

d) AMPLIACIÓN DE TERMODINÁMICA Y TRANSFERENCIA DE CALOR**2. PSICROMETRÍA****2.1. INTRODUCCIÓN**

En general, la psicrometría estudia las propiedades termodinámicas de mezclas de gas con vapor. En particular la mayoría de las aplicaciones se refieren al aire húmedo considerado como la mezcla de aire seco y vapor de agua.

El estudio termodinámico de un sistema complejo como es el aire puede realizarse de forma más o menos sencilla. El hombre ha sido capaz de definir importantes conceptos termodinámicos que por una parte permiten un desarrollo teórico sencillo y que, por otra coinciden con las variables que pueden medirse en la práctica. También se han diseñado diagramas apropiados que facilitan enormemente los cálculos y que además, permiten tener una imagen “visual” del estado termodinámico del aire y su evolución en los procesos que sufre. En este apartado comenzaremos por estudiar las principales propiedades termodinámicas del aire, haciendo especial hincapié en el concepto de humedad. A continuación estudiaremos la forma de utilizar diagramas que faciliten los cálculos.

2.2. COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL AIRE

Se denomina aire seco al aire atmosférico una vez eliminados tanto todo el vapor de agua como los contaminantes presentes. Numerosas mediciones han demostrado que la composición del aire seco es relativamente constante:

- Nitrógeno: 78,08 %
- Oxígeno: 20,94%
- Argón: 0,93%
- Anhídrido Carbónico: 0,031%
- Neón: 0,0018%
- Helio: 0,00052%
- Metano: 0,0002
- Anhídrido sulfuroso: de 0 a 0,0001%
- Hidrógeno: 0,00005
- Componentes minoritarios (kriptón, xenón y ozono): 0,0002%

El peso molecular medio de todos los componentes resulta ser para el aire seco 28,96.

El aire húmedo es una mezcla binaria de aire seco y vapor de agua. La cantidad de vapor de agua en el aire húmedo varía desde 0 (aire seco) hasta un máximo que depende de las condiciones de presión y temperatura. En este último caso se habla de saturación, un estado de equilibrio entre el aire húmedo y la fase de agua condensada.

Desde un punto de vista termodinámico el estudio del aire húmedo se trata de un estudio de un sistema abierto que puede intercambiar materia, masa de agua con sus alrededores. Es una mezcla de gases que no se combinan, no reaccionan químicamente... En condiciones normales las temperaturas son superiores a la temperatura crítica de sus componentes por tanto, suponemos que la mezcla y comporta

como un gas ideal, y todos y cada uno de sus componentes se comportan como gases ideales. En consecuencia se puede utilizar para cada uno y para la mezcla la ecuación de estado de los gases ideales:

$$PV = nRT$$

Recordemos algunos parámetros y leyes de las mezclas (esto es, solo si sus componentes no reaccionan entre sí):

- 1) Sea el gas i de la mezcla, m_i su masa, M_i su masa molar y n_i el número correspondiente de moles. Entonces $n_i = \frac{m_i}{M_i}$ y para el número total de moles de la mezcla se verifica

$$n = \sum_{n=1}^i n_i = \sum_{n=1}^i \frac{m_i}{M_i}$$

- 2) Si tenemos una mezcla de gases ideales inertes a la temperatura T , presión P y volumen V , la ecuación de estado podrá aplicarse al conjunto:

$$PV = \sum_{n=1}^i n_i RT$$

La ecuación anterior puede escribirse en la forma:

$$P = \frac{\sum_{n=1}^i n_i RT}{V} = \frac{n_1 RT}{V} + \frac{n_2 RT}{V} + \frac{n_3 RT}{V} \dots\dots\dots$$

Cada uno de estos términos representa la presión que el gas correspondiente ejercería si estuviera separadamente ocupando el volumen total de la mezcla y se denomina **presión parcial**, por tanto:

$$P = p_1 + p_2 + \dots\dots\dots = \sum_{n=1}^i p_i$$

expresión de la **ley de Dalton**: en una mezcla de gases, entre los que no existe actividad química alguna, la presión total es igual a la suma de las presiones parciales que cada gas ejercería si estuviera por sí solo ocupando el volumen total de la mezcla.

- 3) De la ecuación de estado también puede despejarse el volumen:

$$V = \frac{\sum_{n=1}^i n_i RT}{P} = \frac{n_1 RT}{P} + \frac{n_2 RT}{P} + \frac{n_3 RT}{P} \dots\dots\dots$$

Cada uno de estos términos representa el volumen que ocuparía el gas i si se eliminasen todos los demás sin variar la presión y la temperatura y se denomina **volumen parcial** del gas i de la mezcla. Por tanto:

$$V = \sum_{n=1}^i V_i$$

que constituye la **ley de Amagat**.

- 4) Si m es la masa total de la mezcla y n el número de moles, la ecuación de estado de la mezcla se puede escribir de dos formas diferentes:

$$PV = nRT \text{ siendo } R \text{ la constante de los gases}$$

$$PV = mrT \text{ siendo } r \text{ la constante específica de la mezcla}$$

De estas dos ecuaciones se deduce:

$$nR = mr \Rightarrow r = \frac{R}{m} n = \frac{R}{m} \sum_{i=1}^n n_i = \frac{R}{m} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M_i} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \frac{Rm_i}{M_i}$$

Si llamamos constante del gas i integrante de la mezcla por unidad de masa molecular a $r_i = \frac{R}{M_i}$, la constante específica de la mezcla se puede escribir de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n m_i r_i}{m}$$

- 5) El vapor de agua en el aire se comporta como un gas ideal, por tanto verifica la ecuación:

$$eV = nRT$$

donde e es la presión parcial del vapor de agua en el aire o tensión de vapor. Esta ecuación se puede escribir también de la siguiente manera mediante la constante específica del vapor de agua:

$$eV = nRT = \frac{m_V}{M_V} RT = m_V r_V T$$

- 6) Si el aire húmedo se considera formalmente como mezcla de aire seco y vapor de agua en cantidades m_S y m_V respectivamente. La constante específica r de la mezcla se puede escribir:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n m_i r_i}{m} = \frac{m_S r_S + m_V r_V}{m}$$

siendo las constantes de aire seco y del vapor de agua por unidad de masa:

$$r_S = \frac{R}{M_{\text{aire}}} = \frac{8,31 \frac{J}{\text{mol} \cdot K}}{29 \frac{g}{\text{mol}}} = 287 \frac{J}{\text{Kg} \cdot K}$$

$$r_V = \frac{R}{M_{\text{vapor}}} = \frac{8,31 \frac{J}{\text{mol} \cdot K}}{18 \frac{g}{\text{mol}}} \cong 462 \frac{J}{\text{Kg} \cdot K}$$

