{n_{agua}}{n_{agua} + n_{aire}}$$

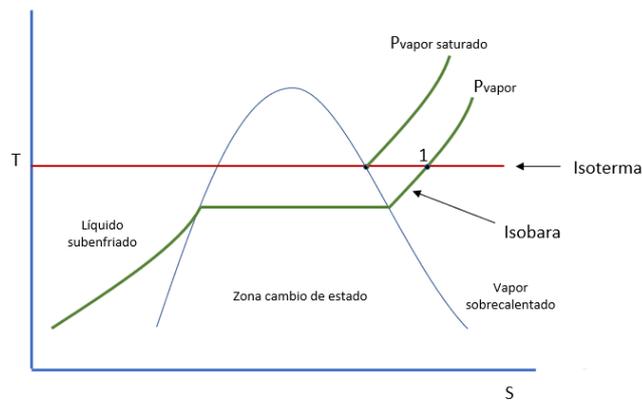
Por otra parte, sabemos que la presión parcial de un gas en una mezcla es igual a su fracción molar por la presión total. Entonces, tenemos que la presión de vapor es igual a la fracción molar del vapor por la presión total, y en caso de que el aire esté saturado, tendremos una presión parcial del vapor saturado que sería igual a la fracción molar del vapor saturado por la presión total.

$$P_{vapor} = \chi_{vapor} \cdot P$$
$$P_{vapor\ saturado} = \chi_{vapor\ saturado} \cdot P$$

Si dividimos estas dos expresiones, tenemos otra forma de calcular la humedad relativa.

$$HR_{aire} = \frac{P_{vapor}}{P_{vapor\ saturado}} \cdot 100 \quad (1)$$

La relación entre la presión de vapor y la presión de vapor saturado a una determinada temperatura se puede visualizar fácilmente en el diagrama temperatura-entropía (Figura 1). Si tenemos un determinado estado definido por la temperatura y la presión de vapor, aquí definido con el punto 1, podemos determinar cuál sería la presión de saturación a esa misma temperatura desplazándonos por la isoterma (línea horizontal), determinando la presión de vapor saturado por el punto de corte con la frontera entre la zona de vapor sobrecalentado y la zona de cambio de estado.



**Figura 1:** Diagrama Temperatura-Entropía, representación de la presión de vapor y presión saturación a temperatura T

Para una determinada temperatura, la presión de vapor saturado se puede tomar de distintas tablas existentes en bibliografía. También puede calcularse a través de la Ecuación (2) donde la temperatura T está usada en  $^{\circ}\text{C}$  y la presión de vapor saturado  $P_{vapor\ saturado}$  en pascuales (Pa):

$$P_{vapor\ saturado} = 10^{\frac{10,2858 \cdot T}{T - 237,3}} \quad (2)$$

## 6 Humedad absoluta

Denominamos *humedad específica* o *humedad absoluta del aire* al cociente entre la masa de vapor de agua que contiene el aire y la masa del aire seco.

$$\omega_{aire} = \frac{m_{vapor}}{m_{aire}} \quad (3)$$

Como el vapor y el aire son ambos gases, podemos expresar estas masas utilizando la ecuación universal de los gases ideales.

$$P_{vapor} \cdot V = \frac{m_{vapor}}{\rho m_{agua}} \cdot R \cdot T$$

$$P_{aire} \cdot V = \frac{m_{aire}}{pm_{aire}} \cdot R \cdot T$$

$$\omega_{aire} = \frac{pm_{agua} \cdot \frac{P_{vapor} \cdot V}{R \cdot T}}{pm_{aire} \cdot \frac{P_{aire} \cdot V}{R \cdot T}}$$

Dado que el volumen que ocupan el aire y el vapor es el mismo, y tanto el vapor como el aire están a la misma temperatura, podemos simplificar estos parámetros junto con la constante de los gases. Entonces obtenemos la humedad específica absoluta en función de la presión de vapor y la presión del aire seco. El peso molecular del aire es 28,93 g/mol y el peso molecular del agua 18 g/mol. Sabiendo que la presión total a la que está sometida la mezcla es igual a la presión del aire más la presión de vapor, podemos obtener la humedad absoluta como la relación entre la presión de vapor dividido por la diferencia entre la presión total y la presión de vapor en un estado dado, multiplicado por el factor, que es 0,622.

