Tema 5

TERMODINÁMICA DEL AIRE Y PSICROMETRÍA

0. Introducción.
1. Propiedades termodinámicas del aire.
- **1.1. Aire saturado. Presión de saturación y temperatura de rocío.**
- **1.2. Índices de humedad.**
- **1.3. Volumen, calor y entalpía húmedos.**
- **1.4. Temperatura de saturación adiabática y de termómetro húmedo.**

2. Aparatos psicrométricos. *(P)*
3. Diagramas psicrométricos. *(P)*
4. Procesos psicrométricos.
- **4.1. Calentamiento o enfriamiento.**
- **4.2. Humidificación.**
- **4.3. Deshumectación.**
- **4.4. Mezcla adiabática.**

(P) = Se desarrollarán en clases prácticas.

• *Objetivos específicos:*

- Conocer y saber calcular las propiedades termodinámicas del aire húmedo.
- Definir y aplicar el concepto de temperatura de rocío.
- Conocer los principales índices de humedad del aire y la relación entre ellos.
- Cálculo analítico de las principales propiedades termodinámicas del aire.
- Definir y aplicar el concepto de temperatura de saturación adiabática.
- Conocer el funcionamiento y manejo de los principales aparatos psicrométricos.
- Utilización de diagramas psicrométricos y realización de los cálculos correspondientes.
- Conocer las principales aplicaciones derivadas del estudio de las propiedades termodinámicas del aire.

• *Bibliografía recomendada:*

* Amigo; “Termotecnia. Aplicaciones Agroindustriales”. Cap. 16.
* De Andrés y Aroca ; “Calor y Frío Industrial I”. Caps. 26 y 27.
* Moran y Shapiro ; “Fundamentos de termodinámica técnica”. Cap. 12.
* Singh y Heldman; “Introducción a la ingeniería de alimentos”. Cap. 10.

0. 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. La psicrometría resulta entonces útil en el diseño y análisis de sistemas de almacenamiento y procesado de alimentos, diseño de equipos de refrigeración, estudio del secado de alimentos, estudios de aire acondicionado y climatización, torres de enfriamiento, y en todos los procesos industriales que exijan un fuerte control del contenido de vapor de agua en el aire.

Vamos a ver cómo 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. El hombre ha sido capaz también de diseñar y construir aparatos muy sencillos, accesibles a cualquier persona, para la determinación de las propiedades básicas del aire húmedo. 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 tema comenzaremos por estudiar las principales propiedades termodinámicas del aire, haciendo especial hincapié en el concepto de humedad. Luego indicaremos los principales aparatos utilizados para medir la humedad. A continuación estudiaremos la forma de utilizar diagramas que faciliten los cálculos. Finalmente estudiaremos diversos procesos psicrométricos útiles en temas posteriores.

1. Propiedades termodinámicas del aire.

Como es bien sabido, el aire es una mezcla de varios gases (entre los que destacan el nitrógeno y el oxígeno) a la que denominamos **aire seco,** más una cierta cantidad de agua en forma de **vapor.**

Generalmente, el rango de presiones y temperaturas de interés para diversas aplicaciones es tan limitado que puede considerarse que tanto el aire seco como el vapor de agua se comportan como gases ideales. Además, se considera que el aire seco se comporta como si fuera un componente puro, por lo que las propiedades del aire húmedo pueden estudiarse en base al conocimiento de las propiedades de mezclas de gases ideales, regidas principalmente por la conocida ley de Dalton. Como veremos a continuación, esta aproximación facilita enormemente el cálculo analítico (mediante ecuaciones) de las propiedades del aire (que suele denominarse aire húmedo para diferenciarlo del aire seco).

Recordaremos las principales propiedades del aire seco y del vapor de agua (ya estudiadas en el Tema 2). En las tablas señaladas encontraremos el valor de dichas propiedades de forma más exacta.

Aire seco. (Singh y Heldman, 1993)

- Masa molecular: $M_a = 28'9645\ 10^{-3}$ kg/mol
- Densidad y volumen específico: $\rho_a = v_a^{-1} \approx \dfrac{P_a M_a}{R\ T(K)}$ (kg/m^3) [Tablas 1 y 2]

  ➢ P_a = presión parcial del aire seco

  ($R = 8'314510$ J mol^{-1} K^{-1} = 0'082056 atm l mol^{-1} K^{-1} = 1'9864 cal mol^{-1} K^{-1})

- Calor específico: $c_{pa} \approx 1$ kJ/(kg ºC) [Tabla 1]
- Entalpía específica: (tomando como referencia 0 ºC) $\Delta h_a \approx 1\ (T - 0\ ºC)$ kJ/kg [Tabla 3]

Vapor de agua (Singh y Heldman, 1993)

- Masa molecular: $M_v = 18'01534\ 10^{-3}$ kg/mol
- Densidad y volumen específico: $\rho_v = v_v^{-1} \approx \dfrac{P_V\ M_V}{R\ T(K)}$ (kg/m^3) para T < 66 ºC

  [Tablas 4, 5 y 6 (la aproximación de gas ideal es menos válida en este caso)]

  ➢ P_v = presión parcial del vapor de agua

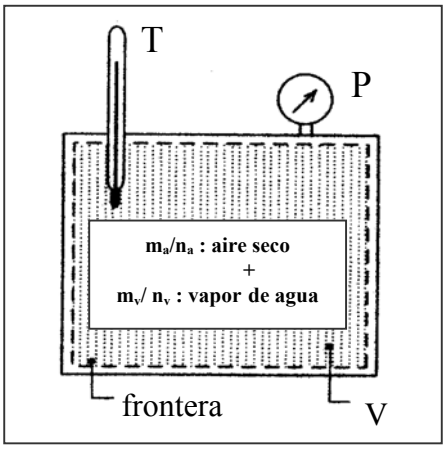
- Calor específico: $c_{pv} \approx 1'88$ kJ/(kg ºC) entre – 71 ºC y 124 ºC [Tablas 4 y 5]
- Entalpía específica: $\Delta h_v \approx L_v(0\ ºC) + 1'88\ (T - 0\ ºC)$ kJ/kg [Tablas 6 y 16]

  (Tomando como referencia agua líquida a 0 ºC, y siendo $L_v(0\ ºC) = 2501'4$ kJ/kg)

Aire húmedo:

Es una mezcla binaria que, a presiones inferiores a 3 atm, puede aproximarse al comportamiento de una mezcla de gases ideales, cumpliendo la ley de Dalton.

Llamamos m_a y m_v , y n_a y n_v a las masas y número de moles de aire seco y de vapor de agua.



- Masa molecular: $M_h = (m_a + m_v)/(n_a + n_v)$ (kg/mol)
- Densidad y volumen específico: $\rho_h = v_h^{-1} \approx \dfrac{P\ M_h}{RT}$ (kg/m^3)

Según la ley de Dalton: $P = P_a + P_v$, donde P_a y P_v son las presiones parciales del aire seco y el vapor de agua (como si ocuparan todo el volumen).

