

Interacción aire - agua.  
Termómetro húmedo

## Objetivos de la práctica

- Obtener experimentalmente la denominada “temperatura húmeda”.
- Estudiar las magnitudes psicrométricas de dos corrientes de aire húmedo, llevando a cabo su cálculo analítico y su determinación gráfica mediante el diagrama psicrométrico.

## Fundamento teórico

Las operaciones que se llevan a cabo en la industria química se pueden clasificar según la propiedad (cantidad de movimiento, energía, materia) que cambia de manera más significativa durante dichas operaciones. El transporte de estas propiedades puede generalizarse formalmente mediante una ecuación experimental del tipo de la ley de Ohm, expresada de la forma:

$$\Phi = \frac{\Pi_A - \Pi_B}{\frac{1}{k}}$$

siendo:

- $\Phi$ :** **Densidad de flujo**, cantidad de propiedad  $\Pi$  transportada por unidad de superficie y unidad de tiempo.
- $\Pi_A - \Pi_B$ :** **Fuerza impulsora**, o diferencia de concentración de propiedad entre los dos puntos en que ésta se transporta.
- $1/k$ :** **Resistencia** opuesta por el sistema al transporte de propiedad; **k** se denomina “coeficiente de transporte”.

De forma más concreta, cuando la energía se transmite a través de un fluido debido al movimiento de éste, se dice que existe un mecanismo de transmisión de calor por convección, cuya densidad de flujo, **q**, puede expresarse de la forma:

$$q \left[ \frac{kJ}{m^2 s} \right] = h_c (T_A - T_B)$$

siendo **h<sub>c</sub>** el denominado “coeficiente individual de transmisión de calor por convección”.

En la transmisión de calor por convección muchas veces se produce de forma simultánea la transmisión de calor por radiación, mecanismo por el que la energía se

transporta en forma de radiación electromagnética, emitida por cualquier sustancia que se encuentra a una temperatura mayor a la del cero absoluto (-273 °C). Ello hace que la ecuación anterior tome la forma:

$$q \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \text{ s}} \right] = (h_C + h_R) (T_A - T_B)$$

siendo en este caso  $h_R$  el denominado “coeficiente individual de transmisión de calor por radiación”.

Por otra parte, cuando se produce el transporte de materia a través de una fase líquida debido a la existencia de gradientes de concentración, la densidad de flujo de materia puede expresarse de la forma:

$$N \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{ s}} \right] = k_L (C_A - C_B)$$

donde  $k_L$  es el “coeficiente individual de transferencia de materia en la fase líquida”, o bien, si se trata de una fase gaseosa:

$$N \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{ s}} \right] = k_G (P_A - P_B)$$

donde  $k_G$  es el “coeficiente individual de transferencia de materia en la fase gaseosa”

Aunque en muchas de las operaciones predomina el transporte de una propiedad, por lo que basta analizar ésta para obtener una representación del sistema, en ciertas operaciones la importancia de los dos fenómenos, transmisión de calor y transferencia de materia es del mismo orden de magnitud, influenciándose mutuamente, de forma que hay que analizarlos conjuntamente para obtener una correcta descripción del comportamiento del sistema. Dentro del conjunto de operaciones con estas características están aquellas que involucran el sistema aire - vapor de agua: humidificación de aire, deshumidificación de aire, refrigeración de agua por evaporación y secado de sólidos. Así pues, resultará de gran interés el estudio de las propiedades de las mezclas aire - vapor de agua o “**Psicrometría**” (“*medida del frío*”).

La influencia simultánea del transporte de las dos propiedades, energía y materia, se manifiesta claramente cuando se estudia la evaporación de una pequeña masa de agua inmersa en una corriente continua de aire, en condiciones adiabáticas. Si la masa de agua es pequeña en comparación con la de aire, las variaciones en las propiedades de éste serán despreciables y el efecto del proceso se manifestará sólo

en el agua.

