

ANEXO I. FUNDAMENTOS DE PSICROMETRÍA

I.1. Introducción

La Psicrometría consiste en el estudio del comportamiento y de las propiedades del aire húmedo.

Se entiende por *aire húmedo* una mezcla de aire seco y vapor de agua. Como es sabido, el aire seco no es un compuesto puro, sino una mezcla de gases; no obstante, a los efectos aquí perseguidos el aire seco será considerado como el formado por un 21% de oxígeno y un 79% de nitrógeno (porcentajes en volumen).

Para presiones no muy alejadas de la atmosférica será perfectamente admisible el comportamiento como gas ideal del aire húmedo.

I.2. Variables psicrométricas

I.2.1. Presión total

Es la presión atmosférica de la localidad, función de la altura de ésta respecto al nivel del mar. Viene dada por la suma de las presiones parciales del vapor y del aire seco:

$$p = p_v + p_{as}$$

donde, teniendo en cuenta el comportamiento ideal de ambos gases:

$$p_v V = n_v RT$$

$$p_{as} V = n_{as} RT$$

I.2.2. Humedad absoluta

Se define como la masa de vapor de agua contenida en una cierta masa de aire seco:

$$\omega = \frac{m_v}{m_{as}} \quad \left(\frac{\text{kg vapor}}{\text{kg as}} \right)$$

Si denotamos como M_v y M_{as} a los pesos moleculares del vapor de agua y del aire seco, respectivamente, la ecuación anterior queda:

$$\omega = \frac{n_v M_v}{n_{as} M_{as}} = \frac{M_v}{M_{as}} \frac{p_v}{p - p_v} = 0.662 \frac{p_v}{p - p_v}$$

donde, de nuevo, se ha tenido en cuenta el comportamiento ideal de ambos gases.

I.2.3. Humedad absoluta de saturación

Consideremos un proceso de humidificación isoterma del aire: a temperatura constante, aumentamos la cantidad de vapor de agua m_v disuelta en el aire, lo que da lugar a un aumento de la presión parcial del vapor, p_v , y, por tanto, de la humedad absoluta, ω .

Cuando la presión parcial del vapor alcanza el valor de saturación correspondiente a esa temperatura, p_{vs} , el aire deja de admitir humedad, apareciendo líquido en equilibrio con

el vapor. En esta situación se dice que el aire está saturado, y la humedad correspondiente a este estado se denomina *humedad absoluta de saturación*:

$$\omega_{sat} = 0.662 \frac{P_{vs}}{p - P_{vs}}$$

Su valor depende exclusivamente de la temperatura del aire:

$$P_{vs} = P_{vs}(T) \Rightarrow \omega_{sat} = \omega_{sat}(T)$$

I.2.4. Grado de saturación

Se define como la relación entre la masa de vapor contenida en una masa de aire seco, en unas ciertas condiciones de presión y temperatura, y la masa de vapor contenida en la misma masa de aire seco, pero en condiciones de saturación a esa presión y a esa temperatura:

$$GS = \frac{\omega}{\omega_{sat}} \quad (\%)$$

Si, además, se admite un comportamiento ideal de la mezcla de aire seco y vapor de agua, entonces:

$$GS = \frac{\omega}{\omega_{sat}} = \frac{\frac{P_v}{p - P_v}}{\frac{P_{vs}}{p - P_{vs}}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \frac{p - P_{vs}}{p - P_v}$$

I.2.5. Humedad relativa

Es la relación entre la fracción molar del vapor contenido en una masa de aire seco en unas condiciones dadas de presión y temperatura, y la fracción molar de dicha masa correspondiente al estado de saturación en esas mismas condiciones de presión y temperatura:

$$\phi = \left[\frac{n_v}{n_{vs}} \right]_{(p,T)} = \left[\frac{P_v}{P_{vs}} \right]_{(p,T)} \quad (\%)$$

La humedad relativa proporciona una idea de la cercanía al estado de saturación de una masa de aire húmedo en unas condiciones (p, T) . Si, además, se admite que p_v y p_{vs} toman valores despreciables frente al de la presión total p , entonces:

$$p_v \ll p \quad , \quad p_{vs} \ll p \Rightarrow GS = \frac{P_v}{P_{vs}} \frac{p - P_{vs}}{p - P_v} \approx \frac{P_v}{P_{vs}} \Rightarrow \phi \approx \left[\frac{\omega}{\omega_{sat}} \right]_{(p,T)}$$

I.2.6. Temperatura seca

Ya ha sido definida implícitamente en el apartado anterior. Se trata, por tanto, de la temperatura real de la mezcla, T ($^{\circ}C$), tal y como se mide con un termómetro convencional.