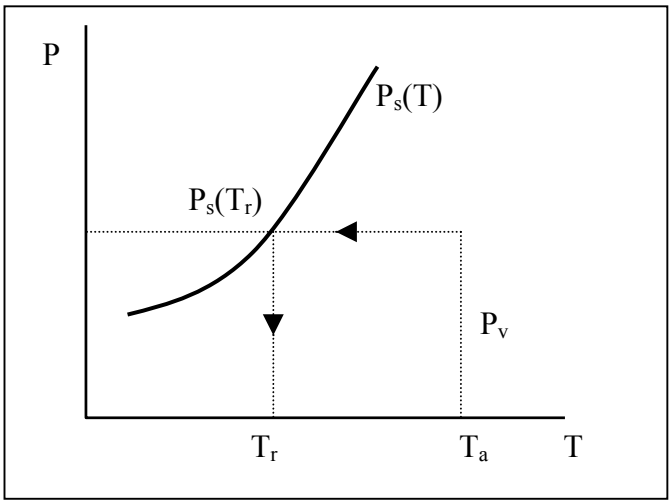
▪ Calor específico: $c_{ph} = \dfrac{m_a c_{pa} + m_v c_{pv}}{m_a + m_v}$ (kJ/K kg aire húmedo)

▪ Entalpía específica: $\Delta h_h = \dfrac{m_a \Delta h_a + m_v \Delta h_v}{m_a + m_v}$ (kJ/kg aire húmedo)

Las expresiones anteriores muestran una dependencia de las propiedades del aire húmedo con la cantidad de vapor que contenga. Por ello, es necesario introducir índices o parámetros que permitan cuantificar la humedad del aire.

1.1. Aire saturado. Presión de saturación y temperatura de rocío.

• El vapor de agua presente en el aire suele tener una presión parcial pequeña. El aire estará saturado de vapor de agua cuando, a una temperatura dada, dicha presión parcial sea igual a su **presión de saturación, P_s ,** a dicha temperatura (Tabla 16). De la misma forma, el aire estará saturado cuando, a una presión parcial P_v cualquiera, su temperatura sea igual a su temperatura de saturación a dicha presión (Tabla 16). A dicha temperatura se le denomina **temperatura o punto de rocío, T_r ,** ya que indica la temperatura a la que comenzará a condensarse el vapor de agua. Es decir, el concepto de temperatura de rocío es totalmente equivalente al de temperatura de saturación a presión constante (isobárica).



- Por ejemplo, la presión de saturación a 20 ºC será 23´39 mb (Tabla 16a), y esto significa que cuando la presión parcial del vapor sea igual a 23´39 mb, comenzará a condensarse.
- De la misma forma, la temperatura de rocío cuando la presión parcial del vapor es de 0´04 bares será aproximadamente de 29 ºC (Tabla 16b), y por debajo de esa temperatura el agua condensaría.

• La diferencia entre la temperatura del aire y su T_r dependerá de la humedad existente en el aire. A una temperatura dada, la temperatura de rocío será más pequeña cuanto menos húmedo esté el aire. Cuando el aire está cerca de la saturación la T y la T_r serán prácticamente iguales. Por ello, la temperatura de rocío también puede utilizarse como **índice de humedad.**

• En la atmósfera, el enfriamiento isobárico necesario para alcanzar la T_r se suele producir bien por la mezcla del aire con otro aire más frío, o bien por el enfriamiento nocturno. Durante la noche, cuando el cielo está despejado o poco nuboso, la temperatura del suelo disminuye sensiblemente, debido a la pérdida de calor por radiación. Si no existe viento a nivel del suelo, este enfriamiento sólo se propaga a las capas atmosféricas más cercanas al suelo. Si la temperatura alcanza la temperatura de rocío, se produce entonces la condensación del vapor de agua sobre el suelo y la vegetación.

• En general, si la $T_r > 0$ ºC se podrían producir gotas de agua, es decir, rocío, nieblas o lluvias, mientras que si la $T_r < 0$ ºC se podrían formar cristales de hielo, dando lugar a nevadas o a la escarcha.

1.2. Índices de humedad.

Llamamos índices de humedad a las distintas formas de expresar la cantidad de vapor de agua contenida en el aire húmedo. Algunos de ellos son los siguientes:

- Humedad absoluta: $\rho_v = m_v/V$ kg vapor/m^3 de aire húmedo
- Razón de mezcla o **humedad**: $X = m_v/m_a$ kg vapor/kg aire seco
- Humedad específica: $e = m_v/(m_v+m_a)$ kg vapor/kg aire húmedo
- Fracción molar: $Y = n_v/n_a$ moles vapor/mol aire seco

que están relacionados entre sí de forma directa.

El principal inconveniente de éstos índices es que no indican si el vapor está a punto de condensar o no, es decir, si el vapor está próximo a la saturación, lo cuál es de suma importancia en la mayoría de los casos prácticos. Por ello se define un índice, que es el más utilizado, llamado humedad relativa.

- **Humedad relativa.** Es el cociente entre la presión parcial del vapor y su presión de saturación a la misma temperatura, expresado en (%):

$$H_R = 100\ P_v/P_s \quad (\%)$$

Así, cuando el aire está saturado $P_v=P_s$ y $T=T_r$ y la humedad será del 100%. Según nos alejemos del 100% el aire estará más seco. Como P_s aumenta con la temperatura (Tabla 16), la humedad relativa disminuirá en la misma proporción. Es decir, el aire tendrá menor humedad relativa cuando esté más caliente, aunque contenga la misma cantidad de vapor (la misma razón de mezcla, por ejemplo), y cuanto más alta sea la temperatura más difícilmente se producirá la saturación.

1.3. Volumen, calor y entalpía húmedos.

Cuando se conoce el grado de humedad, las propiedades termodinámicas del aire húmedo suelen expresarse en función de la razón de mezcla X, y se definen en relación a cada kg de aire seco.

• Volumen húmedo:

$$v^* = v_h(1+X) = \frac{RT}{PM_h}(1+X) = \frac{RT}{PM_a}(1+\frac{M_a}{M_v}X) \qquad m^3 \text{ aire húmedo/kg aire seco}$$

expresión que, para el caso particular en que P = 1 atm = 1'013 10^5 Pa, se reduce a:

$$v^* = 0'002834\ T(K)\ \ (1+1'608X) \qquad m^3 \text{ aire húmedo/kg aire seco}$$

• Calor específico húmedo (calor húmedo):

$$c_p^* = c_{ph}(1+X) = c_{pa} + X\,c_{pv} \qquad \text{kJ/(K kg aire seco)}$$

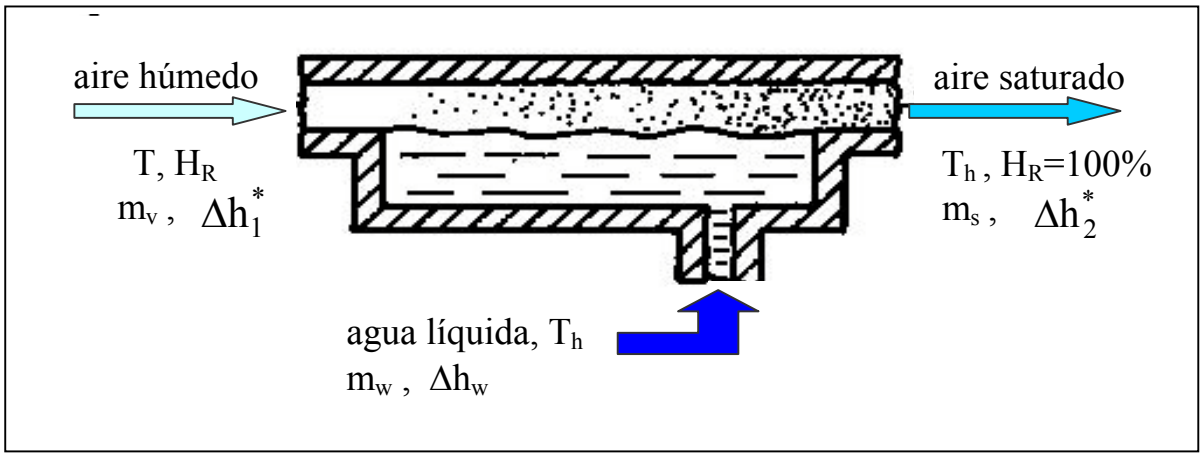
• Entalpía húmeda:

$$\Delta h^* = \Delta h_h(1+X) = \Delta h_a + X\Delta h_v = c_p^*(T-T_0) + X\,L_v(T_0) \qquad \text{kJ/kg aire seco}$$

donde se suele tomar T_0 = 273'15 K = 0 ºC y entonces L_v = 2501'4 kJ/kg.

