

MEZCLAS DE GAS-VAPOR Y ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

A temperaturas por debajo de la temperatura crítica, a la fase gaseosa de una sustancia se le denomina frecuentemente como *vapor*. El término *vapor* implica un estado gaseoso que se encuentra cerca de la región de saturación de la sustancia, lo cual incrementa la posibilidad de condensación durante el proceso.

El capítulo 13 se ocupó de mezclas de gases que solían encontrarse por encima de sus temperaturas críticas. Por consiguiente, no importaba la condensación de los gases durante un proceso. El hecho de no tener que lidiar con dos fases simplificaba de manera considerable al análisis. Sin embargo, cuando se enfrenta una mezcla de gas-vapor, el vapor puede condensarse saliendo de la mezcla gas-vapor durante el proceso, lo que produce una mezcla de dos fases. Esto complica el análisis de manera considerable. En consecuencia, una mezcla de gas-vapor requiere un tratamiento distinto al de una mezcla de gases ordinaria.

En ingeniería se estudian varias mezclas de gas-vapor. En este capítulo se aborda la *mezcla aire-vapor de agua*, que en la práctica es la mezcla de gas-vapor más común. También se estudia el *acondicionamiento de aire*, que es la principal área de trabajo de las mezclas de aire-vapor de agua.



OBJETIVOS

En el capítulo 14, los objetivos son:

- Diferenciar entre *aire seco* y *aire atmosférico*.
- Definir y calcular la humedad específica y relativa del aire atmosférico.
- Calcular la temperatura del punto de rocío del aire atmosférico.
- Relacionar la temperatura de saturación adiabática y la temperatura de bulbo húmedo del aire atmosférico.
- Utilizar la carta psicrométrica como una herramienta para determinar las propiedades del aire atmosférico.
- Aplicar los principios de la conservación de la masa y de la energía en diferentes procesos de acondicionamiento de aire.

Aire seco	
$T, ^\circ\text{C}$	$c_p, \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
-10	1.0038
0	1.0041
10	1.0045
20	1.0049
30	1.0054
40	1.0059
50	1.0065

FIGURA 14-1

Puede suponerse que el c_p será constante a $1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ en el intervalo de temperatura de -10 a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ con un error menor de 0.2 por ciento.

14-1 ■ AIRE SECO Y AIRE ATMOSFÉRICO

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y pequeñas cantidades de otros gases. Normalmente, el aire en la atmósfera contiene cierta cantidad de vapor de agua (o *humedad*) y se conoce como **aire atmosférico**. En contraste, el aire que no contiene vapor de agua se denomina **aire seco**. Es conveniente tratar al aire como una mezcla de vapor de agua y aire seco, porque la composición del aire seco permanece relativamente constante, pero la cantidad de vapor de agua varía por la condensación y evaporación de los océanos, lagos, ríos, regaderas e incluso del agua del cuerpo humano. A pesar de que la cantidad de vapor de agua en el aire es pequeña, desempeña un importante papel en la comodidad cotidiana del ser humano. En consecuencia, es importante tomarlo en cuenta en los dispositivos de acondicionamiento de aire.

La temperatura del aire en aplicaciones de acondicionamiento de aire varía de -10 a cerca de $50 \text{ }^\circ\text{C}$. En este intervalo, el aire seco puede tratarse como un gas ideal con un valor c_p constante de $1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ [$0.240 \text{ Btu/lbm} \cdot \text{R}$] con un error insignificante (menor a 0.2 por ciento), como se ilustra en la figura 14-1. Si se toma como temperatura de referencia los $0 \text{ }^\circ\text{C}$, la entalpía y el cambio de entalpía de aire seco se determinan por

$$h_{\text{aire seco}} = c_p T = (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) T \quad (\text{kJ/kg}) \quad (14-1a)$$

y

$$\Delta h_{\text{aire seco}} = c_p \Delta T = (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \Delta T \quad (\text{kJ/kg}) \quad (14-1b)$$

donde T es la temperatura del aire en $^\circ\text{C}$ y ΔT es el cambio en la temperatura. En procesos de acondicionamiento de aire interesan los *cambios* en la entalpía Δh , los cuales son independientes del punto de referencia elegido.

Por supuesto, sería conveniente tratar al vapor de agua en el aire como un gas ideal; y probablemente usted esté dispuesto a sacrificar un poco de exactitud por tal ventaja. Pero sucede que es posible sacar provecho de esta condición sin mucho sacrificio. A $50 \text{ }^\circ\text{C}$, la presión de saturación del agua es de 12.3 kPa . A presiones por debajo de este valor, el vapor de agua puede tratarse como un gas ideal con un error insignificante (menor a 0.2 por ciento), incluso cuando es un vapor saturado. Por lo tanto, el vapor de agua en el aire se comporta como si existiera solo y obedece la relación de gas ideal $Pv = RT$. En este caso, el aire atmosférico se trata como una mezcla de gases ideales cuya presión es la suma de la presión parcial del aire seco* P_a y la del vapor de agua P_v :

$$P = P_a + P_v \quad (\text{kPa}) \quad (14-2)$$

A la presión parcial del vapor de agua se le conoce como **presión de vapor**. Es la presión que el vapor de agua ejercería si existiera solo a la temperatura y volumen del aire atmosférico.

Dado que el vapor de agua es un gas ideal, la entalpía del vapor de agua es una función exclusiva de la temperatura, es decir, $h = h(T)$. Esto también puede observarse en el diagrama T - s del agua que se presenta en las figuras A-9 y 14-2, donde las líneas de entalpía constante coinciden con las líneas de temperatura constante a temperaturas inferiores a $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Por lo tanto, *la entalpía del vapor de agua en el aire puede considerarse igual a la entalpía del vapor saturado a la misma temperatura*. Es decir,

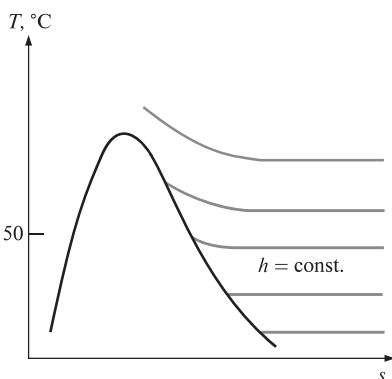


FIGURA 14-2

A temperaturas por debajo de los $50 \text{ }^\circ\text{C}$, las líneas de $h = \text{constante}$ coinciden con las líneas de $T = \text{constante}$ en la región de vapor sobrecalentado del agua.

* En este capítulo, el subíndice a denota el aire seco y el subíndice v significa vapor de agua.

$$h_v(T, \text{ bajo } P) \cong h_g(T) \quad (14-3)$$

La entalpía del vapor de agua a 0 °C es 2 500.9 kJ/kg. El valor c_p promedio del vapor de agua en el intervalo de temperatura de -10 a 50 °C puede considerarse igual a 1.82 kJ/kg · °C. Por lo tanto, la entalpía del vapor de agua se determina aproximadamente a partir de

$$h_g(T) \cong 2\,500.9 + 1.82T \quad (\text{kJ/kg}) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C} \quad (14-4)$$

o

$$h_g(T) \cong 1\,060.9 + 0.435T \quad (\text{Btu/lbm}) \quad T \text{ en } ^\circ\text{F} \quad (14-5)$$

en el intervalo de temperatura de -10 a 50 °C (o de 15 a 120 °F), con un error insignificante, como se observa en la figura 14-3.

14-2 ■ HUMEDAD ESPECÍFICA Y RELATIVA DEL AIRE

La cantidad de vapor de agua en el aire puede determinarse de varias maneras. Es probable que la más lógica sea precisar directamente la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco, a la que se denomina **humedad absoluta** o **específica** (conocida también como *relación de humedad*) y que se representa por medio de ω :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{kg vapor de agua/kg aire seco}) \quad (14-6)$$

La humedad específica también se expresa como

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} \quad (14-7)$$

o

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (\text{kg vapor de agua/kg aire seco}) \quad (14-8)$$

donde P es la presión total.

Considere 1 kg de aire seco. Por definición, el aire seco no contiene vapor de agua y, por ende, su humedad específica es cero. Ahora añada algo de vapor de agua a este aire seco. La humedad específica aumentará. A medida que se añada más vapor o humedad, la humedad específica crecerá hasta que el aire ya no pueda contener más humedad. En este punto se dice que el aire estará saturado por humedad, y se le denomina **aire saturado**. Cualquier humedad agregada al aire saturado se condensará. La cantidad de vapor de agua en el aire saturado a una temperatura y presión especificadas puede determinarse a partir de la ecuación 14-8 si se sustituye P_v por P_g , la presión de saturación del agua a esa temperatura (Fig. 14-4).

La cantidad de humedad en el aire tiene un efecto definitivo en las condiciones de comodidad que ofrece un ambiente. Sin embargo, el nivel de comodidad depende más de la cantidad de humedad que el aire contiene (m_v) respecto a la cantidad máxima de humedad que el aire puede contener a la misma temperatura (m_g). La relación entre estas dos cantidades se conoce como **humedad relativa** ϕ (Fig. 14-5)

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} \quad (14-9)$$

Vapor de agua			
T, °C	h_g , kJ/kg		Diferencia, kJ/kg
	Tabla A-4	Ec. 14-4	
-10	2 482.1	2 482.7	-0.6
0	2 500.9	2 500.9	0.0
10	2 519.2	2 519.1	0.1
20	2 537.4	2 537.3	0.1
30	2 555.6	2 555.5	0.1
40	2 573.5	2 573.7	-0.2
50	2 591.3	2 591.9	-0.6

FIGURA 14-3

En el intervalo de temperatura de -10 a 50 °C, la h_g del agua se determina por la ecuación 14-4 con un error insignificante.

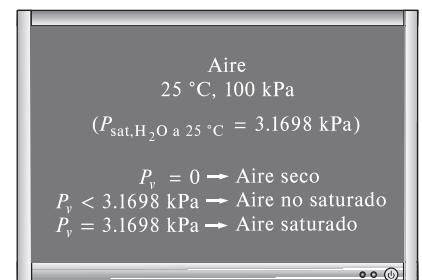


FIGURA 14-4

Para aire saturado, la presión de vapor es igual a la presión de saturación del agua.

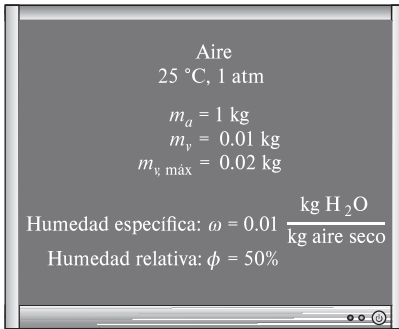


FIGURA 14-5

La humedad específica es la cantidad real de vapor de agua por 1 kg de aire seco, mientras que la humedad relativa es la proporción entre la cantidad real de humedad en el aire y la cantidad máxima de humedad que el aire pudiera contener a esa temperatura.

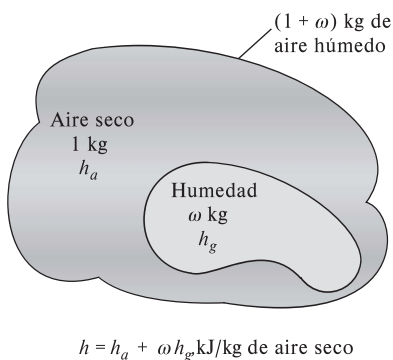


FIGURA 14-6

La entalpía de aire húmedo (atmosférico) se expresa por unidad de masa de aire seco, no por unidad de masa de aire húmedo.

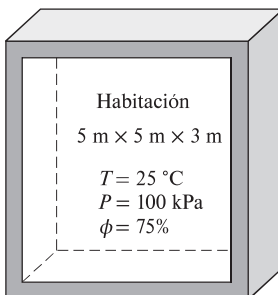


FIGURA 14-7

Esquema para el ejemplo 14-1.

donde

$$P_g = P_{\text{sat a } T} \quad (14-10)$$

Si se combinan las ecuaciones 14-8 y 14-9, también se puede expresar la humedad relativa como

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega) P_g} \quad \text{y} \quad \omega = \frac{0.622 \phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (14-11a, b)$$

La humedad relativa varía de 0 para aire seco a 1 para aire saturado. Advierta que la cantidad de humedad que el aire puede contener depende de su temperatura. Por lo tanto, la humedad relativa del aire cambia con la temperatura aunque su humedad específica permanezca constante.

El aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua, por ello la entalpía del aire se expresa en términos de las entalpías del aire seco y del vapor de agua. En la mayor parte de las aplicaciones prácticas, la cantidad de aire seco en la mezcla de aire-vapor de agua permanece constante, pero la cantidad de vapor de agua cambia. En consecuencia, la entalpía del aire atmosférico se expresa *por unidad de masa del aire seco*, y no por unidad de masa de la mezcla de aire-vapor de agua.

La entalpía total (una propiedad extensiva) del aire atmosférico es la suma de las entalpías del aire seco y del vapor de agua:

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v$$

Al dividir entre m_a se obtiene

$$h = \frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + \omega h_v$$

o

$$h = h_a + \omega h_g \quad (\text{kJ/kg aire seco}) \quad (14-12)$$

puesto que $h_v \cong h_g$ (Fig. 14-6).

Observe también que la temperatura ordinaria del aire atmosférico se conoce como la **temperatura de bulbo seco** para diferenciarla de otras formas de temperatura que deben estudiarse.

EJEMPLO 14-1 La cantidad de vapor de agua en el aire de una habitación

La habitación de 5 m × 5 m × 3 m que se representa en la figura 14-7, contiene aire a 25 °C y 100 kPa, a una humedad relativa de 75 por ciento. Determine a) la presión parcial del aire seco, b) la humedad específica, c) la entalpía por unidad de masa del aire seco y d) las masas del aire seco y del vapor de agua en el cuarto.

SOLUCIÓN Se indica la humedad relativa del aire en un cuarto. Se va a determinar la presión del aire seco, humedad específica, entalpía y las masas de aire seco y del vapor de agua en el cuarto.

Suposición El aire seco y el vapor de agua en el cuarto son gases ideales.

Propiedades El calor específico a presión constante del aire a la temperatura del cuarto es $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (tabla A-2a). Para el agua a 25 °C, se tiene que $P_{\text{sat}} = 3.1698 \text{ kPa}$ y $h_g = 2546.5 \text{ kJ/kg}$ (tabla A-4).

Análisis a) La presión parcial del aire seco puede obtenerse de la ecuación 14-2:

$$P_a = P - P_v$$

donde

$$P_v = \phi P_g = \phi P_{\text{sat a } 25^\circ\text{C}} = (0.75)(3.1698 \text{ kPa}) = 2.38 \text{ kPa}$$

Por lo tanto,

$$P_a = (100 - 2.38) \text{ kPa} = 97.62 \text{ kPa}$$

b) La humedad específica del aire se encuentra a partir de la ecuación 14-8:

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} = \frac{(0.622)(2.38 \text{ kPa})}{(100 - 2.38) \text{ kPa}} = 0.0152 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco}$$

c) La entalpía del aire por unidad de masa de aire seco está determinada con base en la ecuación 14-12:

$$\begin{aligned} h &= h_a + \omega h_v \cong c_p T + \omega h_g \\ &= (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(25^\circ\text{C}) + (0.0152)(2546.5 \text{ kJ/kg}) \\ &= 63.8 \text{ kJ/kg aire seco} \end{aligned}$$

La entalpía del vapor de agua (2546.5 kJ/kg) también podría determinarse a partir de la aproximación dada por la ecuación 14-4:

$$h_{g \text{ a } 25^\circ\text{C}} \cong 2500.9 + 1.82(25) = 2546.4 \text{ kJ/kg}$$

la cual es casi idéntica al valor obtenido en la tabla A-4.

d) Tanto el aire seco como el vapor de agua llenan por completo la habitación. En consecuencia, el volumen de cada uno de ellos es igual al volumen del cuarto:

$$V_a = V_v = V_{\text{habitación}} = (5 \text{ m})(5 \text{ m})(3 \text{ m}) = 75 \text{ m}^3$$

Las masas del aire seco y del vapor de agua se determinan a partir de la relación de gas ideal aplicada por separado a cada gas:

$$\begin{aligned} m_a &= \frac{P_a V_a}{R_a T} = \frac{(97.62 \text{ kPa})(75 \text{ m}^3)}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(298 \text{ K})} = 85.61 \text{ kg} \\ m_v &= \frac{P_v V_v}{R_v T} = \frac{(2.38 \text{ kPa})(75 \text{ m}^3)}{(0.4615 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(298 \text{ K})} = 1.30 \text{ kg} \end{aligned}$$

La masa del vapor de agua en el aire podría obtenerse también de la ecuación 14-6:

$$m_v = \omega m_a = (0.0152)(85.61 \text{ kg}) = 1.30 \text{ kg}$$

14-3 ■ TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO

Si uno vive en climas húmedos, es probable que en verano la mayor parte de las mañanas encuentre el pasto húmedo. Si no llovió la noche anterior, ¿qué sucedió entonces? La explicación es simple. El exceso de humedad en el aire se condensa en las superficies frías y forma el rocío. En el verano, una cantidad considerable de agua se evapora durante el día. En la noche, cuando la temperatura desciende, sucede lo mismo con la “capacidad de sostener la humedad” del aire, que es la cantidad máxima de humedad que el aire puede contener. (¿Qué ocurre con la humedad relativa durante este proceso?) Después de cierto tiempo, la capacidad del aire de sostener la humedad se iguala al contenido de humedad de éste. En este punto, el aire está saturado y su humedad relativa es de 100 por ciento. Cualquier descenso adicional en la temperatura del aire tiene

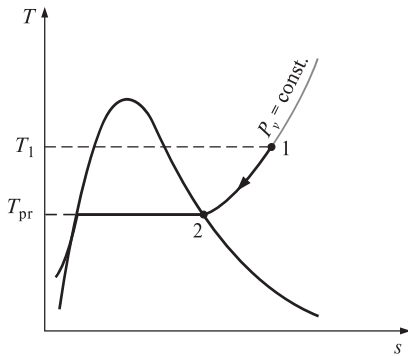


FIGURA 14-8

Enfriamiento a presión constante del aire húmedo y temperatura de punto de rocío en el diagrama T - s del agua.

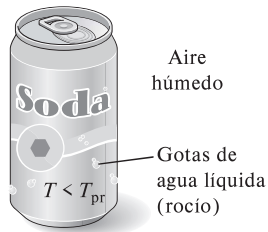


FIGURA 14-9

Cuando la temperatura de una lata de bebida fría está por debajo de la temperatura de punto de rocío del aire circundante, la lata "suda".

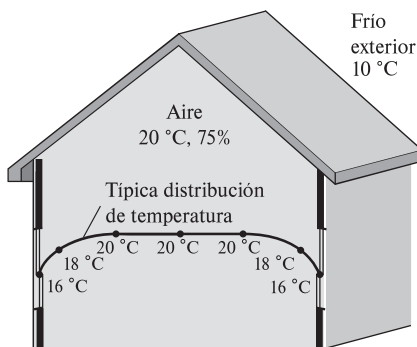


FIGURA 14-10

Esquema para el ejemplo 14-2.

como consecuencia la condensación de un poco de humedad, y esto es el inicio de la formación del rocío.

La **temperatura de punto de rocío** T_{pr} se define como la temperatura a la que se inicia la condensación si el aire se enfría a presión constante. En otras palabras T_{pr} es la temperatura de saturación del agua correspondiente a la presión de vapor:

$$T_{pr} = T_{sat \text{ a } P_v} \quad (14-13)$$

Esto se muestra también en la figura 14-8. Cuando el aire se enfría a presión constante, la presión de vapor P_v permanece constante. Por lo tanto, el vapor en el aire (estado 1) experimenta un proceso de enfriamiento a presión constante hasta que alcanza la línea de vapor saturado (estado 2). La temperatura en este punto es T_{pr} y si la temperatura desciende un poco más, algo de vapor se condensa. En consecuencia, la cantidad de vapor en el aire disminuye, lo que produce una disminución de P_v . El aire permanece saturado durante el proceso de condensación y, por ello, sigue una trayectoria de humedad relativa de 100 por ciento (la línea de vapor saturado). La temperatura ordinaria y la temperatura de punto de rocío del aire saturado son idénticas en este caso.

