

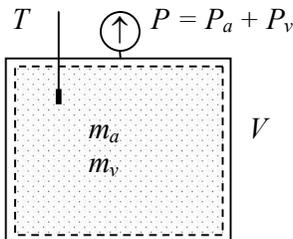


PSICROMETRÍA

Se estudiarán aquí sistemas que contienen mezclas de *aire seco* y *vapor de agua*. También puede estar presente una fase condensada de agua. El conocimiento del comportamiento de tales sistemas es esencial para el análisis y diseño de dispositivos de aire acondicionado, torres de refrigeración y procesos industriales que exijan un fuerte control del contenido en vapor de agua del aire.

Aire húmedo

El término aire húmedo se refiere a una mezcla de aire seco y vapor de agua en la cual el aire seco se trata como si fuera un componente puro. Mediante un análisis de sus propiedades, la mezcla global y cada uno de sus componentes se comporta como un *gas ideal* en las condiciones que se van a considerar, consecuentemente se aplican los conceptos desarrollados previamente para mezclas de gases ideales.



n_a, m_a : aire seco
 n_v, m_v : vapor de agua
 n, m : mezcla

$$P_a = n_a \left(\frac{\bar{R}T}{V} \right) = \frac{m_a (\bar{R} / M_a) T}{V} \quad [1]$$

$$P_v = n_v \left(\frac{\bar{R}T}{V} \right) = \frac{m_v (\bar{R} / M_v) T}{V} \quad [2]$$

Humedad absoluta

$$x = \frac{m_v}{m_a} \quad \left[\frac{kg_v}{kg_a} \right] \quad [3]$$

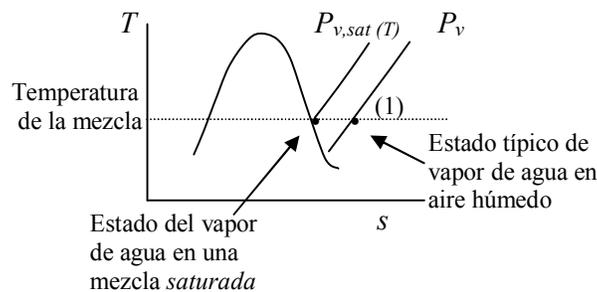
$$x = \frac{M_v P_v (V / \bar{R}T)}{M_a P_a (V / \bar{R}T)} = \frac{M_v P_v}{M_a P_a}$$

sustituyendo $P_a = P - P_v$ y teniendo en cuenta que la relación entre las masas moleculares del agua y del aire seco vale aprox. 0.622:

$$x = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad [4]$$

expresión solo válida en el caso de que la mezcla sea homogénea, o sea que toda el agua contenida sea vapor.

Si consideramos el vapor de agua contenido en una masa de aire húmedo, podemos representar su estado en un diagrama entrópico de vapor de agua. El estado del vapor será generalmente sobrecalentado, por ej. el punto (1) de la Fig. Si al aire se le agrega una masa adicional de vapor de agua, manteniendo la mezcla a la misma temperatura y presión total, deberá aumentar la presión parcial de vapor y disminuir la presión parcial de aire seco. Si se sigue incorporando una mayor masa de vapor, manteniendo siempre la misma T y presión total de la mezcla, el estado del vapor se seguirá desplazando hacia la izquierda hasta que se habrá transformado en *vapor saturado*, dejando de ser sobrecalentado. Si se pretendiera incorporar una masa adicional de vapor de agua, ésta se condensará y se generará una niebla, pues el exceso de vapor quedará como gotas de líquido en suspensión en el aire húmedo, dado que a dicha T el vapor no puede tener una presión mayor que la de vapor saturado, o sea en condiciones de equilibrio con su líquido.

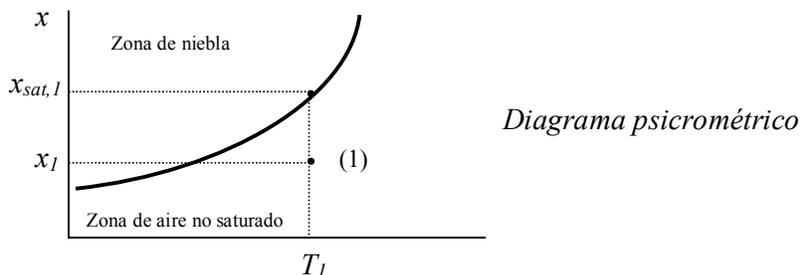


En consecuencia, para una determinada presión total, para cada T habrá un cierto estado del aire húmedo en que el vapor contenido es vapor saturado y en esas condiciones se dice que el aire está saturado de humedad. La humedad absoluta de saturación estará dada por:

$$x_{sat} = 0.622 \frac{P_{v,sat}}{P - P_{v,sat}} \quad [5]$$

fijada la presión total, para cada T corresponderá un valor de $P_{v,sat}$ y por lo tanto una humedad absoluta de saturación x_{sat} .

Este valor es la máxima cantidad de vapor de agua que puede estar mezclada con la unidad de masa de aire seco. Fijada la presión total, por ejemplo la presión atmosférica normal 760 mmHg, puede construirse un diagrama en el que se grafique $x_{sat} = f(T)$.