$$\omega_{aire} = \frac{pm_{agua}}{pm_{aire}} \cdot \frac{P_{vapor}}{P_{aire}}$$

$$\omega_{aire} = 0,622 \cdot \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} \quad (4)$$

Fíjense que se puede calcular la humedad absoluta del aire conociendo su temperatura y su humedad relativa. Para una temperatura del aire, se calcula la presión de vapor saturado asociada a esa temperatura (Ecuación 2). Con el valor de la humedad relativa se obtiene la presión de vapor en el aire (Ecuación 1), y entonces se aplica la Ecuación (4).

Se denomina *grado de saturación* a la relación entre la humedad absoluta de la masa de aire y la humedad absoluta de una masa de aire saturada de vapor de agua a la misma presión y temperatura.

$$GS = \frac{\omega_{aire}}{\omega_{sat}} \quad (5)$$

## 7 Temperatura de rocío

Es la temperatura a la que se produce la saturación a una determinada presión. Su valor se puede calcular a partir de la presión de vapor por la Ecuación 6.

$$T_r = \frac{35,85 \cdot \log P_{vapor} - 2148,49}{\log P_{vapor} - 10,2858} - 273,15 \quad (6)$$

Para un estado determinado, en este caso definido con el punto 1, la temperatura de rocío se puede representar en el diagrama temperatura-entropía, siguiendo la isobara. La temperatura de rocío queda definida por el punto de la frontera entre la zona de vapor sobrecalentado y la zona de cambio de estado.

Para que se produzca condensación en una superficie en contacto con una masa de aire húmedo, debe cumplirse que sobre ella que  $P_{vapor} > P_{vapor\ saturado}$  o  $T < T_r$ .

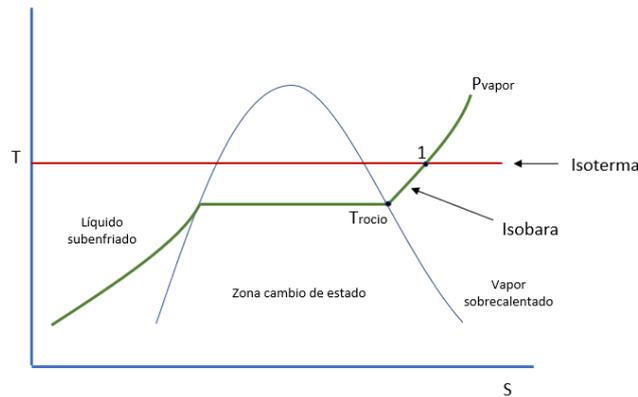


Figura 2: Diagrama Temperatura-Entropía, representación de la temperatura de rocío

## 8 Entalpía del aire húmedo

La entalpía es una variable de estado que se calcula como la suma de la energía interna del sistema y el producto de la presión y el volumen.

$$H = U + P \cdot V$$

La entalpía de una mezcla de gases será la suma de las entalpías de cada uno de sus componentes. En el caso de una mezcla de aire y vapor de agua se expresaría como:

$$H_{\text{aire húmedo}} = H_{\text{aire}} + H_{\text{vapor}}$$

Se denomina *entalpía específica* a la entalpía en el sistema por unidad de masa. Así tenemos que la entalpía específica del aire seco es  $h_{\text{aire}} = H_{\text{aire}}/m_{\text{aire}}$ , y la entalpía específica del vapor es  $h_{\text{vapor}} = H_{\text{vapor}}/m_{\text{agua}}$ , tal que

$$H_{\text{aire húmedo}} = m_{\text{aire}} \cdot h_{\text{aire}} + m_{\text{agua}} \cdot h_{\text{vapor}}$$