Es posible que en un día caliente y húmedo, al comprar un refresco de lata frío en una máquina expendedora, se advierta que se forma rocío sobre la lata. Esa formación de rocío indica que la temperatura de la bebida está por debajo de la T_{pr} del aire de los alrededores (Fig. 14-9).

La temperatura del punto de rocío del aire del ambiente se determina con facilidad si se enfría un poco de agua en una copa metálica y se le añade una pequeña cantidad de hielo para luego agitarla. La temperatura de la superficie exterior de la copa, cuando empieza a formarse rocío sobre la superficie, es la temperatura del punto de rocío del aire.

EJEMPLO 14-2 Empañado de las ventanas de una casa

En clima frío, la condensación se aprecia sobre las superficies interiores de las ventanas debido a las bajas temperaturas del aire cercano a su superficie. Considere la casa que se muestra en la figura 14-10, la cual tiene aire a 20 °C y 75 por ciento de humedad relativa. ¿Cuál será la temperatura de la ventana en que la humedad del aire empezará a condensarse en las superficies interiores de las ventanas?

SOLUCIÓN El interior de una casa se mantiene a una temperatura y humedad especificadas. Se debe determinar la temperatura de la ventana a la cual comienza a empañarse.

Propiedades La presión de saturación del agua a 20 °C es $P_{sat} = 2.3392$ kPa (tabla A-4).

Análisis En general, la distribución de la temperatura en una casa no es uniforme. En invierno, cuando la temperatura de los exteriores disminuye, sucede lo mismo con las temperaturas interiores cerca de los muros y las ventanas. Por consiguiente, el aire cercano a los muros y las ventanas permanece a una temperatura inferior que la de las partes interiores de una casa, aun cuando la presión total y la presión de vapor permanezcan constantes por toda la casa. Como resultado, el aire cercano a los muros y ventanas experimentará un proceso de enfriamiento $P_v = \text{constante}$ hasta que la humedad en el aire comience a condensarse. Esto sucederá cuando el aire alcance su temperatura de punto de rocío T_{pr} . El punto de rocío se determina a partir de la ecuación 14-13 para ser

$$T_{pr} = T_{sat \text{ a } P_v}$$

donde

$$P_v = \phi P_{g, a 20^\circ\text{C}} = (0.75)(2.3392 \text{ kPa}) = 1.754 \text{ kPa}$$

Por lo tanto,

$$T_{\text{pr}} = T_{\text{sat a } 1.754 \text{ kPa}} = 15.4^\circ\text{C}$$

Comentario Advierta que la superficie interior de la ventana se debe mantener arriba de 15.4°C si se desea evitar la condensación en las superficies de las ventanas.

14-4 ■ TEMPERATURAS DE SATURACIÓN ADIABÁTICA Y DE BULBO HÚMEDO

La humedad relativa y la humedad específica se emplean con frecuencia en ingeniería y en las ciencias de la atmósfera, y es deseable relacionarlas para medir fácilmente cantidades como la temperatura y la presión. Una forma de determinar la humedad relativa consiste en encontrar la temperatura de punto de rocío del aire, tal como se estudió en la sección anterior. Al conocer la temperatura del punto de rocío es posible determinar la presión de vapor P_v y con ello, la humedad relativa. Este planteamiento es sencillo pero no muy práctico.

Otra manera de determinar la humedad absoluta o relativa se relaciona con un *proceso de saturación adiabática*, mostrado de manera esquemática y en un diagrama T - s en la figura 14-11. El sistema se compone de un canal largo aislado que contiene una pila de agua. Por el canal se hace pasar un flujo estacionario de aire no saturado que tiene una humedad específica de ω_1 (desconocida) y una temperatura de T_1 . Cuando el aire fluye sobre el agua, un poco de ésta se evapora y se mezcla con el flujo de aire. El contenido de humedad del aire aumentará durante este proceso y su temperatura descenderá, puesto que parte del calor latente de vaporización del agua que se evapora provendrá del aire. Si el canal tiene un largo suficiente, el flujo de aire saldrá como aire saturado ($\phi = 100$ por ciento) a la temperatura T_2 , que se llama **temperatura de saturación adiabática**.

Si se suministra agua de reposición al canal a la razón de evaporación y a la temperatura T_2 , el proceso de saturación adiabática recién descrito puede analizarse como un proceso de flujo estacionario. El proceso no incluye interacciones de calor o trabajo, y los cambios en la energía cinética y potencial pueden ignorarse. De modo que las relaciones de la conservación de la masa y de la conservación de la energía para este sistema de flujo estacionario de dos entradas y una salida se reduce a lo siguiente:

Balance de masa:

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a \quad (\text{La razón del flujo másico del aire seco permanece constante})$$

$$\dot{m}_{w_1} + \dot{m}_f = \dot{m}_{w_2} \quad (\text{La razón del flujo másico del vapor de agua en el aire se incrementa por una cantidad igual a la razón de evaporación } \dot{m}_f)$$

o

$$\dot{m}_a \omega_1 + \dot{m}_f = \dot{m}_a \omega_2$$

Por lo tanto,

$$\dot{m}_f = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)$$

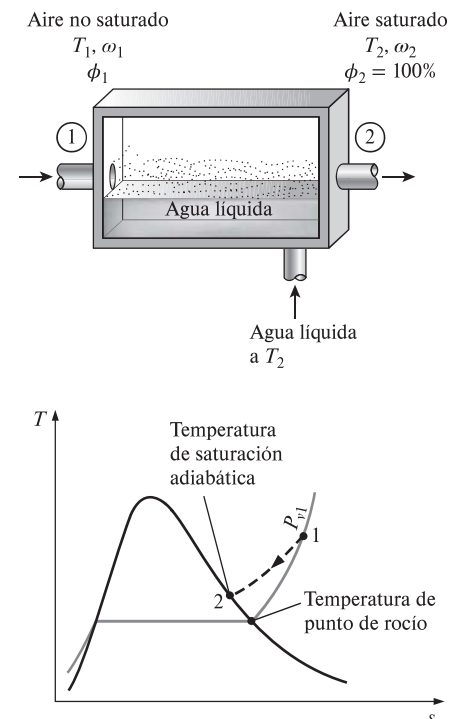


FIGURA 14-11

El proceso de saturación adiabática y su representación en un diagrama T - s del agua.

Balance de energía:

$$\dot{E}_{\text{ent}} = \dot{E}_{\text{sal}} \quad (\text{puesto que } \dot{Q} = 0 \text{ y } \dot{W} = 0)$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_f h_{f_2} = \dot{m}_a h_2$$

o

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_{f_2} = \dot{m}_a h_2$$

Al dividir entre \dot{m}_a se obtiene

$$h_1 + (\omega_2 - \omega_1) h_{f_2} = h_2$$

o

$$(c_p T_1 + \omega_1 h_{g_1}) + (\omega_2 - \omega_1) h_{f_2} = (c_p T_2 + \omega_2 h_{g_2})$$

lo que produce

$$\omega_1 = \frac{c_p (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{f_2}}{h_{g_1} - h_{f_2}} \quad (14-14)$$

donde, de la ecuación 14-11b),

$$\omega_2 = \frac{0.622 P_{g_2}}{P_2 - P_{g_2}} \quad (14-15)$$

puesto que $\phi_2 = 100$ por ciento. De este modo se concluye que la humedad específica (y la humedad relativa) del aire pueden deducirse de las ecuaciones 14-14 y 14-15 si se mide la presión y la temperatura del aire a la entrada y a la salida de un saturador adiabático.

Si el aire que entra al canal ya está saturado, entonces la temperatura de saturación adiabática T_2 será idéntica a la temperatura de entrada T_1 , en cuyo caso la ecuación 14-14 produce $\omega_1 = \omega_2$. En general, la temperatura de saturación adiabática estará entre las temperaturas de entrada y del punto de rocío.

El proceso de saturación adiabática recién analizado proporciona un medio para determinar la humedad absoluta o relativa del aire, pero es necesario un canal largo o un mecanismo de rociado para alcanzar condiciones de saturación a la salida. Un planteamiento más práctico consiste en emplear un termómetro cuyo bulbo esté cubierto con una mecha de algodón saturada con agua, y soplar aire sobre ella, tal como se muestra en la figura 14-12. La temperatura medida de esta manera se denomina **temperatura de bulbo húmedo** T_{bh} , y se emplea comúnmente en aplicaciones de acondicionamiento de aire.

El principio básico implicado es similar al de la saturación adiabática. Cuando el aire no saturado pasa sobre la mecha húmeda, un poco del agua en la mecha se evapora. Como resultado, disminuye la temperatura del agua y se crea una diferencia de temperatura (que es la fuerza impulsora para la transferencia de calor) entre el aire y el agua. Luego de un tiempo, la pérdida de calor del agua por evaporación es igual a la ganancia de calor del aire y la temperatura del agua se estabiliza. En este punto, la lectura del termómetro es la temperatura de bulbo húmedo. También se puede medir la temperatura de bulbo húmedo con un termómetro con mecha húmeda colocado en un soporte unido a una manivela y girando el soporte rápidamente; es decir, se mueve el termómetro en lugar del aire. Un dispositivo que trabaje con base en este principio se denomina *psicrómetro giratorio* y se muestra en la figura 14-13. Normalmente también se monta un termómetro de bulbo seco sobre el armazón de este dispositivo, de manera que la temperatura de bulbo húmedo así como la de bulbo seco puedan medirse de manera simultánea.

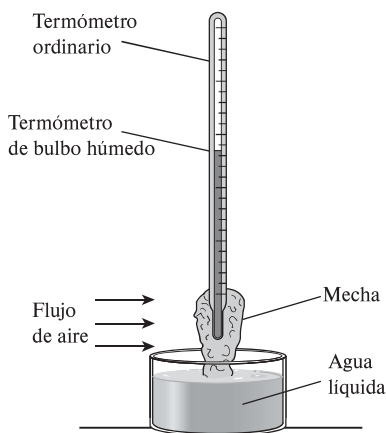


FIGURA 14-12

Un arreglo simple para medir la temperatura de bulbo húmedo.

Los avances en la electrónica han hecho posible medir la humedad de una manera rápida y confiable. Parece que los psicrómetros giratorios y los termómetros de mecha húmeda se han vuelto cosa del pasado. Los dispositivos electrónicos de medición de humedad actuales basados en el cambio de capacitancia de una delgada película polimérica, a medida que absorben vapor de agua, son capaces de identificar y mostrar digitalmente la humedad relativa con 1 por ciento de precisión en cuestión de segundos.

En general, la temperatura de saturación adiabática y la temperatura de bulbo húmedo no son iguales. Pero para mezclas de aire-vapor de agua a presión atmosférica, la temperatura de bulbo húmedo es aproximadamente igual a la temperatura de saturación adiabática. Así, la temperatura de bulbo húmedo T_{bh} puede emplearse en la ecuación 14-14 en lugar de T_2 para determinar la humedad específica del aire.

EJEMPLO 14-3 Las humedades específica y relativa del aire

Las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo del aire atmosférico a una presión de 1 atm (101.325 kPa) se miden con un psicrómetro giratorio. Se establece que sus valores son de 25 y 15 °C, respectivamente. Determine *a*) la humedad específica, *b*) la humedad relativa y *c*) la entalpía del aire.

SOLUCIÓN Se proporcionan las temperaturas de bulbo seco y húmedo. Se deben determinar la humedad específica, la humedad relativa y la entalpía.

Propiedades La presión de saturación del agua es de 1.7057 kPa a 15 °C, y 3.1698 kPa a 25 °C (tabla A-4). El calor específico a presión constante del aire a temperatura ambiente es $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (tabla A-2).

Análisis *a*) La humedad específica ω_1 se obtiene con la ecuación 14-14,

$$\omega_1 = \frac{c_p(T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg_2}}{h_{g_1} - h_{f_2}}$$

donde T_2 es la temperatura de bulbo húmedo y ω_2 es

$$\begin{aligned} \omega_2 &= \frac{0.622 P_{g_2}}{P_2 - P_{g_2}} = \frac{(0.622)(1.7057 \text{ kPa})}{(101.325 - 1.7057) \text{ kPa}} \\ &= 0.01065 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco} \end{aligned}$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{(1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(15 - 25)^\circ\text{C} + (0.01065)(2465.4 \text{ kJ/kg})}{(2546.5 - 62.982) \text{ kJ/kg}} \\ &= 0.00653 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco} \end{aligned}$$

b) La humedad relativa ϕ_1 se determina con la ecuación 14-11a)

$$\phi_1 = \frac{\omega_1 P_2}{(0.622 + \omega_1) P_{g_1}} = \frac{(0.00653)(101.325 \text{ kPa})}{(0.622 + 0.00653)(3.1698 \text{ kPa})} = 0.332 \text{ o } 33.2\%$$

c) La entalpía por unidad de masa de aire seco se determina con base en la ecuación 14-12:

$$\begin{aligned} h_1 &= h_{a_1} + \omega_1 h_{v_1} \cong c_p T_1 + \omega_1 h_{g_1} \\ &= (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(25^\circ\text{C}) + (0.00653)(2546.5 \text{ kJ/kg}) \\ &= 41.8 \text{ kJ/kg aire seco} \end{aligned}$$

Comentario Los cálculos de propiedades vistos con anterioridad pueden llevarse a cabo de manera sencilla utilizando el programa EES y otros que cuenten con funciones psicrométricas integradas.

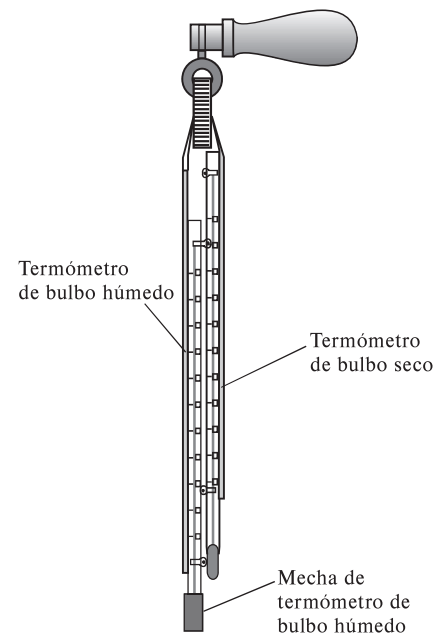


FIGURA 14-13

Psicrómetro giratorio o higrómetro.

14-5 ■ LA CARTA PSICROMÉTRICA

El estado del aire atmosférico a una presión especificada se establece por completo mediante dos propiedades intensivas independientes. El resto de las propiedades se calcula fácilmente a partir de las relaciones anteriores. El dimensionamiento de un sistema común de aire acondicionado implica un gran número de esos cálculos, lo que con el tiempo afecta los nervios del más paciente de los ingenieros. Por lo tanto, hay una clara motivación para efectuar esos cálculos una vez y presentar los datos en gráficas que sean fáciles de leer. Dichas gráficas reciben el nombre de **cartas psicrométricas**, y se utilizan en aplicaciones de acondicionamiento de aire. Una carta psicrométrica para una presión de 1 atm (101.325 kPa o 14.696 psia) se presenta en la figura A-31 en unidades del SI y en la figura A-31E en unidades inglesas. Las cartas psicrométricas a otras presiones (para emplearse en elevaciones bastante más altas que el nivel del mar) también están disponibles.

Las características más importantes de la carta psicrométrica se presentan en la figura 14-14. Las temperaturas de bulbo seco se muestran sobre el eje horizontal y la humedad específica sobre el eje vertical. (Algunas cartas también muestran la presión de vapor sobre el eje vertical ya que para una presión fija P existe una correspondencia de uno a uno entre la humedad específica ω y la presión de vapor P_v , como se observa en la ecuación 14-8.) En el extremo izquierdo de la carta se observa una curva (llamada *línea de saturación*) en lugar de una línea recta. Todos los estados de aire saturado se localizan en esta curva. Por lo tanto, es también la curva de un 100 por ciento de humedad relativa. Otras curvas de humedad relativa constante tienen la misma forma general.

Las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante tienen una apariencia descendente hacia la derecha. Las líneas de volumen específico constante (en m^3/kg de aire seco) parecen similares, salvo que son más inclinadas. Las líneas de entalpía constante (en kJ/kg de aire seco) están casi paralelas a las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante. Por consiguiente, las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante en algunas cartas se emplean como líneas de entalpía constante.

Para aire saturado, las temperaturas de bulbo seco, de bulbo húmedo y de punto de rocío son idénticas (Fig. 14-15), por ende, la temperatura de punto de rocío del aire atmosférico ω en cualquier punto sobre la gráfica se determina al dibujar una línea horizontal (una línea de $\omega = \text{constante}$ o $P_v = \text{constante}$) desde el punto hasta la curva saturada. El valor de la temperatura en el punto de intersección es la temperatura de punto de rocío.

La carta psicrométrica también es una valiosa ayuda en la visualización de los procesos de acondicionamiento de aire. Un proceso de calentamiento o enfriamiento ordinario, por ejemplo, aparecerá como una línea horizontal en esta carta si no se incluye humidificación o deshumidificación (es decir, $\omega = \text{constante}$). Cualquier desviación de la línea horizontal indica que durante el proceso se añade o se extrae humedad al o del aire.

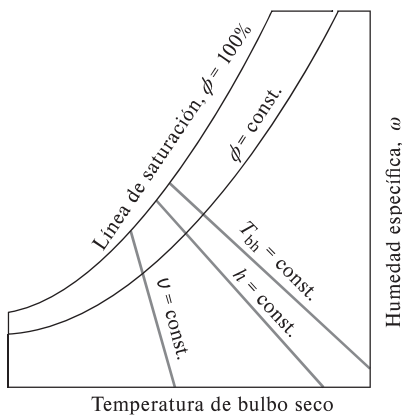


FIGURA 14-14

Esquema de una carta psicrométrica.

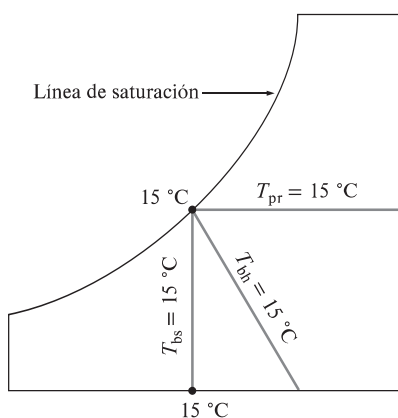


FIGURA 14-15

Para el aire saturado, las temperaturas de bulbo seco, de bulbo húmedo y de punto de rocío son idénticas.

EJEMPLO 14-4 El uso de la carta psicrométrica

Considere un cuarto que tiene aire a 1 atm, 35 °C y 40 por ciento de humedad relativa. Con la carta psicrométrica determine *a)* la humedad específica, *b)* la entalpía, *c)* la temperatura de bulbo húmedo, *d)* la temperatura de punto de rocío y *e)* el volumen específico del aire.

SOLUCIÓN Se proporciona la humedad relativa del aire en el cuarto. Se determinarán la humedad específica, la entalpía, la temperatura de bulbo húmedo, la temperatura de rocío y el volumen específico del aire utilizando la carta psicrométrica.