I.2.7. Temperatura de rocío

Consideremos un proceso de enfriamiento isóbaro de una cierta masa de aire húmedo: si, a presión constante, disminuimos la temperatura seca T de la mezcla, llegará un momento en el que el aire alcance el estado de saturación, apareciendo líquido en equilibrio con el vapor.

La temperatura de rocío es la del aire en el instante en el que condensa la primera gota de vapor, y depende exclusivamente de la humedad absoluta del aire:

$$T_R = T_R(\omega)$$

I.2.8. Temperatura húmeda

Consideremos el esquema de la *Figura 1.1*, donde se muestra un termómetro cuyo bulbo se encuentra rodeado por una malla impregnada en agua. Se denomina *temperatura húmeda* o *temperatura de bulbo húmedo* a la temperatura de equilibrio que alcanza el agua contenida en la malla, al ser expuesta a una corriente de aire húmedo.

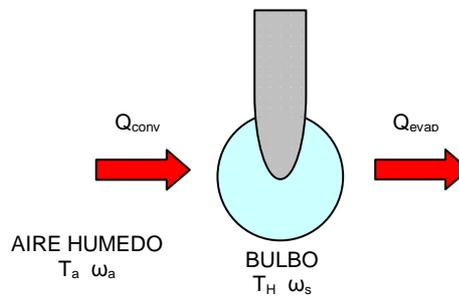


Figura 1.1. Temperatura de bulbo húmedo

Las transferencias de energía que experimenta el agua en contacto con el bulbo son las dadas por:

- El calor por convección Q_{conv} transferido desde el aire hacia la masa de agua, como consecuencia de la diferencia de temperaturas ($T_H < T_a$).
- El calor Q_{evap} , que es el que el agua emplea para evaporarse e incorporarse a la corriente de aire.

De este modo, al entrar en contacto con el aire, el agua de la malla recibe el calor Q_{conv} , aumentando su temperatura. Pero al mismo tiempo, el aire en contacto con el agua se satura, incorporando a la corriente agua en forma de vapor; el calor necesario para evaporar el agua, Q_{evap} , procede de la propia masa de agua, por lo que ésta disminuye su temperatura. El equilibrio se alcanza cuando ambos flujos de calor se igualan:

$$Q_{conv} = Q_{evap}$$

En ese instante, la temperatura alcanzada por el bulbo será la temperatura húmeda, T_H , correspondiente al equilibrio con la corriente de aire.

I.2.9. Volumen específico

Es el volumen ocupado por la unidad de masa de aire seco más el del vapor que le acompaña, referido a la unidad de aire seco:

$$v = \frac{RT}{p} \left(\frac{1}{M_{as}} + \frac{\omega}{M_v} \right) = v(\omega, T) \quad \left(\frac{m^3 \text{ aire}}{kg \text{ as}} \right)$$

Aumenta conforme crecen la temperatura seca y la humedad. También puede obtenerse como la inversa de la densidad del aire.

I.2.10. Entalpía específica

Se trata de una magnitud clave en los balances de energía. Se define como la energía contenida en el aire húmedo, por unidad de masa de aire seco. Viene dada por la suma de las entalpías correspondientes al aire seco y al vapor de agua:

$$h = h_{as} + h_v = c_{p,as} T + (\lambda + c_{p,v} T) \omega \quad \left(\frac{kJ}{kg \text{ as}} \right)$$

donde intervienen:

- Los calores específicos a presión constante del aire seco y del vapor de agua, $c_{p,as}$ y $c_{p,v}$, respectivamente.
- La temperatura seca T de la mezcla.
- El calor latente de vaporización del agua, λ , a la temperatura T .
- La humedad ω de la mezcla.

