



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Empleo del diagrama de Mollier para resolver procesos de acondicionamiento de aire

Apellidos, nombre	Barrera Puigdollers, Cristina ¹ (mcbarpu@tal.upv.es) Betoret Valls, Noelia ¹ (noebevalal.upv.es) Castelló Gómez, Marisa ¹ (mcasgo@upvnet.upv.es) Pérez Esteve, Édgar ¹ (edpees@upv.es)
Departamento	¹ Departamento de Tecnología de Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se describen las principales propiedades termodinámicas del aire húmedo y se explica el manejo del diagrama psicrométrico de Mollier como una alternativa sencilla a las ecuaciones de estado tradicionalmente empleadas para el cálculo de las mismas.

2 Introducción

La ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) define el acondicionamiento del aire como "el control simultáneo de la temperatura, humedad, limpieza y distribución del aire, para que cumpla con los requisitos del espacio acondicionado"[1]. El acondicionamiento de aire en casas, edificios o industrias se hace por dos razones principales: proporcionar confort al humano y controlar el proceso de elaboración. Concretamente, en la fabricación de alimentos, son muchas las operaciones que utilizan el aire como ingrediente [2]: carbonatación de bebidas, aireación, secado, curado, refrigeración, envasado aséptico, etc. Para estas funciones, debe asegurarse no solo la limpieza e higiene del aire, sino también sus propiedades termodinámicas, con la finalidad de fabricar productos de buena calidad al menor coste en el interior de la estructura.

3 Objetivos

Una vez que el alumno lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Identificar las principales propiedades termodinámicas del aire húmedo y su relevancia en el procesado de alimentos.
- Calcular las propiedades termodinámicas del aire húmedo mediante el empleo de las ecuaciones de estado correspondientes.
- Explicar el manejo del diagrama psicrométrico de Mollier y aplicarlo a la descripción de las propiedades termodinámicas de una mezcla de aire seco y vapor de agua en diferentes situaciones.
- Discutir sobre las ventajas e inconvenientes del empleo tanto de las ecuaciones de estado como del diagrama de Mollier para la descripción termodinámica de una corriente de aire húmedo.

4 Desarrollo

Antes de describir el diagrama psicrométrico de Mollier y explicar las ventajas de su manejo en procesos de acondicionamiento de aire, es imprescindible definir en qué consiste la psicrometría y cuáles son las principales propiedades termodinámicas del aire húmedo.

4.1 Psicrometría

La psicrometría es una ciencia dedicada al estudio de las propiedades termodinámicas del aire húmedo y al efecto de la humedad atmosférica sobre



los materiales y el confort humano [3]. A efectos ingenieriles, el aire húmedo puede considerarse como una mezcla de aire seco no condensable, de composición fija (79% de N₂ y 21% de O₂), y vapor de agua condensable [4]. Serán por tanto necesarias, de acuerdo con la Ley de fases de Gibbs, tres propiedades termodinámicas independientes para describir el estado de esta mezcla binaria, que se reducen a dos en procesos que se lleven a cabo a presión atmosférica.

4.2 Propiedades termodinámicas del aire húmedo

A continuación se presentan las propiedades termodinámicas del aire húmedo, organizadas según hagan referencia a la cantidad de vapor de agua presente en la mezcla (humedad específica, humedad relativa y grado de saturación), a su temperatura (temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo y temperatura de rocío) o a su contenido energético (entalpía) [3], [4].

Humedad absoluta: es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en un volumen dado de mezcla. Se calcula a partir de la relación de masas molares del vapor y el aire ($M_v/M_a = 0,622$), la presión parcial del vapor (p_v) y la presión total de la mezcla (P) y se expresa en kg agua/kg aire seco.

$$X = 0,622 \cdot \frac{p_v}{P - p_v} \quad \text{Ecuación 1}$$

Humedad relativa: es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en un determinado volumen de aire y la que tendría si estuviera saturado a la misma temperatura. Se calcula a partir de la presión de vapor de agua en un momento dado (p_v) y la presión de vapor de agua cuando el aire está saturado de humedad (p_s) a la misma temperatura. Se puede expresar como decimal o como porcentaje.