Análisis A una presión total dada, el estado del aire atmosférico se establece mediante dos propiedades independientes, como la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa. Otras propiedades se determinan al leer directamente sus valores en el estado especificado.

a) La humedad específica se determina al dibujar una línea horizontal del estado especificado hacia la derecha hasta que interseca al eje ω , como se aprecia en la figura 14-16. En el punto de intersección se lee

$$\omega = 0.0142 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco}$$

b) La entalpía del aire por unidad de masa de aire seco se determina al trazar una línea paralela a las líneas de $h = \text{constante}$ desde el estado especificado hasta que interseca la escala de la entalpía. En el punto de intersección se lee

$$h = 71.5 \text{ kJ/kg aire seco}$$

c) La temperatura de bulbo húmedo se determina al trazar una línea paralela a la línea de $T_{\text{bh}} = \text{constante}$ a partir del estado especificado hasta que interseca la línea de saturación, resultando

$$T_{\text{bh}} = 24^\circ\text{C}$$

d) La temperatura del punto de rocío se determina al trazar una línea horizontal desde el estado especificado hacia la izquierda hasta intersecar la línea de saturación, dando por resultado

$$T_{\text{pr}} = 19.4^\circ\text{C}$$

e) El volumen específico por unidad de masa de aire seco se determina al observar las distancias entre el estado especificado y las líneas de $\omega = \text{constante}$ a ambos lados del punto. El volumen específico se obtiene mediante interpolación visual como

$$v = 0.893 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

Comentario Los valores que se leen en la carta psicrométrica inevitablemente tienen errores de lectura, por lo que su precisión es limitada.

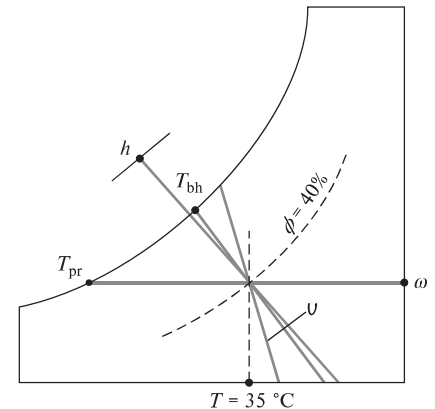


FIGURA 14-16

Esquema para el ejemplo 14-4.

14-6 ■ COMODIDAD HUMANA Y ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

Los seres humanos tienen una debilidad inherente: necesitan sentirse cómodos. Quieren vivir en un ambiente que no sea ni caliente ni frío, ni muy húmedo ni muy seco. Sin embargo, la comodidad no se obtiene de manera sencilla dado que las necesidades del cuerpo humano y el clima no suelen ser muy compatibles. Para alcanzar la comodidad es necesario luchar constantemente contra los factores que causan descontento, como temperaturas mayores o menores y humedades, altas o bajas. La tarea del ingeniero es ayudar a la gente a sentirse cómoda. (Además, eso lo mantendrá con empleo.)

No es difícil que la gente descubra que no puede cambiar el clima en una región. Todo lo que puede hacer es cambiarlo en un espacio confinado, como una casa o un lugar de trabajo (Fig. 14-17). En el pasado, esto se logró parcialmente mediante fuego y sencillos sistemas de calefacción interiores. Hoy día, los modernos sistemas de acondicionamiento de aire pueden calentar, enfriar, humidi-



FIGURA 14-17

No es posible cambiar las condiciones climatológicas, pero sí el clima en un espacio confinado por medio del acondicionamiento de aire.

© Ryan McVay/Getty Images RF

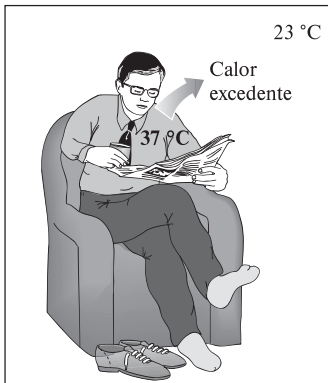


FIGURA 14-18

Un cuerpo se siente cómodo cuando puede disipar libremente su calor excedente, y no más.

ficar, deshumidificar, limpiar e incluso desodorizar el aire; en otras palabras, *acondicionar* el aire según las necesidades de las personas. Los sistemas de acondicionamiento de aire están diseñados para *satisfacer* las necesidades del cuerpo humano; en consecuencia, es fundamental comprender los aspectos termodinámicos del cuerpo.

El cuerpo humano puede verse como una máquina térmica cuya entrada de energía es el alimento. Como cualquier otra máquina térmica, el cuerpo humano genera calor de desecho, que debe liberarse hacia el ambiente si el cuerpo va a continuar en operación. La tasa de generación de calor depende del nivel de la actividad. Para un hombre adulto promedio, es cercana a 87 W cuando duerme, 115 W cuando descansa o realiza trabajo de oficina, 230 W cuando juega boliche y 440 W cuando realiza trabajo físico intenso. Los números correspondientes para una mujer adulta son casi 15 por ciento menores. (Esta diferencia se debe al tamaño del cuerpo, no a su temperatura. La temperatura interna del cuerpo de una persona saludable se mantiene constante en 37 °C.) Un cuerpo se sentirá cómodo en un ambiente en el cual pueda disipar este calor de desecho (Fig. 14-18).

La transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura. En consecuencia, en ambientes fríos un cuerpo perderá más calor del que normalmente genera, lo que produce una sensación de incomodidad. El organismo trata de disminuir el déficit de energía y para ello reduce la circulación de la sangre cerca de la piel (por eso se ve pálida), esto reduce la temperatura de la piel, que es de aproximadamente 34 °C para una persona promedio y, por lo tanto, también la tasa de transferencia de calor. Una baja temperatura de la piel causa molestias. Las manos, por ejemplo, sienten dolor cuando la temperatura de la piel llega a 10 °C (50 °F). Es posible reducir la pérdida de calor del cuerpo si se ponen barreras (ropa adicional, mantas, etc.) en la trayectoria del calor o si aumenta la relación de generación de calor dentro del cuerpo mediante ejercicio. Por ejemplo, la comodidad de una persona en reposo, vestida con ropa de invierno en un cuarto a 10 °C (50 °F), es más o menos igual al nivel de comodidad de una persona idéntica que hace trabajo moderado en un cuarto cuya temperatura se acerca a -23 °C (-10 °F). O puede enconcharse y poner sus manos entre las piernas para reducir la superficie por la que escapa el calor.

En ambientes cálidos existe el problema opuesto: parece que no se disipa el suficiente calor del cuerpo, y se experimenta la sensación de estar dentro de un asador. La gente vestirá ropa ligera para facilitar que el calor salga del cuerpo y reducirá el nivel de actividad para disminuir la tasa de generación de calor de desecho en el cuerpo. También se enciende el ventilador para sustituir continuamente la capa de aire caliente que se forma alrededor del cuerpo como consecuencia del calor corporal por el aire más frío de las otras partes del cuarto. Cuando se hace trabajo ligero o se camina despacio, cerca de la mitad del calor producido por el cuerpo se disipa mediante la sudoración como *calor latente*, mientras que la otra mitad se disipa por convección, y la radiación como *calor sensible*. Cuando se descansa o se realiza trabajo de oficina, la mayor parte del calor (casi 70 por ciento) se disipa en la forma de calor sensible, en tanto que cuando se hace trabajo físico intenso, la mayor parte del calor (cerca de 60 por ciento) se disipa en forma de calor latente. El cuerpo ayuda sudando más. Cuando este sudor se evapora, absorbe calor latente del cuerpo y se enfría. Sin embargo, la transpiración no es muy útil si la humedad relativa del ambiente es cercana a 100 por ciento. La sudoración prolongada sin ninguna ingestión de fluidos producirá deshidratación y reducirá el sudor, lo que conduce a un aumento en la temperatura del cuerpo y a la insolación.

Otro factor importante que influye en la sensación de comodidad es la transferencia de calor por radiación entre el cuerpo y las superficies circundantes como paredes y ventanas. Los rayos del sol viajan por el espacio por radiación. Usted se calienta enfrente de una hoguera incluso si el aire entre usted y ella es bastante frío. De la misma manera, en un cuarto caliente usted sentirá frío si la superficie del techo y de las paredes está a una temperatura considerablemente menor. Esto se debe a la transferencia térmica directa entre su cuerpo y las superficies circundantes mediante radiación. Los calefactores radiantes se emplean para calentar lugares en los que es difícil hacerlo, como los talleres de reparación de automóviles.

La comodidad del cuerpo humano depende de tres factores: la temperatura (bulbo seco), la humedad relativa y el movimiento del aire. La temperatura del ambiente es el indicio más importante de la comodidad. La mayor parte de la gente se siente cómoda cuando la temperatura del ambiente está entre 22 y 27 °C (72 y 80 °F). La humedad relativa también tiene un efecto considerable en el bienestar, pues influye en la cantidad de calor que un cuerpo puede disipar por evaporación. La humedad relativa es una medida de la capacidad del aire para absorber más humedad. La humedad relativa alta retarda el rechazo de calor por evaporación, y la humedad relativa baja lo acelera. La mayoría de la gente prefiere una humedad relativa de 40 a 60 por ciento.

El movimiento del aire también desempeña un papel importante en la comodidad humana. Elimina el aire caliente y húmedo que se forma alrededor del cuerpo y lo sustituye con aire fresco. En consecuencia, el movimiento del aire mejora el rechazo de calor tanto por convección como por evaporación. El movimiento del aire debe ser suficientemente intenso para eliminar calor y humedad de la vecindad del cuerpo, pero al mismo tiempo debe ser apacible para no sentirlo. La mayoría de la gente se siente bien si la velocidad del aire es de aproximadamente 15 m/min. El movimiento del aire a muy alta velocidad ocasiona incomodidad. Por ejemplo, un ambiente a 10 °C (50 °F) con vientos de 48 km/h se siente tan frío como un ambiente a -7 °C (20 °F) con vientos de 3 km/h debido al efecto de enfriamiento del cuerpo por el movimiento del aire (el *factor de enfriamiento del viento*). Otros factores que influyen en la sensación de comodidad son la limpieza del aire, el olor, el ruido y el efecto de radiación.

14-7 ■ PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

Para mantener una vivienda o una construcción industrial a la temperatura y humedad deseadas son necesarios algunos procesos definidos como “acondicionamiento del aire”. Estos procesos incluyen el *calentamiento simple* (elevar la temperatura), el *enfriamiento simple* (reducir la temperatura), la *humidificación* (agregar humedad) y la *deshumidificación* (eliminar humedad). Algunas veces dos o más de estos procesos son necesarios para llevar el aire al nivel de temperatura y humedad que se desea.

Diversos procesos de acondicionamiento de aire se ilustran en la carta psicrométrica de la figura 14-19. Advierta que los procesos de calentamiento y enfriamiento simple aparecen como líneas horizontales en esta gráfica, puesto que el contenido de humedad del aire permanece constante ($\omega = \text{constante}$) durante estos procesos. El aire se calienta y humidifica en el invierno y se enfría y deshumidifica en el verano. Observe cómo aparecen estos procesos en la carta psicrométrica.

La mayor parte de los procesos del acondicionamiento de aire pueden modelarse como procesos de flujo estacionario y, por lo tanto, la relación de *balance de masa* $\dot{m}_{\text{ent}} = \dot{m}_{\text{sal}}$ se expresa para el *aire seco* y el *agua* como

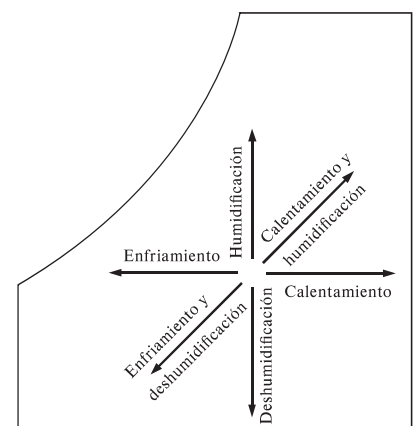


FIGURA 14-19

Varios procesos de acondicionamiento de aire.

Balance de masa para el aire seco:

$$\sum_{\text{ent}} \dot{m}_a = \sum_{\text{sal}} \dot{m}_a \quad (\text{kg/s}) \quad (14-16)$$

Balance de masa para el agua:

$$\sum_{\text{ent}} \dot{m}_w = \sum_{\text{sal}} \dot{m}_w \quad \text{o} \quad \sum_{\text{ent}} \dot{m}_a \omega = \sum_{\text{sal}} \dot{m}_a \omega \quad (14-17)$$

Despreciando los cambios de energía cinética y potencial, la relación del balance de energía de flujo estacionario $\dot{E}_{\text{ent}} = \dot{E}_{\text{sal}}$ puede expresarse en este caso como

$$\dot{Q}_{\text{ent}} + \dot{W}_{\text{ent}} + \sum_{\text{ent}} \dot{m}h = \dot{Q}_{\text{sal}} + \dot{W}_{\text{sal}} + \sum_{\text{sal}} \dot{m}h \quad (14-18)$$

El término “trabajo” por lo general consiste en el *trabajo del ventilador*, que es muy pequeño respecto de otros términos de la ecuación de la energía. A continuación se examinan algunos procesos comunes en el acondicionamiento de aire.

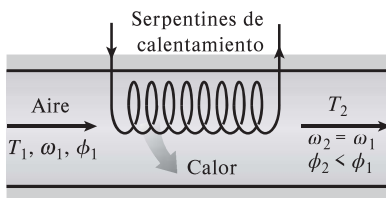


FIGURA 14-20

Durante el calentamiento simple, la humedad específica permanece constante, pero la humedad relativa disminuye.

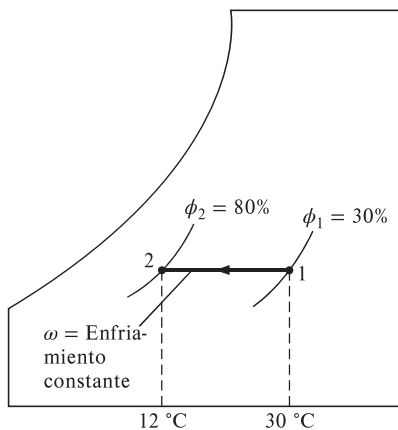


FIGURA 14-21

Durante el enfriamiento simple, la humedad específica permanece constante pero la humedad relativa aumenta.

Calentamiento y enfriamiento simples ($\omega = \text{constante}$)

Muchos sistemas de calefacción residencial constan de una estufa, una bomba de calor o un calentador de resistencia eléctrica. El aire en esos sistemas se calienta al circular por un ducto que contiene los tubos para los gases calientes o los alambres de la resistencia eléctrica, como se indica en la figura 14-20. La cantidad de humedad en el aire permanece constante durante este proceso, ya que no se añade humedad al aire ni se elimina de éste. Esto es, la humedad específica del aire permanece constante ($\omega = \text{constante}$) durante un proceso de calentamiento (o enfriamiento) sin humidificación o deshumidificación. Dicho proceso de calentamiento procederá en la dirección de aumento de la temperatura de bulbo seco siguiendo una línea de humedad específica constante en la carta psicrométrica, la cual aparece como una línea horizontal.

Advierta que la humedad relativa del aire disminuye durante un proceso de calentamiento, incluso si la humedad específica ω permanece constante. Esto se debe a que la humedad relativa es la relación entre el contenido de humedad y la capacidad del aire de sostener humedad a la misma temperatura, y la capacidad de sostener humedad aumenta con la temperatura. En consecuencia, la humedad relativa del aire calentado puede estar muy por debajo de los niveles de comodidad, lo cual ocasiona resequead en la piel, dificultades respiratorias y aumento en la electricidad estática.

Un proceso de enfriamiento a humedad específica constante es similar al proceso de calentamiento analizado antes, excepto que la temperatura de bulbo seco disminuye y la humedad relativa aumenta durante un proceso de este tipo, como se muestra en la figura 14-21. El enfriamiento se logra al pasar el aire sobre algunos serpentines por los cuales fluye un refrigerante o agua fría.

Las ecuaciones de la conservación de la masa para un proceso de calentamiento o enfriamiento que no incluye humidificación o deshumidificación se reduce a $\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$ para aire seco y $\omega_1 = \omega_2$ para el agua. Si se descarta cualquier trabajo de ventilador que pueda estar presente, en este caso la ecuación de la conservación de la energía se reduce a

$$\dot{Q} = \dot{m}_a(h_2 - h_1) \quad \text{o} \quad q = h_2 - h_1$$

donde h_1 y h_2 son las entalpías por unidad de masa de aire seco a la entrada y a la salida de la sección de calentamiento o enfriamiento, respectivamente.

EJEMPLO 14-5 Enfriamiento del aire

Se enfría aire húmedo a 1 atm, 100 °F, y 70 por ciento de humedad relativa a presión constante hasta la temperatura de punto de rocío (Fig. 14-22). Determine el enfriamiento, en Btu/lbm, de aire seco requerido en este proceso.

SOLUCIÓN Se enfría aire húmedo en un estado especificado a presión constante hasta la temperatura de punto de rocío. Se va a determinar el enfriamiento requerido para este proceso.

Suposiciones **1** Éste es un proceso de flujo estacionario, de ahí que la tasa de flujo másico del aire seco permanece constante durante todo el proceso ($\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a$). **2** El aire seco y el vapor de agua son gases ideales. **3** Los cambios de las energías cinética y potencial son insignificantes.

Análisis La cantidad de humedad en el aire permanece constante ($\omega_1 = \omega_2$) a medida que fluye por la sección de enfriamiento ya que el proceso no implica humidificación o deshumidificación. Los estados de entrada y salida del aire se especifican por completo, y la presión total es de 1 atm. Las propiedades del aire en el estado de entrada se determinan con la carta psicrométrica (Fig. A-31E) como

$$\begin{aligned} h_1 &= 56.7 \text{ Btu/lbm aire seco} \\ \omega_1 &= 0.0296 \text{ lbm H}_2\text{O/lbm aire seco} (= \omega_2) \\ T_{\text{pr},1} &= 88.4 \text{ °F} \end{aligned}$$

La entalpía en el estado de salida es

$$\left. \begin{aligned} P &= 1 \text{ atm} \\ T_2 &= T_{\text{pr},1} = 88.4 \text{ °F} \\ \phi_2 &= 1 \end{aligned} \right\} h_2 = 53.8 \text{ Btu/lbm aire seco}$$

A partir del balance de energía del aire en la sección de enfriamiento,

$$q_{\text{sal}} = h_1 - h_2 = 56.7 - 53.8 = 2.9 \text{ Btu/lbm aire seco}$$

Comentario El aire se enfría en 11.6 °C durante este proceso. La humedad específica permanece constante durante un proceso de enfriamiento simple y se representa mediante una línea horizontal en la carta psicrométrica.

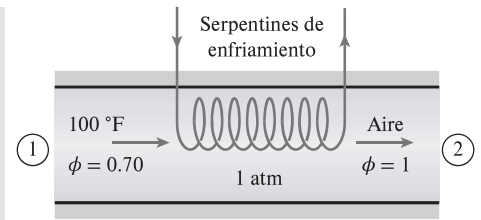


FIGURA 14-22
Esquema para el ejemplo 14.5.

Calentamiento con humidificación

Los problemas asociados con la humedad relativa baja, producto del calentamiento simple, se eliminan al humidificar al aire calentado. Esto se consigue al pasar el aire por una sección de calentamiento (proceso 1-2) y después por una sección de humidificación (proceso 2-3), como se muestra en la figura 14-23.

La ubicación del estado 3 depende de cómo se lleve a cabo la humidificación. Si se introduce vapor en la sección de humidificación, se produce una razonable humidificación con calentamiento adicional ($T_3 > T_2$). Si en vez de esto la humidificación se realiza al rociar agua en el flujo de aire, parte del calor latente de vaporización provendrá del aire, lo que producirá enfriamiento del flujo de aire ($T_3 < T_2$). En este caso, el aire debe calentarse a una temperatura más alta en la sección de calentamiento, para compensar el efecto de enfriamiento durante el proceso de humidificación.

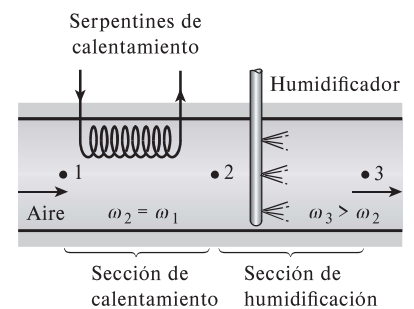


FIGURA 14-23
Calentamiento con humidificación.