Si inicialmente la corriente de aire húmedo no saturado está a una temperatura próxima a la de la masa de agua, ésta tenderá a evaporarse; como el proceso es adiabático, el calor necesario para esta evaporación lo aportará el calor latente de la masa de agua que, por tanto, se enfriará. Una vez que la temperatura del agua sea inferior a la del aire, se producirá una transmisión de calor sensible desde éste hacia el agua, debido al gradiente de temperatura. En un momento dado se alcanzará un régimen estacionario de equilibrio dinámico, para una determinada temperatura del agua,  $t_w$ , en el que el calor necesario para evaporar el agua (de calor latente  $\lambda$ ) y calentar el vapor (de calor específico  $C_p$ ) hasta la temperatura del aire,  $t$ , se equilibra con el calor sensible que se transmite desde el aire al agua (por convección y radiación):

$$Q_{\text{agua} \rightarrow \text{aire}} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = W\lambda + WC_p (t - t_w)$$

donde  $W$  es la masa de agua evaporada, y

$$Q_{\text{aire} \rightarrow \text{agua}} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = (h_C + h_R) A (t - t_w)$$

siendo  $A$  la superficie del agua expuesta al aire.

A la temperatura,  $t_w$ , que alcanza la masa de agua en estado estacionario se la denomina “**temperatura húmeda**”; por contraste, a la temperatura de la masa de aire húmedo,  $t$ , se la suele denominar “**temperatura seca**” cuando se considera este fenómeno de humidificación.

Como simultáneamente a este intercambio de energía el agua se evapora, se producirá una transferencia de materia desde la superficie del agua hacia el aire, pudiendo expresarse la velocidad de evaporación mediante la ecuación:

$$W \left[ \frac{\text{kg agua}}{\text{s}} \right] = M_{\text{agua}} N_{\text{agua}} = M_{\text{agua}} k_G A (p_w - p)$$

donde  $p_w$  es la presión de saturación del agua a la temperatura de ésta, es decir, a  $t_w$  y se considera que la superficie de transferencia de materia,  $A$ , coincide con la de transmisión de calor.

Así pues, igualando las ecuaciones de transmisión de calor y sustituyendo la ecuación de transferencia de materia, se tendrá:

$$M_{\text{agua}} k_G A (p_w - p) [\lambda + C_p (t - t_w)] = (h_C + h_R) A (t - t_w)$$

Esta ecuación puede simplificarse, sin gran error, realizando las siguientes consideraciones:

- Puede comprobarse que las temperaturas seca y húmeda no son muy diferentes cuando se alcanza el estado estacionario, por lo que el término de calor sensible puede despreciarse respecto al calor latente.
- Puede comprobarse que si la velocidad de la corriente de aire es superior a aproximadamente 5 m/s, la transmisión de calor por radiación tiene poca incidencia en el fenómeno, por lo que el coeficiente de transmisión de calor por radiación puede despreciarse respecto al de convección.

Se obtiene así:

$$p_w - p = \frac{h_C}{M_{\text{agua}} k_G \lambda} (t - t_w)$$

o bien, teniendo en cuenta que el cociente de parámetros del segundo miembro siempre permanece prácticamente constante:

$$p_w - p = J (t - t_w)$$

expresión que se conoce como “**ecuación psicrométrica**”, siendo **J** el denominado “**coeficiente psicrométrico**”, que para el sistema aire - vapor de agua tiene un valor de **0,5 mmHg/°C** en las condiciones habituales de operación. Obsérvese que esta ecuación contempla la simultaneidad del transporte de energía y materia y permite calcular la presión parcial del agua en un aire húmedo a partir de las temperaturas seca y húmeda.

Téngase en cuenta finalmente que si la cantidad de agua en contacto con la corriente de aire **no** es limitada, el aire tendería a saturarse y el proceso de enfriamiento afectaría a toda la masa de aire. Cuando el aire se satura se alcanza una temperatura constante, llamada “**temperatura de saturación adiabática**”, **t<sub>s</sub>**, que **casualmente coincide** en el sistema aire - vapor de agua con la temperatura húmeda, pero generalmente su valor está comprendido entre éste y el de la temperatura de saturación (punto de rocío).