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dado que la presión de saturación varía con la temperatura (figura 1), el enfriamiento o calentamiento de una masa de aire húmedo llevará asociado una variación en su humedad relativa, pero no necesariamente en su humedad absoluta. Concretamente, el calentamiento disminuirá su humedad relativa y el enfriamiento la aumentará. Esto será de vital importancia en operaciones de procesado y conservación que impliquen el contacto entre el aire y el alimento, ya que condicionará que el transporte de agua se produzca o no, a mayor o menor velocidad y en el sentido de disminuir o aumentar el contenido en agua del alimento.

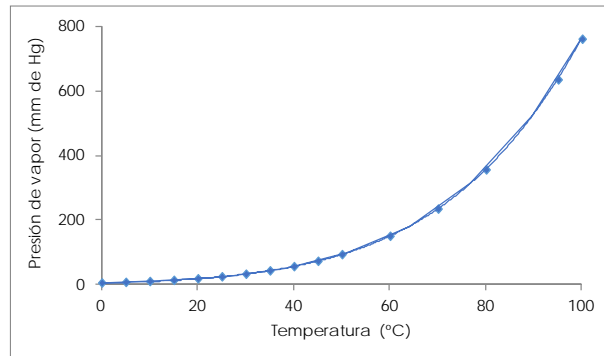


Figura 1. Presión de vapor del agua líquida de 0 a 100 °C en mm de Hg.

Grado de saturación: es la relación entre la humedad específica de un volumen de aire húmedo y la que éste tendría en estado de saturación, a igual temperatura y presión atmosférica.

$$\mu = \varphi \cdot \frac{P - p_s}{P - p_v} \quad \text{Ecuación 3}$$

Temperatura de bulbo seco o temperatura del aire (T): es la temperatura del aire húmedo que marca un termómetro común.

Temperatura de saturación adiabática o de bulbo húmedo (Ts): es la temperatura a la que se satura una mezcla de vapor de agua y aire seco cuando se enfría adiabáticamente, es decir, sin variar su entalpía.

Temperatura de rocío (Tr): es la temperatura a la que ha de enfriarse, a humedad específica constante, una mezcla de aire y vapor de agua para que ésta pase a estar saturada.

Entalpía (h): es la energía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco, por encima de una temperatura de referencia. Se calcula a partir del calor húmedo (s) o cantidad de calor necesaria para elevar 1 °C la temperatura de 1 kg de aire seco más la cantidad de calor necesaria para elevar 1 °C la temperatura del vapor de agua que lo acompaña y se expresa en kcal/kg aire seco · °C.

$$h = (0,24 + 0,46 \cdot X) \cdot T + 595 \cdot X = s \cdot T + 595 \cdot X \quad \text{Ecuación 4}$$

Otra propiedad fundamental relacionada con el volumen ocupado por el aire es la densidad del aire húmedo (ρ), que se define como la suma de las masas de aire seco y vapor de agua por unidad de volumen de aire húmedo.

$$\rho = \frac{29 \cdot P}{R \cdot T} - \frac{11 \cdot \varphi \cdot p_s}{R \cdot T} \quad \text{Ecuación 5}$$

Conviene puntualizar que la densidad del aire húmedo permite calcular el caudal másico de aire húmedo a partir de su caudal volumétrico. A su vez, la humedad específica permite calcular el caudal másico de aire seco a partir del caudal másico de aire húmedo.



Y aunque el manejo de estas ecuaciones de estado no sea excesivamente complicado, se han ideado una serie de diagramas que proporcionan, para una presión total concreta y un par de variables psicrométricas, información acerca de todas las demás propiedades referentes a una mezcla de aire húmedo. Entre ellos, el más empleado en ingeniería es el diagrama de Mollier que representa, para una presión fija, la entalpía (h) frente a la humedad absoluta (X).

4.3 Diagrama psicrométrico de Mollier

En la figura 2 se muestra la representación gráfica del diagrama de Mollier para el aire húmedo a la presión atmosférica ($P = 1 \text{ atm}$). En él se puede distinguir diferentes grupos de líneas:

- Rectas verticales, de humedad absoluta constante.
- Rectas isotermas, horizontales con una ligera pendiente positiva, de temperatura seca constante.
- Rectas isoentálpicas, de pendiente negativa y entalpía constante.
- Curvas exponenciales convexas crecientes, de humedad relativa constante, entre las que destaca por su mayor grosor la curva de saturación o de humedad relativa del 100%.

