

Introdução à Psicrometria

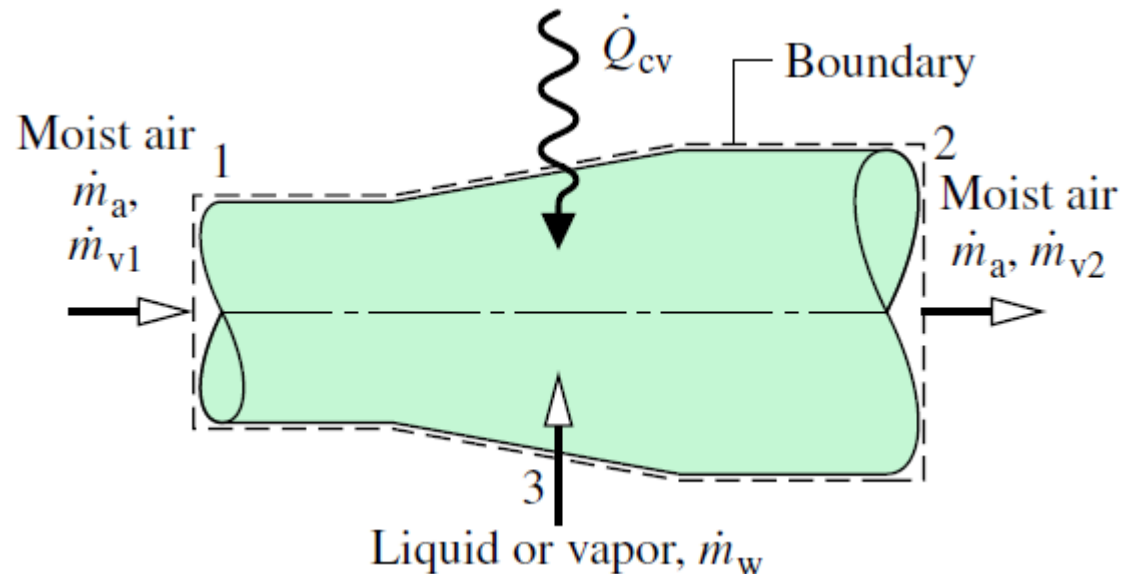
Parte2

Processos de condicionamento de ar

- Em diversas aplicações, o ar deve ser condicionado
 - Temperatura e umidade adequados
 - Zona de conforto: $22^{\circ}\text{C} \leq T \leq 27^{\circ}\text{C}$ e $40\% \leq \phi \leq 60\%$
- Existem dispositivos que fazem isto
 - Umidificador
 - Desumidificador
 - Resfriador evaporativo
 - Torre de resfriamento
 - Etc.

Balanços de Massa e de Energia

- Considere um VC com 2 entradas e uma saída
- Considere as seguintes hipóteses:
 - $W_{\text{eixo}} = 0$
 - $\Delta KE = \Delta PE = 0$
 - R.P.
 - P.U.F.
 - Ar e vapor d'água são gases ideais



Balanços de Massa e de Energia

- Massa:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$$

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_w = \dot{m}_{v2}$$

- onde

$$\dot{m}_{v1} = \omega_1 \dot{m}_a \quad \dot{m}_{v2} = \omega_2 \dot{m}_a$$

- logo

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

- Energia:

$$0 = \dot{Q}_{cv} + (\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1}) + \dot{m}_w h_w - (\dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2})$$

- onde $h_{v2} = h_{g2}$ e $h_{v1} = h_{g1}$, pois $h=h(t)$ para gás perfeito

Balanços de Massa e de Energia

- assim

$$0 = \dot{Q}_{cv} + (\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{g1}) + \dot{m}_w h_w - (\dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{g2})$$

- e com

$$\dot{m}_{v1} = \omega_1 \dot{m}_a \quad \dot{m}_{v2} = \omega_2 \dot{m}_a$$

$$0 = \dot{Q}_{cv} + \dot{m}_a (h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_w h_w - \dot{m}_a (h_{a2} + \omega_2 h_{g2})$$

- finalmente

$$0 = \dot{Q}_{cv} + \dot{m}_a \left[\underline{(h_{a1} - h_{a2})} + \underline{\omega_1 h_{g1} + (\omega_2 - \omega_1) h_w - \omega_2 h_{g2}} \right]$$

- OBS: o primeiro termo sublinhado pode ser avaliado como:

$$h_{a1} - h_{a2} = c_{pa}(T_1 - T_2)$$

Balanços de Massa e de Energia

$$0 = \dot{Q}_{cv} + \dot{m}_a \left[\underline{(h_{a1} - h_{a2})} + \underline{\omega_1 h_{g1} + (\omega_2 - \omega_1) h_w - \omega_2 h_{g2}} \right]$$

- A equação anterior pode ser utilizada para diversos sistemas
 - Note que a conservação da massa está implícita nesta equação
 - Em cada caso, faz-se as simplificações necessárias
 - Utilizam-se tabelas em conjunto com cartas psicrométricas

• OBS:

$$0 = \dot{Q}_{cv} + \dot{m}_a (h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_w h_w - \dot{m}_a (h_{a2} + \omega_2 h_{g2})$$

$$\frac{H_1}{m_a}$$

Carta psicrométrica


$$\frac{H_2}{m_a}$$

Carta psicrométrica


Balanços de Massa e de Energia

- OBS:

$$0 = \dot{Q}_{cv} + \dot{m}_a(h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_w h_w - \dot{m}_a(h_{a2} + \omega_2 h_{g2})$$