Para el estudio de la interacción aire - agua generalmente se utilizan las magnitudes propuestas por Grosvenor (1908), que utilizan como base de cálculo la

unidad de masa de aire seco (en el Sistema Internacional de Unidades). La presión total del sistema está fijada y se supone que las mezclas de aire (que se considera como un compuesto puro de peso molecular 28,8 g/mol) y vapor de agua cumplen las leyes de los gases ideales. Algunas de estas magnitudes, las más frecuentemente usadas, se definen a continuación.

- **Temperatura de saturación (punto de rocío):**

Se denomina temperatura de saturación,  $t_d$ , la temperatura a la cual una mezcla dada de aire y vapor de agua está saturada, es decir, la temperatura a la cual el vapor de agua de la mezcla ejerce una presión parcial,  $p$ , igual a la presión de vapor (**presión de saturación**),  $p_s$  del agua:

$$p = p_s)_{t = t_d}$$

- **Humedad absoluta:**

Se llama humedad absoluta,  $x$ , a la masa de vapor de agua que contiene la unidad de masa de aire seco:

$$x = \frac{M_{vagua} N_{vagua}}{M_{aire} N_{aire}} = \frac{M_{vagua}}{M_{aire}} \frac{p}{\pi - p} = \frac{18}{28,8} \frac{p}{\pi - p}$$

donde  $M$  son los pesos moleculares,  $N$  las cantidades en moles,  $p$  la presión parcial del vapor de agua en el aire y  $\pi$  la presión total. Es decir:

$$x \left[ \frac{\text{kg vapor de agua}}{\text{kg aire seco}} \right] = 0,622 \frac{p}{\pi - p}$$

- **Humedad relativa:**

Se denomina humedad relativa,  $\phi$ , a la relación entre la presión parcial del vapor de agua en el aire,  $p$ , y su presión de saturación,  $p_s$ , a una temperatura dada:

$$\phi = \frac{p}{p_s}$$

es decir, la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene una masa de aire y la que contendría si estuviese saturada a la misma temperatura.

- **Entalpía específica:**

La entalpía específica del aire húmedo,  $h$ , se define como la entalpía de la unidad de masa de aire seco y el vapor de agua que la acompaña:

$$h = h_{aire} + h_{vagua} x$$

Normalmente se toman como estados de referencia para el cálculo de las entalpías el aire y el agua líquida a **0°C** y **1 atm**, por lo que, teniendo en cuenta el cambio de fase del agua (cuyo calor latente se considera también a la temperatura de referencia), se tendrá:

$$h = (C_p)_{\text{aire}} (t - 0) + [\lambda_{\text{vagua}} + (C_p)_{\text{vagua}} (t - 0)] x$$

como en las condiciones de referencia:

$$(C_p)_{\text{aire}} = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco } ^\circ\text{C}}$$

$$(C_p)_{\text{vagua}} = 1,92 \frac{\text{kJ}}{\text{kg vapor de agua } ^\circ\text{C}}$$

$$\lambda_{\text{vagua}} = 2.487 \frac{\text{kJ}}{\text{kg vapor de agua}}$$

se tendrá, en definitiva:

$$h \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco}} \right] = t + (2.487 + 1,92 t) x$$

Obsérvese que al haberse utilizado como referencia una temperatura de 0°C, las unidades de la temperatura que se tome para calcular **h** han de ser **°C**.

- **Volumen específico:**

El volumen específico del aire húmedo, **v**, se define como el volumen total que ocupa la unidad de masa de aire seco y el valor de agua que la acompaña (considerando comportamiento de gas ideal):

$$v = N \frac{R T}{\pi}$$

siendo **N** el número de moles específico, es decir, el número de moles por unidad de masa de aire seco:

$$N \left[ \frac{\text{kmol aire húmedo}}{\text{kg aire seco}} \right] = N_{\text{aire}} + N_{\text{vagua}} x = \frac{1}{28,8} + \frac{x}{18}$$

