

# INTERACCIÓN AIRE AGUA I

## 1. INTRODUCCIÓN

Bajo la denominación de operaciones de interacción aire agua se incluyen tres operaciones que se basan en el transporte de vapor de agua entre aire húmedo y agua líquida:

- *Humidificación de aire*: finalidad, incremento de la humedad del aire
- *Deshumidificación de aire*: finalidad, disminución de la humedad del aire
- *Enfriamiento de agua*: finalidad, disminuir la temperatura del agua, mediante la evaporación de una parte de ella y, por tanto, la humidificación del aire

Las dos primeras operaciones pueden considerarse en conjunto como de  *acondicionamiento de aire*. De las tres, solo la deshumidificación puede considerarse realmente una operación de separación.

Aunque en la mayor parte de los casos estas operaciones se llevan a cabo con el sistema aire-agua, en general pueden tratarse como operaciones de interacción entre un gas inerte, no condensable, y un líquido que puede evaporarse. Los principios que rigen estas operaciones son comunes, aunque el sistema aire agua presenta ciertas peculiaridades que conducen a ecuaciones singulares, que se indicarán más adelante.

El *secado de sólidos* es una operación relacionada con los procesos de interacción aire agua, aunque debe tratarse por separado para tener en cuenta el efecto del sólido.

El acondicionamiento de aire, es decir, la regulación de su humedad y temperatura, es importante tanto a nivel doméstico (logro de unas condiciones más confortables), como industrial (locales con atmósfera controlada para la conservación de alimentos, aire para secaderos, etc.). También debe indicarse que la regulación de las propiedades del aire, sobre todo de su temperatura, puede lograrse también mediante sistemas de generación de frío basados en ciclos de compresión expansión de gases licuables.

El *enfriamiento de agua* resulta esencial en la industria para la reutilización del agua de refrigeración empleada en sistemas de intercambio de calor, dados los cada vez más escasos recursos de agua dulce y la elevada demanda de agua con este fin (se estiman unas necesidades de  $2 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{día}$ ).

### Esquema del tema:

- Propiedades del aire húmedo
- Humidificación de aire. Humidificación adiabática
- Termómetro húmedo
- Equipo para operaciones de humidificación
- Diseño de columnas
- Coeficientes de transporte

## 2. PROPIEDADES DEL AIRE HÚMEDO

Grosvenor (1908) definió diversas magnitudes utilizadas para el estudio de este sistema referidas a la unidad de masa (1 kg) de aire seco, lo que facilita su manejo. Así se utilizan:

### **2.1. Magnitudes relacionadas con la cantidad absoluta de humedad contenida en el aire**

a). *Presión parcial del vapor presente en el aire, p.*

b). *Humedad absoluta, X, kg vapor/kg de aire seco.*

Está directamente relacionada con la presión parcial del vapor. Considerando comportamiento de gas ideal, hipótesis usualmente válida, dadas la presión total y temperatura a que suelen operar estos sistemas, se tiene:

$$X = \frac{M_v}{M_a} \frac{p}{\pi - p} \quad [1]$$

siendo  $M_v$  y  $M_a$  los pesos moleculares del vapor y medio del aire, respectivamente, y  $\pi$  la presión total. Para el sistema aire-agua ( $M_v=18$ ;  $M_a = 28,9$ ) [1] se reduce a:

$$X = 0,622 \frac{p}{\pi - p} \quad [1a]$$

De [1a]:

$$p = \frac{\pi \cdot X}{0,622 + X} \quad [2]$$

Para un aire saturado de humedad,  $p = p_s$  y de [1b]:

$$X_s = 0,622 \frac{p_s}{\pi - p_s} \quad [1b]$$

En el caso del agua, existen diversas ecuaciones para expresar la presión de vapor en función de la temperatura. Aunque existen otras expresiones obtenidas por ajuste de los datos experimentales más complejas, la ecuación de Antoine:

$$\ln p_s = 20,6088 - \frac{5200,13}{T} \quad [3]$$

en la que  $p_s = \text{mm Hg}$  y  $T = \text{K}$ , proporciona buenos resultados.