$$\frac{H_1}{m_a}$$

Carta psicrométrica

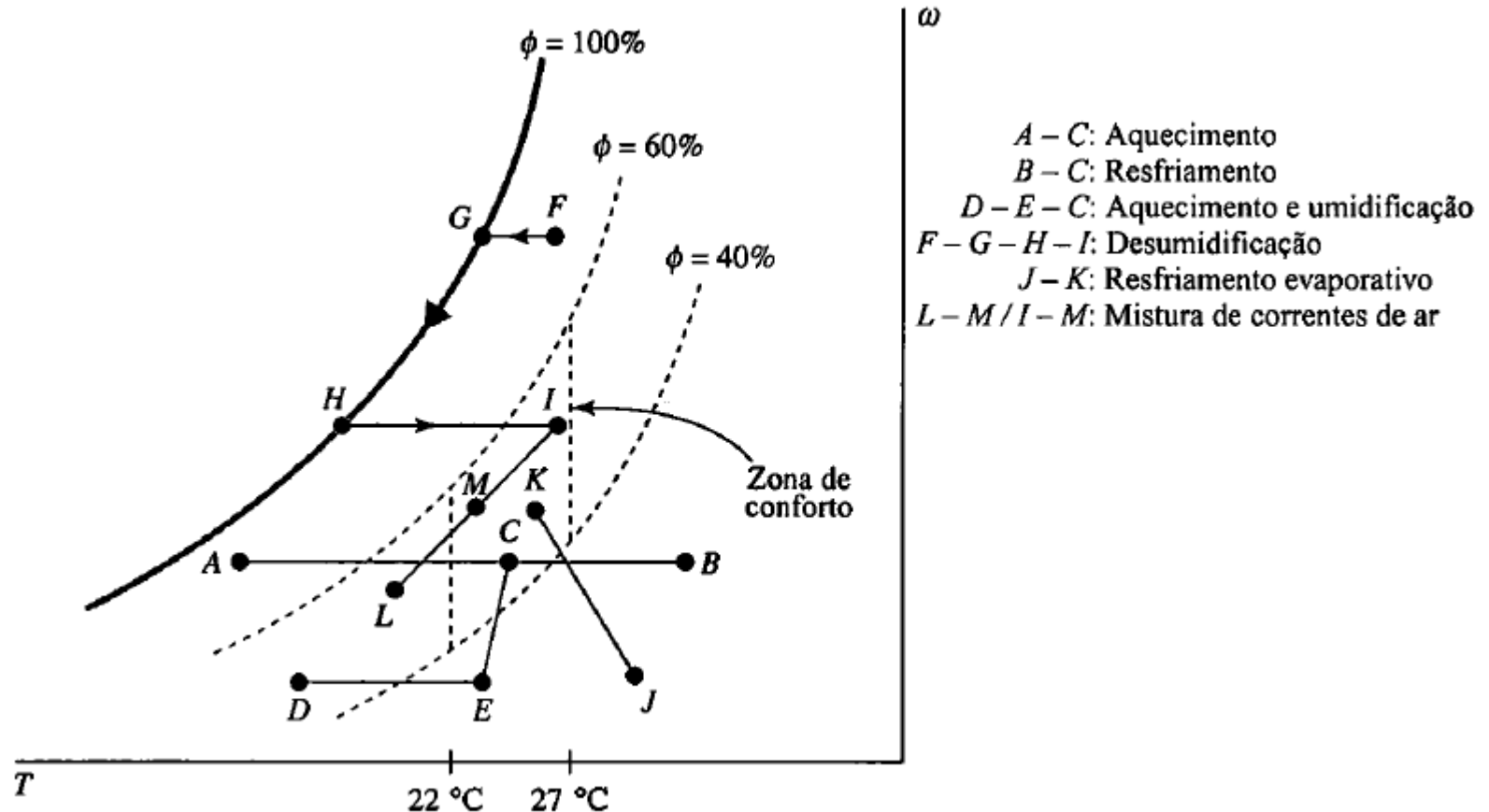

$$\frac{H_2}{m_a}$$

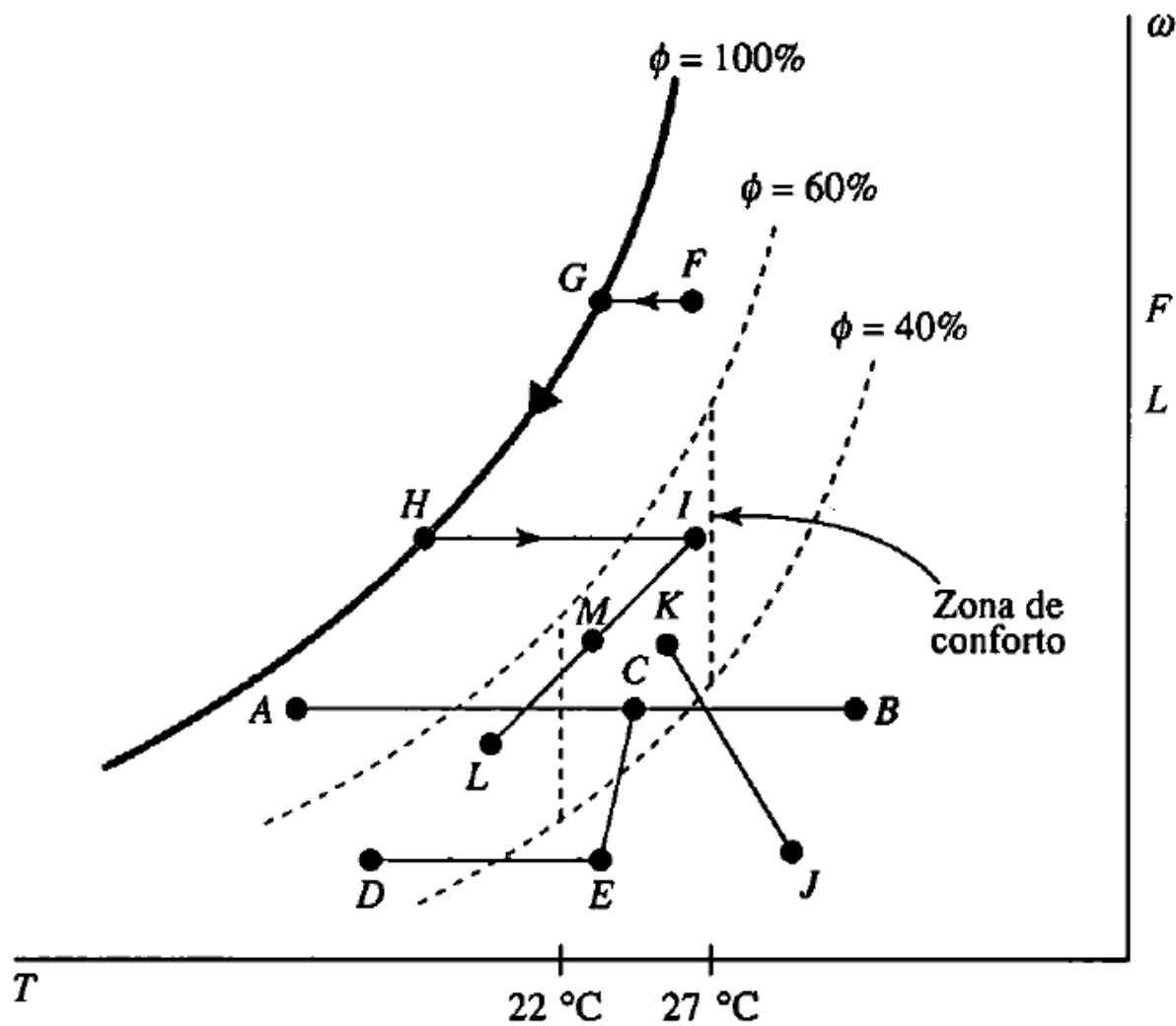
Carta psicrométrica

- Em muitos problemas práticos, a dificuldade estará apenas em encontrar a vazão mássica do ar, pois H_1/m_a e H_2/m_a podem ser diretamente obtidos das cartas psicrométricas

Processos na carta psicrométrica

- Diversos processos podem ser diretamente avaliados utilizando-se cartas psicrométricas
 - Para tanto, seguem-se as linhas de propriedades que permaneceram constantes, até se chegar ao ponto desejado





- $A - C$: Aquecimento
- $B - C$: Resfriamento
- $D - E - C$: Aquecimento e umidificação
- $F - G - H - I$: Desumidificação
- $J - K$: Resfriamento evaporativo
- $L - M / I - M$: Mistura de correntes de ar

Processos na carta psicrométrica

- Ar é muito frio ou muito quente
 - Ar é aquecido ou resfriado
 - Linhas A \rightarrow C e B \rightarrow C
- Ar é muito frio e umidade baixa
 - Ar é aquecido e depois umidade é adicionada
 - D \rightarrow E + E \rightarrow C
- A temperatura é adequada, mas a umidade é muito alta
 - Ar é resfriado e umidade é removida, depois ele é aquecido
 - F \rightarrow G \rightarrow H + remoção de condensado + H \rightarrow I
- Ar é muito quente e umidade e baixa
 - Água é adicionada
 - J \rightarrow K
- Ar é quente e umidade adequada
 - Uma corrente de ar mais frio é misturada ao ar quente
 - L \rightarrow M (ar frio) e I \rightarrow M (ar quente)

Questão

- Ar a 5°C e 70% de umidade relativa é aquecido até 25°C (obs: temperaturas de bulbo seco). A vazão volumétrica é de $50\text{ m}^3/\text{min}$ (no estado inicial) e a pressão da mistura é $P = 100\text{ kPa}$. Encontre: (i) a transferência de calor que ocorre durante este processo e (ii) a umidade relativa final