Humedad relativa

La relación entre la cantidad de humedad que el aire contiene en un determinado estado (x) y la máxima cantidad de humedad que el aire puede contener a la misma temperatura T , esto es x_{sat} , se conoce como humedad relativa:

$$\varphi = \left(\frac{x}{x_{sat}} \right)_T \quad [6]$$

Algunos autores definen humedad relativa como la relación entre la presión parcial de vapor en un aire húmedo y la presión de vapor saturado a la misma temperatura:

$$\phi = \left(\frac{P_v}{P_{v,sat}} \right)_T \quad [7]$$

Si en [6] se reemplaza x y x_{sat} por [4] y [5]:

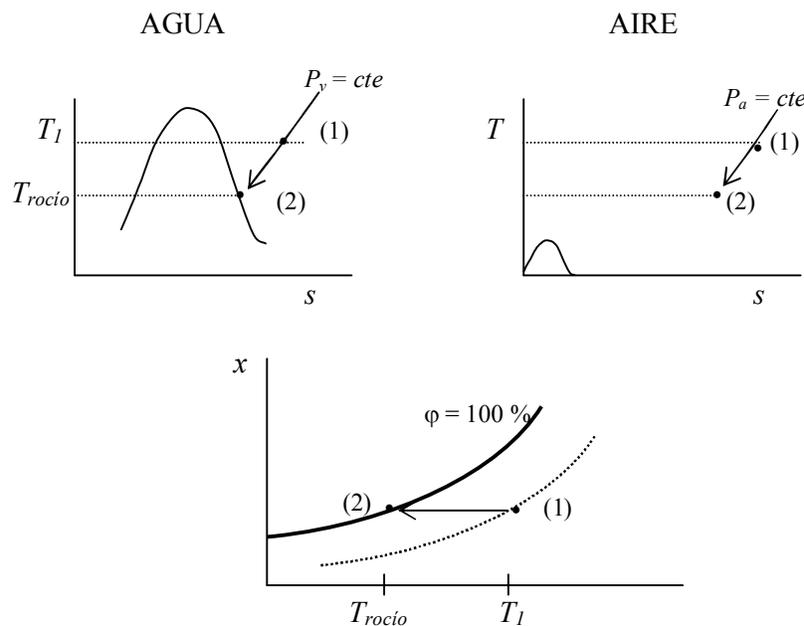
$$\varphi = \frac{x}{x_{sat}} = \frac{P_v / (P - P_v)}{P_{v,sat} / (P - P_{v,sat})} = \phi \frac{(P - P_{v,sat})}{(P - P_v)} \quad [8]$$

La ec. [8] nos indica que para presión atmosférica normal con temperaturas normales ambientes $\varphi \cong \phi$, dado que tanto P_v como $P_{v,sat}$ tienen valores muy inferiores a la presión total P .

Las humedades absolutas y relativas se pueden medir experimentalmente.

Temperatura de rocío

Si se considera una masa de aire húmedo no saturada de humedad, el vapor contenido será un vapor sobrecalentado y su estado estará representado en el diagrama entrópico de vapor de agua por un punto tal como el (1) de la Fig. Si enfriamos la masa de aire húmedo manteniendo constante la presión total y el contenido de humedad, la presión parcial del vapor de agua también se mantendrá constante, el vapor se irá enfriando y llegará un momento en que habrá dejado de ser vapor sobrecalentado y se habrá transformado en saturado (estado (2)). Si seguimos quitándole calor al aire húmedo se producirá condensación de vapor y al líquido así generado es a lo que se denomina *rocío*. A la temperatura correspondiente se la denomina *temperatura de rocío* o *punto de rocío*. Es evidente que la temperatura de rocío no es otra cosa que la temperatura de saturación, o sea de equilibrio líquido-vapor, correspondiente a la presión parcial de vapor en el aire húmedo.



Entalpía del aire húmedo

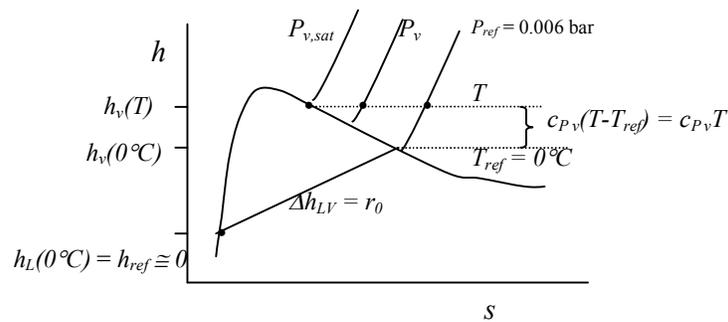
Los valores de U, H y S del aire húmedo se pueden obtener sumando la contribución de cada componente en las condiciones existentes en la mezcla, por ej., la entalpía de una determinada muestra de aire húmedo vale

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad [9]$$

Dividiendo la ec. [9] por m_a y utilizando la humedad absoluta se obtiene la entalpía específica, o entalpía de la mezcla *por unidad de masa de aire seco*

$$\frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + x_v h_v \quad \left[\frac{kJ}{kg_a} \right] \quad [10]$$

Las entalpías del aire seco y del vapor se determinan a la temperatura de la mezcla. Si se consultan las tablas de vapor de agua o del diagrama de Mollier para el agua se comprueba que la entalpía del vapor de agua sobrecalentado a bajas presiones de vapor está muy próxima a la del vapor saturado a la temperatura que se encuentra la mezcla. Por lo tanto, la entalpía del vapor de agua h_v en la ec. [10] se puede tomar como $h_{v, sat}$ a la temperatura dada.



o bien mediante la ec.