## **2.2. Magnitudes relacionadas con el grado de saturación de un aire**

a). *Humedad porcentual,  $X_R$ .*

Razón entre la humedad absoluta del aire,  $X$ , y la humedad de saturación,  $X_s$ , expresada porcentualmente. De [1] y [1b]:

$$X_R = \frac{X}{X_s} 100 = \frac{p}{p_s} \frac{\pi - p_s}{\pi - p} 100 \quad [4]$$

b). *Humedad relativa,  $\varphi$*

Razón entre la presión parcial del vapor en el aire,  $p$ , y la presión de saturación,  $p_s$ :

$$\varphi = \frac{p}{p_s} 100 \quad [5]$$

(puede expresarse en porcentaje o en tanto por uno). Comparando [4] y [5], y teniendo en cuenta que para un aire no saturado,  $p_s > p$ , la humedad porcentual es siempre menor que la humedad relativa. No obstante, en muchos casos  $\Pi \gg p$ ,  $p_s$ , con lo que ambos valores no difieren mucho.

c). *Punto de rocío,  $T_R$ .*

Temperatura a la que hay que enfriar un aire sin variar su presión total para que se encuentra saturado, es decir, la temperatura para la que la presión de vapor del agua igual a la presión parcial del agua en el aire húmedo.

### 2.3. Otras propiedades del aire húmedo

a). *Volumen húmedo,  $v$ ,  $m^3.kg^{-1}$ .*

Volumen que ocupa 1 kg de aire seco más la humedad que contiene. Si se cumple la ley de los gases perfectos,

$$v = \left( \frac{1}{28,9} + \frac{X}{18} \right) \frac{R.T}{\pi} \quad [6]$$

Para un aire saturado,

$$v_s = \left( \frac{1}{28,9} + \frac{X_s}{18} \right) \frac{R.T}{\pi} \quad [6a]$$

b). *Calor húmedo,  $s$ ,  $kJ.(kg \text{ aire seco})^{-1}.K^{-1}$ .*

Calor específico del aire húmedo: calor necesario para elevar 1 K la temperatura de 1kg de aire seco más la humedad que le acompaña. Entre 10 y 60°C, intervalo usual en las operaciones de interacción aire-agua, los calores específicos de aire y agua vapor pueden considerarse constantes: aire = 1,00  $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ; agua vapor = 1,88  $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ . Así pues,

$$s = 1,00 + 1,88.X \quad [7]$$

c). *Entalpía del aire húmedo,  $H$ ,  $kJ.(kg \text{ aire seco})^{-1}$ .*

Entalpía específica de 1 kg de aire seco más la humedad que le acompaña. Como estado de referencia se toma 0°C, 101,3 kPa y agua en estado líquido. Suponiendo la constancia citada para los calores específicos de aire y agua vapor y teniendo en cuenta la entalpía de vaporización del agua a 0°C, 2500  $kJ.kg^{-1}$ ,

$$H = 1,00.t + (2500 + 1,88.t).X = (1,00 + 1,88.X).t + 2500.X = [8]$$

$$= s.t + 2500.X$$

En rigor, debería calcularse utilizando las tablas de entalpía del vapor de agua, que toman como referencia agua líquida en el punto triple, 0,01°C y 600 Pa; sin embargo, la diferencia de entalpías del agua vapor en ambos estados de referencia es tan solo de 0,93  $kJ.kg^{-1}$ , por lo que puede aplicarse la ecuación [8] sin gran error.

### 2.4. Diagramas de humedades o psicrométricos

Varias propiedades del aire húmedo pueden representarse en forma gráfica. Dos son los diagramas utilizados: el diagrama psicrométrico de Grosvenor y el diagrama de Mollier.

- Diagrama de humedades de Grosvenor
- Diagrama de Mollier

Su uso ha perdido importancia, al poder efectuar cálculos muy precisos mediante las ecuaciones anteriores con ayuda de ordenadores.

a). *Diagrama de humedades (Fig. 1).*

Representa la humedad absoluta,  $X$ , frente a la temperatura,  $t$ . En el diagrama se representan líneas de humedad relativa constante, que se trazan fácilmente combinando las ecuaciones [1] y [5]:

$$X = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{\pi - \varphi \cdot p_s} \quad [9]$$

Fijado un valor de  $\varphi$ , se dan valores a  $t$ , se calcula  $p_s$  (ecuación [3]) y se obtiene el valor de  $X$  correspondiente. La curva de  $\varphi = 1$  corresponde al aire saturado de humedad, correspondiendo la zona situada a la izquierda de la misma al aire sobresaturado.