De esta manera la ecuación de estado del aire húmedo es pues:

$$PV = mrT = m \frac{\sum_{i=1}^n m_i r_i}{m} T = (\sum_{i=1}^n m_i r_i) T = (m_S r_S + m_V r_V) T$$

En resumen para el tratamiento del aire húmedo tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación de estado de aire seco: } P_S V = m_S r_S T$$

$$\text{Ecuación de estado del vapor de agua: } e V = m_V r_V T$$

$$\text{Ecuación de estado del aire húmedo: } PV = mrT$$

Una relación interesante es la relación entre las densidades del vapor del agua y del aire seco:

$$P_S = \frac{m_S}{V} r_S T = \rho_S r_S T \quad e = \frac{m_V}{V} r_V T = \rho_V r_V T$$

En idénticas condiciones de presión y temperatura:

$$\varepsilon = \frac{\rho_V}{\rho_S} = \frac{\frac{e}{r_V T}}{\frac{P_S}{r_S T}} = \frac{r_S}{r_V} = \frac{287}{462} \cong \frac{5}{8}$$

2.3. HUMEDAD ATMOSFÉRICA E ÍNDICES DE HUMEDAD

Se define la humedad atmosférica como la proporción de vapor de agua que existe en el aire húmedo. Existen diversas formas de expresar dicho contenido como por ejemplo, por el porcentaje en peso, volumen, masa de vapor por unidad de volumen.... A continuación enumeramos los parámetros habituales o índices de humedad que se utilizan para expresar el contenido de vapor de agua en el aire húmedo:

- a) **Humedad específica q:** Se define como la masa de vapor de agua por unidad de masa del aire húmedo:

$$q = \frac{m_V}{m} = \frac{m_V}{m_V + m_S}$$

- b) **Razón de mezcla w (x):** Se define como la masa de agua que acompaña a la unidad de masa de aire seco:

$$w = \frac{m_V}{m_S}$$

La razón de mezcla puede expresarse en función de la humedad específica de la siguiente manera:

$$w = \frac{m_V}{m_S} = \frac{m_V}{m - m_V} = \frac{\frac{m_V}{m}}{1 - \frac{m_V}{m}} = \frac{q}{1 - q}$$

o también:

$$w = \frac{m_V}{m_S} = \frac{M_V n_V}{M_S n_S} = \frac{M_V n_V}{M_S (n - n_V)} = \frac{M_V \frac{n_V}{n}}{M_S (1 - \frac{n_V}{n})} = \frac{M_V N}{M_S (1 - N)} = \frac{18N}{29(1 - N)} = 0,621 \frac{N}{1 - N}$$

siendo N la fracción molar del vapor de agua en el aire húmedo.

- c) **Tensión de vapor e:** se define como la presión parcial del vapor de agua en la porción de aire húmedo considerada.

Las ecuaciones de estado aplicadas al vapor de agua y al aire seco son: $eV = m_V r_V T$ y $P_S V = m_S r_S T$. Utilizando la ley de Dalton o ley de las presiones parciales se puede escribir que $P_S = P - e$ siendo P la presión total de la mezcla. Por tanto, la ecuación de estado para el aire seco puede escribirse como $(P - e)V = m_S r_S T$. Dividiendo la ecuación del vapor de agua por esta ecuación para el aire seco:

$$\frac{eV}{(P - e)V} = \frac{m_V r_V T}{m_S r_S T} \Rightarrow \frac{e}{P - e} = \frac{m_V}{m_S} \frac{1}{\frac{r_S}{r_V}} \cong \frac{8}{5} w$$

Dado que la tensión de vapor e es mucho menor que la del aire P , se obtiene la siguiente relación entre índices de humedad:

$$\frac{e}{P} \cong \frac{8}{5} w \Rightarrow w \cong \frac{5}{8} \frac{e}{P}$$

- d) **Humedad relativa h ò f:** Se define como la relación entre la masa de vapor de agua que contiene un volumen dado de aire y la que podría contener si estuviese saturado a igual temperatura:

$$h = f = \frac{m_V}{m_{Vsat}} = \frac{e(T)}{e_{sat}(T)}$$

siendo $e_{sat}(T)$ la **tensión de vapor saturante** a la temperatura considerada.

- e) **Humedad absoluta a:** Se define como la masa de vapor de agua, medida en gramos, que hay en un metro cúbico de aire:

$$a = 10^6 \rho_V (g / m^3)$$

estando expresada ρ_V en g / cm^3 . Teniendo en cuenta que $e = \frac{m_V}{V} r_V T = \rho_V r_V T$, podemos escribir:

$$a = 10^6 \rho_V = 10^6 \frac{e}{r_V T}$$

Para que las unidades salgan correctamente cada uno de los parámetros deben escribirse en las siguientes unidades:

$$e = \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} \quad r_v = 462 \frac{J(= N \cdot m)}{\text{Kg} \cdot K} = 462 \cdot 10^4 \frac{\text{dinas} \cdot \text{cm}}{\text{g} \cdot K}$$

$$\text{Entonces:} \quad a = 10^6 \frac{e}{r_v T} = 10^6 \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3} \right) \frac{e \left(\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} \right)}{462 \cdot 10^4 \frac{\text{dinas} \cdot \text{cm}}{\text{g} \cdot K} \cdot T(K)} = 0,22 \frac{e}{T}$$

expresión válida cuando la tensión de vapor se mide en $\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$ o barías.