EJEMPLO 14-6 Calentamiento y humidificación del aire

Mediante un sistema de acondicionamiento de aire se toma aire exterior a 10 °C y 30 por ciento de humedad relativa, a una tasa constante de 45 m³/min y se le acondicionará a 25 °C y 60 por ciento de humedad relativa. El aire exterior se

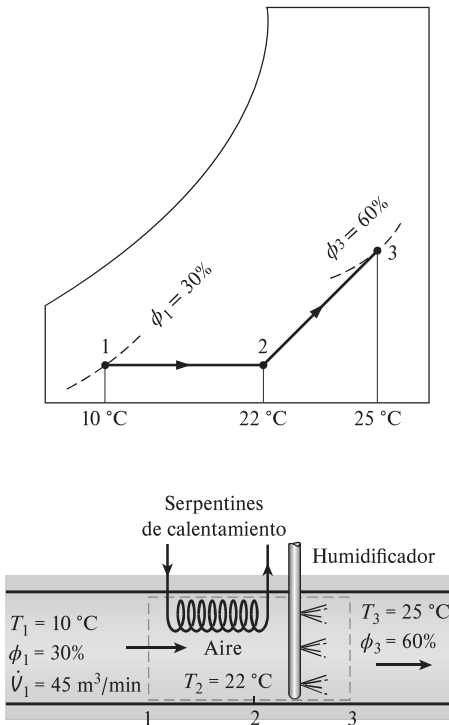


FIGURA 14-24

Esquema y carta psicrométrica para el ejemplo 14-6.

calienta primero hasta 22 °C en la sección de calentamiento, después se humidifica mediante la inyección de vapor caliente en la sección humidificadora. Suponga que todo el proceso sucede a una presión de 100 kPa; entonces determine a) la tasa de suministro de calor en la sección de calentamiento y b) el flujo másico del vapor de agua que se requiere en la sección de humidificación.

SOLUCIÓN Primero se calienta el aire del exterior y después se humedece por medio de inyección de vapor de agua. Se determinarán la razón de transferencia de calor y el flujo másico.

Suposiciones 1 Éste es un proceso de flujo estacionario y, por ende, el flujo másico del aire seco permanece constante durante todo el proceso. 2 El aire seco y el vapor de agua son gases ideales. 3 Los cambios en las energías cinética y potencial son insignificantes.

Propiedades El calor específico a presión constante del aire a temperatura ambiente es $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ y su constante de gases es $R_g = 0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (tabla A-2a). La presión de saturación del agua es 1.2281 kPa a 10 °C y 3.1698 kPa a 25 °C. La entalpía de vapor de agua saturado es 2 519.2 kJ/kg a 10 °C y 2 541.0 kJ/kg a 22 °C (tabla A-4).

Análisis Se toma el sistema como si fuera la sección de calentamiento o la de humidificación, como sea más conveniente. En la figura 14-24 se muestra un esquema del sistema y de la carta psicrométrica. Advierta que la cantidad de vapor de agua en el aire permanece constante en la sección de calentamiento ($\omega_1 = \omega_2$) y se incrementa en la sección de humidificación ($\omega_3 > \omega_2$).

a) Al aplicar los balances de masa y energía a la sección de calentamiento se obtiene

Balance de masa de aire seco:

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a$$

Balance de masa de agua:

$$\dot{m}_a \omega_1 = \dot{m}_a \omega_2 \rightarrow \omega_1 = \omega_2$$

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{\text{ent}} + \dot{m}_a h_1 = \dot{m}_a h_2 \rightarrow \dot{Q}_{\text{ent}} = \dot{m}_a (h_2 - h_1)$$

La carta psicrométrica ofrece grandes ventajas en la determinación de las propiedades del aire húmedo. Sin embargo, su empleo se limita a una presión especificada, que es de 1 atm (101.325 kPa) para la carta dada en el apéndice. A presiones diferentes de 1 atm, se deben utilizar otras cartas correspondientes a estas presiones, o bien, las relaciones desarrolladas antes. En nuestro caso, la elección es clara:

$$P_{v_1} = \phi_1 P_{g_1} = \phi P_{\text{sat a } 10^\circ\text{C}} = (0.3)(1.2281 \text{ kPa}) = 0.368 \text{ kPa}$$

$$P_{a_1} = P_1 - P_{v_1} = (100 - 0.368) \text{ kPa} = 99.632 \text{ kPa}$$

$$v_1 = \frac{R_a T_1}{P_a} = \frac{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(283 \text{ K})}{99.632 \text{ kPa}} = 0.815 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_1}{v_1} = \frac{45 \text{ m}^3/\text{min}}{0.815 \text{ m}^3/\text{kg}} = 55.2 \text{ kg/min}$$

$$\omega_1 = \frac{0.622 P_{v_1}}{P_1 - P_{v_1}} = \frac{0.622(0.368 \text{ kPa})}{(100 - 0.368) \text{ kPa}} = 0.0023 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco}$$

$$h_1 = c_p T_1 + \omega_1 h_{g_1} = (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(10^\circ\text{C}) + (0.0023)(2 519.2 \text{ kJ/kg}) = 15.8 \text{ kJ/kg aire seco}$$

$$h_2 = c_p T_2 + \omega_2 h_{g_2} = (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(22^\circ\text{C}) + (0.0023)(2541.0 \text{ kJ/kg})$$

$$= 28.0 \text{ kJ/kg aire seco}$$

puesto que $\omega_2 = \omega_1$. Entonces la razón de transferencia de calor al aire en la sección de calentamiento se convierte en

$$\dot{Q}_{\text{ent}} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) = (55.2 \text{ kg/min})[(28.0 - 15.8) \text{ kJ/kg}]$$

$$= 673 \text{ kJ/min}$$

b) El balance de masa para el agua en la sección de humidificación puede expresarse como

$$\dot{m}_{a_2} \omega_2 + \dot{m}_w = \dot{m}_{a_3} \omega_3$$

o

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_3 - \omega_2)$$

donde

$$\omega_3 = \frac{0.622 \phi_3 P_{g_3}}{P_3 - \phi_3 P_{g_3}} = \frac{0.622 (0.60) (3.1698 \text{ kPa})}{[100 - (0.60)(3.1698)] \text{ kPa}}$$

$$= 0.01206 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco}$$

Por lo tanto,

$$\dot{m}_w = (55.2 \text{ kg/min})(0.01206 - 0.0023)$$

$$= 0.539 \text{ kg/min}$$

Comentario El resultado de 0.539 kg/min corresponde a un requerimiento de agua cercano a una tonelada por día, lo cual es significativo.

Enfriamiento con deshumidificación

La humedad específica del aire permanece constante durante un proceso de enfriamiento simple, pero su humedad relativa aumenta. Si la humedad relativa alcanza niveles extremadamente altos, tal vez sea necesario eliminar algo de humedad en el aire, es decir, deshumidificarlo. Para esto es necesario enfriar el aire por debajo de su temperatura de punto de rocío.

El proceso de enfriamiento con deshumidificación se muestra de manera esquemática en la carta psicrométrica de la figura 14-25, junto con el ejemplo 14-7. El aire caliente y húmedo entra a la sección de enfriamiento en el estado 1. A medida que pasa por los serpentines de enfriamiento, su temperatura disminuye y su humedad relativa aumenta a humedad específica constante. Si la sección de enfriamiento tiene la longitud suficiente, el aire alcanzará su punto de rocío (estado x , aire saturado). El enfriamiento adicional del aire resultará en la condensación de una parte de la humedad en el aire. Éste permanece saturado durante todo el proceso de condensación, que sigue una línea de 100 por ciento de humedad relativa hasta que alcanza el estado final (estado 2). El vapor de agua, que se condensa saliendo del aire durante este proceso, se elimina de la sección de enfriamiento por medio de un canal independiente. Suele considerarse que el condensado sale de la sección de enfriamiento a T_2 .

El aire frío y saturado en el estado 2 casi siempre se envía directamente a la habitación, donde se mezcla con el aire que hay ahí. No obstante, en ciertos casos, el aire en el estado 2 puede estar a la humedad específica correcta pero a una temperatura muy baja. En esos casos se hace pasar el aire por una sección de calentamiento donde su temperatura se eleva a un nivel más confortable antes de enviarlo al cuarto.

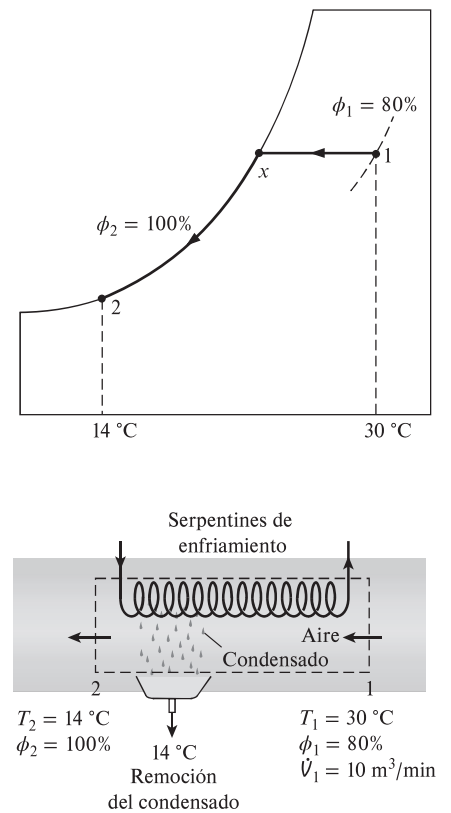


FIGURA 14-25

Esquema y carta psicrométrica para el ejemplo 14-7.

EJEMPLO 14-7 Enfriamiento y deshumidificación del aire

En una unidad de aire acondicionado de ventana entra aire a 1 atm, 30 °C y 80 por ciento de humedad relativa, a una tasa de 10 m³/min y sale como aire saturado a 14 °C. Parte de la humedad en el aire que se condensa durante el proceso se elimina también a 14 °C. Determine las tasas de eliminación de calor y de humedad del aire.

SOLUCIÓN El aire es enfriado y deshumidificado por una unidad de aire acondicionado de ventana. Se desea determinar la razón con la que se desprenderá el calor y la humedad.

Suposiciones **1** Esto es un proceso de flujo estacionario y, por lo tanto, el flujo másico del aire seco permanece constante durante todo el proceso. **2** El aire seco y el vapor de agua son gases ideales. **3** Los cambios en las energías cinética y potencial son insignificantes.

Propiedades La entalpía del agua líquida saturada a 14 °C es de 58.8 kJ/kg (tabla A-4). Asimismo, los estados del aire a la entrada y a la salida están especificados completamente y la presión total es de 1 atm. En consecuencia, es factible determinar las propiedades del aire en ambos estados a partir de la carta psicrométrica como sigue

$$\begin{aligned} h_1 &= 85.4 \text{ kJ/kg aire seco} & h_2 &= 39.3 \text{ kJ/kg aire seco} \\ \omega_1 &= 0.0216 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco} & \text{y } \omega_2 &= 0.0100 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco} \\ v_1 &= 0.889 \text{ m}^3/\text{kg aire seco} \end{aligned}$$

Análisis Se considera que la *sección de enfriamiento* es el sistema. Tanto el esquema del sistema como la carta psicrométrica del proceso se muestran en la figura 14-25. Observe que la cantidad de vapor de agua en el aire disminuye durante el proceso ($\omega_2 < \omega_1$) debido a la deshumidificación. Aplicando los balances de masa y energía en la sección de enfriamiento y deshumidificación se obtiene

Balance de la masa del aire seco:

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a$$

Balance de la masa del agua:

$$\dot{m}_{a_1}\omega_1 = \dot{m}_{a_2}\omega_2 + \dot{m}_w \rightarrow \dot{m}_w = \dot{m}_a(\omega_1 - \omega_2)$$

Balance de la energía:

$$\sum_{\text{ent}} \dot{m}h = \dot{Q}_{\text{sal}} + \sum_{\text{sal}} \dot{m}h \rightarrow \dot{Q}_{\text{sal}} = \dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{m}_w h_w$$

Entonces,

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_1}{v_1} = \frac{10 \text{ m}^3/\text{min}}{0.889 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}} = 11.25 \text{ kg/min}$$

$$\dot{m}_w = (11.25 \text{ kg/min})(0.0216 - 0.0100) = 0.131 \text{ kg/min}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{sal}} &= (11.25 \text{ kg/min})[(85.4 - 39.3) \text{ kJ/kg}] - (0.131 \text{ kg/min})(58.8 \text{ kJ/kg}) \\ &= 511 \text{ kJ/min} \end{aligned}$$

Por lo tanto, esta unidad de aire acondicionado elimina la humedad y el calor del aire a tasas de 0.131 kg/min y 511 kJ/min, respectivamente.

Enfriamiento evaporativo

Los sistemas de enfriamiento convencionales operan en un ciclo de refrigeración y pueden utilizarse en cualquier lugar del mundo, pero su costo inicial y de opera-

ción es muy alto. En los climas desérticos (calientes y secos) se puede evitar el alto costo del enfriamiento mediante *enfriadores evaporativos*, también conocidos como *enfriadores por rociado* o *baño de agua*.

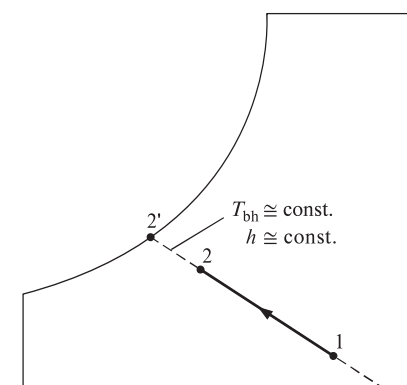
El enfriamiento evaporativo se basa en un sencillo principio: cuando se evapora el agua, el calor latente de vaporización se absorbe del cuerpo del agua y del aire de los alrededores. Como resultado, tanto el agua como el aire se enfrían durante el proceso. Este fenómeno se ha empleado por cientos de años para enfriar agua. Una jarra o cántaro poroso lleno con agua se deja en un área abierta con sombra. Una pequeña cantidad de agua sale a través de los agujeros porosos y el cántaro “suda”. En un ambiente seco, esta agua se evapora y enfría el resto del agua en el cántaro (Fig. 14-26).



FIGURA 14-26

El agua en una jarra porosa dejada en un área abierta y ventilada se enfría como resultado del enfriamiento evaporativo.

Quizás usted ha notado que en un día caliente y seco el aire se siente un poco más frío cuando el patio se riega. Esto es porque el agua absorbe el calor del aire cuando se evapora. Un enfriador evaporativo trabaja con el mismo principio. El proceso de enfriamiento evaporativo se muestra de manera esquemática en la carta psicrométrica de la figura 14-27. En el estado 1 entra al enfriador evaporativo aire caliente y seco, donde se rocía con agua líquida. Parte del agua se evapora durante este proceso al absorber calor del flujo de aire. Como resultado, la temperatura del flujo de aire disminuye y su humedad aumenta (estado 2). En el caso límite, el aire saldrá del enfriador saturado en el estado 2'. Ésta es la temperatura más baja que puede alcanzarse por medio de este proceso.

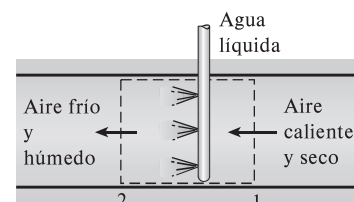


El proceso de enfriamiento evaporativo esencialmente es idéntico al proceso de saturación adiabática, puesto que la transferencia de calor entre el flujo de aire y los alrededores suele ser insignificante. Por ende, el proceso de enfriamiento sigue una línea de temperatura de bulbo húmedo constante en la carta psicrométrica. (Observe que éste no será el mismo caso si el agua líquida se suministra a una temperatura diferente de la temperatura de salida del flujo de aire.) Puesto que las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante coinciden con las líneas de entalpía constante, puede suponerse que la entalpía del flujo de aire permanece constante. Es decir,

$$T_{bh} \cong \text{constante} \quad (14-19)$$

y

$$h \cong \text{constante} \quad (14-20)$$



durante un proceso de enfriamiento evaporativo, que es una aproximación razonable y de uso común en los cálculos de acondicionamiento de aire.

FIGURA 14-27

Enfriamiento evaporativo.

EJEMPLO 14-8 Enfriamiento evaporativo con un turbante

Los habitantes del desierto suelen envolverse la cabeza con un turbante empapado en agua (Fig. 14-28). En un desierto en donde la presión atmosférica es de 1 atm, la temperatura es de 120 °F y la humedad relativa es de 10 por ciento, ¿cuál es la temperatura de esta tela?



SOLUCIÓN Los habitantes del desierto suelen envolverse la cabeza con un turbante de tela porosa empapada en agua. Se debe determinar la temperatura de esta tela en un desierto con una temperatura y una humedad relativa determinadas.

Suposición El aire sale saturado de la tela.

Análisis Como la tela se comporta como la mecha de un termómetro de bulbo húmedo, la temperatura de la tela será la temperatura de bulbo húmedo. Si suponemos que el agua líquida se suministra a una temperatura no muy diferente de la temperatura de salida de la corriente de aire, el proceso de enfria-

FIGURA 14-28

Turbante del que se habla en el ejemplo 14-8.

miento evaporativo sigue una línea de temperatura de bulbo húmedo constante en la carta psicrométrica. Es decir,

$$T_{bh} \cong \text{constante}$$

La temperatura de bulbo húmedo a 1 atm, 120 °F y 10 por ciento de humedad relativa se determina en la carta psicrométrica como

$$T_2 = T_{bh} = 73.7 \text{ °F}$$

Comentario Observe que, para aire saturado, las temperaturas de bulbo húmedo y seco son idénticas. Por lo tanto, la temperatura mínima a la cual se puede enfriar el aire es la temperatura de bulbo húmedo. También observe que la temperatura del aire descende en este caso tanto como 46 °F por enfriamiento evaporativo.

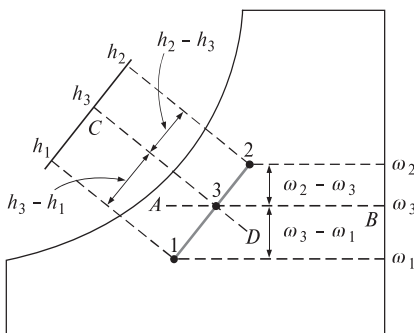
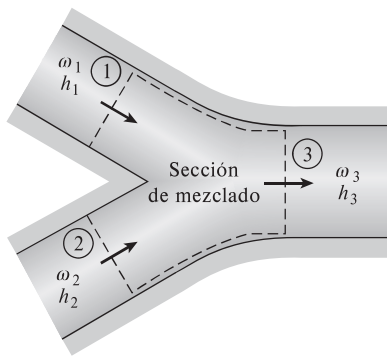


FIGURA 14-29

Cuando dos flujos de aire en los estados 1 y 2 se mezclan adiabáticamente, el estado de la mezcla se ubica sobre la línea recta que conecta los dos estados.

Mezclado adiabático de flujos de aire

En muchas aplicaciones del acondicionamiento de aire es necesario el mezclado de dos flujos de aire. Esto es particularmente cierto en los grandes edificios, la mayor parte de las plantas de producción y procesamiento y los hospitales, donde es preciso que el aire acondicionado se mezcle con una fracción del aire fresco exterior antes de enviarse a los espacios habitados. La mezcla se consigue combinando simplemente los dos flujos de aire, como se indica en la figura 14-29.