1.4. Temperatura de saturación adiabática y de termómetro húmedo.

• **Temperatura de saturación adiabática, T_h** , es la temperatura teórica de equilibrio que tendrá el aire no saturado después de sufrir un proceso adiabático e isobárico (isoentálpico), que lo lleva a la saturación mediante evaporación de agua líquida a dicha temperatura.



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.

Durante el proceso de saturación adiabática la presión parcial del vapor aumenta, como consecuencia del aumento del contenido de vapor, y la temperatura del aire disminuye, ya que el calor necesario para la evaporación es tomado del propio aire húmedo. Lógicamente, para que se produzca el proceso T_h debe ser menor que la T inicial.

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, cuanto mayor sea la humedad del aire menos agua se evaporará, se requerirá menos cantidad de calor para evaporarla y por tanto, la T_h será mayor. Si el aire está inicialmente saturado T_h coincidirá exactamente con T.

Para establecer la relación analítica entre T_h y los índices de humedad, aplicamos los correspondientes balances de masa y energía (ver figura anterior).

➢ ***Balance de masa***: la cantidad de agua a incorporar será igual al aumento de vapor de agua en el aire.

$$\mathbf{m_w = m_s - m_v}$$

donde m_s es la masa de vapor de agua saturado y m_w la masa de agua líquida.

➢ ***Balance de energía***: ya que el proceso es adiabático y los cambios de energía cinética y potencial son despreciables, la variación de entalpía que sufre el aire debe ser igual a la del agua líquida que se está evaporando. (El proceso es isoentálpico para el conjunto aire+agua líquida, pero esto no quiere decir que la entalpía del aire permanezca constante).

$$\mathbf{m_a \left[\Delta h^*_2(T_h) - \Delta h^*_1(T)\right] = m_w\, \Delta h_w(T_h)}$$

donde $\Delta h_w(T_h) = c_w\ T_h$ es la entalpía del agua líquida que se aporta (que permanece constantemente a T_h).

Cuando ambos balances se consideran simultáneamente, puede demostrarse que el calor sensible cedido por el aire durante su enfriamiento es igual al calor latente necesario para evaporar el agua, es decir:

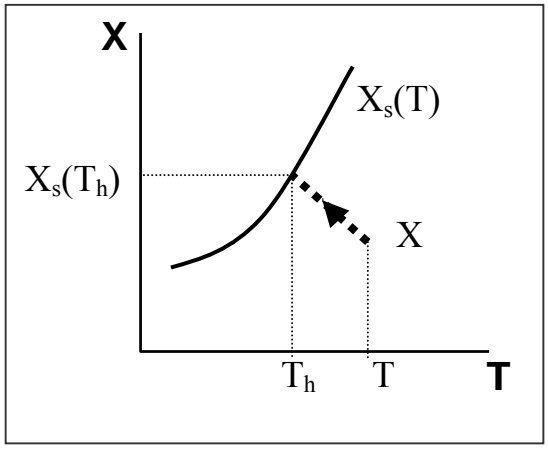
$$\mathbf{c^*_p\,(T - T_h) = (X_s - X)\, L_v\, (T_h)}$$

Para un cálculo aproximado podemos suponer que: $c_p^*(T - T_h) \approx c_{pa}(T - T_h)$
y sustituyendo en la ecuación anterior:

$$X \approx X_s - \frac{c_{pa}}{L_v(T_h)}\left[T - T_h\right]$$

o bien:

$$\mathbf{T - T_h \approx \frac{L_v(T_h)}{c_{pa}}[X_s - X]}$$



Como puede apreciarse, para una T dada, la T_h es menor cuanto más seco esté el aire, es decir cuanto mayor diferencia haya entre X_s y X. Además, con esta aproximación, la curva se convierte en una recta de pendiente negativa, tal y como se muestra en la figura.

Por otra parte, también se cumple:

$$(\Delta h_2^* - \Delta h_1^*) = (X_s - X)\,\Delta h_w(T_h)$$

y teniendo en cuenta que este último término es mucho más pequeño que los anteriores, se cumple, aproximadamente que:

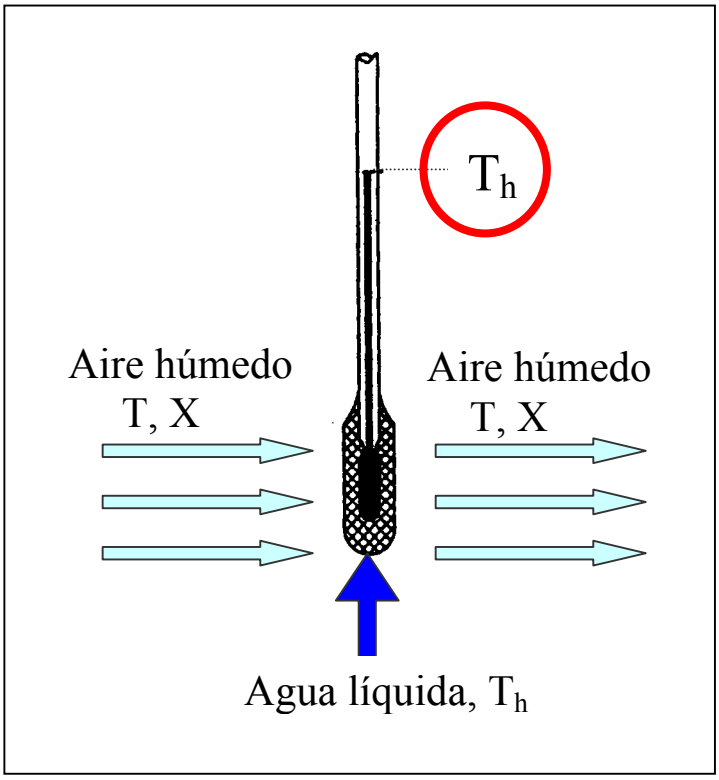
$$\mathbf{\Delta h_2^* \approx \Delta h_1^*}$$

Por tanto, podemos suponer que **el proceso de saturación adiabática es aproximadamente isoentálpico** para el aire húmedo (exactamente isoentálpico para el conjunto de aire húmedo y agua aportada). La recta representada en la figura anterior representará aproximadamente a los procesos isoentálpicos que sufra el aire húmedo. El error cometido al suponer que la entalpía permanece constante es inferior al 5% para temperaturas del aire inferiores a 150 ºC (De Andrés y Aroca, 1990).

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 hemos indicado, su medida directa requeriría un proceso altamente ideal e iterativo (repetitivo), lo que no resulta útil en la práctica.

En realidad, el concepto de temperatura de saturación adiabática (o temperatura termodinámica del termómetro húmedo) fue introducido para poder explicar el fenómeno del termómetro húmedo. Como veremos a continuación, 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.

- **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 se mueva).