Por lo tanto:

$$v \left[ \frac{\text{m}^3 \text{ aire húmedo}}{\text{kg aire seco}} \right] = \left( \frac{1}{28,8} + \frac{x}{18} \right) \frac{R T}{\pi}$$

Obsérvese que si la temperatura se expresa en **K** y la presión total en **atm**, podrá utilizarse para **R** el valor:

$$R = 0,082 \left[ \frac{\text{atm m}^3}{\text{kmol K}} \right]$$

Téngase en cuenta que para calcular estas magnitudes se conocen la presión total del sistema,  $\pi$ , la temperatura (seca),  $t$ , y, con ayuda de los datos de equilibrio agua - vapor, la presión de saturación,  $p_s$ . Sería necesario, pues, el conocimiento adicional de la presión del vapor del agua en el aire húmedo,  $p$ , que se calcula con la ecuación psicrométrica:

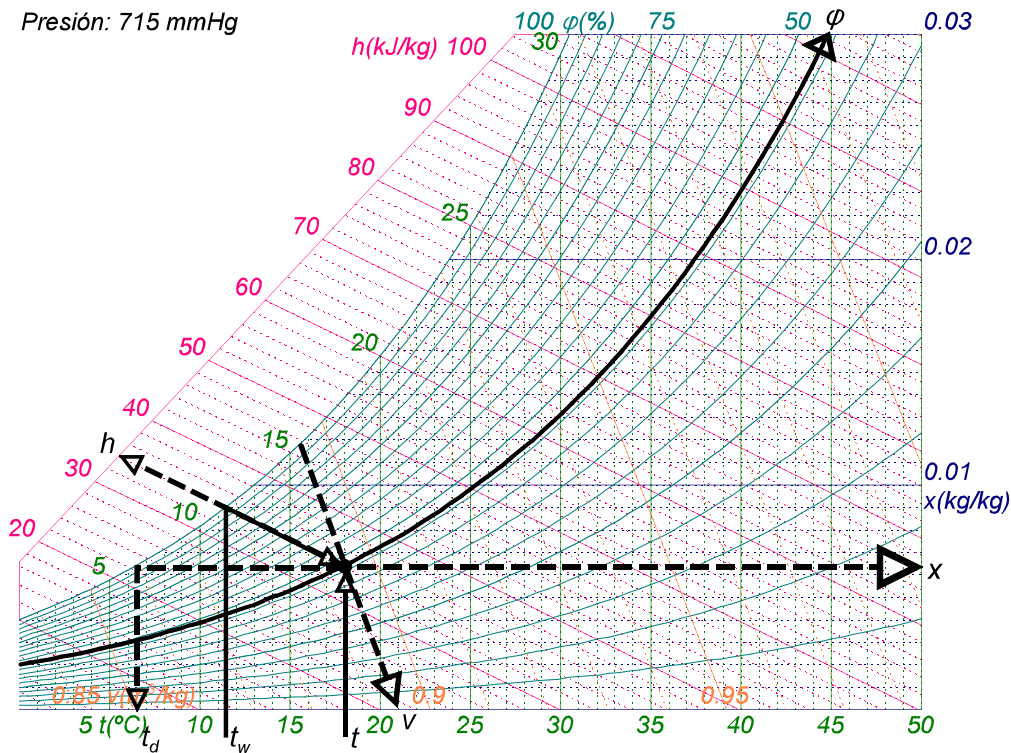
$$p = p_w - J (t - t_w)$$

mediante la cual, midiendo la temperatura húmeda,  $t_w$ , se podrá calcular la presión de saturación a dicha temperatura,  $p_w$ , que se determina con ayuda de los datos de equilibrio. Es decir, midiendo la presión total y las temperaturas seca y húmeda de una masa de aire húmedo podrán obtenerse todas sus propiedades psicrométricas.