Solução

- (i) $\dot{Q} = \dot{m}_a(h_2 - h_1)$

- Onde

e

$$h = H_{\text{mist}}/m_a = h_a + \omega h_v$$

$$\dot{m}_a = \rho_{a1} \dot{V}_{a1}$$



$$\rho_{a1} = \frac{P_{a1}}{R_a T_{a1}}$$



$$P_{a1} = p - p_{v1} = p - \phi p_{g1}$$



$P_{g1} \Rightarrow$ tabela

$$P_{g1} = 0,872 \text{ kPa}$$

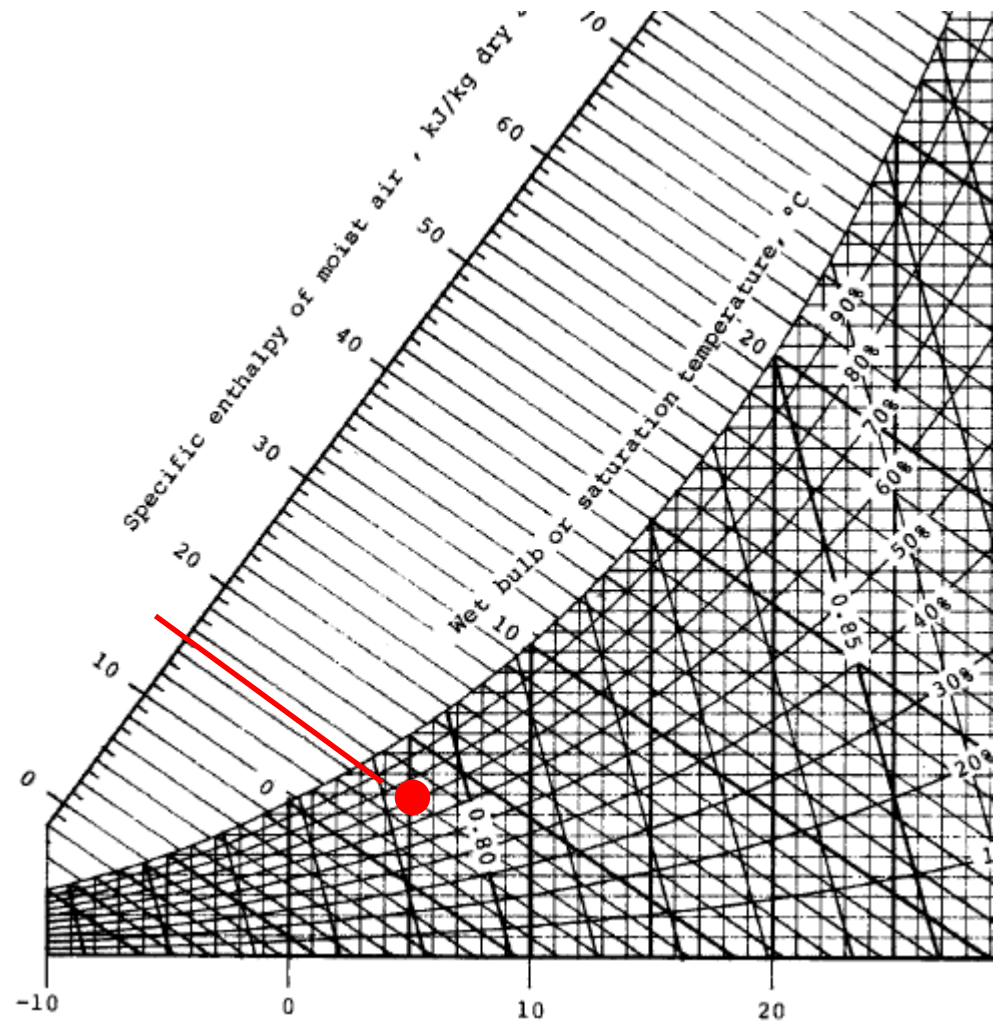
$$P_{a1} = 99,4 \text{ kPa}$$

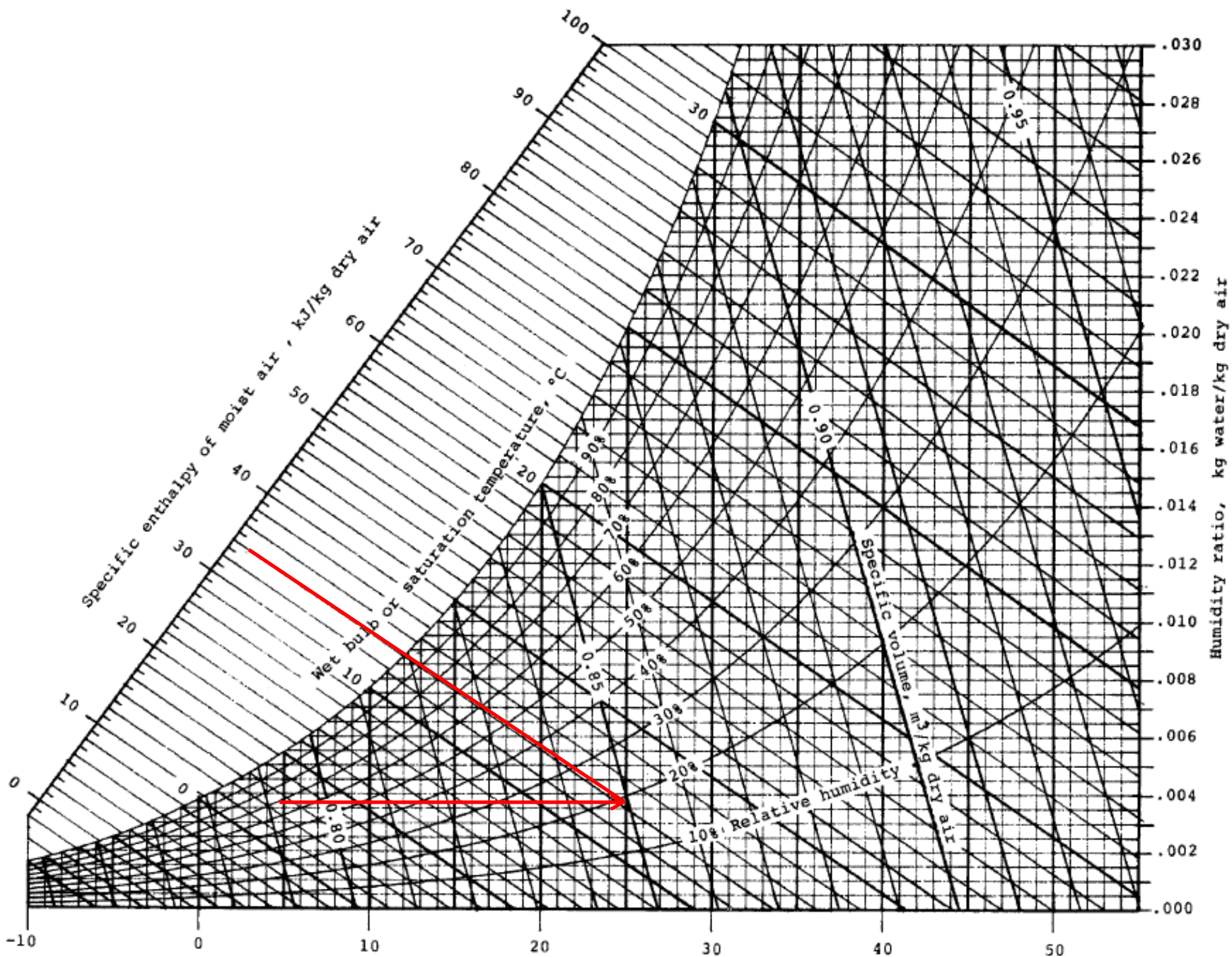
$$\rho_{a1} = 1,246 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_a = 1,308 \text{ kg/s}$$

Solução

- $h_1 \Rightarrow$ carta psicrométrica
 - $h_1 = 14$ kJ/kg ar seco
- $h_2 \Rightarrow$ carta psicrométrica
 - Notar que ω se conserva!
 - Nenhuma umidade é Adicionada ou removida





solução

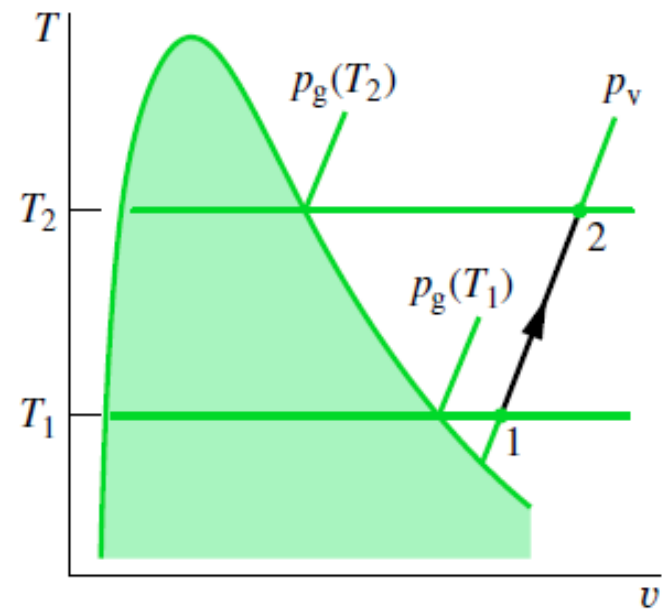
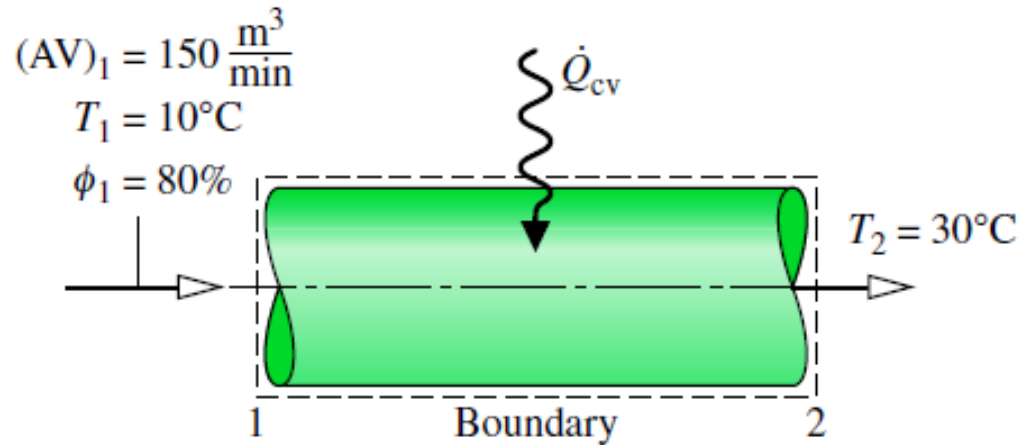
- $h_2 = 35 \text{ kJ/kg ar seco}$

$$\dot{Q} = 22 \text{ kW}$$

- (ii)

$$\phi_2 = 19\%$$

Moist air enters a duct at 10°C , 80% relative humidity, and a volumetric flow rate of $150 \text{ m}^3/\text{min}$. The mixture is heated as it flows through the duct and exits at 30°C . No moisture is added or removed, and the mixture pressure remains approximately constant at 1 bar. For steady-state operation, determine (a) the rate of heat transfer, in kJ/min , and (b) the relative humidity at the exit. Changes in kinetic and potential energy can be ignored.