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 (similarmente 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:

- ✓ En este caso se trata de una magnitud estacionaria de no-equilibrio, ya que depende de las velocidades con las que se transfieren el calor y la materia.
- ✓ 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.
- ✓ La temperatura de 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 de termómetro húmedo no puede considerarse como una propiedad de la mezcla.

La temperatura de 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 que ya hemos definido. Además, como ya hemos indicado, en el caso del aire húmedo, coincide prácticamente con la temperatura de saturación adiabática, por ello **hemos denominado T_h a**

ambas. Para demostrar esta relación partiremos del balance de energía en el termómetro húmedo.

➢ ***Balance de energía:*** El calor sensible que el aire transmite por convección al termómetro húmedo debe ser igual al que requiere el agua para evaporarse. Es decir, para una cantidad de agua dada:

$$h\,(T - T_h) = k_g\, L_v\, (X_s - X)$$

siendo h el coeficiente de convección, k_g el coeficiente de transferencia de masa, y L_v el calor latente de vaporización a la temperatura T_h .

Despejando:

$$\mathbf{T - T_h = \frac{k_g}{h}\, L_v(T_h)\,(X_s - X)}$$

Si comparamos con la ecuación para la temperatura de saturación adiabática:

$$T - T_h \approx \frac{L_v(T_h)}{c_p^*}[X_s - X]$$

deducimos que la temperatura de saturación adiabática será aproximadamente igual a la del termómetro húmedo siempre que:

$$\frac{h}{k_g c_p^*} \approx \frac{h}{k_g c_{pa}} \approx 1$$

expresión conocida como **relación de Lewis** y que solo se cumple para el aire húmedo a humedades moderadas, ya que para este caso el valor de h/k_g, conocida como relación psicrométrica, es del orden de 0.95 kJ/(kg ºC).

Para otras mezclas de aire+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 esta 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 ºC, mientras que para una humedad del 60% comienza a sentirse a los 25 ºC, siendo la T_h aproximadamente igual a 20 ºC en ambos casos.

2. Aparatos psicrométricos.

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.

El conocer el valor de la humedad en el aire es importante en una amplia gama de aspectos prácticos. Por ejemplo, los seres humanos, los animales y las plantas son sensibles a la humedad, afectando tanto a su salud como a su confort. También se debe mantener la humedad correcta para evitar daños a los objetos sensibles como pinturas, grabaciones, etc. Por ello, es necesario que en el diseño de los sistemas de calefacción y acondicionamiento de aire se tenga en cuenta, no sólo la temperatura, sino también la humedad del aire (climatización).

Se hace necesario, por tanto, disponer de instrumentos de medida de la humedad que permitan una lectura cómoda y que proporcionen una exactitud suficiente. A continuación se presentan los distintos aparatos utilizados para medir la humedad, clasificados según el método de medida utilizado.

APARATO	MÉTODO
Psicrómetro y aspiropsicrómetro	Termodinámico
Higrómetro de cabello u otros materiales	Higroscópico
Higrómetro de punto de rocío	Condensación
Higrómetro de absorción química	Gravimetría
Higrómetro eléctrico	Variación de propiedades eléctricas

Estudiaremos aquí las características generales de cada uno de ellos.

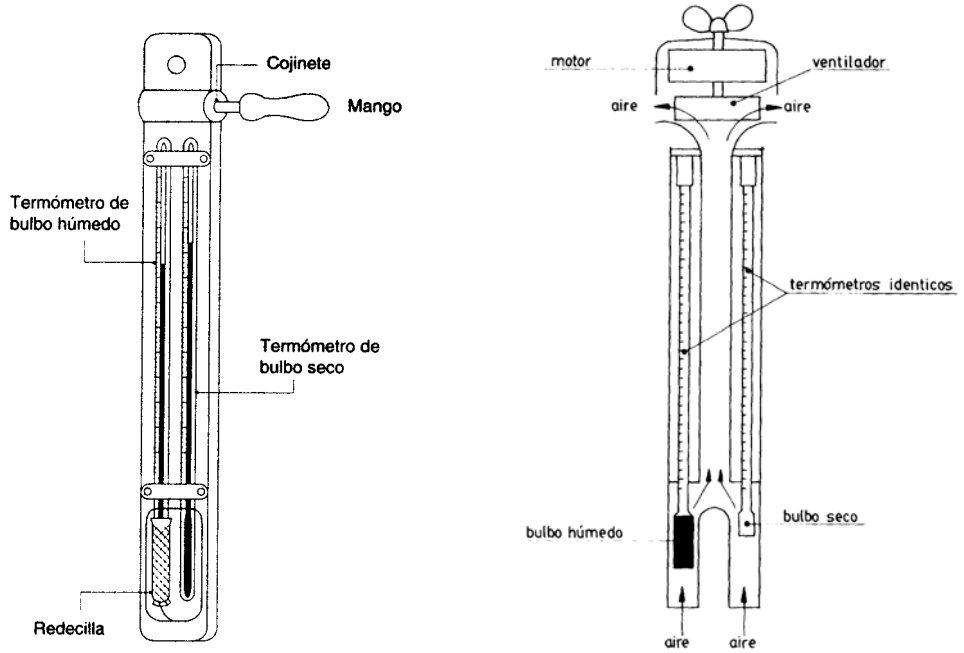
- **Psicrómetro y aspiropsicrómetro.**

Constan 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 extremo 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 aspiropsicrómetro 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 hemos indicado, la diferencia entre la temperatura del aire (o temperatura seca) 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. En caso de no disponer de tabla hay que recurrir a los cálculos necesarios (utilizando las ecuaciones anteriores) o bien a un diagrama psicrométrico.



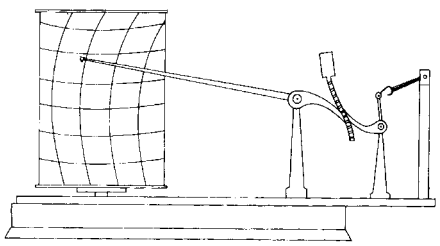
Psicrómetro Aspiropsicrómetro

- **Higrómetros de cabello.**

Se basan en que los cabellos se expanden y contraen según sea la humedad relativa. Más concretamente, Saussure, su inventor, encontró que la variación de longitud del cabello es función lineal de la humedad relativa. Así, un cabello humano puede llegar a variar su longitud en un 2.5% cuando se produce una variación del 100% en la humedad relativa. En todo caso, habrá que tener en cuenta que el aumento de temperatura también influye en el aumento de longitud.

A pesar del nombre genérico de higrómetros de cabello, actualmente se utilizan fibras sintéticas, cintas de madera, membranas diversas, etc. Los aparatos se construyen de forma que permitan medir exactamente la longitud del elemento utilizado, debiendo ser calibrado a diferentes humedades.

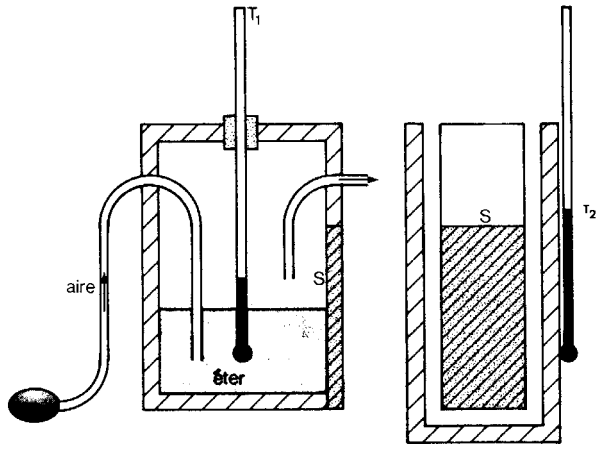
Este tipo de higrómetro es muy adecuado para conseguir un higrógrafo, es decir, para el montaje de un sistema que permita registrar en papel las variaciones de humedad que se vayan produciendo (ver figura).