Dividiendo por la masa de aire seco se obtiene la entalpía específica del aire húmedo:

$$\frac{H_{\text{aire húmedo}}}{m_{\text{aire}}} = h_{\text{aire}} + \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{aire}}} \cdot h_{\text{vapor}}$$

$$h_{\text{aire húmedo}} = h_{\text{aire}} + \omega_{\text{aire}} \cdot h_{\text{vapor}} \quad (7)$$

La entalpía específica del aire a presión atmosférica se puede calcular como el producto de la capacidad calorífica a esa presión por la temperatura.

$$h_{\text{aire}} = C_{p_{\text{aire}}} \cdot T$$

$$C_{p_{\text{aire}}} = 1,005 \quad \text{kJ/kg as } ^{\circ}\text{C}$$

$$h_{aire} = 1,005 \cdot T \quad \text{kJ/kg as}$$

La entalpía específica del vapor de agua se calcula como el calor latente absorbido en el proceso de evaporación a 0°C ( $\lambda = 2503$  kJ/kg agua) más la capacidad calorífica a presión atmosférica por la temperatura.

$$H_{vapor} = m_{agua} \cdot (\lambda + C_{p_{vapor}} \cdot T)$$

$$\lambda = 2503 \quad \text{kJ/kg agua}$$

$$C_{p_{vapor}} = 1,86 \quad \text{kJ/kg agua } ^\circ\text{C}$$

De ahí se obtiene la Ecuación (8) por la que se puede calcular la entalpía del aire húmedo a partir de su temperatura y su humedad absoluta.

$$h_{aire\ húmedo} = C_{p_{aire}} \cdot T + \omega_{aire} \cdot (\lambda + C_{p_{vapor}} \cdot T) \quad (8)$$

## 9 Volumen específico

Se define como volumen específico como el volumen ocupado por unidad de masa ( $v_{aire}$ ). Se puede calcular a partir de la ecuación general de gases ideales.

$$P_{aire} \cdot V = \frac{m_{aire}}{pm_{aire}} \cdot R \cdot T$$

$$v_{aire} = \frac{V}{m_{aire}} = \frac{R \cdot T}{P_{aire} \cdot pm_{aire}}$$

## 10 Diagrama psicrométrico

Las variables de estado definidas para una mezcla de aire y vapor se pueden representar en un diagrama psicrométrico. En el eje de las X tenemos la temperatura en bulbo seco. En el eje de las Y tenemos la humedad absoluta. La variación de la humedad absoluta en función de la temperatura sigue una curva parabólica específica para cada las distintas humedades relativas.

La entalpía específica del aire húmedo en un punto concreto del diagrama queda representada en la escala inclinada.

La temperatura de rocío para un estado se determina trazando una horizontal hasta que se corta con la curva de humedad relativa del 100 %, es decir, en estado saturado.

La temperatura de bulbo húmedo para un estado se determina siguiendo la línea isoentálpica hasta que se corta con la curva de humedad relativa del 100 %, es decir, en estado saturado.

El volumen específico también se mide en una escala inclinada.