$$h_v = r_0 + c_{p_v} T \quad [11]$$

La entalpía de aire seco, h_a , se puede obtener de la ecuación de gas ideal, ya que el aire es gas en todos los estados considerados. Tomando como estado de referencia para el aire 0 °C y 1 atm ($h_{ref} = 0$):

$$h_a - h_{ref} = c_{p_a} (T - T_{ref})$$

o sea

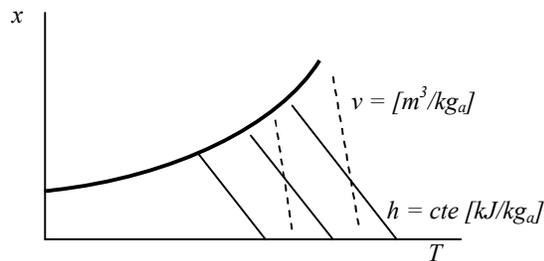
$$h_a = c_{p_a} T \quad [12]$$

Por lo tanto, reemplazando en la ec. [10] se obtiene:

$$h = c_{p_a} T + x(r_0 + c_{p_v} T) \quad [13]$$

La expresión [13] solo tiene validez para aire húmedo no saturado o a lo sumo saturado de humedad.

Para trazar líneas de entalpía constante sobre el diagrama psicrométrico, observar que la ec. [13] es una función $h = h(T,x)$. Si $h = cte$, $dh = 0$. Por lo tanto, derivando la ec. [13] e igualando a cero se encuentra que las evoluciones a $h = cte$ son rectas de pendiente negativa como se indica en la Fig. siguiente:



Volumen específico del aire húmedo

Teniendo en cuenta que estamos considerando al aire húmedo como una mezcla de gases ideales, el volumen de la mezcla por unidad de masa de aire seco será

$$v = \frac{V}{m_a} = \frac{n(\bar{R}T/P)}{m_a} = \frac{(n_a + n_v)(\bar{R}T/P)}{m_a} = \frac{m_a/M_a + m_v/M_v}{m_a}(\bar{R}T/P)$$

$$v = (1/M_a + x/M_v) \cdot \bar{R}T/P \quad \left[\frac{m^3}{kg_a} \right] \quad [14]$$

a partir de esta ec., para una presión total fija, se pueden graficar evoluciones a $v = cte$, resultando ser rectas como se muestra en el diagrama anterior. Observar que $v = v(T,x)$.

Relación entre masas

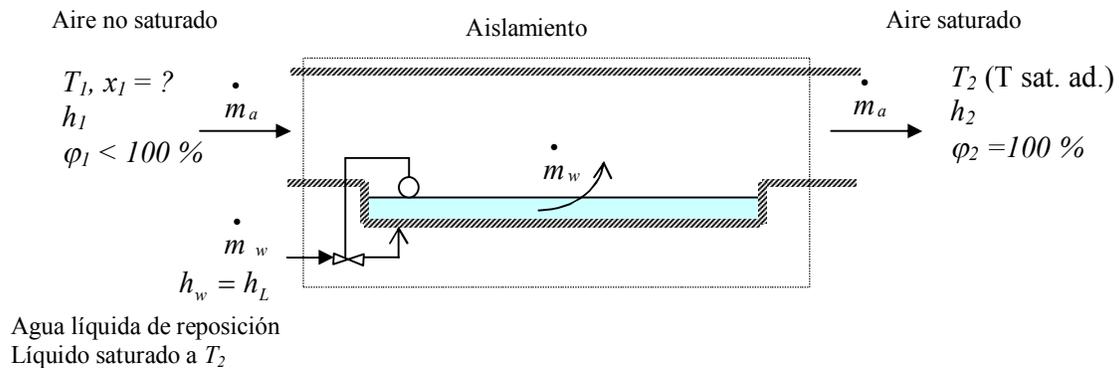
$$\frac{m}{m_a} = \frac{m_a + m_v}{m_a} = 1 + x$$

o sea, la masa de aire húmedo se puede escribir como

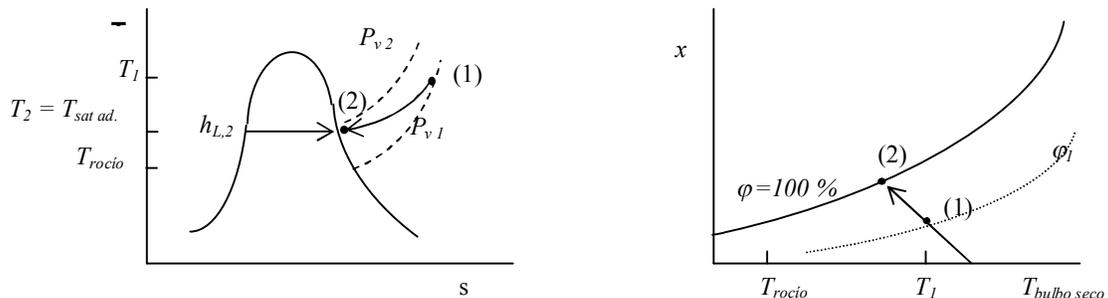
$$m = (1 + x)m_a \quad [15]$$

Temperatura de saturación adiabática y de bulbo húmedo

Proceso de saturación adiabática: $P = \text{cte}$



La energía necesaria para evaporar el agua procederá del aire húmedo, que reducirá su temperatura al ir atravesando el conducto. Si este es suficientemente largo, la mezcla estará saturada a su salida. Dado que se alcanza la saturación sin intercambio de calor con el entorno, la temperatura de la mezcla saliente se denomina de *saturación adiabática*.