Higrógrafo de cabello

- **Higrómetro de punto de rocío.**

Como se muestra en la figura, consta de una placa metálica que es enfriada mediante evaporación de éter u otra sustancia volátil. Cuando se observan las primeras gotitas de líquido en su superficie, la temperatura del éter será la T_r del aire que está siendo usado para la evaporación. La mayor dificultad reside en determinar el momento en que comienza la condensación, por ello actualmente se utiliza algún dispositivo electrónico (célula fotoeléctrica, por ejemplo) que detecte la aparición del rocío. Midiendo la temperatura en el exterior, y utilizando la ecuación o la gráfica de la presión de saturación, se obtiene la humedad relativa del aire.



Esquema del higrómetro de punto de rocío.

• **Higrómetro químico.**

Consta de una serie de tubos que contienen alguna sustancia higroscópica, y por los que se hace circular un volumen conocido de aire hasta que éste queda prácticamente seco. La diferencia de masa de los tubos antes y después de haber hecho circular el aire, se deberá a la masa de vapor que se ha depositado. De esta forma se mide directamente la humedad absoluta.

• **Higrómetros eléctricos.**

Basados en que algunas sustancias (óxido de aluminio, algunos polímeros, etc.) varían su resistencia eléctrica superficial o su capacidad eléctrica en función de la humedad relativa del aire que les rodea. Permiten una medida cómoda y rápida, además de poder ser adaptados para volcar datos en un ordenador.

Los higrómetros electrónicos están definidos en el apartado 5.5 de la norma UNE 100010 (1989), donde se indica que el error para humedades del 20% al 95% es del 2% al 3%, siendo de 0'3 ºC en la medida de temperaturas (seca, húmeda y de rocío).

3. Diagramas psicrométricos.

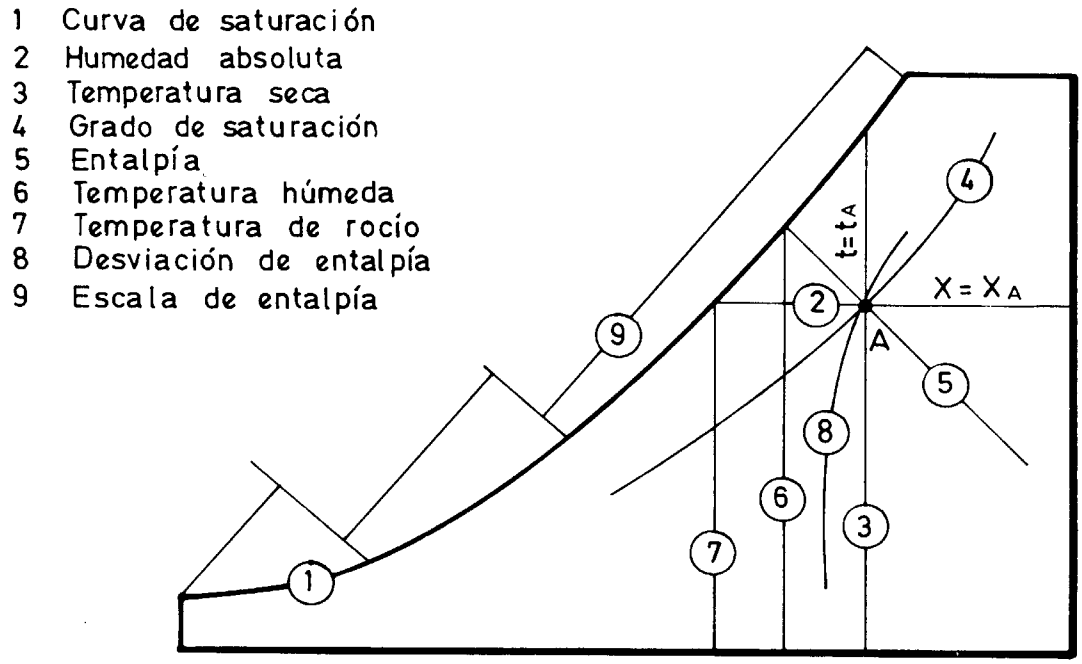
Las diferentes propiedades del aire húmedo están relacionadas entre sí, de forma que a partir de dos cualesquiera de las definidas anteriormente (T, X, H_R, T_r , T_h , v^* , ó Δh^*) es posible obtener el resto. Sin embargo, el uso de las diversas ecuaciones o aproximaciones puede complicar excesivamente 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. Además permiten realizar cálculos en cualquier momento y situación.

El principal inconveniente de los diagramas psicrométricos es que solamente pueden ser utilizados para la presión indicada (con un margen aproximado de un 10% arriba o abajo), es decir, es necesario construir un diagrama para cada presión total P. Otro inconveniente es la gran cantidad de líneas que vienen representadas, lo cual puede llevar al usuario inexperto a cometer errores fácilmente. Es necesario, por tanto, aprender a utilizar correctamente los mencionados diagramas. 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. Finalmente, otro inconveniente es que encontramos, al menos, tres diagramas distintos según las principales coordenadas (ejes) que se eligen. Resulta necesario, por tanto, aprender a utilizar cualquiera de ellos. Mostraremos aquí los diagramas Carrier, Mollier y ASHRAE para la presión atmosférica (101.3 kPa).

• **Diagrama Carrier.**

- Representa la T (ºC) en el eje de abcisas (eje x) y la razón de mezcla o humedad (X, en kg de agua/kg de aire seco) en el eje de ordenadas (eje y, a la derecha).
- La curva de saturación (H_R = 100%) asciende hacia la derecha y representa el final del diagrama. En esta curva se localizan las temperaturas de termómetro húmedo y las temperaturas de rocío.
- Las curvas de humedad relativa constante son similares a la de saturación, avanzando hacia abajo (tumbándose más) según disminuye la humedad del aire.