Teniendo en cuenta que $a = 10^6 \frac{e}{r_v T}$ otra manera de expresar la humedad relativa es:

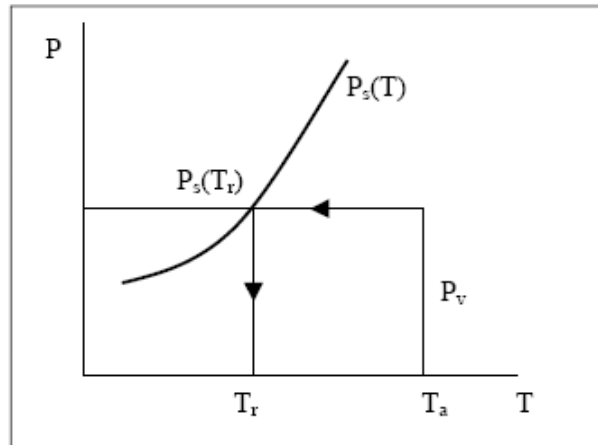
$$h = f = \frac{e(T)}{e_{sat}(T)} = \frac{a}{a_{sat}}$$

esto es, como el cociente entre la humedad absoluta y la humedad absoluta que tendría si el aire estuviese saturado a la misma temperatura.

La humedad relativa es el índice que mejor caracteriza la sensación fisiológica de humedad, de este índice dependen la mayor parte de los efectos meteorológicos y biológicos causados por la presencia del vapor de agua en la atmósfera. Si la humedad relativa alcanza el valor 100% tienen lugar precipitaciones acuosas (rocío, lluvia, niebla, nieve). Si la presión atmosférica permanece constante, el crecer la temperatura decrece la humedad relativa ya que $e_{sat}(T)$ crece mientras $e(T)$ permanece invariable. Esta es la causa de que el aire parezca húmedo por las mañanas y más seco a mediodía. Así en un local cerrado con mucha gente a temperatura constante, a causa de la respiración la humedad relativa crece y conviene desecar. En cambio, en un local con pocas personas y caldeado artificialmente el aire puede hacerse demasiado seco y conviene humedecerlo.

2.4. TEMPERATURA DE ROCÍO O PUNTO DE ROCÍO

Si enfriamos una mezcla no saturada de aire y vapor de agua de manera que la temperatura disminuya hasta que la presión parcial del vapor en la mezcla iguale a la presión de vapor la mezcla quedará saturada y un enfriamiento posterior dará lugar a la condensación. La temperatura T_r a la cual el vapor de agua comienza a condensarse si el aire se enfría, sin cambiar la tensión de vapor e ni la razón de mezcla w , se llama punto de rocío o temperatura de rocío. Es decir, el concepto de temperatura de rocío es totalmente equivalente al de temperatura de saturación a presión constante. Si el aire está muy seco, el punto de rocío corresponde a una temperatura muy distinta de la del aire; en cambio, con aire húmedo, las dos temperaturas están muy próximas. Por ello, la temperatura de rocío también puede utilizarse como índice de humedad.



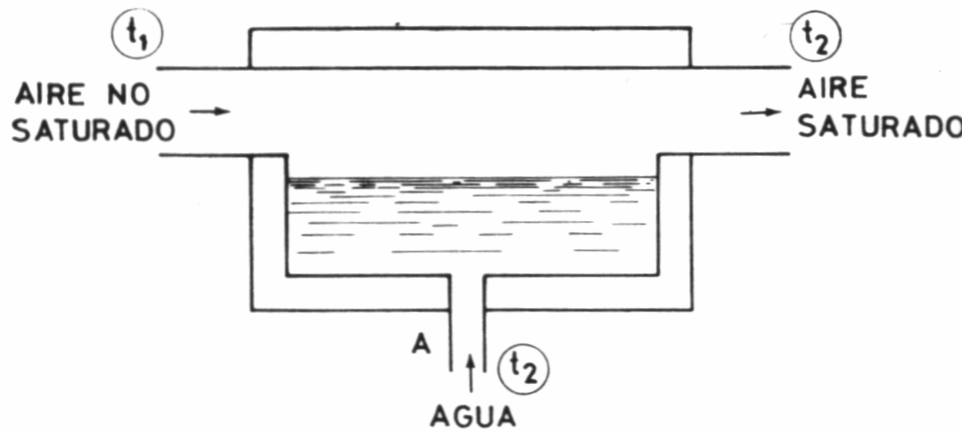
En la atmósfera, el enfriamiento isobárico necesario para alcanzar la temperatura de rocío se suele producir bien por la mezcla del aire con otro aire más frío, o bien por el enfriamiento nocturno. De esta manera cuando la temperatura de las plantas desciende durante la noche hasta la temperatura en que el vapor de agua de la atmósfera se hace saturante dicho vapor se condensa sobre ellas formando rocío. En general si la temperatura de rocío es mayor que 0°C se podrían producir gotas de agua, es decir, rocío, nieblas o lluvia, mientras que si la temperatura de rocío es menor que 0°C se podrían formar cristales de hielo, dando lugar a nevadas o a la escarcha.

En esta misma línea, la tensión de vapor en un recinto cerrado no puede ser mayor que la tensión saturante correspondiente a la más fría de sus paredes, en otro caso en esta pared tendrá lugar la condensación del agua.

2.5. TEMPERATURA DE SATURACIÓN ADIABÁTICA

La temperatura de saturación adiabática es la temperatura teórica a la que el vapor de agua del aire húmedo se hace saturante pero sin intercambiar calor con los alrededores. Se trata de un proceso adiabático e isobárico. Esto es, para cualquier estado de aire húmedo, existe una temperatura a la que el agua líquida (o sólida) se evapora en el aire para llevarlo a la saturación, exactamente a esa misma temperatura y presión. La temperatura de rocío es similar pero se consigue enfriando, esto es con intercambio de calor con los alrededores.

Para entender mejor esta temperatura vamos a considerar el siguiente experimento: supongamos una cámara de saturación adiabática, esto es un depósito aislado sin intercambio de calor con el exterior pero abierto (intercambia materia):



El aire húmedo caracterizado por una masa de vapor m_v , una temperatura T y una razón de mezcla w entra en la cámara adiabática, el aire se satura de vapor de agua. Para que el agua se evapore y se incorpore a la corriente de aire tiene el aire húmedo que ceder calor, por lo que se enfría, esto es, disminuye su temperatura hasta T_h , la **temperatura de saturación adiabática**. Lógicamente para que se produzca el proceso, T_h deber ser menor que la T inicial. Entonces, el aire sale de la cámara adiabática saturado con una temperatura T_h , una masa de vapor de agua m'_v y una razón de mezcla $w' = \frac{m'_v}{m_s}$. Se considera además que el proceso es isobárico, esto es a presión constante.