Las líneas inclinadas que aparecen en el diagrama son líneas isoentálpicas o de humidificación adiabática que se explicarán más adelante.

*b). Diagrama de Mollier (Fig. 2).*

Representa el producto  $s \cdot t$  en ordenadas frente a la humedad absoluta,  $X$ , en abscisas. Análogamente al diagrama de humedades, se representan curvas para distintos valores de la humedad relativa. Para trazar la curva para un valor dado de  $\varphi$ , se dan valores a la temperatura, se calcula la presión de saturación,  $p_s$  (ec. [3]), se obtiene  $X$  (ec. [9]), se calcula  $s$  (ec. [7]) y se representa el punto correspondiente de la curva,  $st-X$ .

Si se multiplican los dos miembros de la ec. [7] por  $t$ , se obtiene:

$$s \cdot t = 1,00 \cdot t + 1,88 \cdot t \cdot X \quad [10]$$

Para un valor dado de  $t$  la ec. [10] representa en el diagrama de Mollier una recta isoterma, de pendiente  $1,88 \cdot t$ . Así pues, el conjunto de líneas isotermas es un haz de rectas de pendiente positiva, creciente con la temperatura.

Finalmente, la ecuación [8] indica que para un valor dado de  $H$  (línea isoentálpica), se obtiene una recta de pendiente  $-2500$  y ordenada en el origen  $H$ , con lo que el conjunto de líneas isoentálpicas es un haz de rectas paralelas.

### 3. HUMIDIFICACIÓN DE AIRE

#### 3.1. Humidificación no adiabática

Considérese el sistema que se muestra en la Figura 3, en el que una corriente de aire con caudal  $m$ ,  $(\text{kg aire seco}) \cdot \text{s}^{-1}$ , temperatura  $t_1$  y humedad absoluta  $X_1$  se introducen en una cámara en la que se pone en contacto con agua a temperatura  $T$ , se humidifica y abandona la cámara con temperatura  $t_2$  y humedad  $X_2$ . Se repone una cantidad de agua igual al caudal evaporado,  $m(X_2 - X_1)$ , a la misma temperatura  $T$ . Sea  $Q$  el caudal de calor introducido al sistema, y  $Q_p$  el caudal de calor perdido a través de las paredes del recinto.

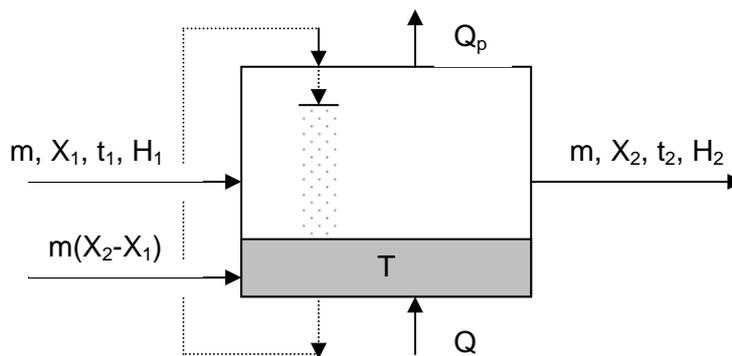


Figura 3. Humidificación de aire no adiabática

Un balance entálpico alrededor del sistema, tomando como temperatura de referencia  $0^\circ\text{C}$ , conduce a:

$$m.H_1 + m(X_2 - X_1)C_L.T + Q = m.H_2 + Q_p$$

Dividiendo por la cantidad de agua vaporizada,  $m(X_2-X_1)$ , denominando  $q = Q/m(X_2-X_1)$  y  $q_p=Q_p/m(X_2-X_1)$  y reordenando:

$$q + C_L.T - q_p = q + q_0 = \frac{H_2 - H_1}{X_2 - X_1} = \frac{s_2.t_2 - s_1.t_1}{X_2 - X_1} + 2500 \quad [11]$$

ecuación representativa de la humidificación de aire no adiabática.