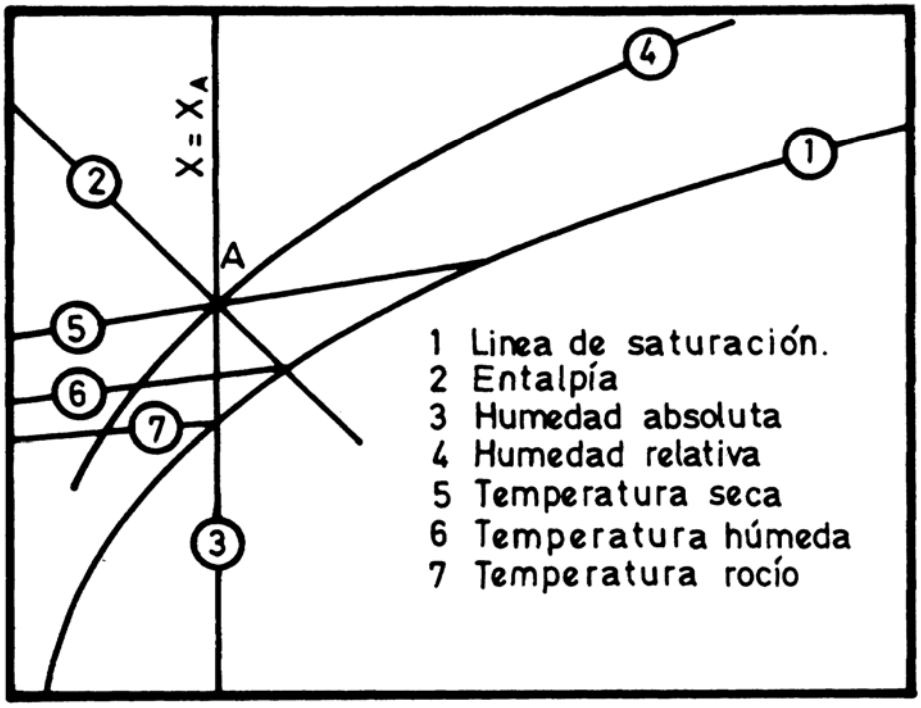


Esquema del diagrama Carrier

- El volumen húmedo y las líneas de T_h constante o isoentálpicas se representan por oblicuas de distinta inclinación. En realidad las líneas de T_h constante son hipérbolas con una pequeña curvatura, por lo que parecen rectas.
- En el caso de la entalpía se obtiene únicamente el valor de la entalpía húmeda en la saturación, siendo entonces necesario incluir otras curvas que dan la desviación correspondiente.
- El calor húmedo no está representado, pero puede obtenerse fácilmente a partir de la ecuación psicrométrica para la entalpía húmeda.

• **Diagrama Mollier.**

- Es el más antiguo de los diagramas psicrométricos, ya que fue propuesto por R. Mollier en 1932. Actualmente se utiliza, sobre todo, en Alemania y Francia.
- Representa la entalpía húmeda en el eje de ordenadas (a la izquierda) frente a la humedad X en abcisas. Las líneas de humedad constante son verticales, mientras que las isoentálpicas son rectas con pendiente negativa y paralelas entre sí.



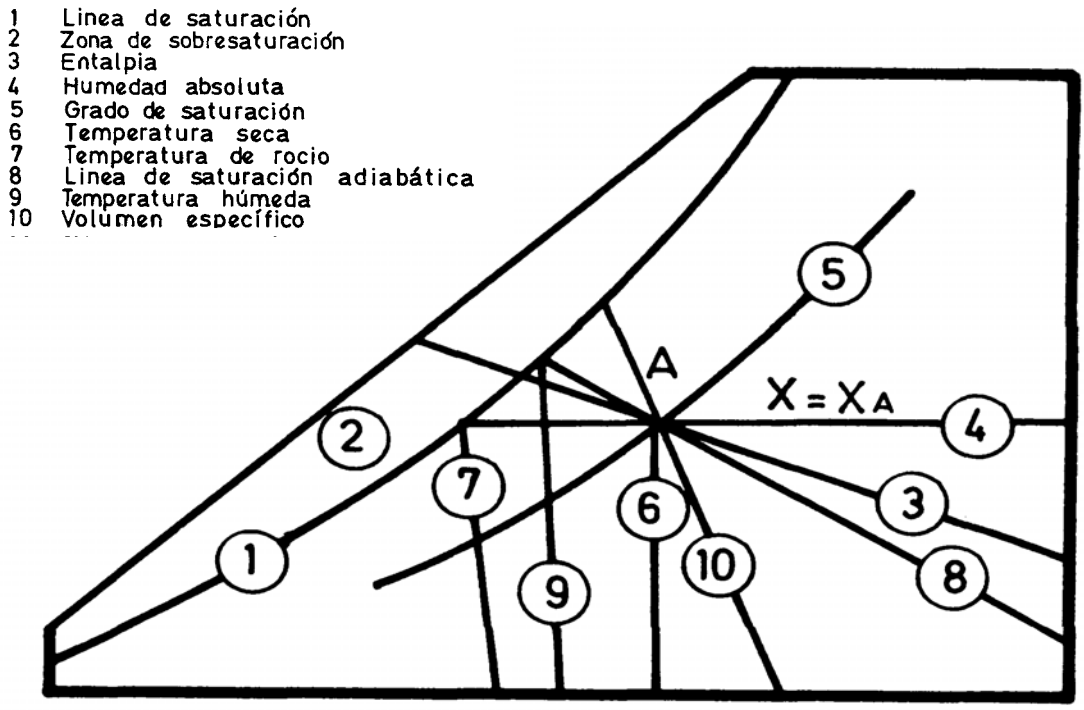
Esquema del diagrama Mollier

- Las isotermas son líneas rectas que arrancan del eje de ordenadas. La isoterma correspondiente a 0 ºC es horizontal, mientras que el resto de isotermas son líneas rectas con mayor pendiente a las temperaturas más altas.
- Las curvas de humedad relativa constante parten de abscisas próximas al origen y van creciendo y separándose en abanico. La curva más cercana al eje horizontal es la de saturación.

- Las líneas de volumen específico constante son rectas que parten del eje vertical, tienen pendiente negativa, aunque con menor inclinación que las isoentálpicas, y finalizan en la curva de saturación.

• **Diagrama ASHRAE.**

- Es el diagrama propuesto por la American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE) y su empleo se está generalizando tanto en América como en Europa.
- Es muy similar al tipo Carrier, siendo la principal diferencia el que aquí se representa directamente la entalpía húmeda, en lugar de la entalpía de saturación. Además se elimina la aproximación de considerar exactamente iguales a las líneas isoentálpicas (líneas continuas) y las de temperatura de termómetro húmedo (líneas discontinuas).



Esquema del diagrama ASHRAE
(De Andrés y Aroca, 1990)

4. Procesos psicrométricos.

Para finalizar el tema, vamos a estudiar algunas aplicaciones prácticas derivadas del conocimiento adquirido sobre el estudio de la humedad del aire. Nos referiremos tanto a aplicaciones industriales como a las relacionadas con fenómenos atmosféricos, ya que ambas tienen relación con la Ingeniería Agraria. El estudio de estos procesos es fundamental para poder abordar los temas referidos a secado, acondicionamiento de aire o climatización.

Los procesos psicrométricos fundamentales consisten en transferencias de energía en forma de calor y transferencias de masa en forma de agua. El signo de dichas transferencias dará lugar a una multitud de posibilidades, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

PROCESO	Δh^*	ΔX	PROCESO	Δh^*	ΔX
Calentamiento	>0	0	Humidificación con calentamiento	>0	>0
Enfriamiento	<0	0	Humidificación con enfriamiento	<0	>0
Humidificación adiabática	0	>0	Deshumectación con calentamiento	>0	<0
Deshumectación adiabática	0	<0	Deshumectación con enfriamiento	<0	<0

Cuando hay variación de humedad, un calentamiento o enfriamiento no significa necesariamente un aumento o disminución de la temperatura.

Otros procesos interesantes son los de mezcla de masas de aire con distintas propiedades. En la sección 4.4 estudiaremos el caso particular de mezcla adiabática.

4.1 Calentamiento o enfriamiento.

Son procesos en los que se modifica la temperatura del aire sin que se produzca evaporación o condensación (calentamiento o enfriamiento sensible). En este caso se mantiene constante la cantidad de vapor presente en el aire, representada por la razón de mezcla, X. En el diagrama Carrier este proceso vendrá representado por una línea recta horizontal (ver figura). En el diagrama de Mollier será una línea recta vertical.

El calentamiento va acompañado de una disminución de la humedad relativa, aumentando, por tanto, la capacidad del aire para secar los materiales con los que entre en contacto. El enfriamiento produce, por el contrario, un aumento de la humedad relativa, pero sin llegar a la saturación (ya que entonces X dejaría de ser constante).