(a)

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2}$$

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2}$$

Não há adição ou remoção de vapor => $\omega_1 = \omega_2 = \omega$

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv}^0 + (\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_v h_{v1}) - (\dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_v h_{v2})$$

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{m}_a (h_{a2} - h_{a1}) + \dot{m}_v (h_{v2} - h_{v1})$$

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{m}_a \left[\underline{(h_{a2} - h_{a1})} + \underline{\omega (h_{v2} - h_{v1})} \right]$$

onde

Table A-22 $h_{a1} = 283.1 \text{ kJ/kg}, h_{a2} = 303.2 \text{ kJ/kg}$

Table A-2 $h_{g1} = 2519.8 \text{ kJ/kg}, h_{g2} = 2556.3 \text{ kJ/kg}$

$$\dot{m}_a = \frac{(AV)_1}{v_{a1}}$$

$$v_{a1} = \frac{(\bar{R}/M)T_1}{p_{a1}}$$

$$p_{a1} = p - p_{v1}$$

$$p_{v1} = \phi_1 p_{g1} = (0.8)(0.01228 \text{ bar}) = 0.0098 \text{ bar}$$

$$p_{a1} = 0.9902 \text{ bar}$$

$$v_{a1} = 0.82 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{m}_a = 182.9 \text{ kg}/\text{min}$$

$$\omega = 0.622 \left(\frac{p_{v1}}{p - p_{v1}} \right) = 0.00616 \frac{\text{kg (vapor)}}{\text{kg (dry air)}}$$

$$\dot{Q}_{cv} = 3717 \text{ kJ/min}$$

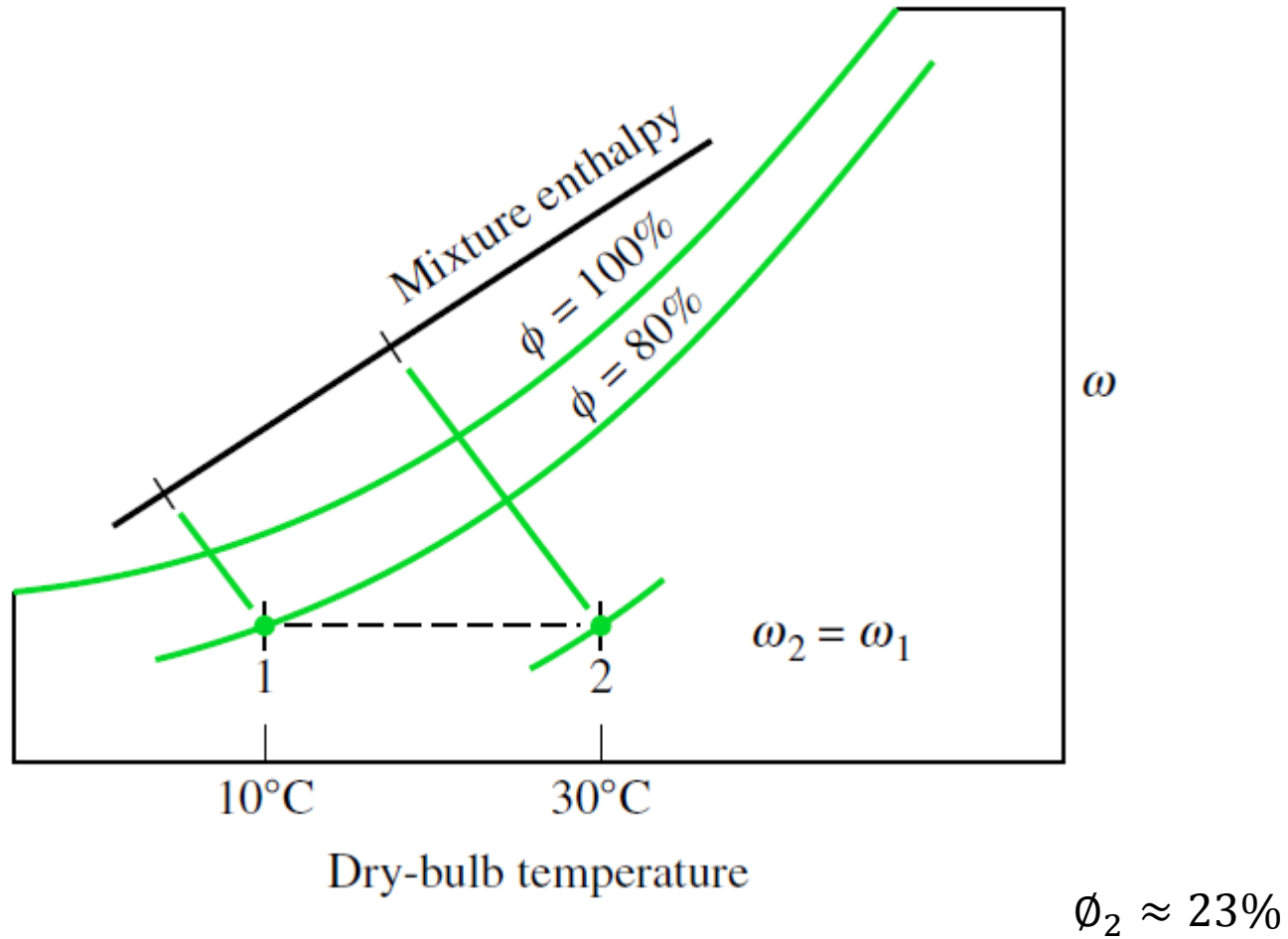
OBS: alternativamente, poderíamos ter pego os valores de h_1 e h_2 do ar úmido de cartas psicrométricas, e depois multiplicado pela vazão mássica do ar

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) = 183(46-28) \approx 3300 \text{ kJ/min}$$

(b) $p_{v2} = p_{v1} = 0.0098 \text{ bar}$

$$\phi_2 = \frac{p_{v2}}{p_{g2}} = \frac{0.0098}{0.04246} = 0.231 (23.1\%)$$

Ou, alternativamente, basta seguir um linha com ω constante na carta psicrométrica, pois não houve acréscimo ou redução de água