Se define el *calor específico húmedo* como:

$$c_{p,H} = c_{p,as} + \omega c_{p,v}$$

Representa la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado la temperatura de la unidad de aire seco junto con el vapor asociado, dado por la humedad ω . En estos términos, la entalpía específica del aire húmedo vendrá dada como:

$$h = c_{p,H} T + \lambda \omega \quad \left(\frac{kJ}{kg \text{ as}} \right)$$

I.3. Cálculo de variables psicrométricas

I.3.1. Diagramas psicrométricos

El aire húmedo presenta 3 variables independientes, lo que hace difícil la representación sobre un plano de sus diferentes estados.

No obstante, en los equipos que trabajan con aire húmedo, tales como unidades de secado, de aire acondicionado o torres de refrigeración, la presión total es aproximadamente constante e igual a la atmosférica:

$$p \approx p_{am}$$

De este modo, los estados del aire húmedo pasan a estar determinados únicamente por dos variables independientes. El *diagrama psicrométrico* es el plano en el que encontramos todos y cada uno de los estados del aire húmedo. Entrando en ellos con los valores de dos de las variables psicrométricas, obtenemos las demás. Asimismo, sobre estos diagramas es posible representar los diferentes tratamientos sobre el aire (*procesos*

psicrométricos), como las evoluciones que éste experimenta desde un cierto estado inicial hasta un cierto estado final.

Los diferentes diagramas se diferencian en las variables independientes elegidas y en el ángulo que forman los ejes coordenados. Los diagramas psicrométricos más importantes son:

1. Diagrama *Carrier*: maneja la temperatura seca y la humedad, (T, ω) , como variables independientes. El ángulo entre los ejes coordenados es de 92.5° .
2. Diagrama *ASHRAE*: utiliza la entalpía específica y la humedad, (h, ω) , como variables independientes. El ángulo entre los ejes coordenados es de 24.5° .
3. Diagrama de *Mollier*: como el diagrama ASHRAE, también emplea la pareja (h, ω) como variables independientes. El ángulo entre los ejes coordenados es de 34° .

En las *Figuras 1.2 y 1.3* se muestra el diagrama ASHRAE, que ha sido el empleado a la hora de analizar los procesos psicrométricos involucrados en los experimentos con la unidad Hilton A-575:

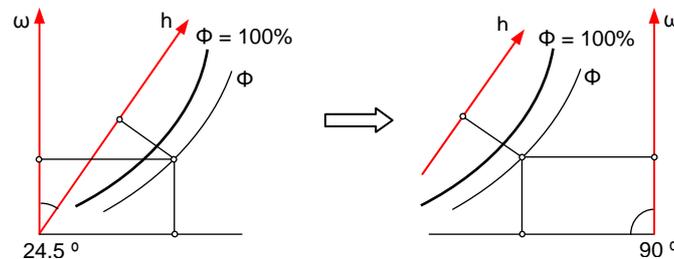


Figura 1.2. Diagrama psicrométrico ASHRAE

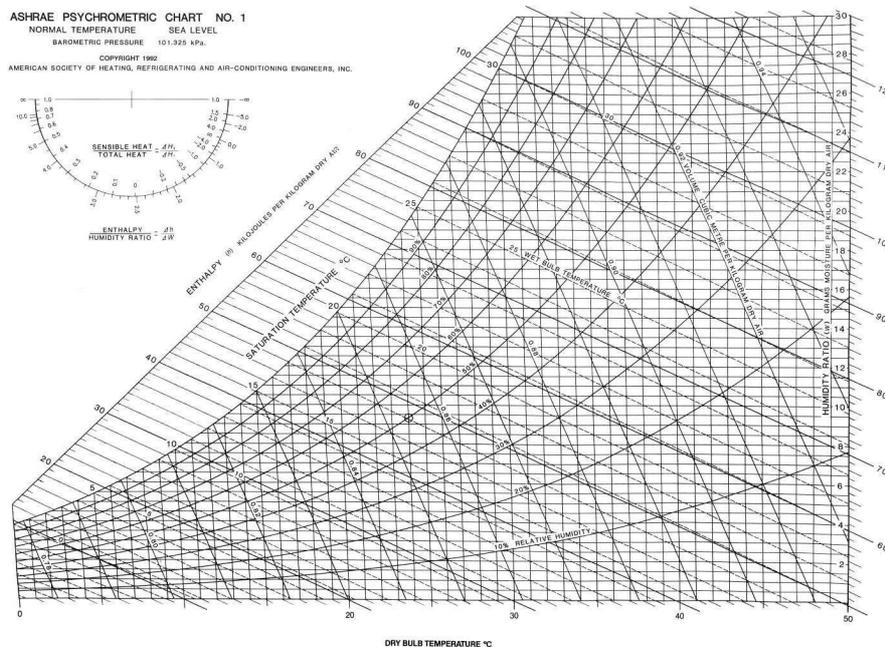


Figura 1.3. Diagrama Psicrométrico ASHRAE

Como se puede observar en la *Figura 1.4*, a partir de dos variables psicrométricas cualesquiera (por ejemplo, temperatura seca, T , y humedad, ω) es posible obtener el valor del resto de variables asociadas a ese estado concreto del aire húmedo:

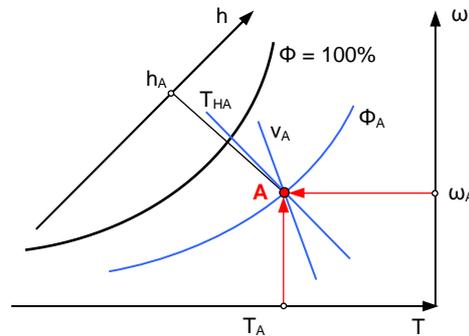


Figura 1.4. Uso del diagrama psicrométrico ASHRAE

I.3.2. Calculadores psicrométricos

Consisten en programas informáticos que calculan de forma directa las propiedades del aire húmedo.

Admiten como datos de entrada la localidad (a través de la presión total o la altitud) junto con dos variables psicrométricas cualesquiera, proporcionando como datos de salida el resto de variables.

I.4. Procesos psicrométricos

Con carácter general, un *proceso psicrométrico* se define como la operación o conjunto de operaciones por medio de las cuales se modifica el estado termohigrométrico del aire. De aquí que la psicrometría aparezca muy vinculada a las técnicas de refrigeración y climatización.

I.4.1. Balances globales en procesos de tratamiento de aire

Un balance global se establece entre las condiciones iniciales y finales del proceso, con el objetivo de cuantificar las cantidades de masa y energía que atraviesan las fronteras del sistema, y sin que nada sea postulado sobre la forma en que el proceso ha sido llevado a cabo, es decir: sin definir estados intermedios del mismo.

En la *Figura 1.5* se muestra un proceso de tratamiento de aire, esquematizado en forma de bloque. Podemos distinguir:

- Las corrientes de entrada y salida del aire húmedo, caracterizadas por el caudal másico de aire seco (m_a), la entalpía específica (h) y la humedad absoluta (ω).
- Las corrientes de entrada y salida del agua, caracterizadas por el caudal másico de agua (L) y por la temperatura (T_L).
- Los aportes o cesiones a través de la frontera del sistema, bien en forma de masa de agua (caudal másico m_L) o bien en forma de calor (Q^*).



Figura 1.5. Esquema de un proceso genérico de tratamiento de aire

El balance de masa sobre el equipo viene dado de la forma:

$$m_a \omega_1 + L_1 + m_L = m_a \omega_2 + L_2 \Rightarrow m_a (\omega_2 - \omega_1) = m_L + (L_1 - L_2)$$

es decir: el aumento de humedad del aire será debido a la cantidad de agua incorporada en forma de vapor desde la corriente L más el aporte externo de agua, m_L .