El intercambio de calor con los alrededores suele ser pequeño y, por lo tanto, puede suponerse que el proceso de mezclado es adiabático. En general, los procesos de mezclado no implican interacciones de trabajo, y los cambios en las energías cinética y potencial, si los hay, son despreciables. En ese caso, los balances de masa y de energía para el mezclado adiabático de dos flujos de aire se reducen a

Masa de aire seco:

$$\dot{m}_{a_1} + \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_{a_3} \quad (14-21)$$

Masa de vapor de agua:

$$\omega_1 \dot{m}_{a_1} + \omega_2 \dot{m}_{a_2} = \omega_3 \dot{m}_{a_3} \quad (14-22)$$

Energía:

$$\dot{m}_{a_1} h_1 + \dot{m}_{a_2} h_2 = \dot{m}_{a_3} h_3 \quad (14-23)$$

Si se elimina \dot{m}_{a_3} de las relaciones anteriores, se obtiene

$$\frac{\dot{m}_{a_1}}{\dot{m}_{a_2}} = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} \quad (14-24)$$

Esta ecuación tiene una interpretación geométrica instructiva sobre la carta psicrométrica. Muestra que la relación entre $\omega_2 - \omega_3$ y $\omega_3 - \omega_1$ es igual a la de \dot{m}_{a_1} a \dot{m}_{a_2} . Los estados que satisfacen estas condiciones se indican mediante la línea discontinua AB. La relación entre $h_2 - h_3$ y $h_3 - h_1$ es también igual a la relación entre \dot{m}_{a_1} y \dot{m}_{a_2} , y los estados que satisfacen esta condición se indican por medio de la línea discontinua CD. El único estado que satisface ambas condiciones es el punto de intersección de estas dos líneas discontinuas, localizado en la línea recta que conecta los estados 1 y 2. Así, se concluye que *cuando dos flujos de aire en dos estados diferentes (estados 1 y 2) se mezclan adiabáticamente, el estado de la mezcla (estado 3) quedará sobre 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 flujos máscicos \dot{m}_{a_1} y \dot{m}_{a_2} .

La naturaleza cóncava de la curva de saturación y la conclusión anterior conducen a una interesante posibilidad. Cuando los estados 1 y 2 se localizan cerca de la curva de saturación, la línea recta que conecta los dos estados cruzará la línea de saturación y tal vez el estado 3 se encuentre a la izquierda de dicha curva. En este caso, una parte de agua se condensará inevitablemente durante el proceso de mezclado.

EJEMPLO 14-9 Mezclado de aire acondicionado con aire exterior

El aire saturado que sale de la sección de enfriamiento de un sistema de acondicionamiento de aire a 14 °C y a una razón de 50 m³/min, se mezcla adiabáticamente con el aire exterior a 32 °C y 60 por ciento de humedad relativa que fluye a una razón de 20 m³/min. Suponga que el proceso de mezclado se efectúa a una presión de 1 atm; con ello determine la humedad específica, la humedad relativa, la temperatura de bulbo seco y el flujo volumétrico de la mezcla.

SOLUCIÓN Se mezcla aire acondicionado con aire del exterior a tasas especificadas. Se desea determinar las humedades específica y relativa, la temperatura de bulbo seco y el flujo volumétrico de la mezcla.

Suposiciones 1 Existen condiciones estacionarias de operación. 2 El aire seco y el vapor de agua son gases ideales. 3 Los cambios en las energías potencial y cinética son insignificantes. 4 La sección de mezclado es adiabática.

Propiedades Las propiedades de entrada de cada flujo están determinadas a partir de la carta psicrométrica como

$$h_1 = 39.4 \text{ kJ/kg aire seco}$$

$$\omega_1 = 0.010 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco}$$

$$v_1 = 0.826 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

y

$$h_2 = 79.0 \text{ kJ/kg aire seco}$$

$$\omega_2 = 0.0182 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco}$$

$$v_2 = 0.889 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

Análisis Se considera como sistema la sección de mezclado de los flujos. El diagrama esquemático del sistema y la carta psicrométrica del proceso se muestran en la figura 14-30. Advierta que esto constituye un proceso de mezclado de flujo estacionario.

Los flujos máscicos del aire seco en cada flujo son

$$\dot{m}_{a_1} = \frac{\dot{V}_1}{v_1} = \frac{50 \text{ m}^3/\text{min}}{0.826 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}} = 60.5 \text{ kg/min}$$

$$\dot{m}_{a_2} = \frac{\dot{V}_2}{v_2} = \frac{20 \text{ m}^3/\text{min}}{0.889 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}} = 22.5 \text{ kg/min}$$

Del balance de masa de aire seco se tiene

$$\dot{m}_{a_3} = \dot{m}_{a_1} + \dot{m}_{a_2} = (60.5 + 22.5) \text{ kg/min} = 83 \text{ kg/min}$$

La humedad específica y la entalpía de la mezcla se determinan a partir de la ecuación 14-24,

$$\frac{\dot{m}_{a_1}}{\dot{m}_{a_2}} = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1}$$

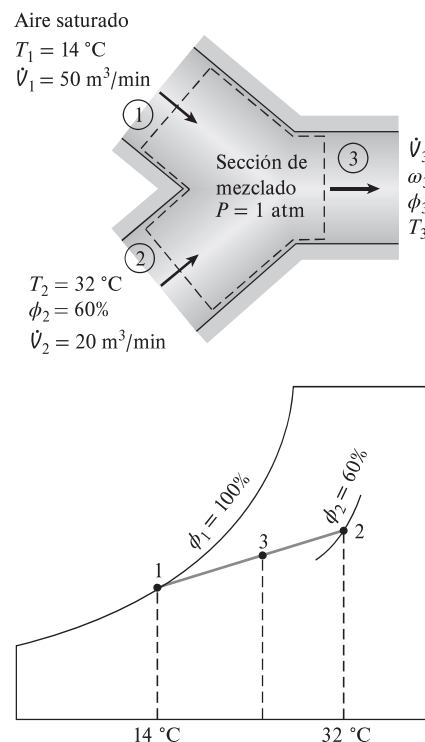


FIGURA 14-30
Esquema y carta psicrométrica para el ejemplo 14-9.

$$\frac{60.5}{22.5} = \frac{0.0182 - \omega_3}{\omega_3 - 0.010} = \frac{79.0 - h_3}{h_3 - 39.4}$$

lo que produce

$$\omega_3 = 0.0122 \text{ kg H}_2\text{O)/kg aire seco}$$

$$h_3 = 50.1 \text{ kJ.kg aire seco}$$

Estas dos propiedades fijan el estado de la mezcla. Otras propiedades de la mezcla se obtienen de la carta psicrométrica:

$$T_3 = 19.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\phi_3 = 89\%$$

$$v_3 = 0.844 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

Por último, el flujo volumétrico de la mezcla se determina de

$$\dot{V}_3 = \dot{m}_{a_3} v_3 = (83 \text{ kg/min})(0.844 \text{ m}^3/\text{kg}) = 70.1 \text{ m}^3/\text{min}$$

Comentario Advierta que el flujo volumétrico de la mezcla es aproximadamente igual a la suma de los flujos volumétricos de los dos flujos entrantes. Esto es común en las aplicaciones de acondicionamiento de aire.

Torres de enfriamiento húmedo

Las centrales eléctricas, los grandes sistemas de acondicionamiento de aire y algunas industrias generan grandes cantidades de calor de desecho que con frecuencia se arroja hacia el agua de enfriamiento que se toma y se regresa de lagos o ríos cercanos. Sin embargo, en algunos casos el suministro de agua es limitado o la contaminación térmica alcanza niveles preocupantes. En tales casos, el calor de desecho debe rechazarse hacia la atmósfera, con el agua de enfriamiento recirculando y sirviendo como medio de transporte para la transferencia de calor entre la fuente y el sumidero (la atmósfera). Una manera de lograr esto es por medio del uso de torres de enfriamiento húmedo.

Una **torre de enfriamiento húmedo** es básicamente un enfriador evaporativo semicerrado. En la figura 14-31 se muestra de manera esquemática una torre de enfriamiento húmedo a contraflujo de tiro inducido. El aire entra a la torre por el fondo y sale por la parte superior. El agua caliente del condensador se bombea hacia la parte superior de la torre y se rocía en este flujo de aire. El propósito del rociado es exponer una gran área superficial de agua al aire. Cuando las gotas de agua caen bajo la influencia de la gravedad, una pequeña fracción del agua (por lo común un pequeño porcentaje) se evapora y enfría el agua restante. La temperatura y el contenido de humedad del aire aumentan durante este proceso. El agua enfriada se acumula en el fondo de la torre y se bombea de nuevo al condensador para absorber calor de desecho adicional. El agua de reposición debe añadirse al ciclo para sustituir el agua perdida por la evaporación y por la corriente de aire. Para reducir la cantidad de agua transportada por el aire, se instalan mamparas deflectoras en las torres de enfriamiento húmedo encima de la sección de rociado.

La circulación del aire en la torre de enfriamiento recién descrita la proporciona un ventilador y, por lo tanto, ésta se clasifica como una torre de enfriamiento de tiro forzado. Otro tipo muy empleado de torre de enfriamiento es la **torre de enfriamiento de tiro natural**, que se asemeja a una gran chimenea y trabaja como una chimenea ordinaria. El aire en la torre tiene un alto contenido de vapor de agua, por lo que es más ligero que el aire exterior. En consecuencia, el aire ligero en la torre asciende y el aire exterior más pesado llena el espacio

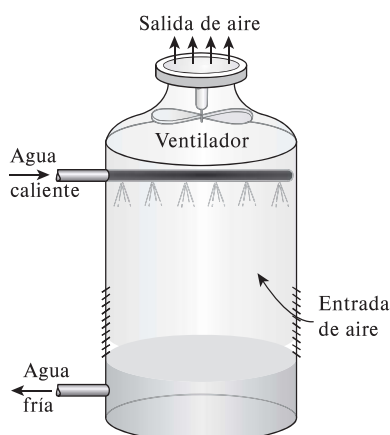


FIGURA 14-31

Una torre de enfriamiento a contraflujo de tiro inducido.

desocupado; de esta forma, se crea un flujo de aire del fondo de la torre hacia la parte superior. La tasa de flujo de aire es controlada por las condiciones del aire atmosférico. Las torres de enfriamiento de tiro natural no necesitan ninguna fuente de potencia externa para inducir el aire, pero su construcción resulta un poco más costosa que la de las torres de enfriamiento de tiro forzado. El perfil de las torres de enfriamiento de tiro natural es hiperbólico, como se muestra en la figura 14-32, y algunas tienen más de 100 m de altura. El objetivo del perfil hiperbólico es tener una mayor resistencia estructural y no obedece a ninguna razón termodinámica.

La idea de una torre de enfriamiento se inició con el **estanque de rociado**, donde el agua caliente es rociada en el aire y se enfría por medio de éste cuando cae en el estanque, como se observa en la figura 14-33. Algunos estanques de rociado aún se utilizan en la actualidad. No obstante, requieren de 25 a 50 veces el área de una torre de enfriamiento, implican pérdidas considerables de agua debido a la corriente de aire, y carecen de protección contra el polvo y la polución.

También se podría descargar el calor de desecho en un **estanque de enfriamiento**, que es básicamente un gran lago abierto a la atmósfera. Aunque la transferencia de calor de la superficie del estanque a la atmósfera (Fig. 14.34) es muy lenta, y en este caso se necesitaría de casi 20 veces el área del estanque de rociado para producir el mismo enfriamiento.



FIGURA 14-33

Un estanque de rociado.

© Yunus Çengel



FIGURA 14-34

Un estanque de enfriamiento.

© Yunus Çengel



FIGURA 14-32

Dos torres de enfriamiento de tiro natural al lado de la carretera.

© Yunus Çengel

EJEMPLO 14-10 Enfriamiento en una central eléctrica mediante una torre de enfriamiento

Del condensador de una central eléctrica sale agua de enfriamiento y entra a una torre de enfriamiento húmedo a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un flujo másico de 100 kg/s . El agua se enfría hasta $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la torre de enfriamiento con aire que entra a la torre a 1 atm , $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, con 60 por ciento de humedad relativa, y sale saturado a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ignore la entrada de potencia al ventilador y determine *a*) el flujo volumétrico del aire en la torre de enfriamiento y *b*) el flujo másico del agua de reposición requerido.

SOLUCIÓN Se enfría agua de enfriamiento de una central eléctrica en una torre de enfriamiento húmedo. Se busca determinar los flujos volumétricos del aire y el másico del agua de reposición.

Suposiciones **1** Existen condiciones estacionarias de operación y, por lo tanto, el flujo másico del aire seco permanece constante durante todo el proceso. **2** El aire seco y el vapor de agua son gases ideales. **3** Los cambios en las energías cinética y potencial son insignificantes. **4** La torre de enfriamiento es adiabática.

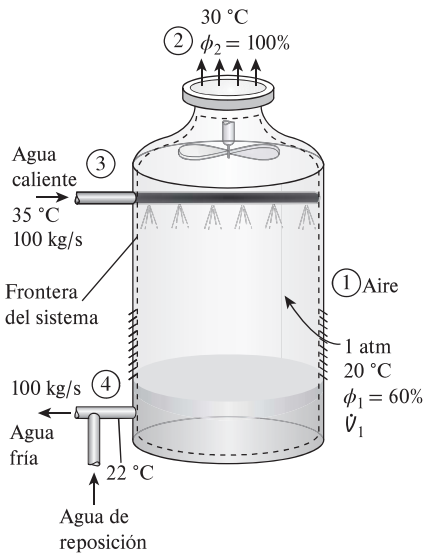


FIGURA 14-35

Esquema para el ejemplo 14-10.

Propiedades La entalpía del agua líquida saturada es de 92.28 kJ/kg a 22 °C y 146.64 kJ/kg a 35 °C (tabla A-4). De la carta psicrométrica se tiene:

$$h_1 = 42.2 \text{ kJ/kg aire seco}$$

$$h_2 = 100.0 \text{ kJ/kg aire seco}$$

$$\omega_1 = 0.0087 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco}$$

$$\omega_2 = 0.0273 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire seco}$$

$$v_1 = 0.842 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

Análisis Considere la torre de enfriamiento como el sistema, representado de manera esquemática en la figura 14-35. Advierta que el flujo másico del 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 estacionaria.

a) Al aplicar los balances de energía y de masa a la torre de enfriamiento se obtiene

Balance de masa de aire seco:

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a$$

Balance de masa de agua:

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_a \omega_1 = \dot{m}_4 + \dot{m}_a \omega_2$$

o

$$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) = \dot{m}_{\text{reemplazo}}$$

Balance de energía:

$$\sum_{\text{ent}} \dot{m}h = \sum_{\text{sal}} \dot{m}h \rightarrow \dot{m}_a h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_a h_2 + \dot{m}_4 h_4$$

o

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_a (h_2 - h_1) + (\dot{m}_3 - \dot{m}_{\text{reemplazo}}) h_4$$

Al despejar \dot{m}_a resulta

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_3 (h_3 - h_4)}{(h_2 - h_1) - (\omega_2 - \omega_1) h_4}$$

Al sustituir,

$$\dot{m}_a = \frac{(100 \text{ kg/s})[(146.64 - 92.28) \text{ kJ/kg}]}{[(100.0 - 42.2) \text{ kJ/kg}] - [(0.0273 - 0.0087)(92.28) \text{ kJ/kg}]} = 96.9 \text{ kg/s}$$

Entonces, el flujo volumétrico de aire en la torre de enfriamiento es

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_a v_1 = (96.9 \text{ kg/s})(0.842 \text{ m}^3/\text{kg}) = 81.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

b) El flujo másico del agua de reposición se determina de

$$\dot{m}_{\text{reemplazo}} = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) = (96.9 \text{ kg/s})(0.0273 - 0.0087) = 1.80 \text{ kg/s}$$

Comentario Por consiguiente, más de 98 por ciento del agua de enfriamiento se recupera y recircula en este caso.

RESUMEN

En este capítulo se estudió la mezcla de aire-vapor de agua, que es la mezcla de gas-vapor más común en la práctica. Normalmente el aire en la atmósfera contiene un poco de vapor de agua, y se denomina *aire atmosférico*. En contraste, el aire que no contiene vapor de agua se llama *aire seco*. Dentro de los límites de la temperatura en la cual trabajan los sistemas de acondicionamiento de aire, tanto el aire seco como el vapor de agua pueden tratarse como gases ideales. El cambio de entalpía del aire seco durante un proceso se encuentra a partir de

$$\Delta h_{\text{aire seco}} = c_p \Delta T = (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \Delta T$$

El aire atmosférico puede tratarse como una mezcla de gases ideales cuya presión es la suma de la presión parcial del aire seco P_a y la del vapor de agua P_v :

$$P = P_a + P_v$$

La entalpía del vapor de agua en el aire puede tomarse como equivalente a la entalpía del vapor saturado a la misma temperatura:

$$h_v(T, \text{ bajo } P) \cong h_g(T) \cong 2500.9 + 1.82T \quad (\text{kJ/kg}) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C} \\ \cong 1060.9 + 0.435T \quad (\text{Btu/lbm}) \quad T \text{ en } ^\circ\text{F}$$

en el intervalo de temperatura de -10 a 50 $^\circ\text{C}$ (15 a 120 $^\circ\text{F}$).

La masa de vapor de agua presente por unidad de masa de aire seco se llama *humedad específica* o *humedad absoluta* ω :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{0.622P_v}{P - P_v} \quad (\text{kg H}_2\text{O/kg aire seco})$$

donde P es la presión total del aire y P_v es la presión del vapor. Hay un límite en la cantidad de vapor de agua que el aire puede contener a una temperatura dada. El aire que contiene la mayor humedad posible se denomina *aire saturado*. La relación entre la cantidad de humedad que el aire contiene (m_v) y la cantidad máxima de humedad que el aire puede contener a la misma temperatura (m_g) se denomina *humedad relativa* ϕ ,

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v}{P_g}$$

donde $P_g = P_{\text{sat a } T}$. Las humedades relativa y específica pueden expresarse también como

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega)P_g} \quad \text{y} \quad \omega = \frac{0.622\phi P_g}{P - \phi P_g}$$

La humedad relativa varía de 0 para aire seco hasta 1 para aire saturado.

La entalpía del aire atmosférico se expresa *por unidad de masa de aire seco*, en vez de hacerlo por unidad de masa de la mezcla aire-vapor de agua, como

$$h = h_a + \omega h_g \quad (\text{kJ/kg aire seco})$$

A la temperatura normal del aire atmosférico se le conoce como *temperatura de bulbo seco* para diferenciarla de otras formas de temperatura. La temperatura a la cual la condensación de agua empieza si el aire seco se enfría a presión constante se llama *temperatura de punto de rocío* T_{pr} :

$$T_{\text{pr}} = T_{\text{sat a } P_v}$$

La humedad relativa y la humedad específica del aire pueden determinarse al medir la *temperatura de saturación adiabática* del aire, que es la temperatura que el aire alcanza después de fluir sobre agua en un canal largo adiabático hasta que se satura:

$$\omega_1 = \frac{c_p(T_2 - T_1) + \omega_2 h_{f2}}{h_{g1} - h_{f2}}$$

donde

$$\omega_2 = \frac{0.622P_{g2}}{P_2 - P_{g2}}$$

y T_2 es la temperatura de saturación adiabática. Un enfoque más práctico dentro de los objetivos de acondicionamiento de aire es emplear un termómetro cuyo bulbo se cubre con una mecha de algodón saturada con agua y soplar aire sobre la mecha. La temperatura medida de esta manera se llama *temperatura de bulbo húmedo*, T_{bh} , y se emplea en lugar de la temperatura de saturación adiabática. Las propiedades del aire atmosférico a una presión total especificada se presentan en forma de gráficas de fácil lectura, llamadas *cartas psicrométricas*. Las líneas de entalpía constante y de temperatura de bulbo húmedo constante son casi paralelas en estas gráficas.