Como todas las magnitudes mencionadas están relacionadas entre sí, generalmente se expresan en forma de diagramas para facilitar su evaluación. Estos gráficos, denominados “**diagramas psicrométricos**” ofrecen ligeras variantes en su modo de presentación, pero todos ellos son diagramas humedad absoluta - temperatura, a presión constante, representativos del estado del aire húmedo, en los que se muestran diferentes familias de líneas:

- Curvas de humedad relativa constante.
- Rectas de temperatura húmeda constante (“**rectas psicrométricas**”) o de entalpía constante (“**adiabáticas**”), al coincidir para el sistema aire - vapor de agua la temperatura húmeda con la temperatura de saturación adiabática.
- Rectas de volumen específico constante.

En la figura se indica gráficamente la manera de obtener las magnitudes psicrométricas a partir de la ubicación de un punto caracterizado por sus temperaturas seca (18 °C) y húmeda (12 °C).



## Dispositivo experimental

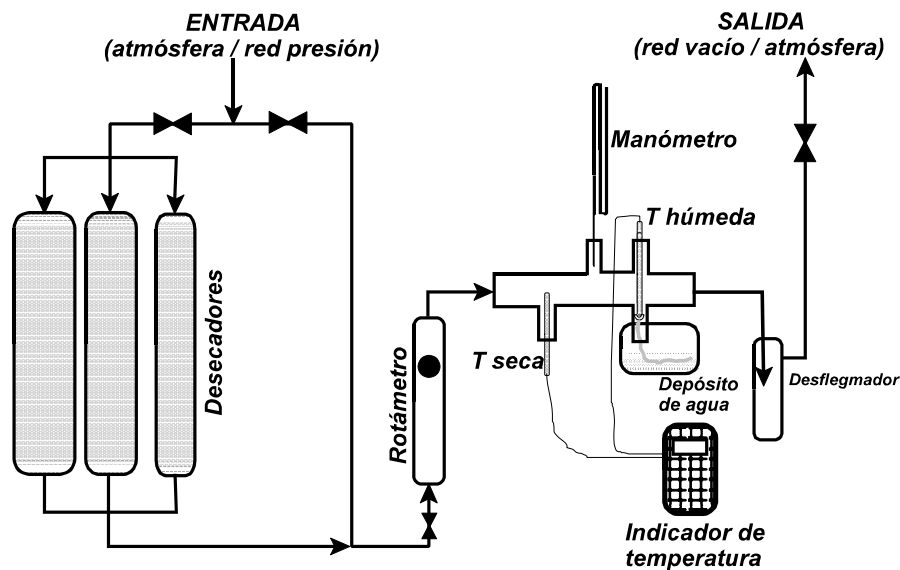
La necesidad de medir la temperatura húmeda para calcular las propiedades psicrométricas exige el montaje de un dispositivo denominado “**termómetro húmedo**”, un sensor de temperatura (bulbo con mercurio, termistor, termopar) recubierto totalmente de un tejido que se prolonga hasta un pequeño depósito lleno de agua, que de esta forma mantiene el termómetro siempre empapado por capilaridad, pero sin estar en contacto con la superficie del líquido.

El módulo experimental completo está formado por un rotámetro para medir el caudal de aire (cuya escala, que representa el caudal en NI/min está comprendida entre **0 y 15** y cuyo factor de corrección para el aire es de **1,3**), una válvula para regularlo (que siempre se mantendrá completamente abierta), un manómetro de rama abierta para medir la presión en el sistema y un sensor de temperatura para medir la temperatura seca. En ambos extremos existen sendas válvulas que se utilizan para permitir el acceso del aire al sistema, bien aire ambiente (aplicando a la salida del sistema vacío de la red), o bien aire comprimido de la red (aplicado directamente a la entrada del sistema).

Los dos sensores de temperatura están conectados a una unidad electrónica

de medición de temperatura, que dispone de un conmutador de selección de temperatura, de dos posiciones, y un lector digital para esta variable. El selector de temperatura permite conmutar entre los dos sensores dispuestos en el módulo experimental con objeto de realizar las lecturas correspondientes.

A continuación del termómetro húmedo se ha colocado un desflegmador, que actuará como trampa para las gotas de agua que puedan ser arrastradas por la corriente de aire, procedentes del depósito de alimentación del termómetro húmedo.