Asimismo, la ecuación del balance de energía sobre el equipo se escribe:

$$m_a h_1 + L_1 h_{L1} + m_L h_L + Q^* = m_a h_2 + L_2 h_{L2}$$

Reagrupando términos, resulta:

$$m_a (h_2 - h_1) = m_L h_L + Q^* + (L_1 h_{L1} - L_2 h_{L2})$$

es decir: el aumento de entalpía del aire húmedo es debido al calor cedido por la corriente de agua L y los aportes externos de energía (bien aporte directo de calor, Q^* , o bien energía asociada al aporte de agua, h_L).

I.4.2. Tecnología de los procesos psicrométricos

I.4.2.1. Equipos de contacto indirecto

Se componen esencialmente de un intercambiador de calor, normalmente de flujo cruzado y con superficies extendidas (esto es, superficie aleteada).

El intercambiador es alimentado en una de sus corrientes por un fluido caloportador (agua, vapor, refrigerante, etc...), que realiza una aportación de calor positiva o negativa. El balance de masa en estos equipos no incluye, por tanto, los términos asociados a la corriente L (caudal másico de agua en circulación).

En caso de que el aire fuese deshumidificado, el vapor de agua condensado (corriente m_L) sería extraída del sistema.

I.4.2.2. Equipos de contacto directo.

Poseen en su interior un dispositivo, generalmente de pulverización y a contracorriente, que posibilita el contacto directo entre el aire y el agua.

El sistema opera adiabáticamente, de forma que en el balance de energía el término Q^* es nulo. El carácter adiabático del proceso es compatible con que el agua sea calentada o enfriada, pues esta aportación energética es la asociada al término h_{L2} . En el balance de masa, el término m_L también es nulo.

También existen equipos de contacto directo sin circulación de agua. Están dotados de una bandeja o recipiente con agua, que suele albergar un serpentín de calentamiento (esta bandeja es sustituida en ocasiones por una inyección directa de vapor). En estos equipos los términos asociados a la corriente L desaparecen del balance de masa.

I.4.3. Factor característico j

De las ecuaciones de balance planteadas anteriormente es posible obtener las cantidades netas de agua, W , y de energía, Q , transferidas a la corriente de aire húmedo:

$$W = m_L + (L_1 - L_2)$$

$$Q = m_L h_L + Q^* + (L_1 h_{L1} - L_2 h_{L2})$$

De este modo, los balances de masa y de energía sobre el aire húmedo pueden escribirse de la forma:

$$m_a (\omega_2 - \omega_1) = W$$

$$m_a (h_2 - h_1) = Q$$

Si dividimos el balance de energía entre el balance de masa, se obtiene:

$$j = \frac{h_2 - h_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta h}{\Delta \omega} = \frac{Q}{W}$$

El factor j se define como la relación entre la variación de entalpía del aire y la variación de su humedad absoluta (desde el inicio hasta el final de la transformación), y se denomina *factor característico* del proceso.

I.4.4. Factor de calor sensible

Consideremos la entalpía específica del aire húmedo:

$$h = c_{p,H} T + \lambda \omega$$

expresada en función del calor específico húmedo, $c_{p,H}$. Sucede que este coeficiente puede suponerse constante, para el campo de variación de ω en climatización. Como el calor latente de vaporización, λ , también es constante, al diferenciar la expresión anterior se obtiene:

$$dh = c_{p,H} dT + \lambda d\omega = dh_{sen} + dh_{lat}$$

El término dh_{sen} representa la variación de entalpía experimentada por el aire a causa de la variación de su temperatura seca, T , permaneciendo constante el contenido de humedad, y se denomina *variación de entalpía sensible*:

$$\Delta h_{sen} = c_{p,H} \Delta T$$

El término dh_{lat} representa la transformación energética sufrida por la masa de aire como consecuencia de la modificación de su humedad absoluta, ω , permaneciendo constante la temperatura seca, y se denomina *variación de entalpía latente*:

$$\Delta h_{lat} = \lambda \Delta \omega$$

En la *Figura 1.6* se representa un proceso psicrométrico genérico 1-2 y las variaciones de entalpía sensible, latente y total asociadas a dicho proceso.