- (1) Estado del vapor de agua en la corriente de aire húmedo que entra.
- (2) Estado del vapor de agua en la corriente de aire húmedo que sale.

Si el agua de reemplazo se envía con la velocidad de evaporación, será un proceso de flujo estable. Considerando que no hay intercambios de calor ni trabajo y no hay cambios en E_c ni E_p :

$$\begin{aligned} \text{Balance másico de aire} \quad & \dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a \\ \text{Balance másico de agua} \quad & \dot{m}_{v_1} + \dot{m}_w = \dot{m}_{v_2} \quad \text{con} \quad \begin{cases} \dot{m}_{v_1} = \dot{m}_a x_1 \\ \dot{m}_{v_2} = \dot{m}_a x_2 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (x_2 - x_1)$$

[16]

Balance de energía

$$\sum \dot{H}_{entran} = \sum \dot{H}_{salen}$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_w h_{L,2} = \dot{m}_a h_2$$

reemplazando \dot{m}_w por [16] y dividiendo por \dot{m}_a queda

$$h_1 + (x_2 - x_1)h_{L,2} = h_2 \quad [17]$$

Recordando que la entalpía de una mezcla de aire húmedo es

$$h = \frac{H}{m_a} = h_a + xh_v$$

la ec. [17] se puede escribir como

$$[c_p T_1 + x_1 h_{v1}] + (x_2 - x_1)h_{L,2} = [c_p T_2 + x_2 h_{v2}]$$

o sea

$$x_1 = \frac{c_p(T_2 - T_1) + x_2 \lambda_2}{h_{v1} - h_{L2}} \quad [18]$$

donde T_2 es la *temperatura de saturación adiabática*.

λ_2 es el calor de cambio de fase líquido-vapor a T_2 y x_2 se calcula conociendo P (presión de la mezcla) y T_2 :

$$x_2 = 0.622 \frac{P_{v2}}{P - P_{v2}}$$

Temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco

La temperatura de *bulbo seco* (T) no es otra cosa que la temperatura a la que se encuentra una masa de aire húmedo, o sea, la que indicará un termómetro cuyo bulbo se encuentra sin humedecer.

La temperatura de *bulbo húmedo* (T_{bh}), en cambio, es la temperatura que adquirirá e indicará un termómetro cuyo bulbo se ha puesto en contacto con un paño mojado, colocado en contacto con una masa de aire húmedo. Si el aire húmedo se encontrara saturado de humedad, ambos termómetros indicarían la misma temperatura. En cambio, si el aire húmedo no está saturado, la T_{bh} será menor que la de bulbo seco. Esto es debido a que el agua del paño se va a ir vaporizando e incorporando como vapor a la masa de aire húmedo.

El agua que se vaporiza necesita una energía térmica que es el calor latente de vaporización, para la transformación. Energía que tomará del paño y el termómetro que está en contacto con él, de manera que la temperatura descenderá en el termómetro. En cuanto descienda la temperatura en el termómetro, se va a producir un segundo efecto. El termómetro comenzará a recibir calor que le transferirá el ambiente en que se encuentra que estará a mayor temperatura. Llegará un momento que ambas cantidades de calor sean iguales y entonces el termómetro se estabiliza. El valor que indica en ese momento es la temperatura de bulbo húmedo.

Para mezclas aire-vapor de agua en el rango normal de presión y temperatura del aire atmosférico, la temperatura de saturación adiabática es aproximadamente igual a la temperatura de bulbo húmedo. Por lo tanto, para determinar la humedad absoluta de una mezcla (ec. [18]) se puede utilizar la temperatura de bulbo húmedo en lugar de la temperatura de saturación adiabática.

Las líneas de $T_{bh} = cte$ coinciden aproximadamente con las de $h = cte$ de la mezcla por unidad de masa de aire seco. Este hecho se puede establecer estudiando el balance de energía del saturador adiabático, ec. [17]. Puesto que la contribución energética del agua de reposición que entra al saturador (h_{L2}) es mucho menor que la del aire húmedo, la entalpía del aire que sale es casi igual a la del aire que entra. Por lo tanto, todos los estados con la misma T_{bh} (o con la misma temperatura de saturación adiabática) tienen aproximadamente la misma entalpía por unidad de masa de aire seco.