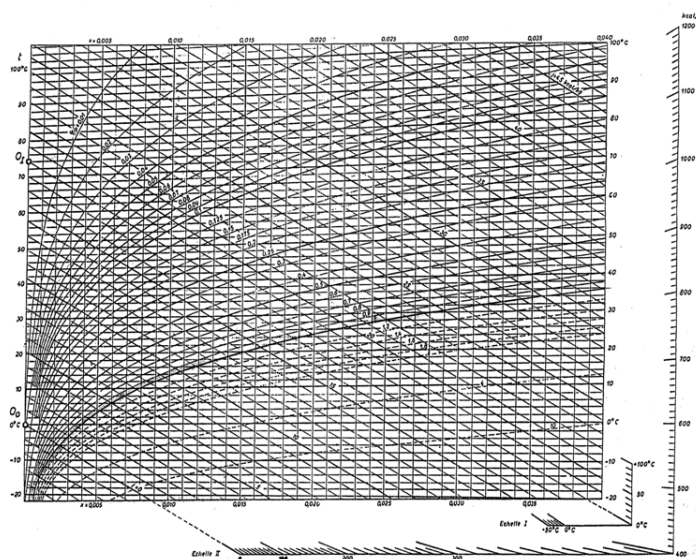


Figura 2. Diagrama de Mollier para el aire húmedo a 1 atm de presión.

4.3.1 Situar un punto en el diagrama de Mollier

Tal y como se ha comentado anteriormente, dos propiedades independientes cualesquiera, incluyendo la temperatura del bulbo húmedo, permiten situar la mezcla en el gráfico psicrométrico (punto de estado) y determinar las demás propiedades termodinámicas del aire húmedo. A modo de ejemplo, en la figura 3 se ha representado sobre el diagrama de Mollier la mezcla de aire seco y vapor de agua que tiene una humedad relativa del 25% y una temperatura seca de 50 °C.

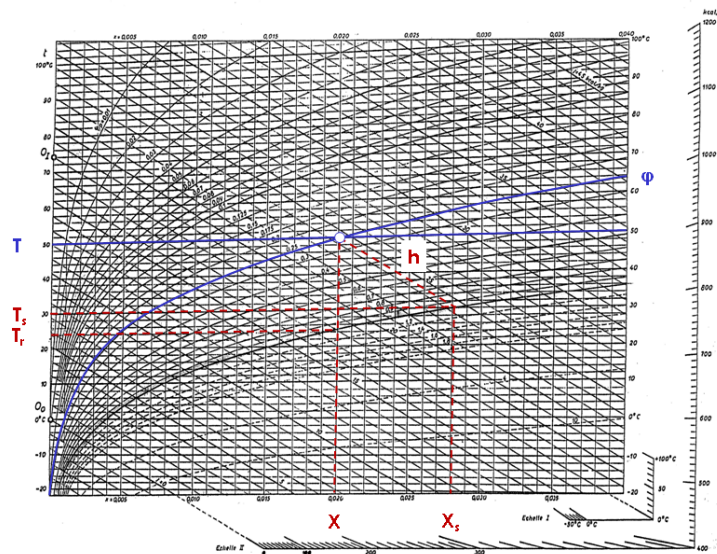


Figura 3. Cómo situar un punto en el diagrama de Mollier.

Una vez localizado el punto de intersección entre la isoterma y la curva de humedad relativa correspondientes, se puede leer sobre el eje de abscisas el valor correspondiente a la humedad absoluta (en este caso, $X \approx 0,020$ kg agua/kg aire seco). Del mismo modo, se puede leer directamente sobre la recta isoentálpica el valor de la entalpía (en este caso, $h \approx 24,5$ kcal/kg aire seco). Finalmente, en el punto de intersección entre la recta isoentálpica y la curva de saturación se representan las condiciones de saturación adiabática de la mezcla de aire húmedo (en este caso, $T_s \approx 30$ °C y $X_s \approx 0,028$ kg agua/kg aire seco) y en la intersección entre la recta vertical y la curva de saturación se sitúa el punto de rocío (en este caso, $T_r \approx 24$ °C). Es posible que al emplear un método gráfico la precisión en las estimaciones no sea tan elevada como al emplear un método analítico, pero el ahorro de tiempo es considerable. Especialmente en procesos de acondicionamiento (enfriamiento-calentamiento, humidificación-deshumidificación) y mezclado de aire, el uso de los diagramas psicrométricos resulta de gran utilidad.