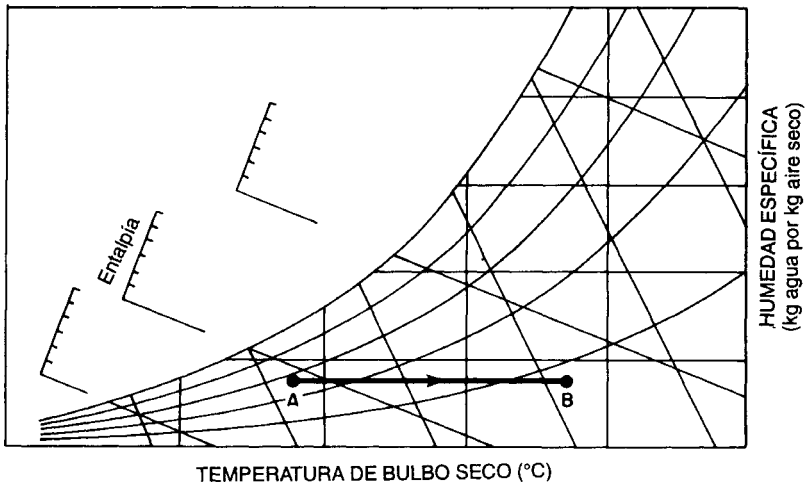
La cantidad de energía necesaria para el calentamiento o desprendida en el enfriamiento vendrá dada por:

$$Q = m_a (\Delta h^*_B - \Delta h^*_A) = m_a c^*_p \Delta T$$

Un ejemplo de estos procesos es el que ocurre en un intercambiador de calor en el que una corriente de aire se calienta o se enfría intercambiando calor con un segundo fluido, como agua caliente o vapor de agua en el calentamiento, o una salmuera (disolución salina incongelable) o

un líquido frigorígeno en el enfriamiento. Siempre habrá que tener en cuenta que, en el caso del enfriamiento, la superficie en contacto con el aire debe tener una temperatura superior a la de rocío, para evitar la condensación del agua y por tanto, la deshumectación del aire.

Otro ejemplo es la disminución, claramente apreciable, de la humedad relativa del aire en los locales con calefacción, provocando la desecación de mucosas, irritaciones en la faringe, etc.



Calentamiento en el diagrama Carrier.

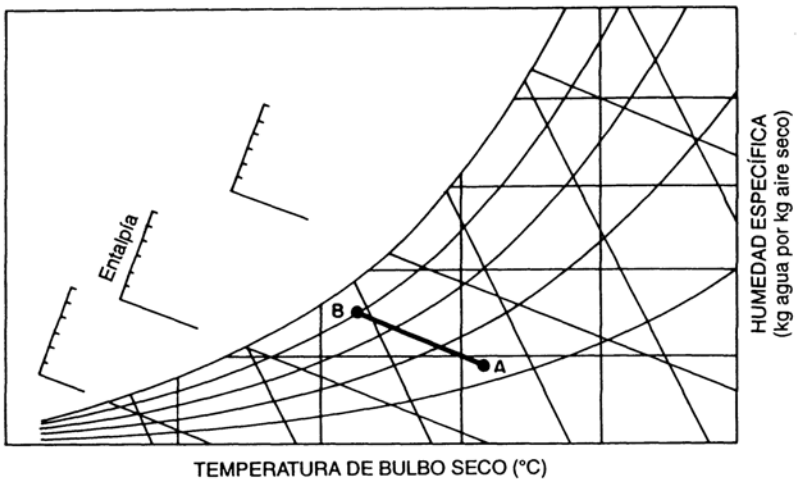
4.2 Humidificación.

En los procesos de humidificación se produce un aumento de la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Dicho aumento de la humedad estará provocado por la extracción del agua presente en alguna sustancia (secado) o por que se añada agua expresamente (por ejemplo, para acondicionar el aire en un clima seco, o para conseguir una humedad relativa elevada en cámaras de conservación de frutas y hortalizas).

En todo caso, se producirá también una variación en la temperatura del aire, que dependerá de si se ha añadido o no calor durante el proceso.

- **Humidificación adiabática.** Aumento de la humedad y la humedad relativa a la vez que disminuye la temperatura sin que exista aportación de energía. El proceso es el mismo que el explicado en la saturación adiabática, sin que tenga que alcanzarse necesariamente dicha saturación. En el diagrama psicrométrico, la evolución del aire sigue las líneas isoentálpicas que, en primera aproximación (diagrama Carrier) coincidirán con las de termómetro húmedo, es decir, que T_h permanece prácticamente constante durante el proceso.

  En la práctica, muchos de los equipos industriales para la evaporación o acondicionamiento de aire y para el secado de sólidos (frutas, cereales, etc.) están diseñados de forma que algunos de los procesos resulten adiabáticos.



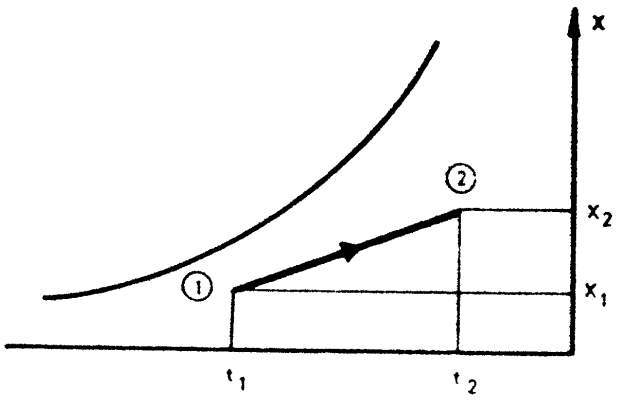
Humidificación adiabática en el diagrama Carrier.

La humidificación puede conseguirse pulverizando agua líquida en el aire o bien haciendo que el aire pase a través de un tejido que se mantiene constantemente mojado con agua. Este proceso se suele denominar "**enfriamiento evaporativo**" y constituye el fundamento físico de los "lavadores de aire". Se supone que se evapora todo el agua inyectada y que el calor necesario para ello lo extrae del aire inicial, disminuyendo su temperatura. La entalpía del aire aumentará un poco, debido a este aporte de agua, pero en la práctica puede considerarse que tanto la entalpía como la temperatura de termómetro húmedo permanecen constantes durante el proceso.

El enfriamiento evaporativo se utiliza también en los humidificadores de paneles, que mantienen una gran superficie constantemente húmeda sobre la que incide una corriente de aire. Este tipo de paneles resulta muy apropiada para algunas aplicaciones agrícolas como son los invernaderos, las naves de cultivo de champiñones y setas, y también en algunas instalaciones ganaderas (gallineros en régimen de explotación intensiva, o alojamientos de conejos en regiones donde se alcanzan altas temperaturas).

- **Humidificación con calentamiento o enfriamiento.** Aumento de la humedad con intercambio de calor. La temperatura puede aumentar, disminuir o permanecer constante. La humedad relativa puede aumentar o disminuir. La evolución del aire en el diagrama psicrométrico no sigue ninguna línea determinada, pero el proceso puede descomponerse, por ejemplo, en un calentamiento sensible seguido de una humidificación adiabática.

  Este proceso es el que sufre el aire acondicionado en verano una vez que entra en un local, donde absorbe calor y humedad al mismo tiempo. También ocurre cuando en invierno el aire exterior frío debe ser calentado y humidificado antes de ser introducido en un local climatizado.