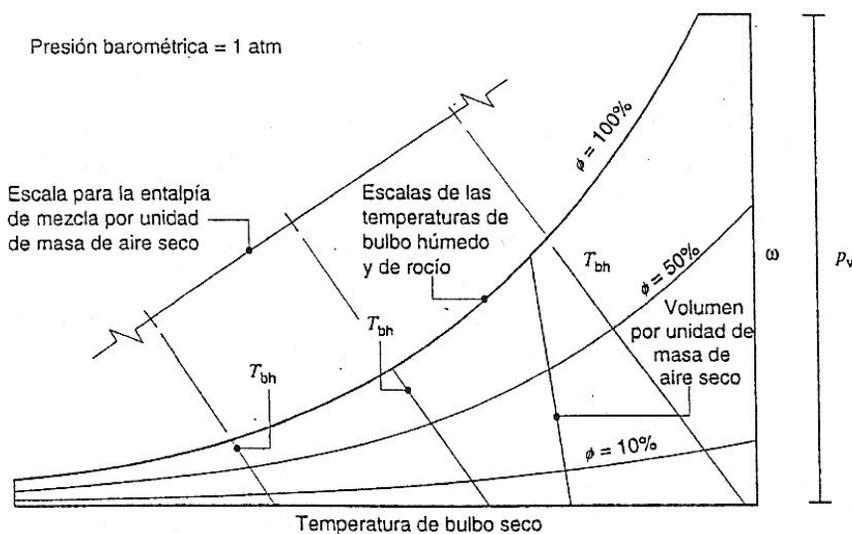
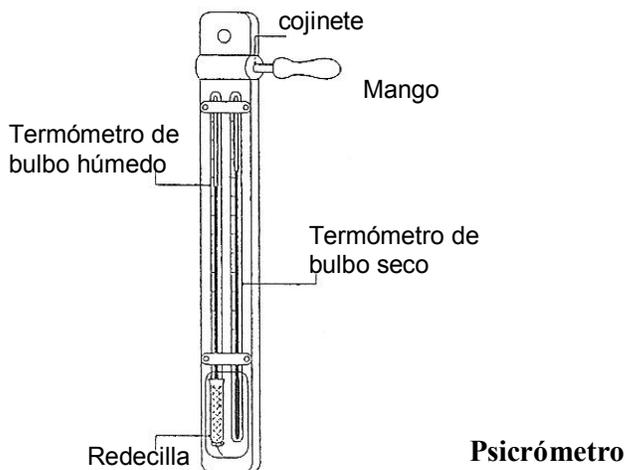


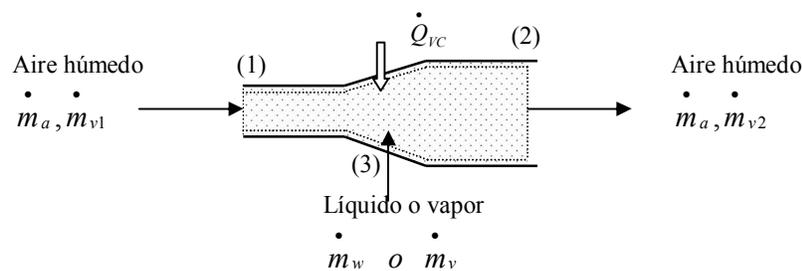
Diagrama psicrométrico

Conservación de la masa y la energía en los sistemas psicrométricos

Analizaremos en esta sección los principios de conservación de la masa y la energía para sistemas compuestos por mezclas de aire seco y vapor de agua en los que puede estar presente una fase condensada de agua.

Los dispositivos en los que tienen lugar los procesos psicrométricos como son: *calentamiento* o *enfriamiento* (elevación o disminución de T), *humidificación* o *deshumidificación* (incorporación o eliminación de humedad) o la combinación de dos o más de ellos, se analizan habitualmente sobre un volumen de control (VC). Para considerar un análisis típico, vamos a referirnos a la Fig. siguiente, que muestra un dispositivo en estado estacionario, con dos entradas y una salida. Entre el volumen de control y su entorno puede haber una transferencia de calor \dot{Q}_{VC} .

La mayor parte de los procesos se pueden modelar como procesos en estado estacionario, por lo tanto, las cantidades de aire seco y vapor de agua contenidas dentro del VC no varían:



$$\text{Balance de masa de aire seco:} \quad \dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a \quad [10]$$

$$\text{Balance de masa de aire agua:} \quad \dot{m}_{v,1} + \dot{m}_w = \dot{m}_{v,2} \quad \text{o} \quad \dot{m}_w = \dot{m}_a(x_2 - x_1) \quad [11]$$

$$\text{Balance de energía:} \quad \dot{Q} = \dot{m}_a h_2 - (\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_w h_w) \quad [12]$$

Se supone que los cambios de energía cinética y potencial serán despreciables. El término trabajo por lo general consiste en el trabajo del ventilador, que es muy pequeño respecto de otros términos de la ec. de energía.

Para el estudio de sistemas cerrados compuestos por mezclas de aire húmedo no se necesitan conceptos básicos adicionales.

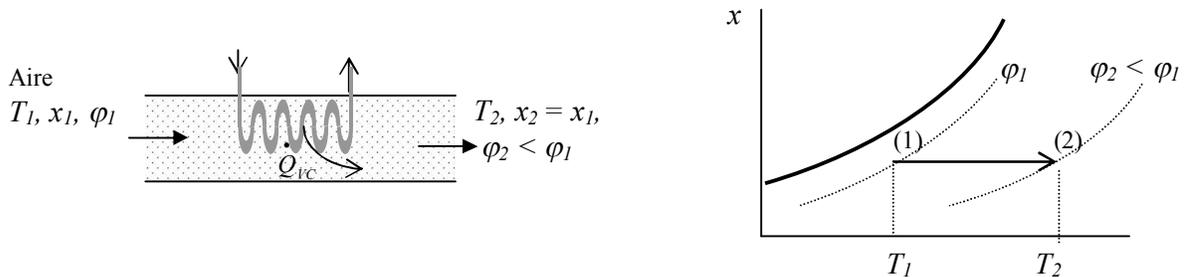
Procesos de acondicionamiento de aire

Calentamiento o enfriamiento ($x = \text{cte}$)

Muchos sistemas de calefacción constan de una estufa, una bomba de calor o de una resistencia eléctrica. La cantidad de humedad en el aire en estos casos permanece constante, ya que no se añade ni se elimina humedad del mismo.