Las necesidades del cuerpo humano y las condiciones ambientales no son muy compatibles. En consecuencia, a menudo se vuelve necesario cambiar las condiciones de los espacios ambientados con el fin de hacerlos más agradables. Para mantener un espacio habitado o una instalación industrial a la temperatura y humedad deseadas, son necesarios algunos procesos de acondicionamiento del aire. Entre ellos se incluye el calentamiento simple (elevar la temperatura), el enfriamiento simple (reducir la temperatura), la humidificación (agregar humedad) y la deshumidificación (eliminar humedad). Algunas veces se necesitan dos o más de estos procesos para llevar el aire a la temperatura y humedad deseadas.

La mayor parte de los procesos de acondicionamiento de aire pueden moderarse como procesos de flujo estacionario y, en consecuencia, pueden analizarse mediante los balances de masa de flujo estacionario (tanto para el aire seco como para el agua) y balance de energía,

Masa de aire seco:

$$\sum_{\text{ent}} \dot{m}_a = \sum_{\text{sal}} \dot{m}_a$$

Masa de agua:

$$\sum_{\text{ent}} \dot{m}_w = \sum_{\text{sal}} \dot{m}_w \quad \text{o} \quad \sum_{\text{ent}} \dot{m}_a \omega = \sum_{\text{sal}} \dot{m}_a \omega$$

Energía:

$$\dot{Q}_{\text{ent}} + \dot{W}_{\text{ent}} + \sum_{\text{ent}} \dot{m}h = \dot{Q}_{\text{sal}} + \dot{W}_{\text{sal}} + \sum_{\text{sal}} \dot{m}h$$

Se supone que los cambios en las energías cinética y potencial son insignificantes.

Durante un proceso de calentamiento y enfriamiento simple, la humedad específica permanece constante, aunque cambian la temperatura y la humedad relativa. Algunas veces el aire se humidifica después de calentarse, y algunos procesos de enfriamiento

incluyen deshumidificación. En climas secos, es posible enfriar el aire por medio de enfriamiento evaporativo si se le hace pasar por una sección donde se rocía con agua. En localidades con un suministro de agua limitado pueden depositarse en la atmósfera grandes cantidades de calor de desecho con una pérdida mínima de agua mediante el uso de torres de enfriamiento.

REFERENCIAS Y LECTURAS RECOMENDADAS

1. ASHRAE, *1981 Handbook of Fundamentals*, Atlanta, Georgia, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1981.
2. S. M. Elonka, "Cooling Towers", *Power*, marzo, 1963.
3. W. F. Stoecker y J. W. Jones, *Refrigeration and Air Conditioning*, 2a. ed., McGraw-Hill, Nueva York, 1982.
4. L. D. Winiarski y B.A. Tichenor, "Model of Natural Draft Cooling Tower Performance", *Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, agosto, 1970.

PROBLEMAS*

Aire seco y aire atmosférico: humedad específica y relativa del aire

14-1C ¿Cuál es la diferencia entre aire seco y aire atmosférico?

14-2C ¿Qué es la presión de vapor?

14-3C ¿Cuál es la diferencia entre la humedad específica y la humedad relativa?

14-4C ¿Puede tratarse el agua como un gas ideal? Explique.

14-5C Explique cómo se determina la presión de vapor del aire ambiente cuando la temperatura, la presión total y la humedad relativa del aire se conocen.

14-6C ¿La humedad relativa del aire saturado es necesariamente de 100 por ciento?

14-7C Se pasa aire húmedo por una sección de enfriamiento donde se enfría y se deshumidifica. ¿Cómo cambian *a*) la humedad específica y *b*) la humedad relativa del aire durante este proceso?

14-8C ¿Cómo cambiarán *a*) la humedad específica y *b*) la humedad relativa del aire contenido en un cuarto bien sellado cuando se calienta?

14-9C ¿Cómo cambiarán *a*) la humedad específica y *b*) la humedad relativa del aire contenido en un cuarto bien sellado cuando se enfría?

14-10C Considere un recipiente que contiene aire húmedo a 3 atm y cuyas paredes son permeables al vapor de agua. El aire del entorno a la presión de 1 atm contiene también algo de hu-

medad. ¿Es posible que el vapor de agua fluya desde el entorno hacia el interior del recipiente? Explique.

14-11C ¿Es posible obtener aire saturado a partir de aire insaturado sin agregar humedad? Explique.

14-12C ¿Por qué las tuberías de agua fría siempre se cubren con chaquetas de barrera de vapor?

14-13C ¿Cómo compararía la entalpía de vapor de agua a 20 °C y 2 kPa con la entalpía de vapor de agua a 20 °C y 0.5 kPa?

14-14 Un tanque contiene 15 kg de aire seco y 0.17 kg de vapor de agua a 30 °C y 100 kPa de presión total. Determine *a*) la humedad específica, *b*) la humedad relativa, y *c*) el volumen del tanque.

14-15 Repita el problema 14-14 para una temperatura de 40 °C.

14-16 Un tanque de 8 m³ contiene aire saturado a 30 °C y 105 kPa. Determine *a*) la masa de aire seco, *b*) la humedad específica y *c*) la entalpía del aire por masa unitaria de aire seco.

14-17 Determine las masas de aire seco y el vapor de agua contenidos en un cuarto de 90 m³ a 93 kPa, 15 °C y 50 por ciento de humedad relativa. *Respuestas:* 100 kg, 0.578 kg

14-18E Un cuarto contiene aire a 85 °F y 13.5 psia a una humedad relativa de 60 por ciento. Determine *a*) la presión parcial del aire seco, *b*) la humedad específica y *c*) la entalpía por unidad de aire seco. *Respuestas:* *a*) 13.1 psia, *b*) 0.0169 lbm H₂O/lbm aire seco, *c*) 39.0 Btu/lbm aire seco

14-19 Aire húmedo a 100 kPa, 20 °C y 90 por ciento de humedad relativa se comprime en un compresor isentrópico de flujo estacionario a 800 kPa. ¿Cuál es la humedad relativa del aire a la salida del compresor?

14-20E Se expande aire húmedo a 100 psia y 400 °F y una relación de humedad de 0.025 H₂O/lbm de aire seco hasta 15 psia en una tobera isentrópica. ¿Cuánto del vapor de agua inicial se ha convertido en agua líquida a la salida de la tobera?



* Los problemas marcados con "C" son preguntas de concepto, y se exhorta a los alumnos a contestarlas todas. Los problemas marcados con una "E" están en unidades inglesas, y quienes utilizan unidades SI pueden ignorarlos. Los problemas con un ícono  son extensos y se recomienda emplear un software apropiado para resolverlos.



FIGURA P14-19

Temperaturas de punto de rocío de saturación adiabática y de bulbo húmedo

- 14-21C** ¿Qué es la temperatura de bulbo húmedo?
- 14-22C** En verano, la superficie exterior de un vaso lleno de agua con hielo frecuentemente “suda”. ¿Cómo puede explicar este “sudor”?
- 14-23C** En algunos climas, quitar el hielo del parabrisas de un automóvil es una tarea común en las mañanas de invierno. Explique cómo se forma el hielo en el parabrisas durante algunas noches aun cuando no llueve o nieva.
- 14-24C** Andy y Wendy usan anteojos. En un día frío de invierno, Andy llega del frío exterior y entra a la casa tibia mientras Wendy sale. ¿Cuál par de anteojos es más probable que se empañe? Explique.
- 14-25C** ¿Cuándo son idénticas las temperaturas de bulbo seco y de punto de rocío?
- 14-26C** ¿Cuándo son equivalentes las temperaturas de saturación adiabática y de bulbo húmedo para aire atmosférico?
- 14-27** Una casa contiene aire a 25 °C y 65 por ciento de humedad relativa. ¿Se condensará algo de humedad en las superficies externas de las ventanas cuando la temperatura de éstas se reduce a 10 °C?
- 14-28E** Una mujer sedienta abre el refrigerador y saca una bebida enlatada fría a 40 °F. ¿Piensa usted que la lata “sudará” mientras ella disfruta la bebida en un cuarto a 70 °F y humedad relativa de 38 por ciento?
- 14-29** El aire en un cuarto tiene una temperatura de bulbo seco de 26 °C y una temperatura de bulbo húmedo de 21 °C. Suponiendo una presión de 100 kPa. Determine *a*) la humedad específica, *b*) la humedad relativa, y *c*) la temperatura de punto de rocío. *Respuestas:* *a*) 0.0138 kg H₂O/kg aire seco, *b*) 64.4 por ciento, *c*) 18.8 °C
- 14-30**  Reconsidere el problema 14-29. Determine las propiedades requeridas con un software apropiado. ¿Cuáles serían los valores de las propiedades a una presión de 300 kPa?
- 14-31E** El aire en un cuarto tiene una temperatura de bulbo seco de 75 °F y una temperatura de bulbo húmedo de 60 °F. Suponiendo una presión de 14.3 psia, determine *a*) la humedad

específica, *b*) la humedad relativa y *c*) la temperatura de punto de rocío. *Respuestas:* *a*) 0.0079 lbmH₂O/lbm aire seco, *b*) 41.7 por ciento, *c*) 50.2 °F

14-32 Las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo de aire atmosférico a 95 kPa son 25 y 17 °C, respectivamente. Determine *a*) la humedad específica, *b*) la humedad relativa, y *c*) la entalpía del aire, en kJ/kg aire seco.

14-33 El aire atmosférico a 35 °C fluye de manera constante hacia el interior de un dispositivo de saturación adiabática y sale como una mezcla saturada a 25 °C. Se suministra agua de reposición al dispositivo a 25 °C. La presión atmosférica es de 98 kPa. Determine la humedad relativa y la humedad específica del aire.

Carta psicrométrica

- 14-34C** ¿Cómo se comparan la temperatura de entalpía constante y la temperatura de bulbo húmedo en la carta psicrométrica?
- 14-35C** ¿En qué estados en la carta psicrométrica las temperaturas de bulbo seco, bulbo húmedo y punto de rocío son idénticas?
- 14-36C** ¿Cómo se determina en la carta psicrométrica la temperatura de punto de rocío en un estado especificado?
- 14-37C** ¿Los valores de entalpía determinados en una carta psicrométrica al nivel del mar se pueden usar a mayores altitudes?
- 14-38** El aire atmosférico a una presión de 1 atm y temperatura de bulbo seco de 30 °C tiene una humedad relativa de 80 por ciento. Usando la carta psicrométrica, determine *a*) la temperatura de bulbo húmedo, *b*) la relación de humedad, *c*) la entalpía, *d*) la temperatura de punto de rocío y *e*) la presión de vapor del agua.
- 14-39E** Aire atmosférico a una presión de 1 atm y temperatura de bulbo seco de 90 °F tiene una temperatura de bulbo húmedo de 85 °F. Usando la carta psicrométrica, determine *a*) la humedad relativa, *b*) la relación de humedad, *c*) la entalpía, *d*) la temperatura de bulbo húmedo y *e*) la presión de vapor del agua.

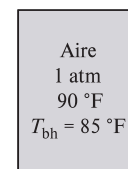



FIGURA P14-39E

14-40E Reconsidere el problema 14-39E. Determine la temperatura de saturación adiabática del aire húmedo. *Respuesta:* 85 °F

14-41 El aire atmosférico en una habitación tiene una presión de 1 atm, una temperatura de bulbo seco de 24 °C y una temperatura de bulbo húmedo de 17 °C. Usando la carta psicrométrica, determine *a*) la humedad específica, *b*) la entalpía, en kJ/kg de aire seco, *c*) la relación de humedad, *d*) la temperatura de

punto de rocío y *e*) el volumen específico del aire, en m^3/kg aire seco.

14-42  Reconsidere el problema 14-41. Determine las propiedades requeridas con un software apropiado en lugar de la carta psicrométrica. ¿Cuáles serían los valores de las propiedades en un lugar a 3 000 m de altitud?

14-43 El aire atmosférico a una presión de 1 atm y la temperatura de bulbo seco de 28°C tiene una temperatura de punto de rocío de 20°C . Usando la carta psicrométrica, determine *a*) la humedad relativa, *b*) la relación de humedad, *c*) la entalpía, *d*) la temperatura de bulbo húmedo, y *e*) la presión de vapor del agua.

14-44 Reconsidere el problema 14-43. Determine la temperatura de saturación adiabática del bulbo húmedo.

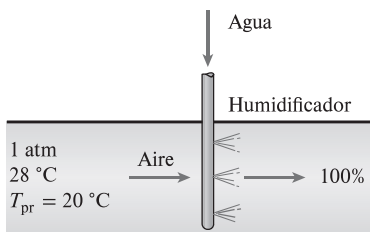


FIGURA P14-44

Comodidad humana y acondicionamiento de aire

14-45C ¿Qué hace un sistema moderno de acondicionamiento de aire, además de calentar o enfriar el aire?

14-46C ¿Cómo responde el cuerpo humano *a*) al clima caliente, *b*) al clima frío y *c*) al clima caliente y húmedo?

14-47C ¿Cómo afecta el movimiento del aire cerca del cuerpo humano la comodidad de las personas?

14-48C Considere un partido de tenis en clima frío, donde tanto los jugadores como los espectadores usan el mismo tipo de ropa. ¿Qué grupo de personas sentirá más frío? ¿Por qué?

14-49C ¿Por qué piensa que los bebés son más susceptibles al frío?

14-50C ¿Qué es el efecto de radiación? ¿Cómo afecta la comodidad de las personas?

14-51C ¿Cómo afecta la humedad la comodidad de las personas?

14-52C ¿Qué son la humidificación y la deshumidificación?

14-53C ¿Qué es el metabolismo? ¿Cuál es la tasa metabólica para un hombre promedio? ¿Por qué interesa la tasa metabólica de los ocupantes de un edificio en relación con la calefacción y el acondicionamiento de aire?

14-54C ¿Por qué la tasa metabólica de las mujeres, en general, es menor que la de los hombres? ¿Cuál es el efecto de la ropa en la temperatura ambiente que se siente cómoda?

14-55C ¿Qué es el calor sensible? ¿Cómo se ve afectada la pérdida de calor sensible del cuerpo humano por *a*) la temperatura de la piel, *b*) la temperatura ambiente y *c*) el movimiento del aire?

14-56C ¿Qué es el calor latente? ¿Cómo se ve afectada la pérdida de calor latente del cuerpo humano por *a*) la humedad de la piel y *b*) la humedad relativa del ambiente? ¿Cuál es la tasa de evaporación del cuerpo en relación con la tasa de pérdida de calor latente?

14-57 Una tienda departamental espera tener 225 clientes y 20 empleados en las horas pico durante el verano. Determine la contribución de las personas a la carga total del sistema de enfriamiento de la tienda.

14-58E En una sala de cine en invierno, 500 personas, cada una de las cuales genera calor sensible a razón de 80 W, están viendo una película. Las pérdidas de calor a través de las paredes, las ventanas y el techo se estiman en 130 000 Btu/h. Determine si se necesita calentar o enfriar la sala.

14-59 Para una tasa de infiltración de 1.2 cambios de aire por hora (*changes per hour*, ACH, por sus siglas en inglés), determine la carga de calor sensible, latente y de infiltración total de un edificio al nivel del mar, en kW, que mide 20 m de longitud, 13 m de ancho y 3 m de altura cuando el aire exterior está a 32°C y 35 por ciento de humedad relativa. El edificio se mantiene a 24°C y 55 por ciento de humedad relativa todo el tiempo.

14-60 Repita el problema 14-59 para una tasa de infiltración de 1.8 de cambios de aire por hora.

14-61 Un pollo promedio (1.82 kg o 4.0 lbm) tiene una tasa metabólica basal de 5.47 W y una tasa metabólica promedio de 10.2 W (3.78 W de calor sensible y 6.42 W de calor latente) durante actividad normal. Si hay 100 pollos en una sala de crianza, determine la tasa de generación total de calor y la tasa de producción de humedad en la sala. Considere el calor de vaporización del agua como 2 430 kJ/kg.

14-62 Una persona promedio produce 0.25 kg de humedad mientras toma una ducha y 0.05 kg cuando se baña en tina. Considere una familia de cuatro, cada uno de los cuales se da una ducha una vez al día en un cuarto de baño que no está ventilado. Tomando el calor de vaporización del agua como 2 450 kJ/kg, determine la contribución de las duchas a la carga de calor latente del acondicionador de aire por día en el verano.

Calentamiento y enfriamiento simples

14-63C ¿Cómo cambian las humedades relativa y específica durante un proceso de calentamiento simple? Responda la misma pregunta para un proceso de enfriamiento simple.

14-64C ¿Por qué un proceso de calentamiento o enfriamiento simple aparece como una línea horizontal en la carta psicrométrica?

14-65 Se enfría aire húmedo a 150 kPa, 40°C y 70 por ciento de humedad relativa a presión constante en una tubería hasta su temperatura de punto de rocío. Calcule la transferencia de calor, en kJ/kg aire seco, requerida para este proceso.

Respuesta: 6.8 kJ/kg de aire seco

14-66E Aire húmedo a 40 psia, 50°F y 90 por ciento de humedad relativa se calienta en una tubería a presión constante a 120°F . Calcule la humedad relativa a la salida del tubo y la cantidad de calor necesaria, en Btu/lbm de aire seco.

14-67 Entra aire a una sección de calentamiento a 95 kPa, 10 °C y 30 por ciento de humedad relativa a razón de 6 m³/min, y sale a 25 °C. Determine *a*) la razón de transferencia de calor en la sección de calentamiento y *b*) la humedad relativa del aire en la salida. *Respuestas:* *a*) 106 kJ/min, *b*) 11.6 por ciento

14-68 Entra aire a una sección de enfriamiento de 30 cm de diámetro a 1 atm, 35 °C y 45 por ciento de humedad relativa, a 18 m/s. Se quita calor del aire a razón de 750 kJ/min. Determine *a*) la temperatura de salida, *b*) la humedad relativa de salida del aire y *c*) la velocidad de salida. *Respuestas:* *a*) 26.5 °C, *b*) 73.1 por ciento, *c*) 17.5 m/s

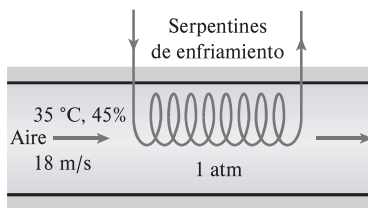


FIGURA P14-68

14-69 Repita el problema 14-68 para una tasa de remoción de calor de 950 kJ/min.

14-70E Una sección de calentamiento consiste en un ducto de 15 pulg de diámetro que alberga un calentador de resistencia eléctrica de 4 kW. El aire entra a la sección de calentamiento a 14.7 psia, 50 °F y 40 por ciento de humedad relativa a una velocidad de 25 pies/s. Determine *a*) la temperatura de salida, *b*) la humedad relativa de salida del aire y *c*) la velocidad de salida. *Respuestas:* *a*) 56.6 °F, *b*) 31.4 por ciento, *c*) 25.4 pies/s

Calentamiento con humidificación

14-71C ¿Por qué algunas veces se humidifica el aire calentado?

14-72 Aire a 1 atm, 15 °C y 60 por ciento de humedad relativa se calienta primero a 20 °C en una sección de calentamiento y luego se humidifica por introducción de vapor de agua. El aire sale de la sección de humidificación a 25 °C y 65 por ciento de humedad relativa. Determine *a*) la cantidad de vapor que se agrega al aire y *b*) la cantidad de calor que se transfiere al aire en la sección de calentamiento. *Respuestas:* *a*) 0.0065 kg H₂O/kg aire seco, *b*) 5.1 kJ/kg aire seco

14-73E Aire a 14.7 psia, 35 °F y 50 por ciento de humedad relativa se calienta primero a 65 °F en una sección de calentamiento y luego se humidifica introduciendo vapor de agua. El aire sale de la sección de humidificación a 85 °F y 55 por ciento de humedad relativa. Determine *a*) la cantidad de vapor agregado al aire, en lbm H₂O/lbm aire seco y *b*) la cantidad de transferencia de calor al aire en la sección de calentamiento, en Btu/lbm aire seco.