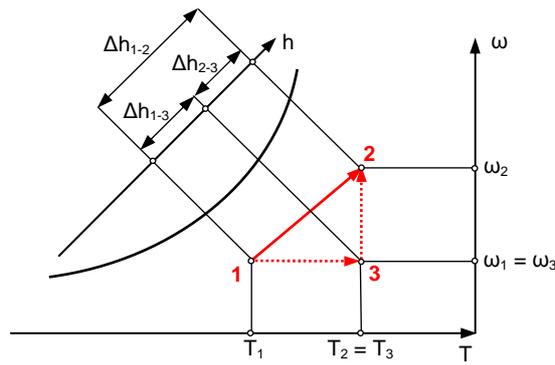


Figura 1.6. Representación gráfica de las transferencias de entalpía sensible y latente

La variación de entalpía en la transformación 1-2 es independiente del camino seguido, por lo que podemos emplear el estado intermedio 3 (véase Figura 1.6) para escribir:

$$\Delta h_{1-2} = \Delta h_{1-3} + \Delta h_{3-2}$$

Es evidente que los incrementos de entalpía sensible y latente serán los dados por, respectivamente:

$$\Delta h_{sen} = \Delta h_{1-3} = c_{p,H} \Delta T_{1-3} = c_{p,H} \Delta T_{1-2}$$

$$\Delta h_{lat} = \Delta h_{3-2} = \lambda \Delta \omega_{3-2} = \lambda \Delta \omega_{1-2}$$

De este modo, cualquier transferencia de energía durante un proceso psicrométrico entre dos estados, inicial y final, puede ser descompuesta en sus componentes sensible y latente:

$$\Delta h_T = h_{as} - h_{ae} = \Delta h_{sen} + \Delta h_{lat}$$

siendo h_{ae} y h_{as} la entalpía específica de la corriente de aire a la entrada y a la salida del equipo de tratamiento, respectivamente. El *factor de calor sensible* se define entonces como la relación entre la variación de la componente sensible de la entalpía y la variación total:

$$FCS = \frac{\Delta h_{sen}}{\Delta h_T} = \frac{c_{p,H} (T_{as} - T_{ae})}{h_{as} - h_{ae}}$$

Se trata de un coeficiente que cuantifica la fracción de calor que es intercambiado por el aire húmedo en forma sensible (variaciones de temperatura), proporcionando además una idea de la orientación del vector asociado al proceso sobre el diagrama psicrométrico: valores próximos a la unidad de *FCS* implican rectas muy horizontales (poca variación de humedad), mientras que valores muy pequeños de *FCS* implican rectas muy verticales (poca variación de la temperatura).

I.4.5. Procesos psicrométricos fundamentales

A continuación se estudian brevemente los procesos básicos de tratamiento de aire de mayor interés. Para cada uno de ellos se proporciona la evolución sobre el diagrama psicrométrico, la forma que toman los balances de masa y energía y los valores de parámetros como j o *FCS*, así como la indicación de los tipos de equipos capaces de llevar a cabo el proceso en cuestión.

1.4.5.1. Calentamiento sensible

Esta operación se lleva a cabo en equipos de contacto indirecto, normalmente intercambiadores de flujo cruzado con superficies extendidas (*batería de calor*). Las corrientes involucradas en el proceso se muestran en la *Figura 1.7*.

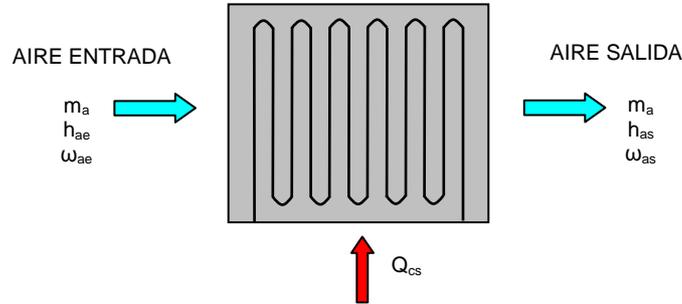


Figura 1.7. Equipo de calentamiento sensible

El aire entra en contacto con las superficies de los tubos, los cuales se encuentran a una temperatura T_S (mayor que la temperatura del aire). El aire de salida puede considerarse como una mezcla entre el aire no tratado (a la temperatura de entrada T_{ae}) y el aire en contacto con las superficies de los tubos (a la temperatura T_S), tal y como se muestra en la *Figura 1.8*:

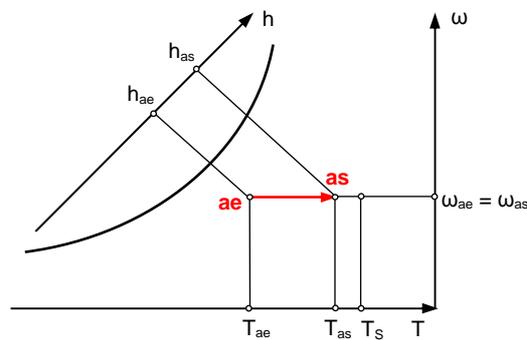


Figura 1.8. Proceso de calentamiento sensible

Tras este proceso, el aire tratado no experimenta variación en su humedad absoluta. Por esto, los balances de masa y energía se reducen a:

$$\omega_{ae} = \omega_{as} \Rightarrow \Delta\omega = 0$$

$$Q_{cs} = m_a (h_{as} - h_{ae}) = m_a c_{p,H} \Delta T$$

donde Q_{cs} es el calor transferido en el equipo por el fluido caloportador en el proceso de calentamiento sensible. De la forma que toma el balance de masa, es evidente que no existe componente latente en la variación de entalpía específica:

$$\Delta\omega = 0 \Rightarrow \Delta h_{lat} = 0 \Rightarrow \Delta h_T = h_{as} - h_{ae} = \Delta h_{sen}$$

Para este proceso los factores característico y de calor sensible vendrán dados, respectivamente, como:

$$\Delta h_{lat} = 0 \Rightarrow j = \frac{\Delta h_r}{\Delta \omega} = +\infty ; FCS = \frac{\Delta h_{sen}}{\Delta h_r} = 1$$

1.4.5.2. Enfriamiento y deshumidificación

También se lleva a cabo en equipos de contacto indirecto: es el proceso que experimenta el aire húmedo a su paso por una *batería de frío* (intercambiador de flujo cruzado con aletas), en la cual la temperatura superficial de los conductos, T_S , es inferior a la temperatura de rocío del aire, T_R .

El vapor de agua presente en el aire condensa, formando una capa de condensado sobre la superficie de intercambio; existe, pues, transferencia conjunta de calor y masa, entre el aire húmedo y la capa de condensado. Las corrientes involucradas en el proceso se muestran en la *Figura 1.9*:

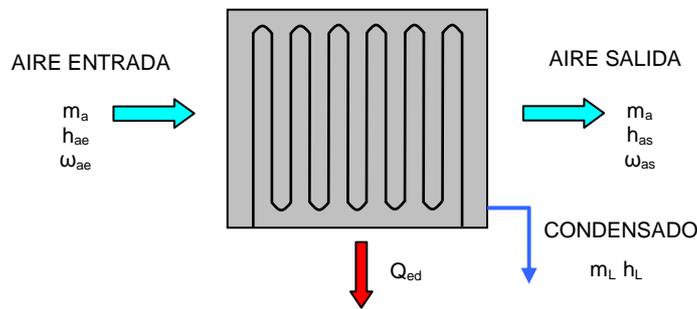


Figura 1.9. Equipo de enfriamiento y deshumidificación.

Si Q_{ed} es el calor extraído en la batería en el proceso de enfriamiento y deshumidificación del aire, las ecuaciones de balance de masa y energía quedan, respectivamente:

$$m_L = m_a (\omega_{ae} - \omega_{as})$$

$$Q_{ed} + m_L h_L = m_a (h_{ae} - h_{as})$$

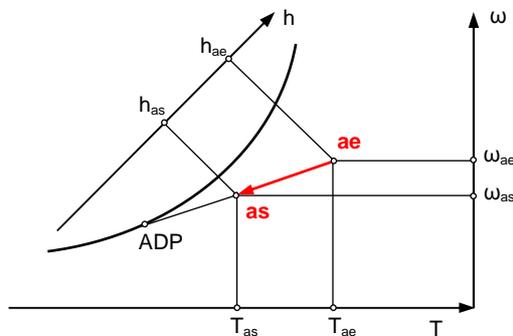


Figura 1.10. Proceso de enfriamiento y deshumidificación

La variación de entalpía del aire que circula a través de la batería es debida, esta vez, a la variación de sus dos componentes (véase *Figura 1.10*):