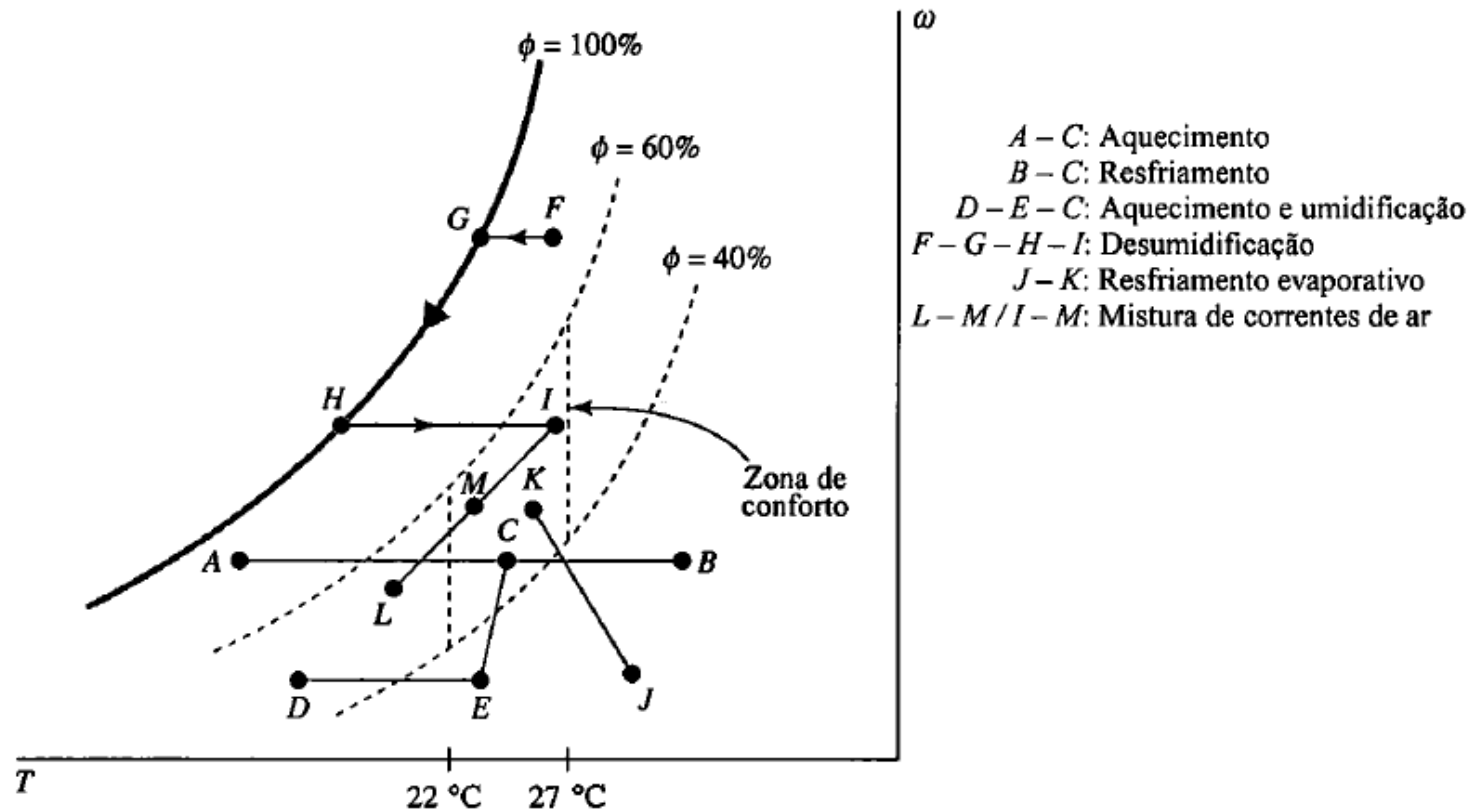


Questão

- Ar externo a 80°F e 90% de umidade relativa é acondicionado de modo a entrar em um ambiente a 75°F e 40% de umidade relativa. Determine, por massa de ar seco: (i) a quantidade de água (umidade) removida; (ii) o resfriamento necessário; (iii) o aquecimento necessário.

Solução

- O processo geral é aproximadamente o $F \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow I$ da figura abaixo.
 - O resfriamento ocorre de F à H sendo que água é removida do ar (condensação) de G à H
 - O aquecimento ocorre de H à I



Solução

- (i) Basta encontrar ω nos pontos G e H e fazer a subtração
 - Pois ω é dado em massa de vapor por massa de ar

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{vG} - \dot{m}_{vH} \Rightarrow \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} = \omega_G - \omega_H$$

$$\Delta\omega = \omega_H - \omega_G = 0,0075 - 0,0177 = -0,010 \text{ lbm}_{H_2O}/\text{lbm}_{ar}$$

- Negativo pois água foi removida (condensação)
- (ii) O resfriamento corresponde à energia removida durante o processo F->G->H
 - Se desprezarmos a energia que fica no condensado (pois é muito pequena perto da do ar úmido)
 - Basta encontrar os h's na carta psicrométrica

$$\frac{\dot{Q}_r}{\dot{m}_a} = h_H - h_F = 20 - 39,5 = -18,5 \text{ BTU}/\text{lbm}_{ar}$$

- Negativo pois energia foi removida

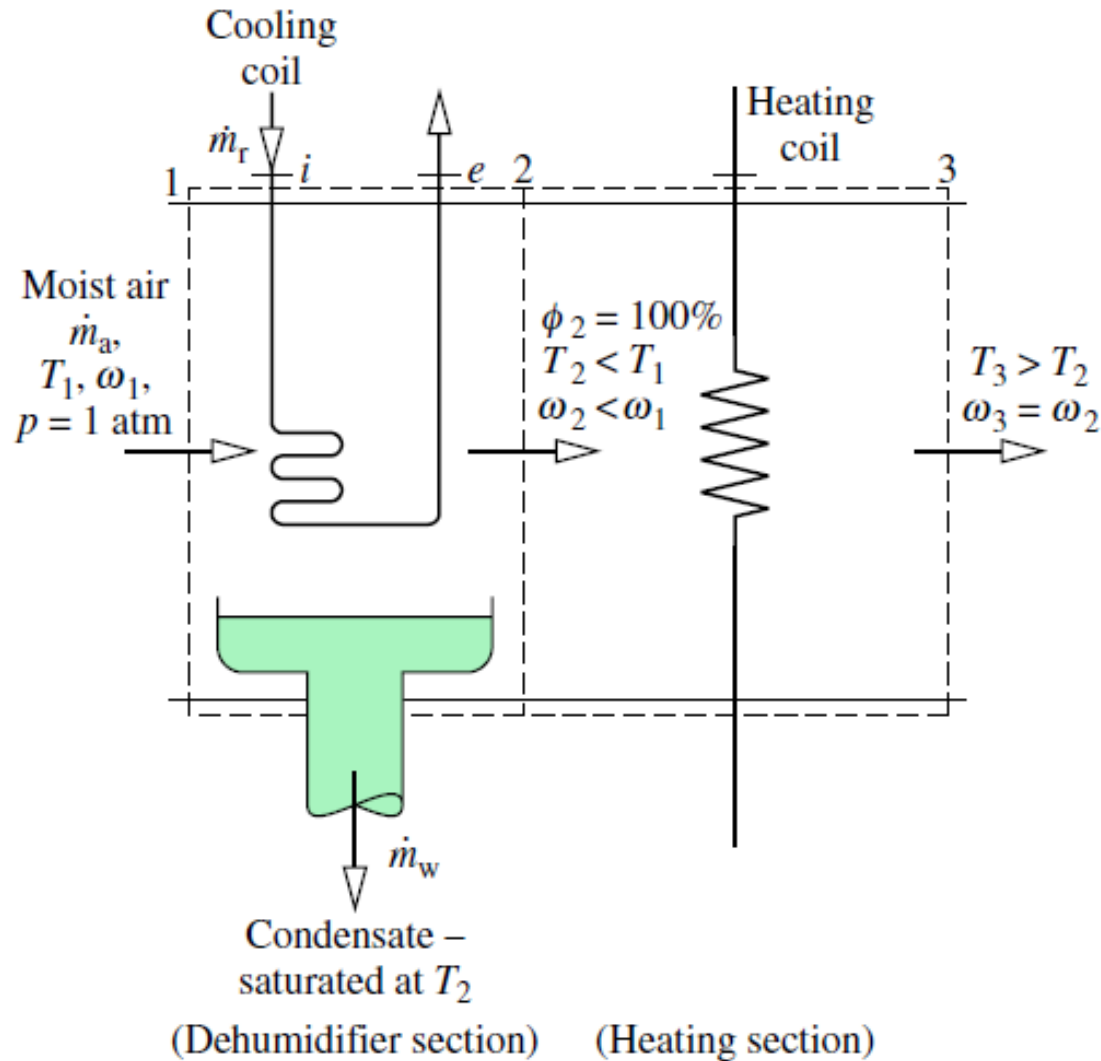
Solução

- (iii) O aquecimento corresponde à energia adicionada durante o processo H->I
 - Basta encontrar os h's na carta psicrométrica