Obsérvese que el módulo experimental dispone además de unos lechos desecadores, que pueden utilizarse para secar el aire y realizar estudios complementarios.

## Realización práctica

Se determinarán las magnitudes psicrométricas del aire comprimido de la red y del aire ambiente.

El **aire comprimido** se aplicará de la red a la entrada del sistema, con cuya llave se regulará el caudal para obtener una medida del rotámetro no inferior a **12** unidades (cuidando de que la llave de salida esté completamente abierta). El **aire ambiente** se hará pasar a través del dispositivo aplicando el vacío de la red a la salida del sistema, con cuya llave se regulará la caída de presión a través del sistema de tal forma que no supere los **12** cm de Hg (cuidando de que la llave de entrada esté completamente abierta).

Se medirá la presión atmosférica mediante un barómetro y, cuando se alcance

el estado estacionario, se tomarán los datos de presión manométrica y las temperaturas seca y húmeda, en ambos casos.

### *Datos complementarios*

La presión de saturación del agua en función de la temperatura puede obtenerse a partir de las propiedades críticas, ( $P_c$ ,  $T_c$ ), mediante la siguiente ecuación:

$$\ln \frac{p_s}{p_c} = \frac{1}{1 - \theta} (A \theta + B \theta^{1.5} + C \theta^3 + D \theta^6)$$

siendo:

$$\theta = 1 - \frac{T}{T_c}$$

las constantes:

$$\begin{aligned} A &= -7,76451 \\ B &= 1,45838 \\ C &= -2,7758 \\ D &= -1,23303 \end{aligned}$$

y las propiedades críticas del agua:

$$\begin{aligned} p_c &= 220,55 \text{ bar} \\ T_c &= 647,1 \text{ K} \end{aligned}$$

Obsérvese que, debido a la definición de  $\theta$ , será necesario utilizar la temperatura en grados Kelvin.

El diagrama psicrométrico [adjunto](#), obtenido a **715 mmHg** puede utilizarse para obtener gráficamente las propiedades del aire húmedo.

### Presentación de los resultados

1. Establecer las temperaturas seca y húmeda, la presión manométrica y la presión total del sistema tanto para el aire ambiente como para el aire comprimido.
2. Teniendo en cuenta que la conducción tiene **9 mm** de diámetro interno, calcular la velocidad del aire en ambos casos. ¿Se cumple la condición que ha permitido desprejar la transmisión de calor por radiación en la obtención de la ecuación psicrométrica y, por tanto en el valor de **J** utilizado?
3. Obtener las presiones de saturación,  $p_w$  y  $p_s$  (datos de equilibrio), la presión

parcial de agua en el aire (ecuación psicrométrica) y la temperatura de saturación o punto de rocío (datos de equilibrio) para ambos casos.

4. Calcular para ambos casos las respectivas propiedades del aire: humedad absoluta, humedad relativa, entalpía específica y volumen específico.
5. Basándose en las temperaturas seca y húmeda, caracterizar el aire en el diagrama psicrométrico (cuando sea posible) y leer en él las propiedades mencionadas, para ambos casos.
6. Comparar los valores obtenidos analíticamente con los obtenidos de forma gráfica, calculando los errores respectivos. ¿Cuál es la principal fuente de error?
7. Está bastante generalizada la creencia de que el aire húmedo es más denso que el aire seco. ¿Es eso cierto? Demuéstrese comparando el volumen específico de un aire húmedo con el de un aire completamente seco.

## Bibliografía

- Brown, G.G. y otros; “Operaciones básicas de la Ingeniería Química”, Manuel Marín & Cía. Ed., Barcelona (1955).
- McCabe, W.L. y Smith, J.C.; “Operaciones básicas de Ingeniería Química”, Ed. Reverté, Barcelona (1973).
- Vian, A. y Ocón, J.; “Elementos de Ingeniería Química”, 5ª ed., Ed. Aguilar, Madrid (1972).

Presión: 715 mmHg