Observar que la humedad relativa disminuye durante el proceso de calentamiento. En consecuencia, la humedad relativa puede estar bastante por debajo de los niveles de comodidad, lo que ocasiona resequead en la piel, dificultades respiratorias y aumento de la electricidad estática.

Un proceso de enfriamiento a $x = cte$ es similar al de calentamiento, excepto en que la T de bulbo seco disminuye y ϕ aumenta. El enfriamiento se logra al pasar el aire sobre algunos serpentines por los cuales fluye un refrigerante o agua fría.

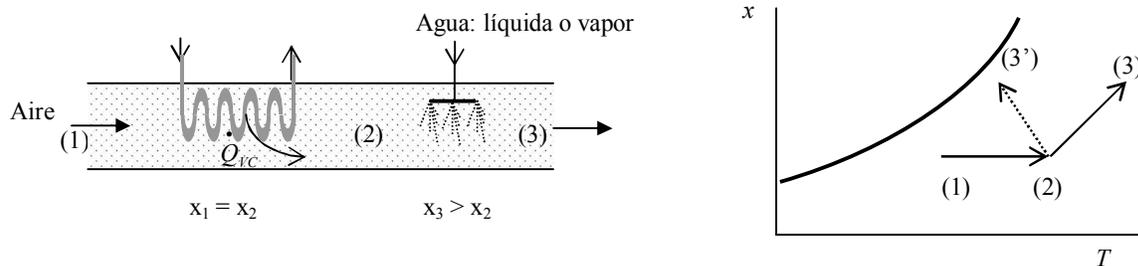


De [12]

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) \quad [13]$$

Calentamiento con humidificación

Los problemas asociados con la humedad relativa baja, producto del calentamiento simple, se eliminan al humidificar el aire calentado. Esto se consigue al pasar el aire por una sección de calentamiento (1-2) y luego por una sección de humidificación (2-3).



La ubicación de estado de salida depende de cómo se lleve a cabo la humidificación. Si se introduce vapor en la sección de humidificación se produce humidificación con calentamiento adicional (estado 3), con $T_3 > T_2$. En cambio, si la humidificación se logra rociando agua líquida en la corriente de aire, parte del calor latente de vaporización provendrá del aire, lo que producirá un enfriamiento de la corriente (2), o sea $T_{3'} < T_2$.

De [11], los caudales de agua líquida o vapor (\dot{m}_w o \dot{m}_v), según el caso, serán:

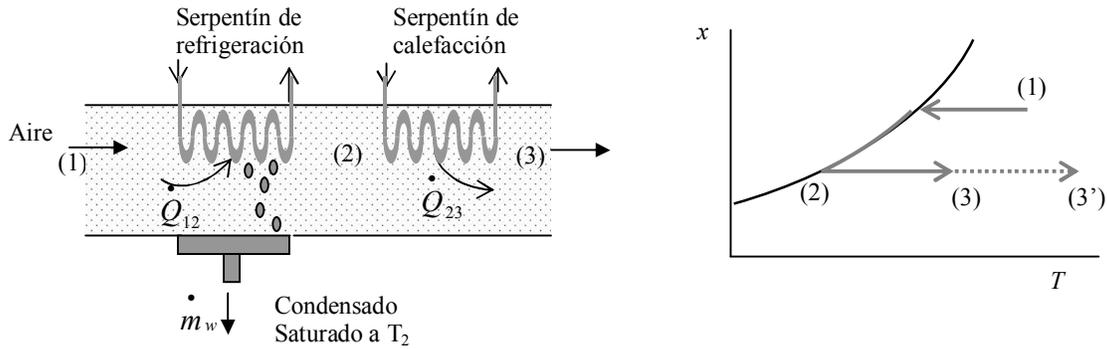
$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (x_3 - x_2) \quad [14]$$

El balance de energía en el proceso de humidificación (2-3) (ver ec. [12]), da:

$$\dot{m}_w h_w = \dot{m}_a (h_3 - h_2) \quad [15]$$

Deshumidificación con calentamiento

Cuando una corriente de aire húmedo se enfría a presión de la mezcla constante hasta una temperatura inferior a la de rocío, parte del vapor de agua presente al principio se condensa. Ver Fig.. El aire húmedo entra en el estado (1) y circula a través de un serpentín de refrigeración por el que circula un refrigerante o agua fría. Parte del vapor de agua inicialmente presente en el aire húmedo se condensa, y el aire húmedo sale del deshumidificador saturado en el estado (2). Aunque el agua condensa a varias T , se considera que el agua condensada se enfría hasta T_2 antes de salir del deshumidificador.



Para el proceso (1-2):

Balace de masa de agua:

$$\dot{m}_a x_1 = \dot{m}_w + \dot{m}_a x_2 \quad \rightarrow \quad \boxed{\dot{m}_w = \dot{m}_a (x_1 - x_2)} \quad [16]$$

Balace de energía:

$$\dot{Q} = \sum \dot{H}_{salen} - \sum \dot{H}_{entran}$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_a h_2 + \dot{m}_w h_w - \dot{m}_a h_1$$

sustituyendo por [16]

$$\boxed{\frac{\dot{Q}_{12}}{\dot{m}_a} = (h_2 - h_1) + (x_2 - x_1)h_w} \quad [17]$$