### 3.2. Humidificación adiabática

En este caso, Figura 4, no hay aporte externo de calor ni pérdidas a través de las paredes. La temperatura del agua descende, ya que ha de aportarse la entalpía de vaporización del agua que se transfiere al aire. La humedad y temperatura del aire a la salida dependerán únicamente del tiempo de contacto entre el aire y el agua.

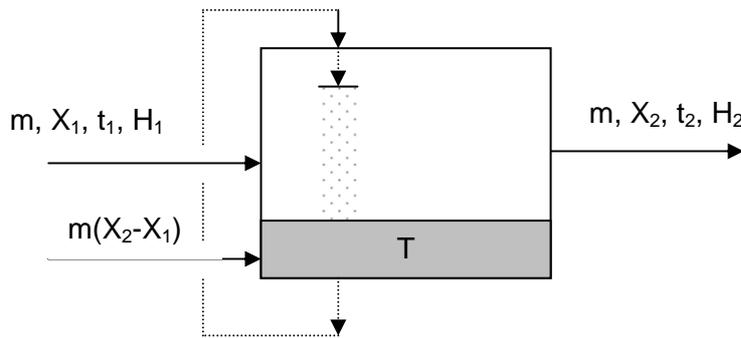


Figura 4. Humidificación de aire adiabática

De modo riguroso, el balance de entalpía debería plantearse en estado no estacionario; sin embargo, si se considera una masa de agua dentro del recinto relativamente grande, puede admitirse un estado cuasiestacionario. En tal caso, teniendo en cuenta que  $q = 0$ ,  $q_p = 0$ , la ecuación [11] se reduce a:

$$C_L.T = \frac{H_2 - H_1}{X_2 - X_1} = \frac{s_2.t_2 - s_1.t_1}{X_2 - X_1} + 2500 \quad [12]$$

### 3.3. Saturación adiabática

Supóngase que el contacto del aire con el agua en la cámara de humidificación es muy prolongado y que se alcanza un equilibrio entre el agua y el aire de salida, saturado de humedad, siendo la temperatura final de ambos  $t_s$ . En ese caso, la ecuación [12] puede escribirse:

$$C_L.t_s = \frac{H_s - H_1}{X_s - X_1} = \frac{s_s.t_s - s_1.t_1}{X_s - X_1} + 2500 \quad [13]$$

De la ecuación [7] se deduce:

$$s_s = s_1 + 1,88(X_s - X_1) \quad [14]$$

Por otra parte, se cumple la igualdad

$$2500 + 1,88t_s = C_L.t_s + r_s \quad [15]$$

De [13], [14] y [15], se deduce finalmente,

$$C_L.t_s = \frac{[s_1 + 1,88(X_s - X_1)]t_s - s_1.t_1}{X_s - X_1} + 2500 = \frac{(X_s - X_1)[2500 + 1,88t_s] - s_1(t_1 - t_s)}{X_s - X_1}$$

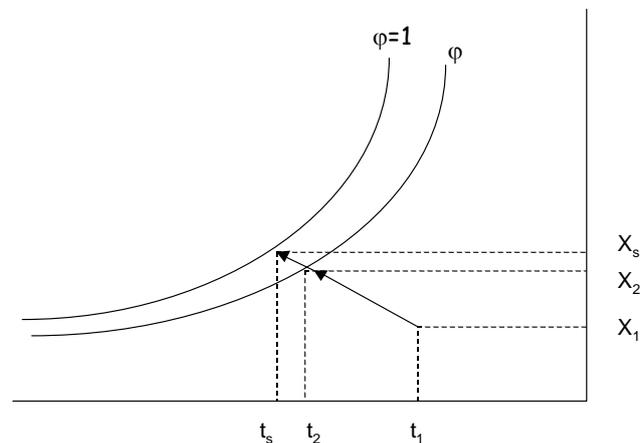
$$\therefore \frac{X_s - X_1}{t_s - t_1} = -\frac{s_1}{r_s} \quad [16]$$