Esta definición parece difícil de entender en la práctica, ya que es necesario que el agua líquida, se reponga precisamente a la temperatura de saturación adiabática cuyo valor en principio desconocemos. En realidad debe entenderse que se trata de una definición operacional de forma que la temperatura de saturación adiabática puede encontrarse mediante las siguientes operaciones:

- 1) Agregar agua a cualquier temperatura hasta que el aire se sature adiabáticamente
- 2) Medir la temperatura del aire saturado
- 3) Cambiar la temperatura del agua líquida de forma que coincida con la medida en el paso anterior
- 4) Repetir los pasos 2 y 3 hasta que la temperatura del aire saturado se iguale a la del agua que está siendo agregada. Cuando ambas coincidan habremos encontrado la temperatura de saturación adiabática

La temperatura de saturación adiabática dependerá de la humedad que contenga el aire, y por tanto, constituye otro índice de humedad. En efecto, para una temperatura dada T , cuando mayor sea la humedad del aire menos agua se evaporará, se requerirá menos cantidad de agua para evaporarla y por tanto, la T_h será mayor.

Para establecer la reacción analítica entre T_h y los índices de humedad aplicamos los correspondientes balances de masa y energía. Como el proceso es adiabático todo el calor cedido por el aire que entra en la cámara se invierte exclusivamente en la evaporación del agua necesaria para que la mezcla salga saturada:

$$Q_{\text{absorbido}} = Q_{\text{cedido}}$$

$$m_S c_{PS} (T - T_h) + m_V c_{PV} (T - T_h) = L(m'_V - m_V)$$

siendo $c_{PS} = 0,24 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}$ el calor específico del aire seco a presión constante, $c_{PV} = 0,45 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}$ el calor

específico del vapor de agua a presión constante y $L = 597 \frac{\text{cal}}{\text{g}}$ el calor latente de evaporación del agua.

Dividiendo la ecuación inicial por m_S obtenemos:

$$\left[c_{PS} + \frac{m_V}{m_S} c_{PV} \right] (T - T_h) = L \left(\frac{m'_V}{m_S} - \frac{m_V}{m_S} \right)$$

o bien:

$$[c_{PS} + w c_{PV}] (T - T_h) = L(w'_{sat} - w)$$

En la práctica $w < 0.01$ de modo que esta ecuación puede escribirse en primera aproximación y sin grandes errores como:

$$c_{PS} (T - T_h) = L(w'_{sat} - w) \Rightarrow c_{PS} (T - T_h) = L \left(\frac{5}{8} \frac{e_{sat}}{P} - \frac{5}{8} \frac{e}{P} \right)$$

A partir de esta expresión se puede obtener la tensión de vapor e en función de la tensión de saturación y de las temperaturas de entrada y salida a la cámara adiabática:

$$e = e_{sat} - \frac{8P}{5L} c_{PS} (T - T_h) = e_{sat} - \frac{P}{2 \cdot 774} (T - T_h)$$

Para P igual a 760 mm Hg, se tiene:

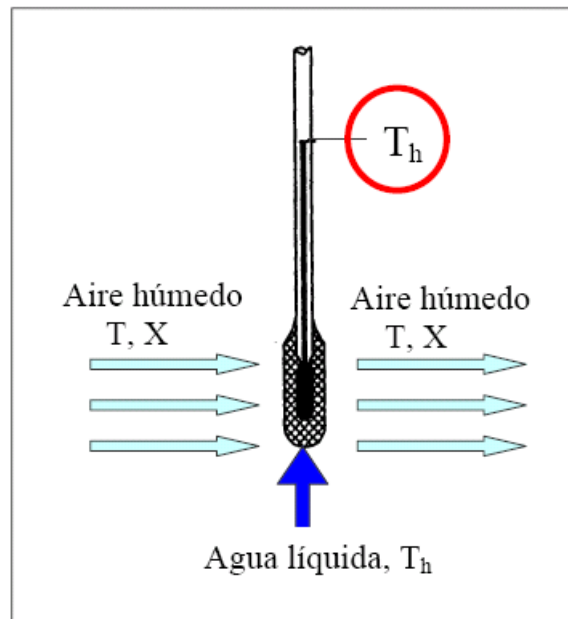
$$e = e_{sat} - \frac{1}{2,037} (T - T_h)$$

Por otro lado, se puede suponer que el proceso de saturación adiabática es aproximadamente isoentálpico para el aire húmedo. El error cometido al suponer que la entalpía permanece constante es inferior al 5 % para temperaturas de aire inferiores a 150 °C.

Como ya hemos indicado, la principal utilidad del concepto de temperatura de saturación adiabática es su dependencia con la humedad del aire, y por tanto, su posible uso como índice de humedad. Para poder calcular dicho índice sería necesario medir experimentalmente la temperatura T_h , sin embargo como ya se ha indicado su medida directa requeriría un proceso altamente ideal e iterativo, lo que no resulta útil en la práctica.

En realidad, el concepto de temperatura de saturación adiabática T_h fue introducido para poder explicar el fenómeno de termómetro húmedo. En el caso del aire húmedo, T_h puede obtenerse experimentalmente de una forma sencilla, ya que coincide prácticamente con la temperatura que mide un termómetro húmedo situado en una corriente de aire no saturado, denominada temperatura de termómetro

húmedo. La temperatura de termómetro húmedo es la temperatura que alcanza un termómetro cubierto con un paño húmedo que se expone a una corriente de aire sin saturar que fluye a velocidades cercanas a 5 m/s, también puede hacerse que sea el termómetro el que remueva.



Cuando el paño se expone al aire, parte del agua se evapora, consumiendo inicialmente calor latente del paño y produciendo un descenso de la temperatura del termómetro. A partir de dicho momento fluye calor desde el aire hacia el paño, permitiendo la evaporación de más agua. El proceso sigue hasta que se alcanza el equilibrio entre ambos flujos de calor, de manera similar a como ocurre en el proceso de saturación adiabática.