Para el proceso (2-3):

$$\boxed{\frac{\dot{Q}_{23}}{\dot{m}_a} = (h_3 - h_2)} \quad [18]$$

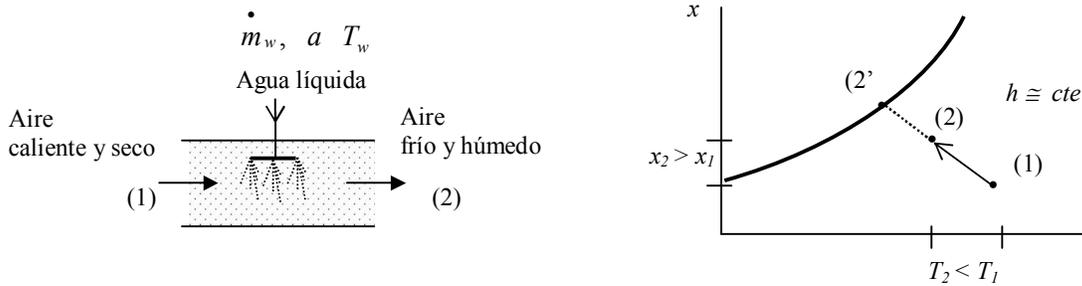
Enfriamiento evaporativo

El enfriamiento en climas cálidos relativamente secos, se puede conseguir mediante el *enfriamiento evaporativo*. Éste implica, o bien pulverizar agua líquida en el aire o bien forzarlo a circular a través de un tejido que se mantiene constantemente mojado con agua. Debido a la baja humedad del aire que entra, estado (1), parte del agua inyectada se evapora. La energía para la evaporación la suministra la corriente de aire, que reduce su T y sale en el estado (2).

Si el intercambio de calor con el entorno es despreciable, no se realiza trabajo ni hay variaciones de energías cinética y potencial, los balances estacionarios de masa y energía para el volumen de control se reducen a

$$h_1 + \underbrace{(x_2 - x_1)h_w}_{(*)} = h_2 \quad [19]$$

Se supone que toda el agua inyectada se evapora en la corriente de aire húmedo. El término (*) contabiliza el aporte energético del agua inyectada. Este término es normalmente mucho menor que cualquiera de los dos términos entálpicos del aire húmedo. Por lo tanto, la entalpía de la corriente de aire permanece aproximadamente constante, ver diagrama psicrométrico. Recordando que las entalpías están muy próximas a las líneas de $T_{bh} = cte$, se deduce que el enfriamiento evaporativo se efectúa a temperatura de bulbo húmedo casi constante.



En el caso límite, el aire saldrá del enfriador saturado (2'). Esta es la T más baja que puede alcanzarse por medio de este proceso.

El proceso de enfriamiento evaporativo es idéntico al proceso de saturación adiabático, puesto que la transferencia de calor entre la corriente de aire y el medio suele ser despreciable. Observar que este no será el caso si el agua líquida ingresa a una temperatura diferente de la T de salida de la corriente de aire.

Mezcla adiabática de corrientes de aire

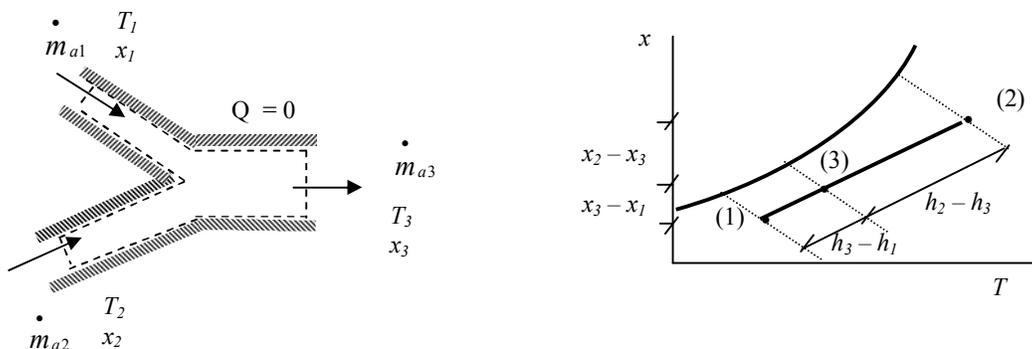
Un proceso común en sistemas de acondicionamiento de aire es la mezcla de corrientes de aire húmedo, tal como se muestra en la Fig. El objetivo del análisis termodinámico es, habitualmente, fijar el caudal y el estado de la corriente de salida para unos determinados caudales y estados de las dos corrientes de entrada. Los balances de masa del aire seco y del vapor de agua y de energía en estado estacionario son

$$\begin{aligned} \text{Aire seco} \quad & \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3} \quad [20] \\ \text{Vapor de agua} \quad & \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v3} \end{aligned}$$

como $\dot{m}_v = x \dot{m}_a$

$$\dot{m}_{a1} x_1 + \dot{m}_{a2} x_2 = \dot{m}_{a3} x_3 \quad [21]$$

$$\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_{a2} h_2 = \dot{m}_{a3} h_3 \quad [22]$$



Como la transferencia de calor con los alrededores suele ser muy pequeña, puede suponerse que el proceso de mezclado es adiabático.