### 3.4. Representación gráfica de los procesos de humidificación no adiabática y adiabática

#### a). Diagrama de humedades

Un proceso de saturación adiabática desde unas condiciones iniciales del aire  $X_1, t_1$  hasta unas finales  $X_s, t_s$  debe cumplir la ecuación [16]. El calor húmedo  $s_1$  depende del valor  $X_1$ . Por tanto, en el diagrama  $X-t$  la ecuación de saturación adiabática [16] representa una curva. Sin embargo,  $s$  varía relativamente poco con  $X$ . Por ello, prácticamente es una recta de pendiente negativa,  $-s_1/r_s$ , que tiene como parámetro la temperatura de saturación adiabática correspondiente y que comienza en el punto representativo del aire inicial. Algunos textos (McCabe-Smith) distorsionan levemente la escala de ordenadas para que las líneas de humidificación sean rectas

Si se trata de una humidificación adiabática desde un valor inicial  $X_1, t_1$  hasta una humedad final  $X_2$ , el proceso seguiría la línea adiabática entre los dos puntos correspondientes.



#### b). Diagrama de Mollier

En el diagrama de Mollier  $st-X$ , la ecuación [11] representa la ecuación de una recta de pendiente  $q+q_0-2500$  que une los puntos inicial y final. La suma  $q+q_0$  expresa el calor neto que hay que aportar para conseguir la humidificación en esas condiciones. Para calcular gráficamente el valor  $q+q_0$  se dispone en el diagrama de Mollier una escala auxiliar que se extiende por tres lados del mismo. Para su uso se traza por el origen una recta paralela a la que une los puntos inicial y final, y se lee sobre la escala el valor  $q+q_0$ . Para construir la escala, se trazan los ejes a usar, se toman parejas de valores inicial y final, se calcula  $q+q_0$  con la ecuación [11] y se marca sobre la escala siguiendo el procedimiento indicado (recta paralela que pasa por el origen). (Evidentemente, en la actualidad resulta más sencillo aplicar directamente la ecuación [11]).

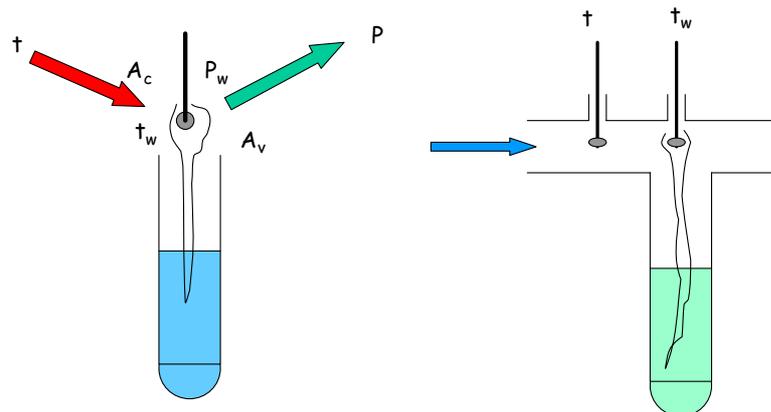
La humidificación adiabática, conforme a la ecuación [12], sigue una recta de pendiente  $C_L T-2500$ . Dado que el valor de  $C_L T$  es del orden de  $60-100 \text{ kJ.kg}^{-1}$ , puede despreciarse frente a 2500, de tal modo que, prácticamente los procesos de humidificación adiabática son isoentálpicos y por tanto siguen las rectas isoentálpicas trazadas en el diagrama de Mollier.

## 4. TERMÓMETRO HÚMEDO. TEMPERATURA HÚMEDA

### 4.1. Teoría del termómetro húmedo

Un termómetro húmedo es un termómetro o par termoelectrónico cuyo bulbo o soldadura está recubierto por un pabito de tela que se mantiene empapado con un líquido (agua generalmente, aunque puede ser cualquier otro líquido evaporable, como benceno, etc.).

Si se sitúa un termómetro húmedo en el seno de una corriente de aire húmedo no saturado que se encuentra a temperatura “seca”,  $t$ , ocurren los siguientes fenómenos (admítase que el líquido se encuentra inicialmente a una temperatura próxima a  $t$ , aunque el resultado final es el mismo, cualquiera que sea la temperatura inicial del líquido) (Figura )::



i). El líquido comienza a evaporarse como consecuencia de la fuerza impulsora ( $p_w - p$ ), tomando la entalpía de vaporización del propio líquido, que como consecuencia empieza a enfriarse. Sea  $t_w$  la temperatura del líquido en cada instante.