4.3.2 Situar un proceso en el diagrama de Mollier

En la figura 4 se ha representado sobre el diagrama de Mollier la evolución del aire a su paso a través de una unidad básica de secado adiabático y simple paso. Para situar el aire ambiente (punto 1), bastaría con utilizar las medidas de temperatura (T_1) y humedad relativa (ϕ_1) leídas en un termohigrómetro. Para situar el aire que sale del calentador y entra en la cámara de secado (punto 2) bastaría con saber la temperatura a la que se va a llevar a cabo el proceso de deshidratación (T_2) ya que, por lo general, el calentamiento no tiene por qué llevar asociada una variación en el contenido en vapor de agua de la mezcla, pudiéndose asumir que $X_1 = X_2$. Si, como se ha comentado, el secado es adiabático, la entalpía del aire permanece constante a su paso a través de la unidad básica de secado ($h_2 = h_3$), por lo que el punto que representa las condiciones del aire que sale de la cámara



de secado (punto 3) estará situado sobre la isoentálpica que pasa por el punto 2. Para saber exactamente la posición en la que se encuentra el punto 3 se puede medir la temperatura del aire a la salida de la cámara de secado (T_3) o se puede plantear un balance de agua para calcular, a partir del agua cedida por el producto que se está secando, la humedad absoluta con la que el aire abandona el proceso (X_3).

$$M'(X_3 - X_2) = m'(x_{w0} - x_{wF})$$

Ecuación 6

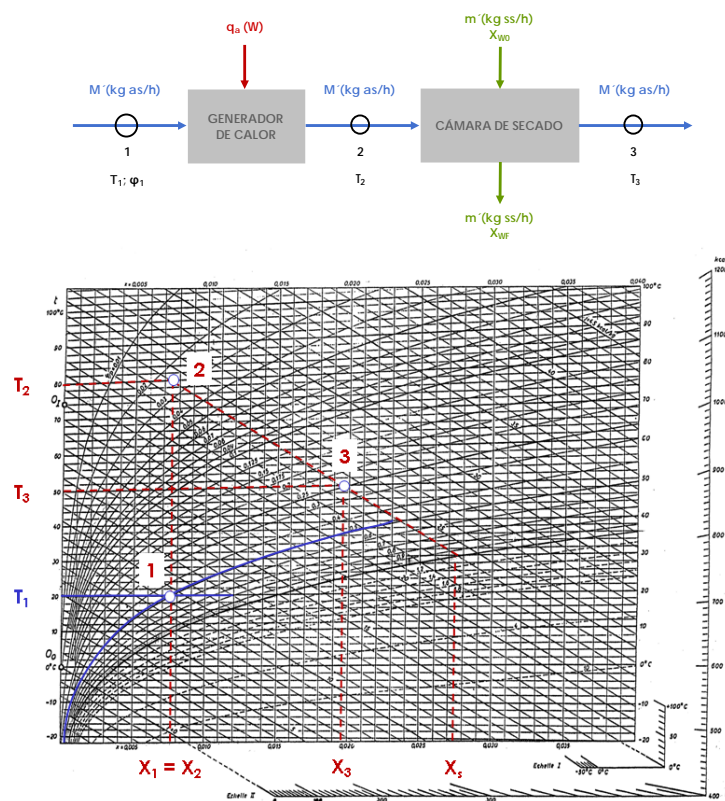


Figura 4. Cómo representar un proceso en el diagrama de Mollier.