Si se elimina \dot{m}_{a3} de las relaciones anteriores, se obtiene

$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{x_2 - x_3}{x_3 - x_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1}$$

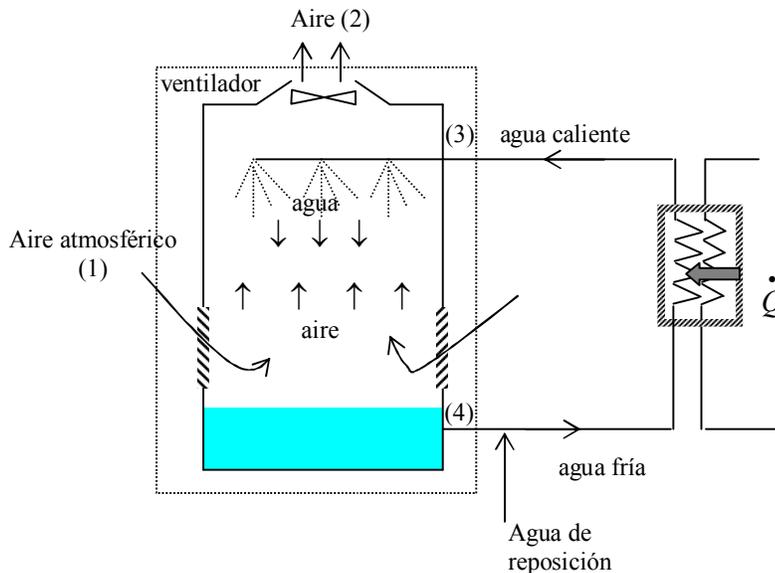
El único estado que satisface estas condiciones está localizado en la línea recta que conecta los estados (1) y (2) en la carta psicrométrica, y que la relación entre las distancias 2-3 y 3-1 es igual a la relación de los caudales máscicos \dot{m}_{a1} y \dot{m}_{a2} .

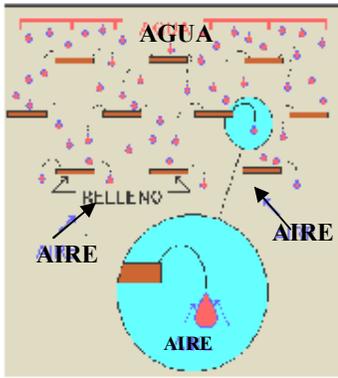
Torres de enfriamiento

Las centrales eléctricas, los grandes sistemas de aire acondicionado y algunas industrias generan grandes cantidades de calor de desecho que con frecuencia se arroja hacia el agua de enfriamiento de lagos o ríos cercanos. Sin embargo, en algunos casos el suministro de agua es limitado o la contaminación térmica alcanza niveles preocupantes. En esos casos, el calor de desecho debe arrojarse hacia la atmósfera. Una manera de lograrlo es mediante torres de enfriamiento.

Una torre de enfriamiento es un *enfriador evaporativo*. El aire entra por el fondo a la torre y sale por la parte superior. El agua caliente a refrigerar se bombea hacia la parte superior de la torre y se rocía en esta corriente de aire.

Cuando las gotas de agua caen bajo la influencia de la gravedad, una pequeña fracción de agua *se evapora y enfría el agua restante*. La temperatura y el contenido de humedad del aire aumenta durante este proceso. El agua enfriada se acumula en el fondo de la torre y se bombea de nuevo al condensador para recoger más energía sobrante. El agua de reemplazo debe añadirse al ciclo para sustituir el agua perdida por la evaporación y por el arrastre de agua.





Cuando a la gota que se pone en contacto con el aire, se le evapora la película exterior, requiere para este proceso absorber energía (calor latente de evaporación), que la toma de la propia gota, enfriándola consecuentemente (*enfriamiento evaporativo*).

El objeto que se persigue en la torre es que la gota este el mayor tiempo posible en contacto con el aire, lo cual se logra con la altura de la misma y además interponiendo obstáculos (el relleno), que la van deteniendo y al mismo tiempo la van fragmentando facilitando más el proceso evaporativo.

La circulación del aire en la torre la proporciona un ventilador, por lo que esta torre se la clasifica como torre de enfriamiento de *tiro forzado*. Otro tipo muy empleado de torre es la torre de enfriamiento de *tiro natural*, que se asemeja a una gran chimenea, de manera que el aire asciende debido a una diferencia de densidad.

Aplicaremos balances de masa y de energía al volumen de control, considerando que el proceso se desarrolla en estado estacionario, es adiabático y despreciando el trabajo del ventilador y las variaciones de energía cinética y potencial.

Balance de masa de aire seco

$$\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a$$

Balance de masa de agua

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_a x_1 = \dot{m}_4 + \dot{m}_a x_2$$

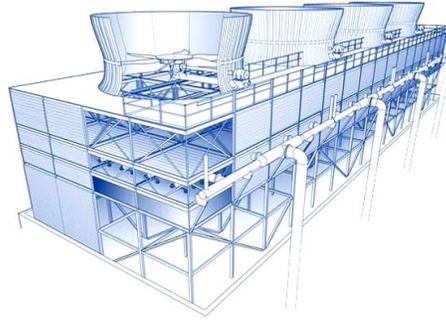
$$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = \dot{m}_a (x_2 - x_1) = \dot{m}_{\text{reposición}} \quad [23]$$

Balance de energía

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_a h_2 + \dot{m}_4 h_4 \quad [24]$$

Las entalpías de cada corriente líquida (h_3 y h_4) se calculan como la de líquido saturado a su respectiva temperatura y las entalpías del aire húmedo (h_1 y h_2) del diagrama psicrométrico.

Observar que el caudal másico de agua líquida disminuye en una cantidad igual a la cantidad de agua que se evapora en la torre durante el proceso de enfriamiento. El agua que se pierde por evaporación debe restituirse después en el ciclo para mantener la operación uniforme.



<http://www.marleyct.com/>