Hay que tener en cuenta varios aspectos fundamentales que distinguen esta nueva magnitud de la anterior:

- 1) En este caso se trata de una magnitud estacionario de no equilibrio, ya que depende de las velocidades con las que se transfieren el calor y la materia
- 2) En este caso la cantidad de líquido es tan pequeña, en comparación con la masa de aire que las variaciones que se producen en las propiedades de éste último son despreciables, y el efecto del proceso se manifiesta solamente en el líquido
- 3) La temperatura del termómetro húmedo depende de los ritmos de transferencias de calor y masa entre el paño húmedo y el aire. Puesto que dichas transferencias dependen, a su vez, de la geometría del termómetro, de la velocidad del aire, de la temperatura del agua suministrada y de otros factores, la temperatura del termómetro húmedo no puede considerarse como una propiedad de la mezcla

La temperatura del termómetro húmedo depende de la humedad que contenga el aire, por tanto también puede utilizarse como índice de humedad y estará relacionado con los índices como ya hemos indicado y hemos denominado a ambas por T_h ya que prácticamente coinciden

Para otras mezclas de aire y vapor, como la que se produce en tanques de almacenamiento de aceite o en mezclas de alcohol y aire, no se produce esta coincidencia y la temperatura de saturación adiabática será distinta de la temperatura de termómetro húmedo.

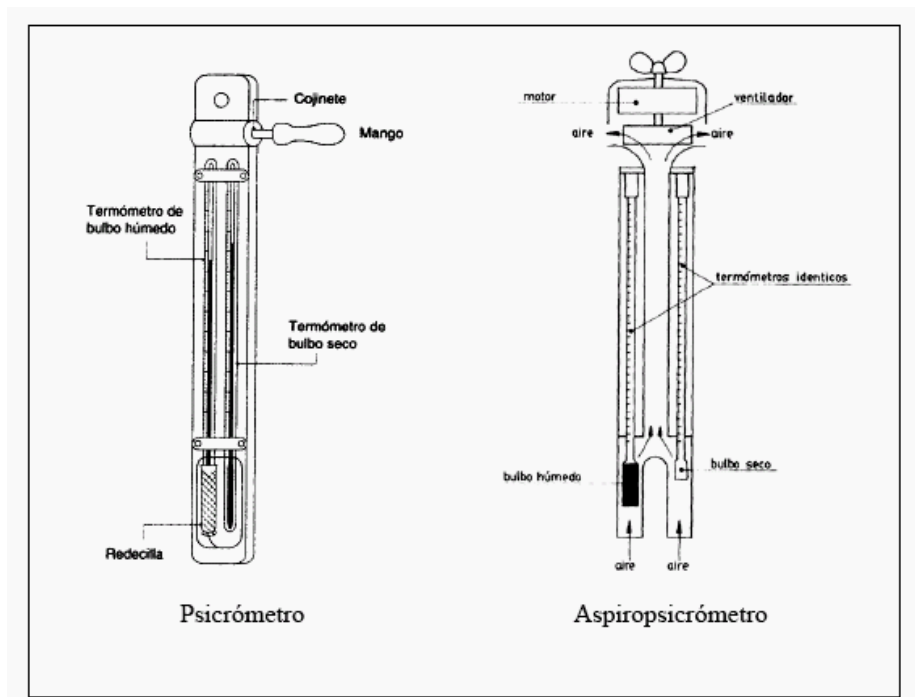
Algunos procesos naturales están relacionados con el concepto de temperatura de termómetro húmedo. Así la disminución de la temperatura en la piel de personas y animales o en los órganos tiernos de los vegetales en corriente de aire, es debida a la evaporación del líquido procedente de la transpiración producida por los mismos. También es conocido que si el aire está muy húmedo la evaporación de sudor se ve disminuida y aumenta la sensación de bochorno. Así, para una misma temperatura el calor resulta menos sofocante cuanto más seco esté el aire, ya que es posible evaporar mayor cantidad de sudor y la piel alcanzará una temperatura T_h más baja. Por ejemplo, la sensación de bochorno para una humedad del 30% empieza a sentirse a los 32°C, mientras que para una humedad del 60 % comienza a sentirse a los 25°C siendo la T_h aproximadamente igual a 20°C en ambos casos.

2.6. PSICRÓMETROS

Una vez introducidos los conceptos teóricos necesarios, resulta conveniente estudiar cómo pueden ser medidos en la práctica. Una de las facetas más importantes de la psicrometría es precisamente, la medida directa o indirecta de los índices de humedad. Se hace necesario, disponer de instrumentos de medida de la humedad que permitan una lectura cómoda y que proporcionen una exactitud suficiente.

Uno de los más habituales es el psicrómetro. Consta básicamente de dos termómetros, uno normal (seco) y otro con su bulbo permanentemente humedecido gracias a un paño o gasa mojados que lo recubre. El paño o gasa, en forma de mecha, recibe el agua de un pequeño depósito en el que está sumergido el otro extremos del mismo. Este depósito presenta sólo un orificio para dejar paso a la mecha evitando la evaporación.

Resulta conveniente que el termómetro esté ventilado, evitándose además los efectos de la radiación. Por ello, se suele utilizar un psicrómetro en forma de honda, como el mostrado en la figura, de manera que ambos termómetros giran mediante un movimiento manual.



Más perfecto es el aspirópsicrómetro de Assmann, en el que el movimiento del aire se logra mediante un ventilador. Como se muestra en la figura, los dos termómetros son ventilados por la corriente de aire aspirada por un pequeño ventilador. Para rechazar la radiación se rodea a los termómetros con tubos niquelados.

Como ya se ha indicado, la diferencia entre la temperatura del aire y T_h dependerá de la humedad del aire, permitiendo así medir ésta. En la mayoría de los casos, junto al psicrómetro se suministra una tabla con doble entrada T y $T - T_h$ que proporciona directamente la humedad relativa del aire.

Por otro lado están los higrómetros o psicrómetros eléctricos que basados en algunas sustancias (óxido de aluminio, polímeros...) varían su resistencia eléctrica superficial y su capacidad eléctrica en función de la humedad relativa del aire que les rodea. Permiten una medida cómoda y rápida.