- Disminución de la componente latente: el aire pierde humedad porque parte del vapor de agua disuelto en el aire condensa (caudal de condensado m_L recogido en la salida de agua precipitada de la batería) sobre la superficie de intercambio:

$$\omega_{ae} > \omega_{as} \Rightarrow \Delta h_{lat} < 0$$

- Disminución de la componente sensible: el aire se enfría, hasta una temperatura intermedia entre el *ADP* (temperatura de la película de condensado sobre los tubos, que es alcanzada por el aire en contacto con dicha película) y la temperatura del aire a la entrada, T_{ae} (ésta es la temperatura a la que permanece la parte de la corriente de aire que no ha entrado en contacto con la pared de los tubos).

De este modo, se tiene:

$$\Delta h_T = h_{ae} - h_{as} = \Delta h_{sen} + \Delta h_{lat}$$

y los factores característico y de calor sensible vendrán dados por:

$$j = \frac{\Delta h_T}{\Delta \omega} > 1 \quad ; \quad FCS = \frac{\Delta h_{sen}}{\Delta h_T} < 1$$

1.4.5.3. Humidificación isoterma

Consiste en la inyección de vapor de agua en la corriente de aire. El tratamiento se lleva a cabo en equipos de contacto directo, con inyectores de vapor y sin recirculación de agua (véase *Figura 1.11*).

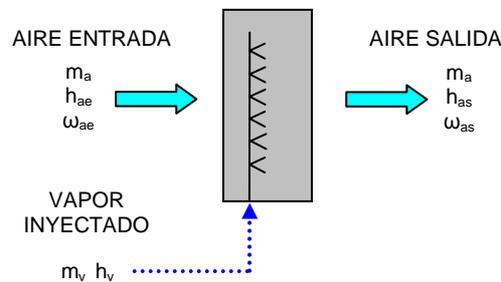


Figura 1.11. Equipo de humidificación.

Como se observa en la *Figura 1.12*, el aire aumenta su contenido de humedad a su paso por el equipo, manteniendo constante su temperatura seca, es decir: el único aporte de energía es en forma de vapor de agua incorporado a la corriente, y dado por el caudal másico m_v .

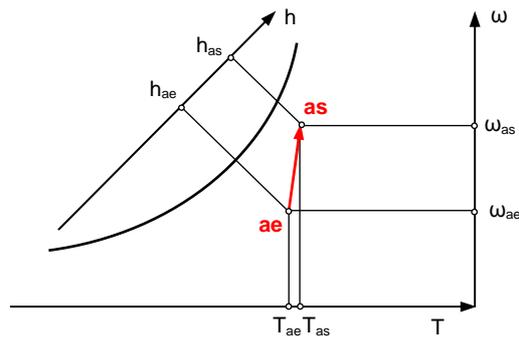


Figura 1.12. Proceso de humidificación isoterma

Por esto, los balances de masa y energía toman la forma:

$$m_v = m_a (\omega_{as} - \omega_{ae})$$

$$m_v h_v = m_a (h_{as} - h_{ae})$$

donde h_v no es más que la entalpía específica del vapor de agua correspondiente al estado en que éste es inyectado en la corriente de aire. Reagrupando estas expresiones y eliminando el caudal másico de vapor inyectado se obtiene el *factor característico j*, el cual nos da la pendiente del proceso:

$$j = \frac{\Delta h_T}{\Delta \omega} = \frac{h_{as} - h_{ae}}{\omega_{as} - \omega_{ae}} = h_y$$

El pequeño incremento en entalpía sensible se debe exclusivamente a la transferencia de calor por convección entre la corriente de vapor y la corriente de aire. En efecto, el vapor se encontrará a un nivel de temperatura superior al de la corriente de aire, siendo inevitable la existencia de un flujo de calor asociado a dicho gradiente.