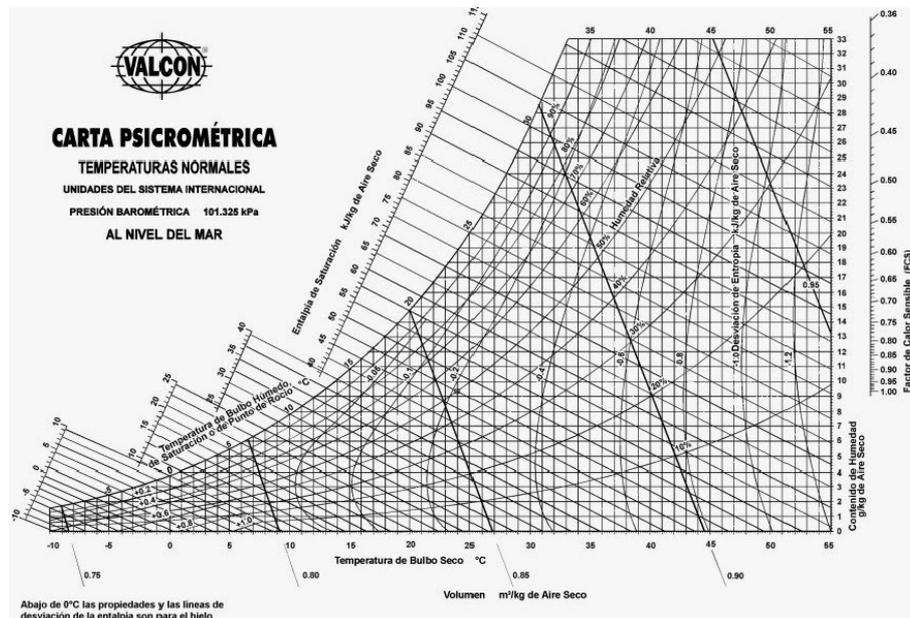


Figura 3: Diagrama psicrométrico

### Ejemplo 1

Para una masa de aire húmedo a presión atmosférica (101325 Pa) que tiene una temperatura seca de 22°C y una humedad relativa del 62 %, determinar:

- Presión de vapor de saturación, en Pa
- Presión de vapor, en Pa
- Humedad absoluta de saturación
- Humedad absoluta
- Temperatura de rocío
- Entalpía del aire húmedo
- Volumen específico del aire

### Resolución

- Presión de vapor de saturación, en Pa

$$T=22^{\circ}\text{C} \Rightarrow P_{\text{vapor}} = 10^{\frac{10,2858 \cdot T}{T - 237,3}} = 2641,54 \text{ Pa}$$

- Presión de vapor, en Pa

$$\text{HR}=62\% \Rightarrow P_{\text{vapor}} = P_{\text{vapor saturado}} \cdot \frac{\text{HR}}{100} = 1637,76 \text{ Pa}$$

- Humedad absoluta en la saturación

$$\omega_{\text{sat}} = 0,622 \cdot \frac{P_{\text{vapor saturado}}}{P - P_{\text{vapor saturado}}} = 0,0166 \text{ kg vapor/kg as}$$

- Humedad absoluta

$$\omega_{\text{aire}} = 0,622 \cdot \frac{P_{\text{vapor}}}{P - P_{\text{vapor}}} = 0,0102 \text{ kg vapor/kg as}$$

- Temperatura de rocío

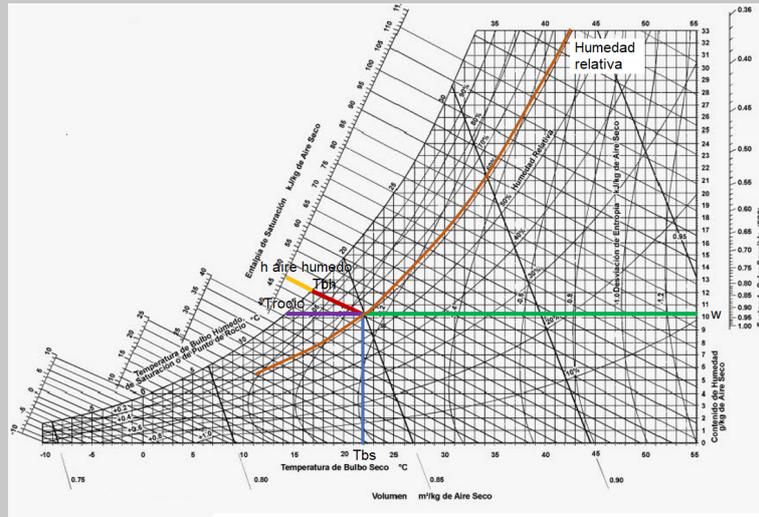
$$T_r = \frac{35,85 \cdot \log P_{vapor} - 2148,49}{\log P_{vapor} - 10,2858} - 273,15 = 14,38 \text{ } ^\circ\text{C}$$

f) Entalpía del aire húmedo

$$h_{aire} = C_{p_{aire}} \cdot T + \omega_{aire} \cdot (\lambda + C_{p_{vapor}} \cdot T) = 48,05 \text{ kJ/kg as}$$

g) Volumen específico

$$v_{aire} = \frac{V}{m_{aire}} = \frac{R \cdot T}{P_{aire} \cdot pm_{aire}} = 0,85 \text{ m}^3/\text{kg as}$$



## 11 Cierre

En este capítulo se ha visto que todas las variables de estado de una mezcla de aire y vapor se pueden determinar de forma analítica a partir de dos de ellas. Generalmente se miden la temperatura y la humedad relativa, y todas las demás se calculan a partir de éstas, siguiendo el siguiente diagrama.