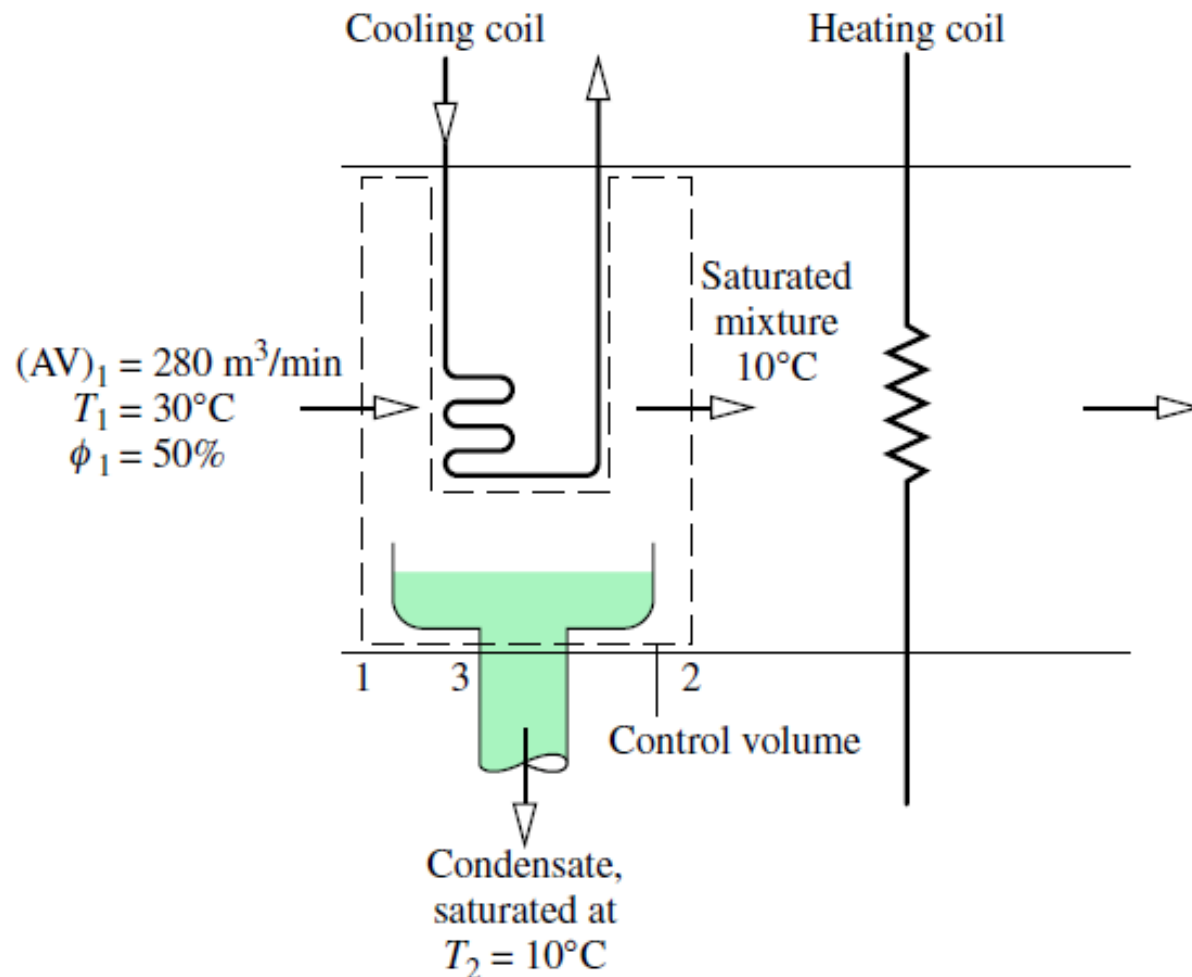
$$\frac{\dot{Q}_a}{\dot{m}_a} = h_I - h_H = 26,5 - 20 = 6,5 \text{ BTU/lbm}_{ar}$$

Desumidificador

- A questão anterior é o exemplo típico de um desumidificador



Moist air at 30°C and 50% relative humidity enters a dehumidifier operating at steady state with a volumetric flow rate of $280\text{ m}^3/\text{min}$. The moist air passes over a cooling coil and water vapor condenses. Condensate exits the dehumidifier saturated at 10°C . Saturated moist air exits in a separate stream at the same temperature. There is no significant loss of energy by heat transfer to the surroundings and pressure remains constant at 1.013 bar. Determine (a) the mass flow rate of the dry air, in kg/min, (b) the rate at which water is condensed, in kg per kg of dry air flowing through the control volume, and (c) the required refrigerating capacity, in tons.



(a)

$$\dot{m}_a = \frac{(AV)_1}{v_{a1}} = \frac{(AV)_1}{(\bar{R}/M_a)(T_1/p_{a1})}$$

$$p_{a1} = p_1 - p_{v1}$$

$$p_{v1} = \phi_1 p_{g1} = 0.02123 \text{ bar}$$

$$p_{a1} = 1.013 - 0.02123 = 0.99177 \text{ bar}$$

$$\dot{m}_a = 319.35 \text{ kg/min}$$

(b)

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2} + \dot{m}_w \quad \Rightarrow \quad \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} = \omega_1 - \omega_2$$

ω_1 e ω_2 : fórmulas ou carta psicrométrica

$$\omega_1 = 0.622 \left(\frac{P_{v1}}{P_1 - P_{v1}} \right) = 0.0133 \frac{\text{kg(vapor)}}{\text{kg(dry air)}}$$

$$\omega_2 = 0,622 \left(\frac{P_{v2}}{P_2 - P_{v2}} \right)$$



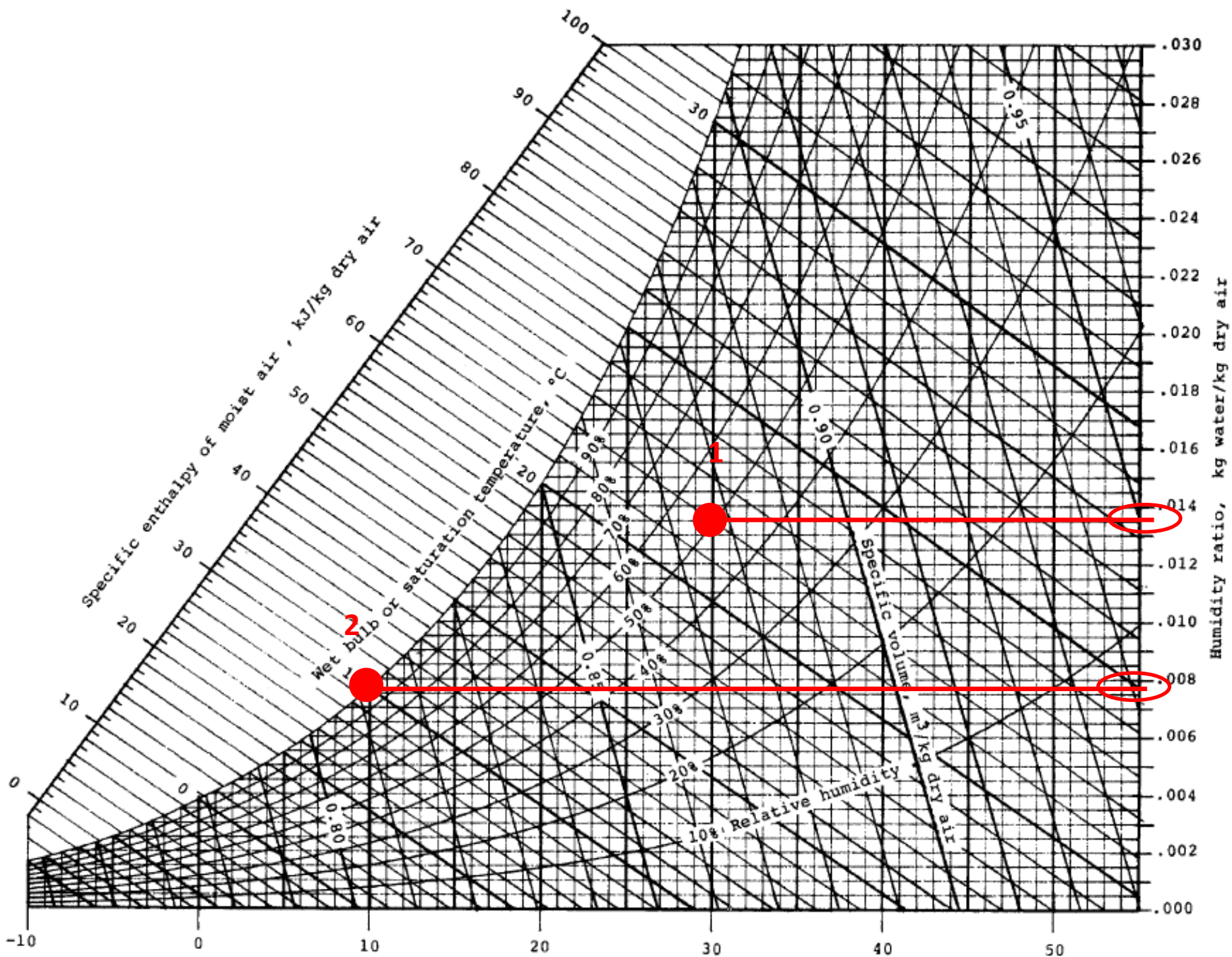
$$P_{v2} = P_g (T=T_2) , \text{ pois } \phi_2 = 100\%$$

$$\omega_2 = 0.0076 \text{ kg(vapor)/kg(dry air)}$$

logo

$$\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} = 0.0133 - 0.0076 = 0.0057 \frac{\text{kg(condensate)}}{\text{kg(dry air)}}$$