ii). Se inicia un flujo de calor desde el aire hacia el líquido, provocado por la diferencia de temperaturas ( $t - t_w$ ). Este flujo puede tener lugar por convección y por radiación.

iii). Al disminuir  $t_w$ , se hace menor  $p_w$  y, por tanto, la fuerza impulsora del flujo de vapor hacia el aire. También aumenta la fuerza impulsora ( $t - t_w$ ) del flujo de calor.

iv). Para un cierto valor de  $t_w$  se alcanzará un estado estacionario, en el cual el flujo de calor que recibe el líquido desde el aire es igual a la entalpía necesaria para la vaporización del líquido que se transfiere en esas condiciones hacia el aire. La temperatura  $t_w$  que corresponde a dicho estado estacionario, y que permanece invariable, se denomina **temperatura húmeda**.

A este mismo estado estacionario se llega igualmente si la temperatura inicial del agua es diferente de la del aire. Si la temperatura del agua es mayor que la del aire, se transferirá agua hacia el aire, enfriándose como en el caso anterior, pero además se transmitirá calor por convección-radiación del agua al aire. Por tanto el agua se enfriará por dos causas. Al cabo de un cierto tiempo se igualará su temperatura a la del aire y partir de ese instante continuará el proceso como en el caso anterior.

Si la temperatura del agua es inferior a la del aire pueden darse dos situaciones: que sea a su vez superior o inferior a la temperatura húmeda del aire. En el primer caso la situación es idéntica a la descrita inicialmente: transferencia del vapor del agua hacia el aire y transmisión de calor del aire hacia el agua. En el segundo caso, el caudal de calor

transferido hacia el bulbo sería superior al calor asociado con el agua evaporada, con lo que el bulbo se calentaría hasta alcanzar la misma temperatura de equilibrio.

Cuando se alcanza la temperatura húmeda, se cumplen las siguientes ecuaciones (se aplican al caso del agua):

- Caudal de agua vaporizada y transferida hacia el aire:

$$M_v = k_g A_v (p_w - p) \quad [17]$$

donde  $M_v$  kmol.s<sup>-1</sup> y  $A_v$ , superficie disponible para la transferencia de materia, m<sup>2</sup>. Si  $r_w$  es la entalpía de vaporización del agua a la temperatura  $t_w$ , kJ.kg<sup>-1</sup>, la entalpía necesaria para vaporizar dicho caudal será:

$$Q_v = 18r_w k_g A_v (p_w - p) \quad [18]$$

- Caudal de calor recibido del aire:

$$Q_T = (h_c + h_r) A_T (t - t_w) \quad [19]$$

donde  $h_c$  y  $h_r$  son los coeficientes de transmisión de calor desde el aire al agua por convección y radiación, respectivamente, kW.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>. El coeficiente de radiación  $h_r$  se define como:

$$h_r = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon (T^4 - T_w^4)}{t - t_w} \quad [20]$$

donde  $T$  y  $T_w$  son las temperaturas absolutas del aire seco y húmedo, respectivamente. La emisividad,  $\varepsilon$ , para un bulbo recubierto y mojado tiene un valor próximo a la unidad (~0,95).

Si se define  $\alpha = (h_c + h_r) / h_c$  y se supone que  $A_v = A_T$ , igualando para el estado estacionario  $Q_v$  y  $Q_T$ , ecuaciones [18] y [19]:

$$p_w - p = \frac{\alpha h_c}{18k_g r_w} (t - t_w) = J(t - t_w) \quad [21]$$

donde

$$J = \frac{\alpha h_c}{18k_g r_w} \quad [22]$$

es un coeficiente que depende de las condiciones de operación, concretamente de los valores de  $h_c$ ,  $h_r$ ,  $k_g$  y  $r_w$ . De estas variables,  $r_w$  puede suponerse constante para pequeñas variaciones de  $t_w$  y  $h_r$  solo depende de los valores de  $t$  y  $t_w$ . Por el contrario, los coeficientes  $h_c$  y  $k_g$  varían sensiblemente con la velocidad relativa del aire respecto al bulbo, aumentando ambos coeficientes de modo similar al incrementarse dicha velocidad. Además, al aumentar la velocidad el coeficiente  $\alpha$  tiende a la unidad, ya que  $h_c$  crece mientras que  $h_r$  se mantiene constante, tal como se muestra en la Figura , y el coeficiente  $J$  de la ecuación [22] se mantiene constante. Para el sistema aire-agua con  $V > 5$  m.s<sup>-1</sup>,  $J = 66$  Pa.K<sup>-1</sup> (0,5 mm/°C).