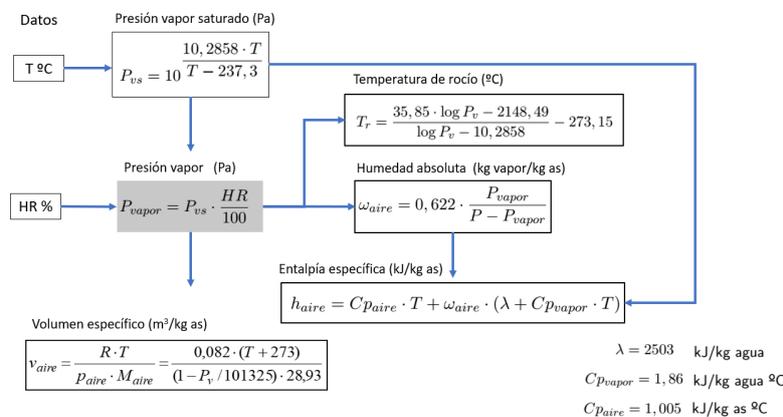


Figura 4: Flujo de cálculo de variables de estado a partir de la temperatura y humedad relativa del aire

Conociendo dos variables de estado se puede representar un punto en el diagrama psicrométrico, pudiendo definir todas las demás.

## 12 Ejercicios propuestos

### Ejercicio 1

Para una masa de aire húmedo a presión atmosférica (101325 Pa) que tiene una temperatura seca de 25°C y una humedad relativa del 50 %, determinar:

- Presión de vapor de saturación, en Pa
- Presión de vapor, en Pa
- Humedad absoluta de saturación (kg v/kg as)
- Humedad absoluta (kg v/kg as)
- Temperatura de rocío (°C)
- Entalpía específica (kJ/kg as)

## 13 Simbología

$T_{aire}$	Temperatura del aire en bulbo seco (°C)
$\chi_{vapor}$	Fracción molar del vapor (moles vapor/moles totales)
$\chi_{aire}$	Fracción molar del aire (moles aire/moles totales)
$HR_{aire}$	Humedad relativa del aire (%)
$\omega_{aire}$	Humedad absoluta del aire (kg de agua/kg de aire seco)
$\omega_{sat}$	Humedad absoluta del aire saturado a determinada temperatura (kg de agua/kg de aire seco)
$P_{vapor}$	Presión de vapor (Pa)
$P_{vaporsaturado}$	Presión de vapor saturado (Pa)
$T_r$	Temperatura de rocío (°C)
$pm_{aire}$	peso molecular del aire (g aire/mol)
$pm_{agua}$	Peso molecular del agua (g aire/mol)
$C_{p_{aire}}$	Calor específico del aire a presión constante (kJ/kg °C)
$C_{p_{vapor}}$	Calor específico del vapor a presión constante (kJ/kg °C)
$h_{aire}$	Entalpía específica del aire seco (kJ/kg aire seco)
$h_{vapor}$	Entalpía específica del vapor (kJ/kg agua)
$h_{aire\ húmedo}$	Entalpía específica de la mezcla aire-vapor (kJ/kg aire seco)
$\lambda$	Calor latente de evaporación del agua a 0°C

## 14 Bibliografía

ATECYR (2010). Fundamentos de climatización: para instaladores e ingenieros recién titulados. Ed. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr)

DTIE 3.01, Psicrometría (Pinazo Ojer, José Manuel | García Lastra, Arcadio | ATECYR)