14-74 Un sistema de acondicionamiento de aire opera a presión total de 1 atm y consiste en una sección de calentamiento y un humidificador que agrega vapor de agua saturado a 100 °C. El aire entra a la sección de calentamiento a 10 °C y 70 por ciento de humedad relativa, a razón de 35 m³/min, y sale de la sección de humidificación a 20 °C y 60 por ciento de humedad relativa. Determine *a*) la temperatura y la humedad relativa del

aire cuando sale de la sección de calentamiento, *b*) la tasa de transferencia de calor en la sección de calentamiento y *c*) el flujo de adición de agua al aire en la sección de humidificación.

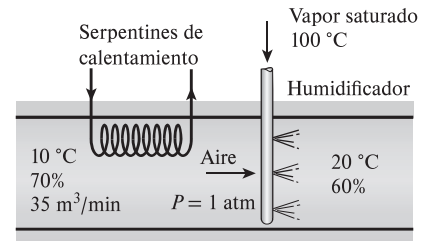


FIGURA P14-74

14-75 Repita el problema 14-74 para una presión total de 95 kPa para el flujo de aire. *Respuestas:* *a*) 19.5 °C, 37.7 por ciento, *b*) 391 kJ/min, *c*) 0.147 kg/min

Enfriamiento con deshumidificación

14-76C ¿Por qué algunas veces el aire enfriado se recalienta en verano antes de descargarlo a un cuarto?

14-77 Se enfría aire atmosférico a 1 atm, 30 °C y 80 por ciento de humedad relativa hasta 20 °C mientras la presión de la mezcla permanece constante. Calcule la cantidad de agua, en kg/kg de aire seco, extraída del aire y el requerimiento de enfriamiento, en kJ/kg de aire seco, cuando sale agua líquida del sistema a 22 °C. *Respuestas:* 0.0069 kg H₂O/kg de aire seco, 27.3 kJ/kg de aire seco

14-78E Se deben enfriar diez mil pies cúbicos por hora de aire atmosférico a 1 atm y 85 °F con una temperatura de rocío de 70 °F hasta 60 °F. Determine la tasa a la cual sale el condensado de este sistema y la tasa de enfriamiento cuando el condensado sale del sistema a 65 °F.

14-79 Entra aire por la sección de enfriamiento de 40 cm de diámetro a 1 atm, 32 °C y 70 por ciento de humedad relativa a 120 m/min. El aire se enfría al pasar sobre un serpentín refrigerante a través del cual fluye agua fría. El agua experimenta una elevación de temperatura de 6 °C. El aire sale de la sección de enfriamiento saturado a 20 °C. Determine *a*) la tasa de transferencia de calor, *b*) la tasa de flujo másico del agua y *c*) la velocidad de salida de la corriente de aire.

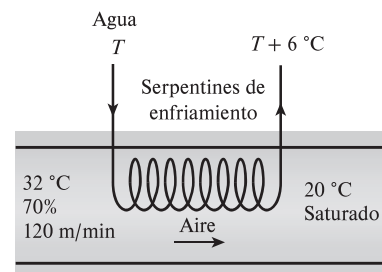



FIGURA P14-79

14-80  Reconsidere el problema 14-79, y con un software apropiado, desarrolle una solución general al problema en el cual puedan suministrarse las variables de

entrada y los estudios paramétricos realizados. Para cada conjunto de variables de entrada para los cuales la presión es atmosférica, muestre el proceso en la carta psicrométrica.

14-81 Repita el problema 14-79 para una presión total de 88 kPa del aire. *Respuestas:* a) 452 kJ/min, b) 18.0 kg/min, c) 114 m/min

14-82 En un día de verano en Nueva Orleans, Louisiana, la presión es de 1 atm: la temperatura es de 32 °C y la humedad relativa de 95 por ciento. Este aire se debe acondicionar a 24 °C y 60 por ciento de humedad relativa. Determine la cantidad de enfriamiento, en kJ, necesaria, y el agua eliminada, en kg, por cada 1 000 m³ de aire seco procesados a la entrada del sistema.

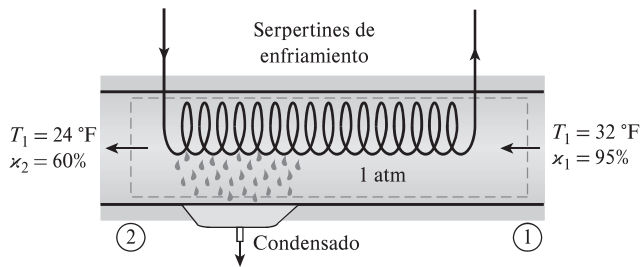


FIGURA P14-82

14-83 ¿Cuánto se deberá reducir la temperatura del aire húmedo para producir la deshumificación deseada? *Respuesta:* 15.8 °C

14-84 Entra aire atmosférico del interior de un automóvil al evaporador del acondicionador de aire a 1 atm, 27 °C y 50 por ciento de humedad relativa. El aire regresa al automóvil a 10 °C y 90 por ciento de humedad relativa. El compartimento de los pasajeros tiene un volumen de 2 m³ y se requieren cinco cambios de aire por minuto para mantener el interior del automóvil al nivel de comodidad deseado. Trace el diagrama psicrométrico del aire atmosférico que fluye a través del proceso de acondicionamiento del aire. Determine las temperaturas de punto de rocío y bulbo húmedo a la entrada del evaporador, en °C. Determine la tasa de transferencia de calor necesaria del aire atmosférico al fluido del evaporador, en kW. Determine la tasa de condensación del vapor de agua en el evaporador, en kg/min.

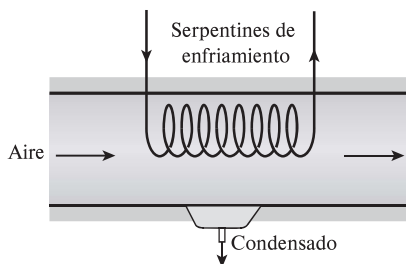


FIGURA P14-84

14-85 Aire húmedo a 101.3 kPa, 39 °C de bulbo seco y 50 por ciento de humedad relativa se enfría a presión constante a una temperatura de 10 °C por debajo de la temperatura de punto de rocío.

a) Trace el diagrama del sistema y el diagrama psicrométrico para el proceso.

b) Si se ha determinado que la tasa de transferencia de calor del aire atmosférico es de 1 340 kW, ¿cuál es la tasa de flujo volumétrico del aire atmosférico, en m³/s, para este proceso?

14-86E Aire húmedo saturado a 70 psia y 200 °F se enfría a 100 °F a medida que fluye por una tubería de 3 pulg de diámetro a una velocidad de 50 pies/s y a presión constante. Calcule la tasa a la cual se forma agua líquida en el interior de esta tubería y la tasa a la cual se enfría el aire.

Respuestas: 0.0670 lbm/s, 83.2 Btu/s

14-87 Se va a acondicionar aire húmedo en un proceso a presión constante a 1 atm de 39 °C de bulbo seco y 50 por ciento de humedad relativa a 17 °C de bulbo seco y 10.8 °C de bulbo húmedo. Primero se hace que el aire pase sobre los serpentines de enfriamiento para eliminar toda la humedad necesaria para alcanzar el contenido de humedad final y luego se hace que pase sobre los serpentines de calentamiento para alcanzar el estado final.

- Trace el diagrama psicrométrico del proceso.
- Determine la temperatura de punto de rocío de la mezcla a la entrada de los serpentines de enfriamiento y la entrada de los serpentines de calentamiento.
- Determine el calor extraído por los serpentines de enfriamiento, el calor agregado por los serpentines de calentamiento, y la transferencia neta de calor durante todo el proceso, todo en kJ/kg de aire seco.

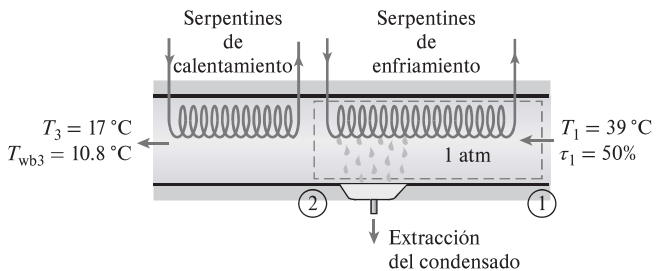


FIGURA P14-87

14-88 Aire atmosférico a 1 atm, 32 °C y 95 por ciento de humedad relativa se enfría a 24 °C y 60 por ciento de humedad relativa. Para suministrar el enfriamiento necesario, se usa un sistema ideal simple de refrigeración de compresión de vapor, usando refrigerante R-134a como fluido de trabajo. Este sistema opera su evaporador a 4 °C y su condensador a una temperatura de saturación de 39.4 °C. El condensador rechaza su calor al aire atmosférico. Calcule la destrucción de exergía, en kJ, en el sistema total, por cada 1 000 m³ de aire seco procesado.

Enfriamiento evaporativo

14-89C ¿Qué es el enfriamiento evaporativo? ¿Funcionará en climas húmedos?

14-90C Durante la evaporación de un cuerpo de agua al aire, ¿en qué condiciones será el calor latente de vaporización igual a la transferencia de calor del aire?

14-91C ¿Un proceso de evaporación tiene que incluir transferencia de calor? Describa un proceso que incluya transferencia tanto de calor como de masa.

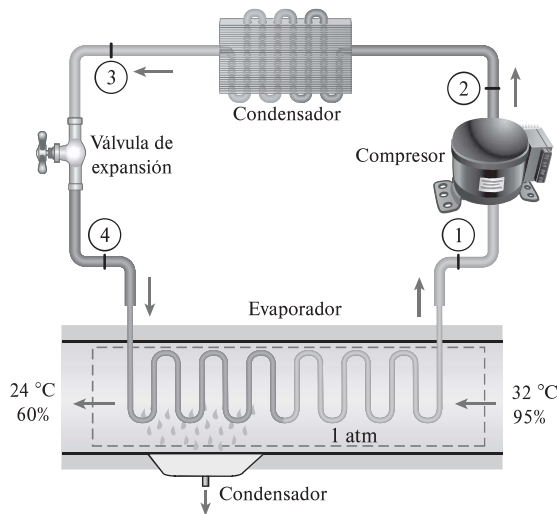


FIGURA P14-88

14-92 Los habitantes del desierto con frecuencia envuelven sus cabezas con una tela porosa empapada de agua. En un desierto donde la presión es de 1 atm, la temperatura es de 45 °C, y la humedad relativa es de 15 por ciento, ¿cuál es la temperatura de la tela?

14-93E Entra aire a un enfriador evaporativo a 14.5 psia, 93 °F y 30 por ciento de humedad relativa y sale saturado. Determine la temperatura de salida del aire.

14-94 Entra aire a un enfriador evaporativo a 14.7 psia, 95 °F y 20 por ciento de humedad relativa, y sale a 80 por ciento de humedad relativa. Determine *a*) la temperatura de salida del aire y *b*) la temperatura más baja a la que el aire puede ser enfriado por este enfriador evaporativo.

14-95 Entra aire a un enfriador evaporativo a 1 atm, 40 °C y 20 por ciento de humedad relativa, a razón de 7 m³/min, y sale con una humedad relativa de 90 por ciento. Determine *a*) la temperatura de salida del aire y *b*) el flujo necesario de suministro de agua al enfriador evaporativo.

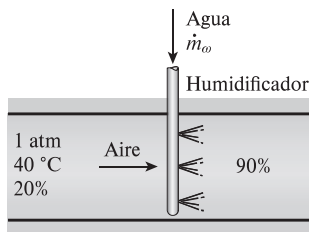


FIGURA P14-95

14-96 Aire a 1 atm, 20 °C y 70 por ciento de humedad relativa se calienta primero a 35 °C en una sección de calentamiento, y luego se pasa por un enfriador evaporativo, donde su temperatura cae a 25 °C. Determine *a*) la humedad relativa de salida y *b*) la cantidad de agua agregada al aire, en kg H₂O/kg aire seco.

Mezclado adiabático de flujos de aire

14-97C Dos flujos de aire insaturado se mezclan adiabáticamente. Se observa que se condensa algo de humedad durante el proceso de mezclado. ¿En qué condiciones será este caso?

14-98C Considere el mezclado adiabático de dos flujos de aire. ¿El estado de la mezcla en la carta psicrométrica tiene que estar en la línea recta que conecta los dos estados?

14-99 Aire húmedo saturado a 1 atm y 10 °C se debe mezclar con aire atmosférico a 1 atm, 32 °C y 80 por ciento de humedad relativa, para formar aire de 70 por ciento de humedad relativa. Determine las proporciones a las cuales se deben mezclar estos dos flujos y la temperatura del aire resultante.

14-100 Dos flujos de aire se mezclan estacionaria y adiabáticamente. El primer flujo entra a 35 °C y 30 por ciento de humedad relativa a razón de 15 m³/min, mientras el segundo entra a 12 °C y 90 por ciento de humedad relativa, a razón de 25 m³/min. Suponiendo que el proceso de mezclado ocurre a una presión de 1 atm, determine la humedad específica, la humedad relativa, la temperatura de bulbo seco y el flujo volumétrico de la mezcla. *Respuestas:* 0.0088 kg H₂O/kg aire seco, 59.7 por ciento, 20.2 °C y 40.0 m³/min

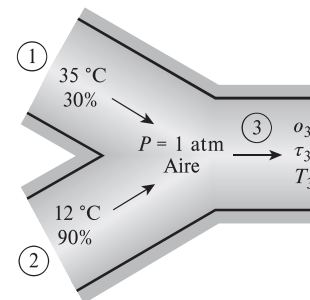



FIGURA P14-100

14-101 Repita el problema 14-100 para una presión de la cámara de mezclado de 90 kPa.

14-102 Un flujo de aire tibio con una temperatura de bulbo seco de 36 °C y una temperatura de bulbo húmedo de 30 °C se mezcla adiabáticamente con un flujo de aire saturado frío a 12 °C. Las razones másicas de aire seco de los flujos de aire tibio y frío son 8 y 10 kg/s, respectivamente. Suponiendo una presión total de 1 atm, determine *a*) la temperatura, *b*) la humedad específica y *c*) la humedad relativa de la mezcla.

14-103  Reconsidere el problema 14-102, y con un software apropiado, determine el efecto de la tasa de flujo másico de un flujo de aire frío saturado en la temperatura de la mezcla, la humedad específica, y la humedad relativa. Considere que la tasa de flujo másico del aire frío saturado varía de 0 a 16 kg/s mientras se mantiene constante la tasa de flujo másico del aire caliente. Trace la temperatura de la mezcla, la humedad específica, y la humedad relativa como funciones de la tasa de flujo másico del aire frío y explique los resultados.

14-104E Dos flujos de aire húmedo se mezclan adiabáticamente a 1 atm de presión para formar un tercer flujo. El primer flujo tiene una temperatura de 100 °F, una humedad relativa de

90 por ciento, y una tasa de flujo volumétrico de 3 pies³/s, mientras que el segundo tiene una temperatura de 50 °F, una humedad relativa de 30 por ciento, y una tasa de flujo volumétrico de 1 pie³/s. Calcule la temperatura y la humedad relativa del tercer flujo.

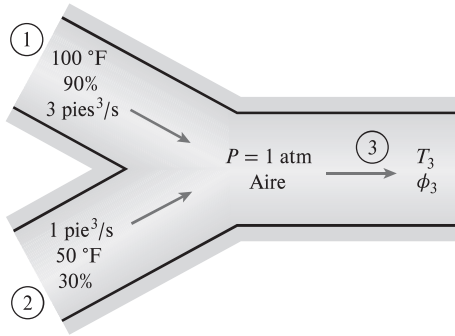


FIGURA P14-104E

14-105E Reconsidere el problema 14-104E. Calcule la tasa de generación de entropía en este proceso.

Respuesta: 3.40×10^{-4} Btu/s·R

Torres de enfriamiento húmedo

14-106C ¿Cómo funciona una torre de enfriamiento húmedo de tiro natural?

14-107C ¿Qué es un estanque de rociado? ¿Cómo funciona en comparación con el desempeño de una torre de enfriamiento húmedo?

14-108 El agua refrigerante del condensador de una central eléctrica entra a una torre de enfriamiento húmedo a 40 °C a razón de 90 kg/s. El agua se enfría a 25 °C en la torre de enfriamiento mediante aire que entra a la torre a 1 atm, 23 °C y 60 por ciento de humedad relativa y sale saturada a 32 °C. Despreciando la potencia consumida por el ventilador, determine *a*) el flujo volumétrico del aire en la torre de enfriamiento y *b*) el flujo másico del agua de reposición requerida.

14-109 Una torre de enfriamiento húmedo debe enfriar 60 kg/s de agua de 40 a 33 °C. Entra aire atmosférico a la torre a 1 atm, con temperaturas de bulbo seco y húmedo de 22 y 16 °C, respectivamente, y sale a 30 °C con una humedad relativa de 95 por ciento. Usando la carta psicrométrica, determine *a*) el flujo volumétrico del aire a la entrada de la torre de enfriamiento y *b*) el flujo másico del agua de reposición necesaria.

Respuestas: *a*) 30.3 m³/s, *b*) 0.605 kg/s

14-110E El agua a 100 °F se debe enfriar en una torre de enfriamiento a la que entra a razón de 10 000 lbm/h. Entra aire húmedo a esta torre a 1 atm, 60 °F, y 20 por ciento de humedad relativa con una tasa de flujo de aire seco de 7 000 lbm/h y sale a 75 °F y 0.018 lbm H₂O/lbm de aire seco. Determine la humedad relativa a la cual sale el aire de la torre y la temperatura de salida del agua.

14-111 Una torre de enfriamiento húmedo debe enfriar 17 kg/s de agua de enfriamiento de 40 a 30 °C, en una ubicación en la que la presión atmosférica es de 96 kPa. El aire atmosférico entra a la torre a 20 °C y 70 por ciento de humedad relativa, y sale

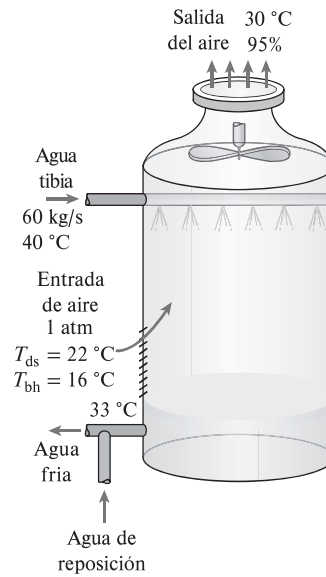


FIGURA P14-109

saturado a 35 °C. Despreciando la entrada de potencia al ventilador, determine *a*) el flujo volumétrico de aire a la entrada de la torre de enfriamiento y *b*) el flujo másico del agua de reposición necesaria. *Respuestas:* *a*) 7.58 m³/s, *b*) 0.238 kg/s

14-112 Se debe enfriar agua de 30 °C a 22 °C en una torre de enfriamiento a la cual entra a razón de 5 kg/s. Entra aire húmedo a esta torre a 1 atm y 15 °C con una humedad relativa de 25 por ciento y sale a 18 °C con una humedad relativa de 95 por ciento. Determine la tasa de flujo másico del aire seco a través de la torre. *Respuesta:* 6.29 kg/s

14-113 Reconsidere el problema 14-112. ¿Cuánto potencial de trabajo se pierde, en kJ/kg, de aire seco en la torre de enfriamiento? Considere $T_0 = 15$ °C.

Problemas de repaso

14-114 El aire en un cuarto está a 1 atm, 32 °C y 60 por ciento de humedad relativa. Determine *a*) la humedad específica, *b*) la entalpía, en kJ/kg de aire seco, *c*) la temperatura de bulbo húmedo, *d*) la temperatura de rocío, y *e*) el volumen específico del aire en m³/kg de aire seco. Use la carta psicrométrica.

14-115 Determine la fracción molar de aire seco en la superficie de un lago cuya temperatura es de 18 °C. El aire en la superficie del lago está saturado y la presión atmosférica al nivel de lago es de 100 kPa.