Una vez representados en el diagrama de Mollier la composición de todas las corrientes de aire que intervienen en el proceso, resulta sencillo plantear determinados cálculos, tales como la eficiencia comercial (E , en kcal/kg agua evaporada) o el rendimiento termodinámico (η).

$$E = \frac{h_2 - h_1}{X_3 - X_2}$$

Ecuación 7

$$\eta = \frac{X_3 - X_2}{X_s - X_2}$$

Ecuación 8

4.3.3 Resolver mezclas con el diagrama de Mollier

En la figura 5 se ha resuelto sobre el diagrama de Mollier el proceso de mezcla de dos corrientes de aire A y B. Como se puede observar, la composición de la corriente mezcla estará situada sobre la recta que une los puntos que representan cada una de las corrientes que se están mezclando y su posición exacta vendrá determinada por la relación entre los caudales másicos de A y B ($r = M'_A/M'_B$) o el valor de humedad absoluta de la mezcla calculado a partir del balance de materia en torno al punto mezcla.

$$M'_A \cdot X_A + M'_B \cdot X_B = M'_M \cdot X_M$$

Ecuación 9

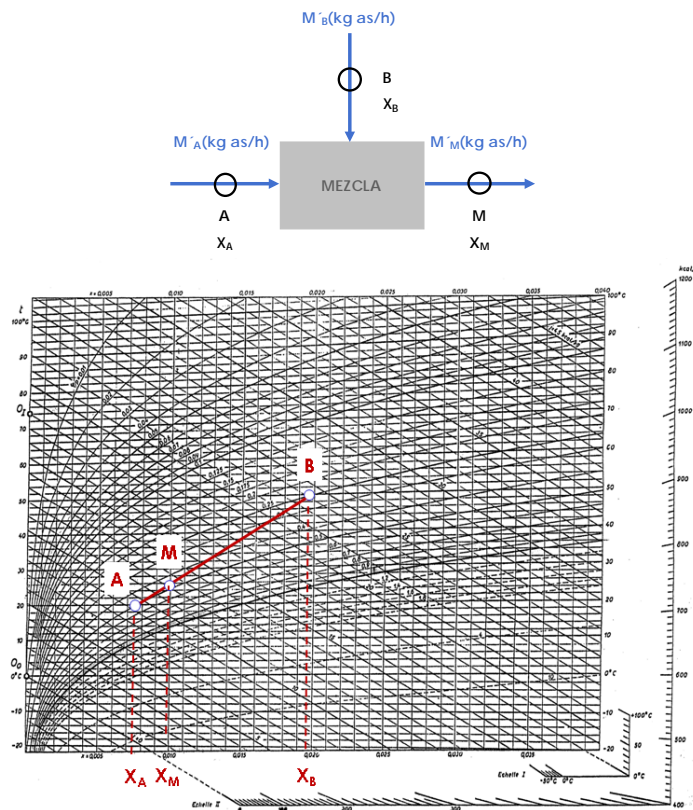


Figura 5. Cómo resolver mezclas con el diagrama de Mollier.

5 Cierre

A lo largo de este documento hemos visto cuáles son las principales propiedades termodinámicas del aire húmedo y cómo obtenerlas a partir de medidas sencillas, ya sea de forma numérica, mediante el empleo de ecuaciones de estado, o de forma gráfica, mediante el empleo del diagrama psicrométrico de Mollier. Como conclusión se podría decir que el manejo del diagrama de Mollier es más rápido y sencillo, aunque no tan preciso como las ecuaciones matemáticas.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

6 Bibliografía

6.1 Referencias de fuentes electrónicas:

[1] Anónimo. (2017). "Psicometría". WIKI DE BIOTECNOLOGÍA INDUSTRIAL DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO (SANGOLQUÍ, ECUADOR). Disponible en: <https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/carta%20psicometrica.pdf/350357460/carta%20psicometrica.pdf>

[2] IDEA FSI NEWSLETTER (2013). "La importancia de la calidad del aire en la industria alimentaria". Disponible en: <http://www.ideafoodsafetyinnovation.com/newsletters/2013/08/la-importancia-de-la-calidad-del-aire-en-la-industria-alimentaria/>

6.2 Libros:

[3] Martínez, A.: "Termodinámica del aire húmedo", en Termodinámica Básica y Aplicada, capítulo 8, Ed. Dossat S.A., 1992, pág. 175-194.

[4] Martínez-Navarrete, N.; Andrés, A.M.; Chiralt, A.; Fito, P.: "Interacción aire-agua: termodinámica del aire húmedo", en Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno, capítulo 2, Ed. UPV, 2000, pág. 25-50.