OBS: alternativamente, ω_1 e ω_2 podem ser obtidos da carta psicrométrica



(c) Da 1ª Lei:

$$0 = \dot{Q}_{cv} + (\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1}) - \dot{m}_w h_w - (\dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2})$$

onde

$$\dot{m}_{v1} = \omega_1 \dot{m}_a, \dot{m}_{v2} = \omega_2 \dot{m}_a, \dot{m}_w = (\omega_1 - \omega_2) \dot{m}_a$$

logo

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{m}_a [(h_{a2} - h_{a1}) - \omega_1 h_{g1} + \omega_2 h_{g2} + (\omega_1 - \omega_2) h_{f2}]$$

E $h_{v1} = h_g(T=T_1)$, $h_{v2} = h_g(T=T_2)$, pois vapor no ar = gás perfeito $\Rightarrow h=h(T)$.
Para o ar, $h=h(T)$ é tabelado (Tab. A22). Para o condensado, $h_w = h_{f2} = h_l(T=T_2)$, i.e., líquido saturado

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{cv} &= (319.35) [(283.1 - 303.2) - 0.0133(2556.3) \\ &\quad + 0.0076(2519.8) + 0.0057(42.01)] \Rightarrow 52.5 \text{ tons} \\ &= -11,084 \text{ kJ/min} \end{aligned}$$

Pois 1ton = 211kJ/min

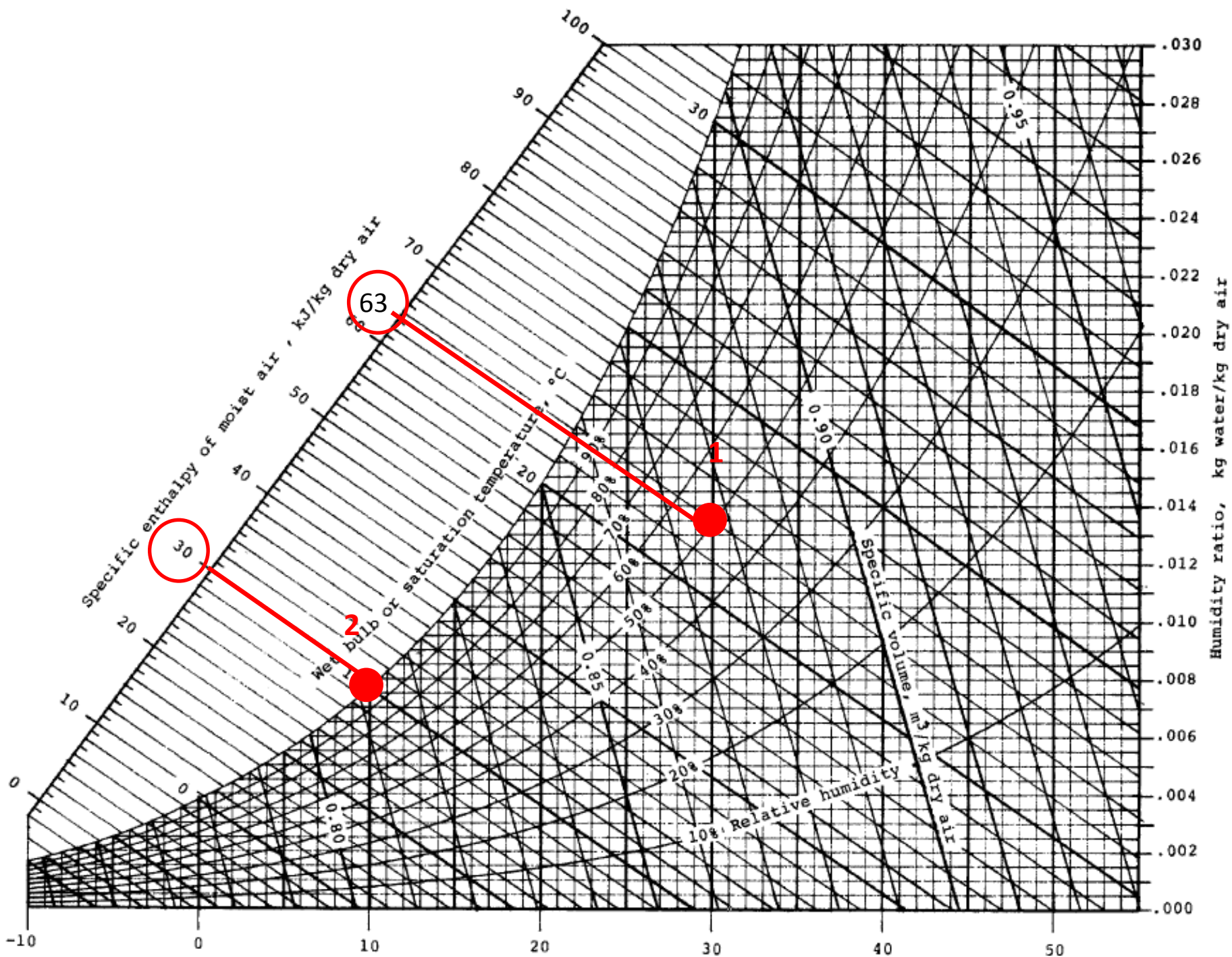
Alternativamente, poderíamos reescrever a 1ª Lei e obter os dados de entalpia do ar úmido por unidade de massa de ar seco diretamente da carta psicrométrica

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{m}_a \left[\underbrace{(h_a + \omega h_v)_2}_{h_2 \approx 63} - \underbrace{(h_a + \omega h_v)_1}_{h_1 \approx 30} + (\omega_1 - \omega_2) h_w \right]$$