Humidificación con calentamiento
en el diagrama Carrier

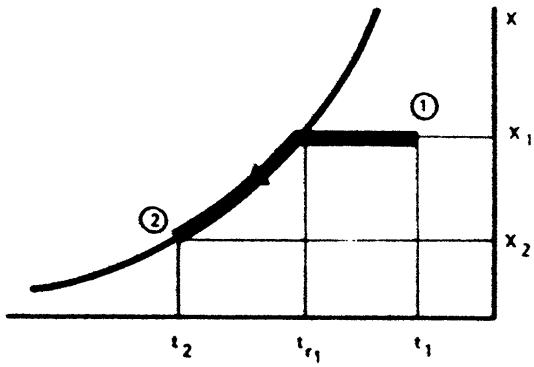
4.3. Deshumectación.

En los procesos de deshumectación la humedad del aire disminuye, siendo los más habituales los siguientes:

- **Deshumectación química.** Disminución de la humedad del aire mediante el uso de adsorbentes (carbones activados, gel, sílice, ...) o absorbentes (cloruros, bromuros, ..). En el proceso se libera calor y la temperatura del aire aumenta. En el diagrama psicrométrico, el proceso no sigue ninguna línea determinada.

- **Deshumectación por enfriamiento.** Disminución de la humedad del aire como consecuencia de una disminución de la temperatura por debajo de su correspondiente temperatura de rocío.

  Como ya sabemos, la saturación del aire se produce cuando su humedad relativa alcanza el 100% y el aire alcanza su temperatura de rocío. A partir de dicho momento cualquier enfriamiento producirá la condensación del vapor de agua existente, disminuyendo, por tanto la humedad presente en el aire, que seguirá evolucionando según la curva de saturación del diagrama psicrométrico. En los problemas relacionados con procesos de condensación es importante obtener la temperatura final, así como la cantidad de vapor condensado.



Deshumectación por enfriamiento
en el diagrama Carrier.

En la atmósfera, las condensaciones se producen por enfriamiento directo del aire, bien cuando asciende adiabáticamente, cuando deja de recibir el calor del Sol, o cuando se mezcla con aire muy húmedo o muy frío. Cuando el aire asciende la temperatura disminuye a un ritmo aproximado de 10 ºC por cada km de elevación. Cuando se alcanza la temperatura de rocío el vapor de agua presente en el aire tenderá a condensarse. Sin embargo, las gotas de agua no se producen enseguida. Ello es debido a que la capilaridad hace que la presión sea mayor en las superficies esféricas, como las gotas, que en las superficies planas (sobrepresión por curvatura, dada por la ecuación de Laplace). Por tanto, las gotas pequeñas que puedan producirse se evaporarán enseguida a menos que existan núcleos de condensación o que el aire esté sobresaturado. Una vez que comienza la condensación se forman brumas, que constituyen la fase inicial de la formación de nieblas o nubes.

Por otra parte, cuando el aire se enfría sin ascender, y una vez que se alcance la temperatura de rocío, y suponiendo condiciones suficientemente estables (ausencia de viento, por ejemplo), comenzará a producirse condensación sobre algunas superficies en contacto con el aire que son malos conductores del calor o que exhalan humedad (rocas, vidrios, vegetación, ...). La cantidad de rocío depende de la naturaleza de los objetos y de las condiciones meteorológicas (viento, etc.). Si la temperatura de rocío es inferior a 0 ºC se producirá escarcha (por ejemplo en los evaporadores de las cámaras frigoríficas). Por otra parte, si el aire no está en contacto con tales superficies, la formación de gotas requiere, de nuevo, núcleos de condensación, produciéndose entonces las nieblas.

4.4. Mezcla adiabática.

En algunos casos prácticos se produce la mezcla de aires con diferentes propiedades psicrométricas, sin que se realice ningún aporte externo de calor (adiabáticamente). Ejemplo típico es el que se produce cuando el aire de retorno en un sistema de aire acondicionado se mezcla con una parte de aire procedente del exterior.

Para calcular las propiedades del aire mezclado, conociendo las de sus componentes, es necesario recurrir a los balances de masa y energía.

Llamando 1 y 2 a los componentes y 3 a la mezcla, en el estado estacionario los balances de aire seco y vapor de agua serán:

$$m_{a1} + m_{a2} = m_{a3}$$

$$m_{v1} + m_{v2} = m_{v3}$$

Teniendo en cuenta la definición de la razón de mezcla y sustituyendo:

$$X_1\, m_{a1} + X_2\, m_{a2} = X_3\, (m_{a1} + m_{a2})$$

De donde podemos despejar la humedad del aire mezclado:

$$\mathbf{X_3 = \frac{X_1\, m_{a1} + X_2\, m_{a2}}{m_{a1} + m_{a2}}}$$

que, como vemos, nos es más que un reparto proporcional a la cantidad de aire inicial de cada componente.

Análogamente, el balance de energía será:

$$m_{a1}\ \Delta h_1^* + m_{a2}\ \Delta h_2^* = m_{a3}\ \Delta h_3^*$$

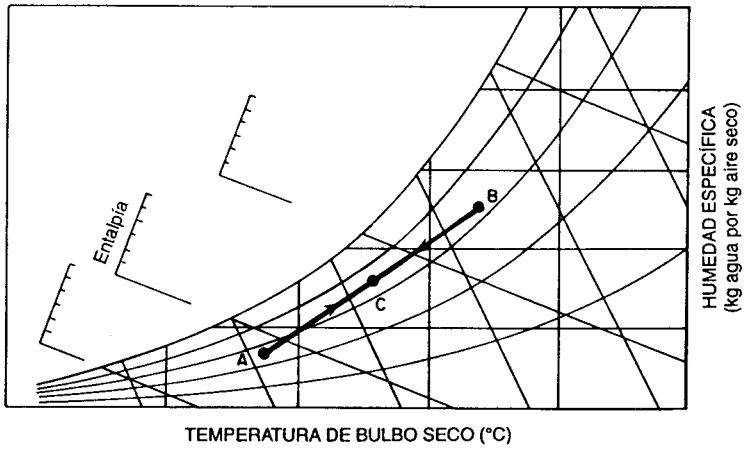
y, por tanto,

$$\Delta \mathbf{h}_3^* = \frac{\mathbf{m}_{a1}\,\Delta \mathbf{h}_1^* + \mathbf{m}_{a2}\Delta \mathbf{h}_2^*}{\mathbf{m}_{a1} + \mathbf{m}_{a2}}$$

es decir, la entalpía de la mezcla también se obtiene mediante un reparto proporcional a la cantidad de aire seco de cada componente de la mezcla.

Para determinar las propiedades del aire mezclado puede utilizarse también el diagrama psicrométrico, como sigue:

1) Se localizan los puntos que representan las dos masas de aire iniciales.
2) Se unen dichos puntos mediante una línea recta.
3) Dicha línea recta se divide en proporción inversa a las cantidades de aire iniciales. Así, si las dos cantidades son iguales, la mezcla de aire vendrá dada por la mitad de la línea (ver figura). Si son distintas, el punto que representa al aire mezclado estará más cerca de la mayor cantidad de aire inicial.



Mezcla adiabática en el diagrama Carrier.

Si las dos corrientes de aire que se mezclan están inicialmente saturadas, el punto de mezcla se encontrará fuera del diagrama psicrométrico, es decir, más allá de la línea de saturación. Para encontrar el punto que representa al nuevo aire saturado, se traza una paralela a las líneas isoentálpicas (T_h constante) desde el punto de mezcla hasta la curva de saturación.