14-116 Aire seco cuyo análisis molar es 78.1 por ciento de N₂, 20.9 por ciento de O₂ y 1 por ciento de aire fluye sobre un cuerpo de agua hasta que se satura. Si la presión y temperatura del aire permanecen constantes a 1 atm y 25 °C durante el proceso, determine *a*) el análisis molar del aire saturado y *b*) la densidad del aire antes y después del proceso. ¿Qué conclusión saca de los resultados?

14-117 La condensación del vapor de agua en las líneas de aire comprimido es una preocupación importante en las plantas industriales, y el aire comprimido a menudo se deshumidifica

para evitar los problemas asociados con la condensación. Considere un compresor que comprime aire ambiente de la presión atmosférica local de 92 kPa a una presión de 800 kPa (absoluta). El aire comprimido luego se enfría a la temperatura ambiente al pasar por las líneas de aire comprimido. Despreciando cualquier pérdida de presión, determine si habrá condensación en las líneas de aire comprimido en un día en el que el aire ambiente está a 20 °C y 50 por ciento de humedad relativa.

14-118E Considere un cuarto que se enfría de forma adecuada mediante un acondicionador de aire cuya capacidad de enfriamiento es de 7 500 Btu/h. Si el cuarto se debe enfriar mediante un enfriador evaporativo que elimina calor a la misma tasa por evaporación, determine cuánta agua debe suministrarse al enfriador por hora en condiciones de diseño.


14-119 Los costos de acondicionamiento de aire de una casa se pueden reducir hasta en 10 por ciento instalando la unidad exterior (el condensador) del acondicionador de aire en una ubicación sombreada por árboles y arbustos. Si los costos de acondicionamiento de aire son de \$500 por año, determine cuánto ahorrarán los árboles al propietario durante los 20 años de vida del sistema.

14-120E El U.S. Department of Energy estima que se ahorrarían 190 000 barriles de combustóleo por día si cada vivienda en Estados Unidos elevará el ajuste del termostato en verano en 6 °F (3.3 °C). Suponiendo que la temporada invernal es de 120 días y el costo del combustóleo es de \$70/barril, determine cuánto dinero se ahorraría al año.

14-121 Un laboratorio tiene un volumen de 700 m³ y debe experimentar un cambio de aire completo por minuto cuando está en uso. El aire atmosférico exterior a 100 kPa, 30 °C de bulbo seco, y 60 por ciento de humedad relativa se introduce al equipo de acondicionamiento de aire del laboratorio y se acondiciona a 20 °C de bulbo seco y 12 °C de bulbo húmedo, el estado requerido para el aire que se suministra al laboratorio.

- Trace el equipo del sistema y el diagrama psicrométrico del proceso.
- ¿Qué tasa de flujo másico del aire atmosférico externo se requiere para el cambio de aire, en kg/h?
- Determine la tasa de flujo másico del agua condensada del aire atmosférico, en kg/min.
- El fluido de enfriamiento en el sistema de acondicionamiento de aire es agua helada, la cual experimenta una elevación de temperatura de 15 °C durante el proceso de intercambio de calor. Determine la tasa de flujo másico del agua helada, en kg/min.

14-122 Un tanque de 1.8 m³ contiene aire saturado a 20 °C y 90 kPa. Determine *a*) la masa del aire seco, *b*) la humedad específica y *c*) la entalpía del aire por unidad de masa del aire seco. *Respuestas:* 1.88 kg, *b*) 0.0166 kg H₂O/kg de aire seco, *c*) 62.2 kJ/kg de aire seco

14-123  Reconsidere el problema 14-122, y con un software apropiado determine las propiedades del aire en el estado inicial. Estudie el efecto de calentar el aire a volumen constante hasta que la presión es de 110 kPa. Trace la transferencia de calor requerida, en kJ, en función de la presión.

14-124E Aire a 15 psia, 60 °F y 70 por ciento de humedad relativa fluye por un ducto de 6 pulg de diámetro a 27 pies/s. Determine *a*) la temperatura de punto de rocío, *b*) la tasa de flujo volumétrico del aire, y *c*) la tasa de flujo másico del aire seco.

14-125 Fluye aire de forma estacionaria por una tobera isentrópica. El aire entra a la tobera a 35 °C, 200 kPa, y 50 por ciento de humedad relativa. Si no hay condensación durante el proceso de expansión, determine la presión, temperatura y velocidad del aire a la salida de la tobera.

14-126 Durante un día de verano en El Paso, Texas, el aire exterior está a 1 atm, 40 °C y 20 por ciento de humedad relativa. Agua a 20 °C se evapora en este aire seco para producir aire a 25 °C y 80 por ciento de humedad relativa. ¿Cuánta agua, en kgH₂O/kg de aire seco, se requiere y cuánto enfriamiento, en kJ/kg de aire seco se ha producido?

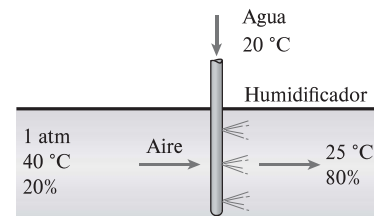


FIGURA P14-126

14-127 Reconsidere el problema 14-126. Si el sistema se opera como un sistema adiabático y el aire que produce tiene una humedad relativa de 80 por ciento, ¿cuál es la temperatura del aire producido? *Respuesta:* 24.6 °C

14-128E Un día de invierno típico en Fairbanks, Alaska, tiene una presión de 1 atm, una temperatura de 32 °F, y una humedad relativa de 60 por ciento. ¿Cuál es la humedad relativa adentro de una casa donde el aire se ha calentado a 70 °F?

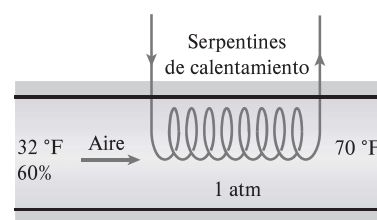


FIGURA P14-128E

14-129E Reconsidere el problema 14-128E. La humedad relativa del aire en una casa se debe restaurar a 60 por ciento evaporando agua a 60 °F en el aire. ¿Cuánto calor, en Btu, se requiere para hacer esto en una casa de 16 000 pies³ de volumen?

14-130 Entra aire a una sección de enfriamiento a 97 kPa, 35 °C y 30 por ciento de humedad relativa a razón de 6 m³/min, donde se enfría hasta que la humedad en el aire comienza a condensarse. Determine *a*) la temperatura del aire a la salida y *b*) la tasa de transferencia de calor en la sección de enfriamiento.

14-131 Entra aire externo a un sistema de acondicionamiento de aire a 10 °C y 70 por ciento de humedad relativa a una tasa

constante de $26 \text{ m}^3/\text{min}$, y sale a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 45 por ciento de humedad relativa. Primero se calienta el aire externo a $18 \text{ }^\circ\text{C}$ en la sección de calentamiento y luego se humidifica mediante la inyección de vapor de agua caliente en la sección de humidificación. Suponiendo que todo el proceso ocurre a 1 atm, determine *a*) la tasa de suministro de calor en la sección de calentamiento y *b*) la tasa de flujo másico del vapor necesaria en la sección de humidificación.

14-132 Entra aire atmosférico a un sistema de acondicionamiento de aire a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ y 70 por ciento de humedad relativa con una tasa de flujo másico de $4 \text{ m}^3/\text{min}$ y se enfría a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y 20 por ciento de humedad relativa a una presión de 1 atm. El sistema utiliza refrigerante R-134a como fluido de enfriamiento que entra a la sección de enfriamiento a 350 kPa con una calidad de 20 por ciento y sale como vapor saturado. Muestre el proceso en la carta psicrométrica. ¿Cuál es la transferencia de calor del aire a los serpentines de enfriamiento, en kW? Si se condensa agua del aire, ¿cuánta agua se condensará del aire atmosférico por min? Determine la tasa de flujo másico del refrigerante, en kg/min.

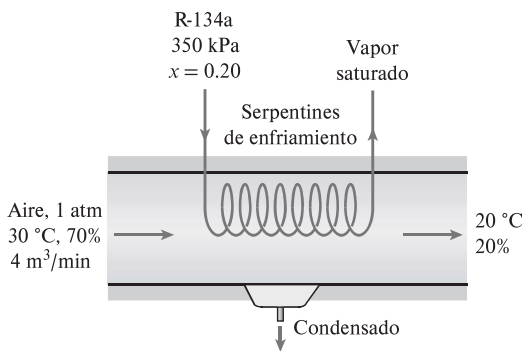


FIGURA P14-132

14-133 Se enfría aire húmedo a 101.3 kPa, $36 \text{ }^\circ\text{C}$ de bulbo seco y 65 por ciento de humedad relativa a presión constante a una temperatura $10 \text{ }^\circ\text{C}$ por debajo de su temperatura de punto de rocío. Trace el diagrama psicrométrico del proceso y determine la transferencia del calor del aire, en kJ/kg de aire seco.

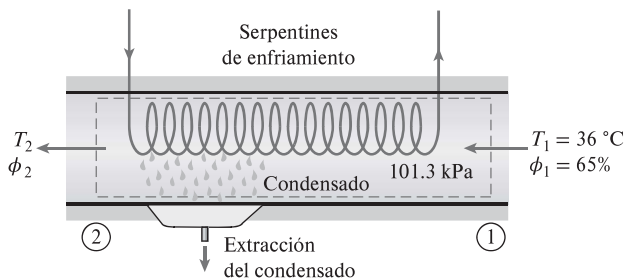


FIGURA P14-133

14-134 El acondicionador de aire de un automóvil utiliza refrigerante R-134a como fluido de enfriamiento. El evaporador opera a 100 kPa manométricos y el condensador lo hace a 1.5 MPa manométricos. El compresor requiere un suministro

de potencia de 6 kW y su eficiencia isentrópica es de 85 por ciento. Aire atmosférico a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 60 por ciento de humedad relativa entra al evaporador y sale a $8 \text{ }^\circ\text{C}$ y 90 por ciento de humedad relativa. Determine la tasa de flujo másico del aire atmosférico que entra al evaporador del acondicionador de aire, en m^3/min .

14-135 Un sistema de acondicionamiento de aire opera a una presión total de 1 atm y consiste en una sección de calentamiento y un enfriador evaporativo. El aire entra a la sección de calentamiento a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ y 55 por ciento de humedad relativa, a razón de $30 \text{ m}^3/\text{min}$, y sale del enfriador evaporativo a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 45 por ciento de humedad relativa. Determine *a*) la temperatura y la humedad relativa del aire cuando sale de la sección de calentamiento, *b*) la tasa de transferencia de calor en la sección de calentamiento y *c*) el flujo de agua agregada al aire en el enfriador evaporativo. Respuestas: *a*) $32.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 19.2 por ciento, *b*) $655 \text{ kJ}/\text{min}$, *c*) $0.112 \text{ kg}/\text{min}$

14-136 Reconsidere el problema 14-135, y con un software apropiado estudie el efecto de la presión total en el rango de 94 a 100 kPa en los resultados requeridos en el problema. Trace los resultados en función de la presión total.

14-137 Repita el problema 14-135 para una presión total de 96 kPa.

14-138 Se debe mezclar aire acondicionado a $13 \text{ }^\circ\text{C}$ y 90 por ciento de humedad relativa con aire externo a $34 \text{ }^\circ\text{C}$ y 40 por ciento de humedad relativa a 1 atm. Si se desea que la mezcla tenga una humedad relativa de 60 por ciento, determine *a*) la relación entre las tasas de flujo másico del aire seco del aire acondicionado y el aire externo y *b*) la temperatura de la mezcla.

14-139 Reconsidere el problema 14-138. Determine las cantidades deseadas con un software apropiado en lugar de la carta psicrométrica. ¿Cuáles serían las respuestas en un lugar donde la presión atmosférica es de 80 kPa?

14-140 Una torre de enfriamiento de tiro natural debe eliminar el calor residual del agua de enfriamiento que fluye por el condensador de una planta eléctrica de vapor. La turbina de esta planta recibe $42 \text{ kg}/\text{s}$ de vapor del generador de vapor, y 18 por ciento del vapor que entra a la turbina se extrae para varios calentadores de agua de alimentación. El condensado de los calentadores de alta presión se atrapa para el siguiente calentador de agua de alimentación de baja presión. El último calentador de agua de alimentación opera a 0.2 MPa, y todo el vapor extraído para los calentadores de agua de alimentación se estrangula a la salida del último calentador de agua de alimentación hacia el condensador que opera a 10 kPa. El resto del vapor produce trabajo en la turbina y sale de la etapa de baja presión de la turbina a 10 kPa con una entropía de $7.962 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$. La torre de enfriamiento suministra el agua de enfriamiento a $26 \text{ }^\circ\text{C}$ al condensador, y el agua de enfriamiento regresa del condensador a la torre de enfriamiento a $40 \text{ }^\circ\text{C}$. El aire atmosférico entra a la torre a 1 atm con temperaturas de bulbo seco y húmedo de 23 y $18 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente, y sale saturado a $37 \text{ }^\circ\text{C}$. Determine *a*) la tasa de flujo másico del agua de enfriamiento, *b*) la tasa de flujo volumétrico del aire de entrada a la torre de enfriamiento, y *c*) la tasa de flujo másico del agua de reposición requerida. Este problema se resuelve con un software apropiado.

Problemas para el examen de fundamentos de ingeniería

14-141 Un cuarto contiene 65 kg de aire seco y 0.43 kg de vapor de agua a 25 °C y 90 kPa de presión total. La humedad relativa del aire en el cuarto es

- a) 29.9% b) 35.2% c) 41.5%
d) 60.0% e) 66.2%

14-142 Un cuarto de 40 m³ contiene aire a 30 °C y una presión total de 90 kPa con una humedad relativa de 75 por ciento. La masa de aire seco en el cuarto es

- a) 24.7 kg b) 29.9 kg c) 39.9 kg
d) 41.4 kg e) 52.3 kg

14-143 Un cuarto está lleno de aire húmedo saturado a 25 °C y una presión total de 100 kPa. Si la masa de aire seco en el cuarto es de 100 kg, la masa de vapor de agua es

- a) 0.52 kg b) 1.97 kg c) 2.96 kg
d) 2.04 kg e) 3.17 kg

14-144 Un cuarto contiene aire a 30 °C y una presión total de 96.0 kPa con una humedad relativa de 75 por ciento. La presión parcial del aire seco es

- a) 82.0 kPa b) 85.8 kPa c) 92.8 kPa
d) 90.6 kPa e) 72.0 kPa

14-145 El aire de una casa está a 25 °C y 65 por ciento de humedad relativa. Ahora se enfría el aire a presión constante. La temperatura a la cual la humedad del aire comenzará a condensar es

- a) 7.4 °C b) 16.3 °C c) 18.0 °C
d) 11.3 °C e) 20.2 °C

14-146 Se enfría y deshumidifica aire cuando fluye sobre los serpentines de un sistema de refrigeración a 100 kPa de 30 °C y una relación de humedad de 0.023 kg/kg aire seco a 15 °C y una relación de humedad de 0.015 kg/kg aire seco. Si el flujo másico del aire seco es de 0.4 kg/s, la tasa de remoción de calor del aire es

- a) 6 kJ/s b) 8 kJ/s c) 11 kJ/s
d) 14 kJ/s e) 16 kJ/s

14-147 Aire a una presión total de 90 kPa, 15 °C y 75 por ciento de humedad relativa se calienta y humidifica a 25 °C y 75 por ciento de humedad relativa introduciendo vapor de agua. Si el flujo másico de aire seco es de 4 kg/s, el flujo de adición de vapor de agua al aire es

- a) 0.032 kg/s b) 0.013 kg/s c) 0.019 kg/s
d) 0.0079 kg/s e) 0 kg/s

14-148 En la carta psicrométrica, un proceso de enfriamiento y deshumidificación aparece como una línea que es

- a) horizontal a la izquierda
b) vertical hacia abajo
c) diagonal hacia arriba a la derecha (dirección NE)
d) diagonal hacia arriba a la izquierda (dirección NO)
e) diagonal hacia abajo a la izquierda (dirección SO)

14-149 En la carta psicrométrica, un proceso de calentamiento y humidificación aparece como una línea que es

- a) horizontal a la derecha
b) vertical hacia arriba
c) diagonal hacia arriba a la derecha (dirección NE)
d) diagonal hacia arriba a la izquierda (dirección NO)
e) diagonal hacia abajo a la derecha (dirección SE)

14-150 Un flujo de aire a una temperatura y humedad relativa especificadas sufre enfriamiento evaporativo por aspersión de agua a la misma temperatura. La temperatura mínima a la que se puede enfriar el flujo de aire es

- a) la temperatura de bulbo seco en el estado dado
b) la temperatura de bulbo húmedo en el estado dado
c) la temperatura de punto de rocío en el estado dado
d) la temperatura de saturación correspondiente a la relación de humedad en el estado dado
e) la temperatura de punto triple de agua

Problemas de diseño y ensayo

14-151 Identifique las fuentes principales de ganancia de calor en su casa en verano, y proponga formas de minimizarlas y por ende de reducir la carga de enfriamiento.

14-152 Las necesidades de aire acondicionado de un edificio grande se pueden satisfacer mediante un solo sistema central o mediante varias unidades individuales de ventana. Considerando que ambos métodos son de uso común en la práctica, la elección correcta depende de la situación concreta. Identifique los factores importantes que es necesario al tomar la decisión, y explique las condiciones en las cuales un sistema de acondicionamiento de aire que consiste en varias unidades de ventana es preferible con respecto a un solo sistema central grande y viceversa.

14-153 Diseñe un sistema de enfriamiento evaporativo de bajo costo adecuado para usarse en su casa. Muestre cómo obtendría un rociador de agua, cómo introduciría el flujo de aire y cómo evitaría que las gotitas de agua llegaran al espacio habitable.

14-154 El cambio diario en la temperatura de la atmósfera tiende a ser más pequeño en ubicaciones en las que la humedad relativa es alta. Demuestre por qué sucede esto, calculando el cambio en la temperatura de una cantidad fija de aire cuando se quita del aire una cantidad fija de calor. Grafique este cambio de temperatura como función de la humedad relativa inicial, y asegúrese de que la temperatura del aire llegue a la temperatura de punto de rocío, o la exceda. Haga lo mismo cuando se agrega al aire una cantidad fija de calor.

14-155 La condensación e incluso el congelamiento de la humedad en los muros de un edificio sin retardadores de vapor efectivos son un problema real en climas fríos, pues aminoran la eficacia del aislamiento. Investigue cómo lidian con este problema los constructores en su área, ya sea que utilicen retardadores de vapor o barreras de vapor en los muros, o dónde colocan estos retardadores o barreras en los muros. Prepare un informe sobre sus hallazgos y explique la razón de esta práctica.

14-156 La operación de una torre de enfriamiento está regida por los principios de mecánica de fluidos, transferencia de calor y transferencia de masa, así como termodinámicos. Las leyes de la termodinámica limitan las condiciones en las cuales se puede esperar una operación satisfactoria, mientras que las otras ciencias determinan las dimensiones del equipo y otros factores. Use la ley expresada para el incremento de entropía u otro principio apropiado y la primera ley para limitar la entrada de aire húmedo en comparación con las condiciones en la entrada de agua líquida. Haga lo mismo para las condiciones de salida de aire húmedo en comparación con las condiciones de salida de agua líquida.

14-157 Un huracán es una gran máquina térmica alimentada por el intercambio de agua con aire húmedo. El agua del océano se evapora cuando el aire se aproxima al ojo de la tormenta, y se condensa como lluvia cerca del ojo de la tormenta. Desarrolle una curva de la velocidad del viento cerca del ojo de la tormenta como una función de la cantidad de agua liberada del aire como lluvia. En esta curva, indique la temperatura mínima del aire y la humedad relativa necesarias para mantener la velocidad del viento. *Sugerencia:* Como límite superior, toda la energía liberada por la condensación del agua se convertiría en energía cinética.