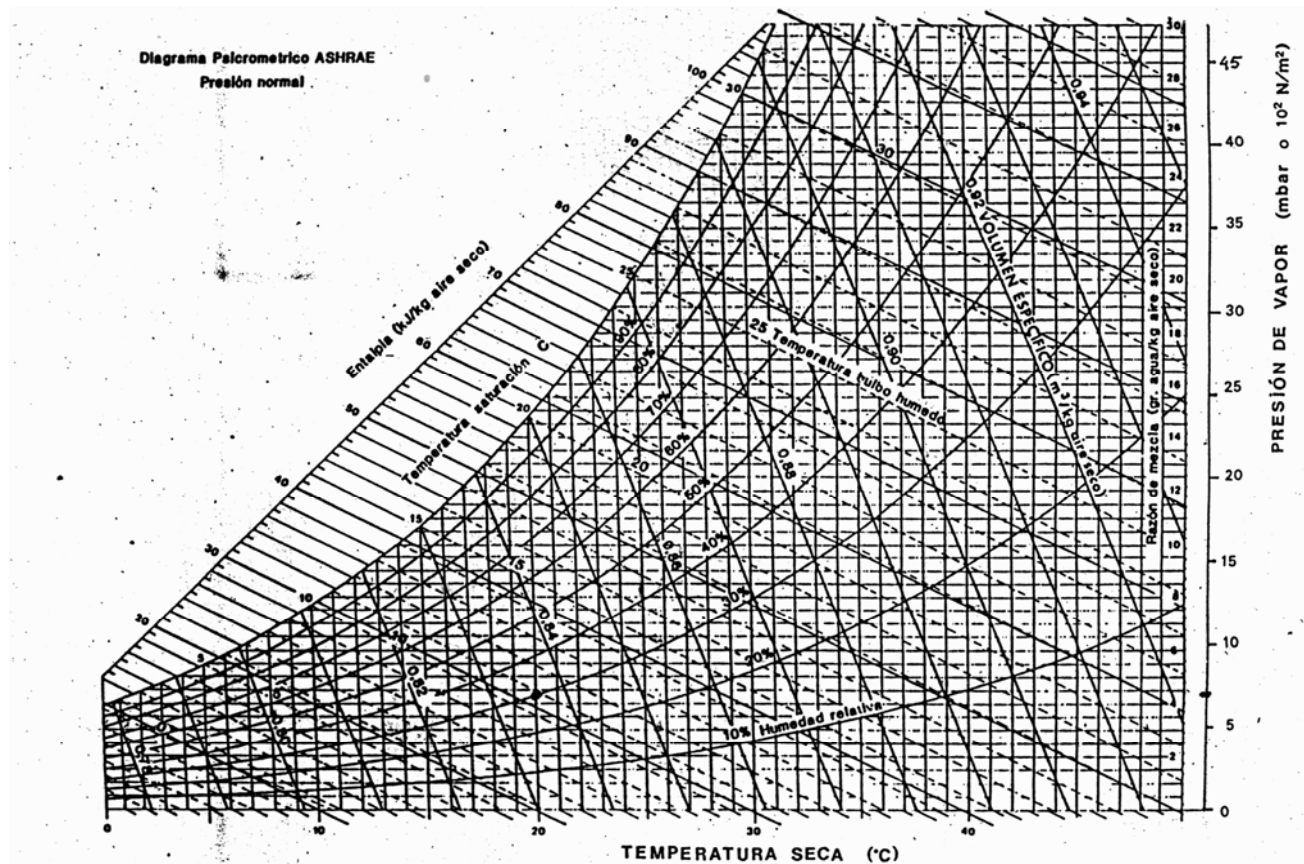


2.7. DIAGRAMAS PSICROMÉTRICOS

Las diferentes propiedades del aire húmedo están relacionadas entre sí, de forma que a partir de dos cualesquiera de las definidas anteriormente es posible obtener el resto. Sin embargo, el uso de las diversas ecuaciones o aproximaciones puede complicar excesivamente el cálculo de las propiedades. Por ello, se ha impuesto en la práctica la utilización de diagramas que no son más que las representaciones gráficas de las ecuaciones anteriores y que se denominan diagramas psicrométricos. En estos diagramas, cada estado del aire vendrá representado por un punto y cada proceso psicrométrico por una línea. Se consigue así una estimación rápida y precisa de la información necesaria en el estudio y diseño de equipos o procesos relacionados con la psicrometría.

El principal inconveniente de los diagramas psicrométricos es que solamente puede ser utilizados para la presión indicada es decir, es necesario construir un diagrama para cada presión total P . También hay que tener en cuenta que no están representadas las curvas para todos los valores posibles, por lo que en muchos casos será necesario interpolar. Se encuentran distintos tipos de diagramas según las principales coordenadas o ejes que se eligen, por ejemplo está el diagrama de Carrier, Mollier y ASHRAE. De todos ellos el diagrama ASHRAE es el propuesto por la American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers y su empleo se está generalizando tanto en América como en Europa.

En este diagrama se representa la temperatura seca en °C en el eje de abscisas y en el eje de ordenadas (lineal) se representa la razón de mezcla w .



Los puntos localizados a la izquierda de la curva de saturación representan mezclas de aire saturado con agua en estado líquido, lo que provoca bruma y son condiciones muy inestables. Cualquier punto localizado a la derecha de la curva de saturación representa una mezcla bien definida de aire y vapor de agua.

Sobre el diagrama psicrométrico se pueden trazar líneas de temperatura constante o isotermas de bulbo seco que son paralelas al eje de la razón de mezcla o humedad. Las líneas inclinadas con pendiente negativa corresponden a las isotermas de saturación adiabática que como se mencionó anteriormente coinciden prácticamente con las de la temperatura húmeda (líneas discontinuas) para el caso aire-vapor de agua. Las curvas localizadas entre el eje de abscisas y la curva de saturación corresponden a las isóneas de humedad relativa cuyo valor disminuye a medida que se alejan de la curva de saturación.