Así pues, conocida la temperatura de un aire, midiendo su temperatura húmeda en las citadas condiciones de velocidad puede determinarse la presión parcial de vapor de agua en el mismo mediante la ecuación [21], y a partir de ella todas sus propiedades.

Todo lo anterior es aplicable a líquidos diferentes del agua, con los oportunos cambios en los valores de las propiedades y de la constante  $J$ .

Carrier observó que la temperatura húmeda de un aire,  $t_w$ , definida por la ecuación [21] coincidía prácticamente con la temperatura de saturación adiabática del mismo,  $t_s$ , definida por la ecuación [16], proponiendo una explicación inicial a este hecho. Posteriormente, Lewis y col. ( ) demostraron la razón de dicha coincidencia. Para ello modificaron la ecuación [21], expresando la diferencia ( $p_w - p$ ) en función de las humedades absolutas y sustituyendo el coeficiente  $k_g$  en función de  $k'$  (coeficiente definido con una fuerza impulsora ( $X_w - X$ ), de tal manera que:

$$k' = 29.k_g \cdot (\pi - p)_{ml}$$

Se llega así a la expresión:

$$\frac{X_w - X}{t_w - t} = -\frac{\alpha h_c}{k' r_w} \quad [23]$$

A partir de muchos datos experimentales obtenidos con el sistema aire agua con velocidades del aire de 4-10 m.s<sup>-1</sup> se obtuvo un valor medio:

$$\frac{h_c}{k' s} = 0,945 \quad [24]$$

De [24] y [25], tomando un valor medio  $\alpha = 1,05$ ,

$$\frac{X_w - X}{t_w - t} = -(1,05)(0,945) \frac{s}{r_w} \approx -\frac{s}{r_w} \quad [25]$$

ecuación idéntica a [16], lo que demuestra la coincidencia de las temperaturas húmeda y de saturación adiabática para el sistema aire agua en las condiciones mencionadas.

Si la velocidad del aire es inferior a 4 m.s<sup>-1</sup> y también si la humedad del aire es muy elevada ambas temperaturas pueden ser diferentes. Por otra parte, esta coincidencia no se da en otros sistemas para los que la razón  $h_c/k'.s$  sea diferente de la unidad.

#### 4.2. Razón psicrométrica

La razón  $h_c/k'.s$  se denomina razón psicrométrica. Para sistemas diferentes del aire-agua dicha razón puede evaluarse a partir de expresiones para los coeficientes individuales  $h_c$  y  $k'$ . Utilicemos como ejemplo la analogía de Colburn:

$$j_H = j_D = \frac{f}{2} \quad \therefore \quad \frac{h_c}{\rho c_p V} \left( \frac{c_p \mu}{K} \right)^{2/3} = \frac{k_c}{V} \left( \frac{\mu}{\rho D_v} \right)^{2/3} = \frac{f}{2} \quad [26]$$

Si se hace  $c_p = s$ ;  $\rho = 28,95(\pi-p)_{ml}/RT$  (según la ley de gases, supuesto que el gas inerte es aire) y  $k_c = k'RT/28,95(\pi-p)_{ml}$ :

$$\frac{h_c}{k' s} = \left( \frac{\mu}{\rho D_v} \right)^{2/3} = \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} = \left( \frac{K}{\rho s D_v} \right)^{2/3} = Le^{2/3} \quad [27]$$

Bedingfield y Drew ( ) llevaron a cabo experimentos de sublimación de sólidos en gases, obteniendo la siguiente correlación:

$$\frac{h_c}{k' s} = Le^{0,56} \quad [28]$$

Así pues, en general puede afirmarse que para un sistema gas inerte-líquido evaporable cualquiera se cumple que:

$$\frac{h_c}{k' s} = f(Le) \quad [29]$$

En el caso del sistema aire-agua los números de Schmidt y Prandtl son prácticamente coincidentes, con lo que el número de Lewis es ~1 y se justifican todos los resultados mencionados anteriormente.