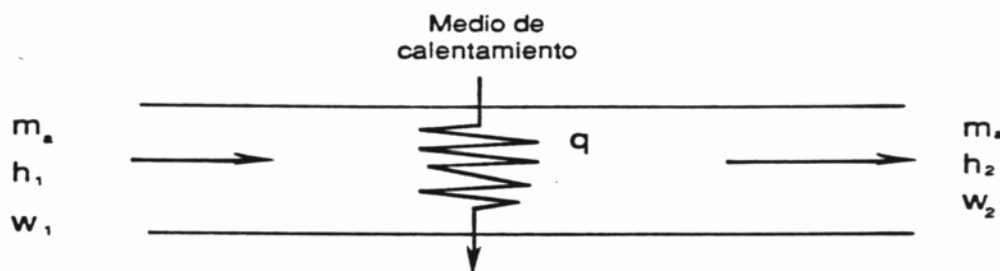
Además de las isóneas anteriores existen gráficas auxiliares que permiten la determinación de otras propiedades como por ejemplo el volumen específico o la entalpía de saturación.

Para determinar un punto sobre este diagrama, es necesario conocer por lo menos dos variables: por ejemplo, un aire húmedo se halla a una temperatura de bulbo seco de 40°C, una temperatura termodinámica de bulbo húmedo de 20°C y a una presión de 1 atm. Determinése el contenido de humedad, entalpía, la temperatura de punto de rocío, la humedad relativa y el volumen específico.

Localícese el punto de estado en el diagrama en la intersección de las líneas de temperatura de bulbo seco de 40°C y de temperatura termodinámica de bulbo húmedo de 20°C . Se obtiene la lectura $W = 6.4 \text{ gagua} / \text{Kg}$ de aire seco. La entalpía puede hallarse trazando una línea paralela a la línea de entalpía más próxima ($60 \text{ KJ} / \text{Kg}$ aire seco). Se obtiene la lectura $h = 56.7 \text{ KJ} / \text{Kg}$ aire seco. La temperatura de punto de rocío puede leerse en la intersección de $W = 6.5 \text{ gagua} / \text{Kg}$ aire seco con la curva de saturación. De este modo, $t_d = 7^{\circ}\text{C}$. La humedad relativa puede estimarse directamente, de este modo, 14%. El volumen puede hallarse mediante interpolación lineal entre las líneas de volumen de 0.89 y $0.90 \text{ m}^3 / \text{Kg}$ aire seco. De esto modo $v = 0.896 \text{ m}^3 / \text{kg}$ aire seco.

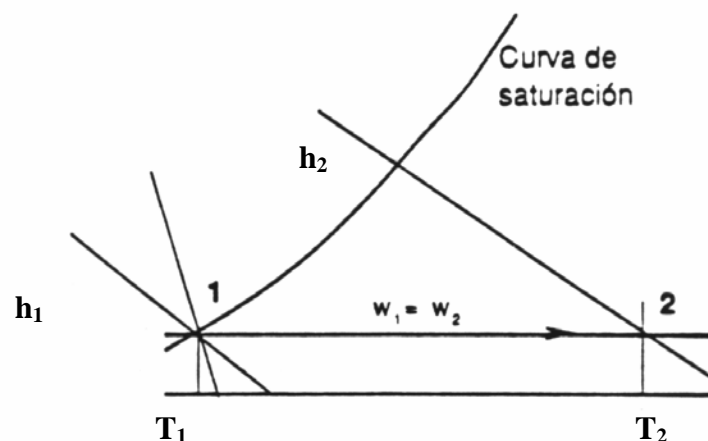
El diagrama psicrométrico también puede ser utilizado para resolver gráficamente numerosos procesos del aire húmedo. Lo vamos a ilustrar con algunos ejemplos en los cuales el proceso tiene lugar a una presión constante igual a la presión normal:

a) Calentamiento de aire húmedo: Se hace circular aire saturado a la temperatura t_1 por un tubo de paredes a mayor temperatura, t_2 o a través de una superficie caliente a dicha temperatura. Como no existe condensación, ni evaporación ninguna, el grado de humedad permanece constante y en un diagrama psicrométrico el proceso equivale a un desplazamiento horizontal del punto 1 al 2 con una disminución de la humedad relativa.

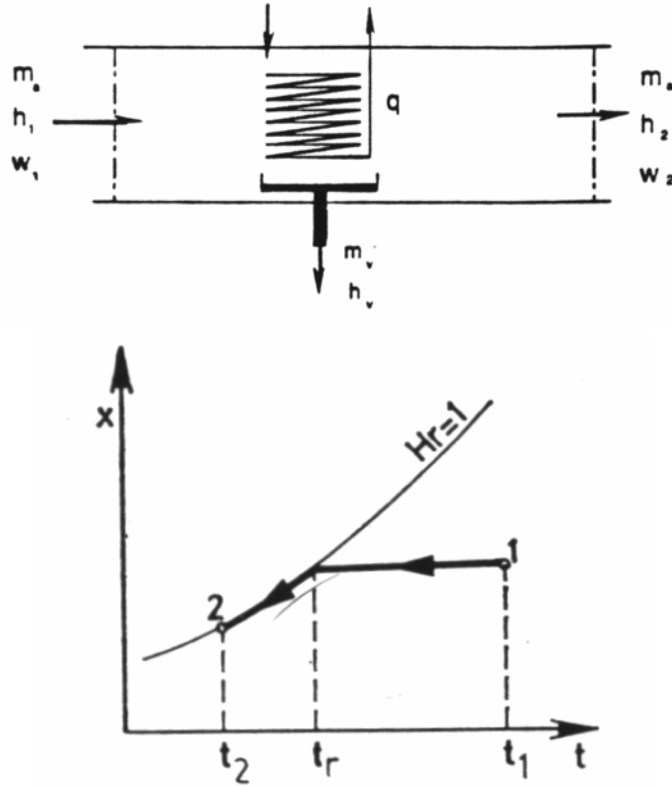


En régimen permanente la energía suministrada por unidad de tiempo se expresa en este caso como:

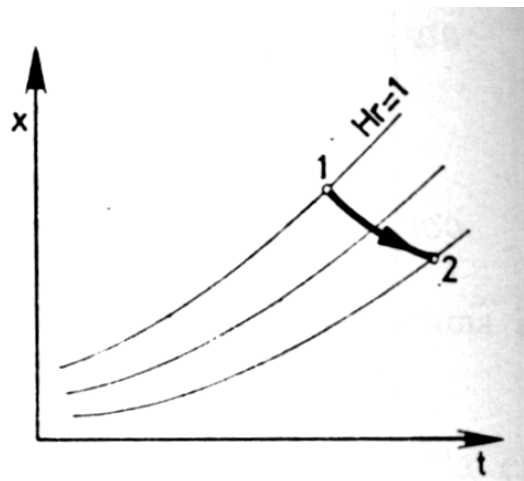
$$q = m_{\text{aire}}(h_2 - h_1)$$



b) Enfriamiento del aire: El aire húmedo a temperatura inicial t_1 circula ahora por un serpentín de refrigeración cuyas paredes están a una temperatura t_2 inferior al punto de rocío. El aire se enfría, y en una carta psicrométrica su evolución será una línea recta hasta alcanzar el punto de rocío, en cuyo momento se inicia la condensación y la evolución sigue la curva de saturación hasta alcanzar la temperatura t_2 .



c) Secado o deshumedecimiento químico: el deshumedecimiento de las mezclas de vapor de agua y aire también puede realizarse con adsorbentes tales como el gel de sílice. En el proceso se libera calor y la temperatura crece. En el diagrama psicrométrico, el proceso no sigue ninguna línea determinada. En la figura se representa gráficamente el proceso que tiene lugar:

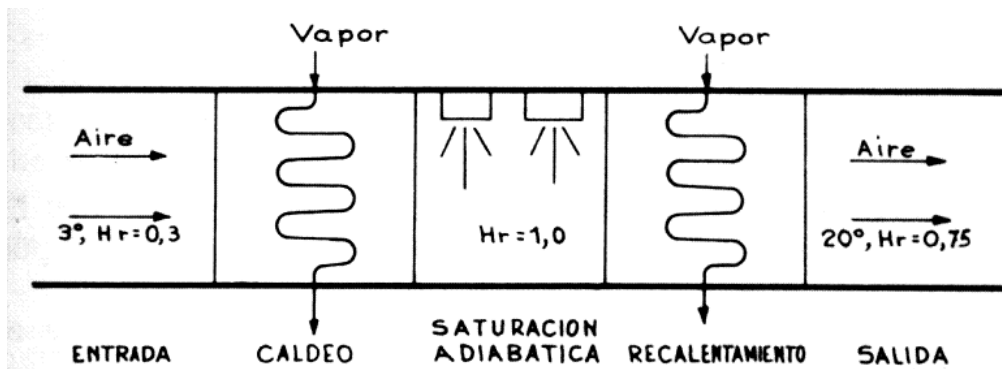


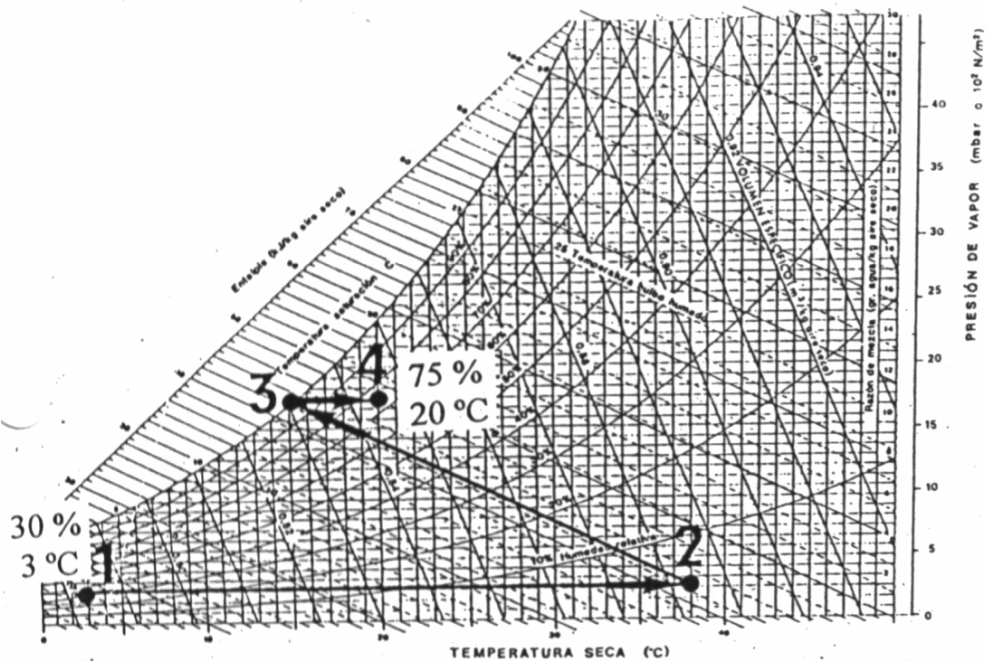
También es posible, como hemos visto en el apartado b) disminuir la humedad del aire como consecuencia de una disminución de la temperatura por debajo de su correspondiente temperatura de rocío.

2.8. ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE

Un local acondicionado es aquel que reúne la temperatura y humedad relativa óptimas para el bienestar del organismo. Veamos dos ejemplos:

1. Acondicionamiento de aire frío y seco: *Deseamos tener una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 75% y las condiciones exteriores son de 3°C y una humedad relativa del 30%: se debe disponer de una instalación que verifique los siguientes procesos que pueden seguirse en un diagrama psicrométrico. Se calienta el aire exterior (punto 1) sin variar la razón de mezcla hasta alcanzar las condiciones del punto 2, situado en la curva de saturación adiabática correspondiente al punto de rocío del aire acondicionado, después se satura adiabáticamente el aire, haciéndolo circular en contracorriente con una lluvia de agua fina hasta alcanzar el punto 3, en que está saturado, y se caliente el aire sin variar la razón de mezcla hasta alcanzar el punto 4, cuya temperatura y humedad son las requeridas.*





2. Acondicionamiento de aire cálido y húmedo: En el siguiente esquema se representa el acondicionamiento en un día caluroso y húmedo en que las condiciones exteriores son de 40°C y una humedad relativa del 90% y se desean unas condiciones finales de 20°C y una humedad relativa de 75%. En este caso el aire se somete a un proceso de refrigeración (1-2), al descender la temperatura por debajo del punto de rocío, el vapor de agua se condensa y el agua líquida se retira, esto es, se lleva a cabo un proceso de eliminación de humedad (2-3) y después se realiza un calentamiento (3-4) hasta obtener las condiciones deseadas.