$$\downarrow$$
$$h_2 \approx 63$$

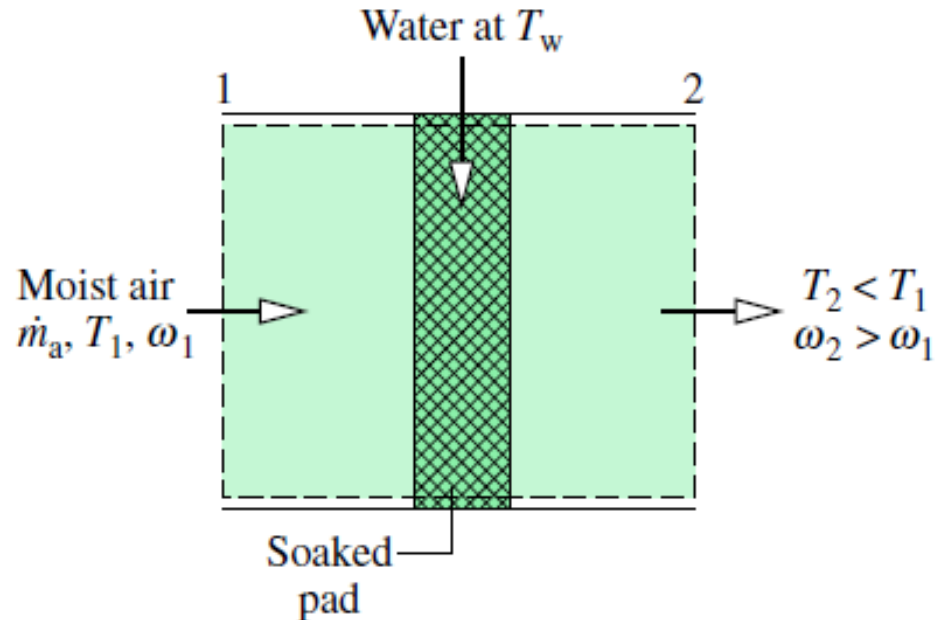
$$\downarrow$$
$$h_1 \approx 30$$

Para o condensado, $h_w = h_{f2} = h_l(T=T_2)$, i.e., líquido saturado



Resfriador Evaporativo

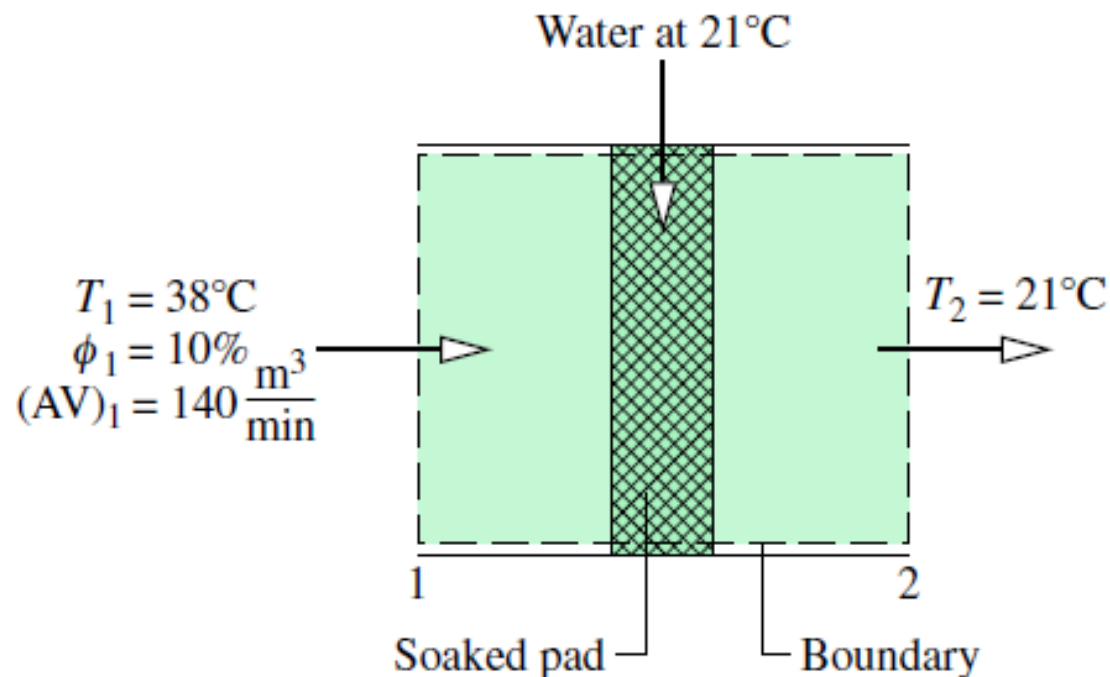
- Troca de calor com vizinhança (considerando apenas o evaporador em si) é desprezível
- Normalmente, entalpia trazida pela água líquida também é desprezível
 - Desta forma, processo é quase isentálpico ($T_{bu} \approx \text{cte}$)



$$(h_{a2} + \omega_2 h_{g2}) = \underbrace{(\omega_2 - \omega_1) h_f}_{\text{Em geral é desprezível}} + (h_{a1} + \omega_1 h_{g1})$$

Em geral é desprezível

Air at 38°C and 10% relative humidity enters an evaporative cooler with a volumetric flow rate of $140\text{ m}^3/\text{min}$. Moist air exits the cooler at 21°C . Water is added to the soaked pad of the cooler as a liquid at 21°C and evaporates fully into the moist air. There is no heat transfer with the surroundings and the pressure is constant throughout at 1 atm. Determine (a) the mass flow rate of the water to the soaked pad, in lb/h, and (b) the relative humidity of the moist air at the exit to the evaporative cooler.



(a)

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

$$\omega_1 = 0.622 \left(\frac{p_{v1}}{p_1 - p_{v1}} \right) = 0.00408 \text{ kg(vapor)/kg(dry air)}$$

$$p_{v1} = \phi_1 p_{g1} = 0.0066 \text{ bar}$$

$$\dot{m}_a = \frac{(AV)_1}{v_{a1}} = 157.8 \frac{\text{kg(dry air)}}{\text{min}}$$

Lei dos gases perfeitos nos dá v_a

E ω_2 ? Podemos utilizar a 1ª Lei

$$(h_{a2} + \omega_2 h_{g2}) = \underline{(\omega_2 - \omega_1) h_f} + (h_{a1} + \omega_1 h_{g1})$$

$$\omega_2 = \frac{h_{a1} - h_{a2} + \omega_1(h_{g1} - h_f)}{h_{g2} - h_f} = \frac{c_{pa}(T_1 - T_2) + \omega_1(h_{g1} - h_f)}{h_{g2} - h_f} = .011 \frac{\text{kg(vapor)}}{\text{kg(dry air)}}$$

Finalmente

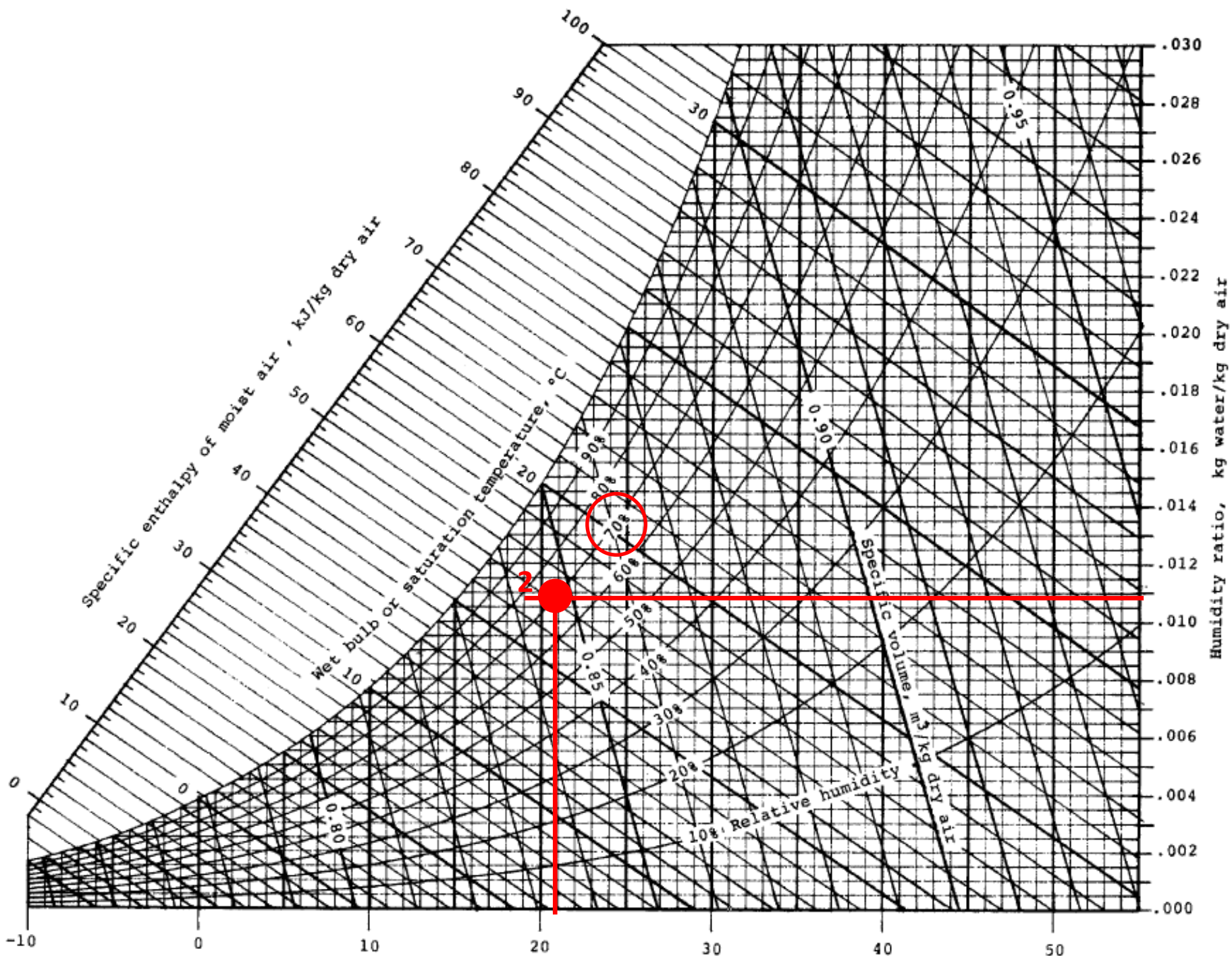
$$\dot{m}_w = 65.5 \frac{\text{kg(water)}}{\text{h}}$$

(b)

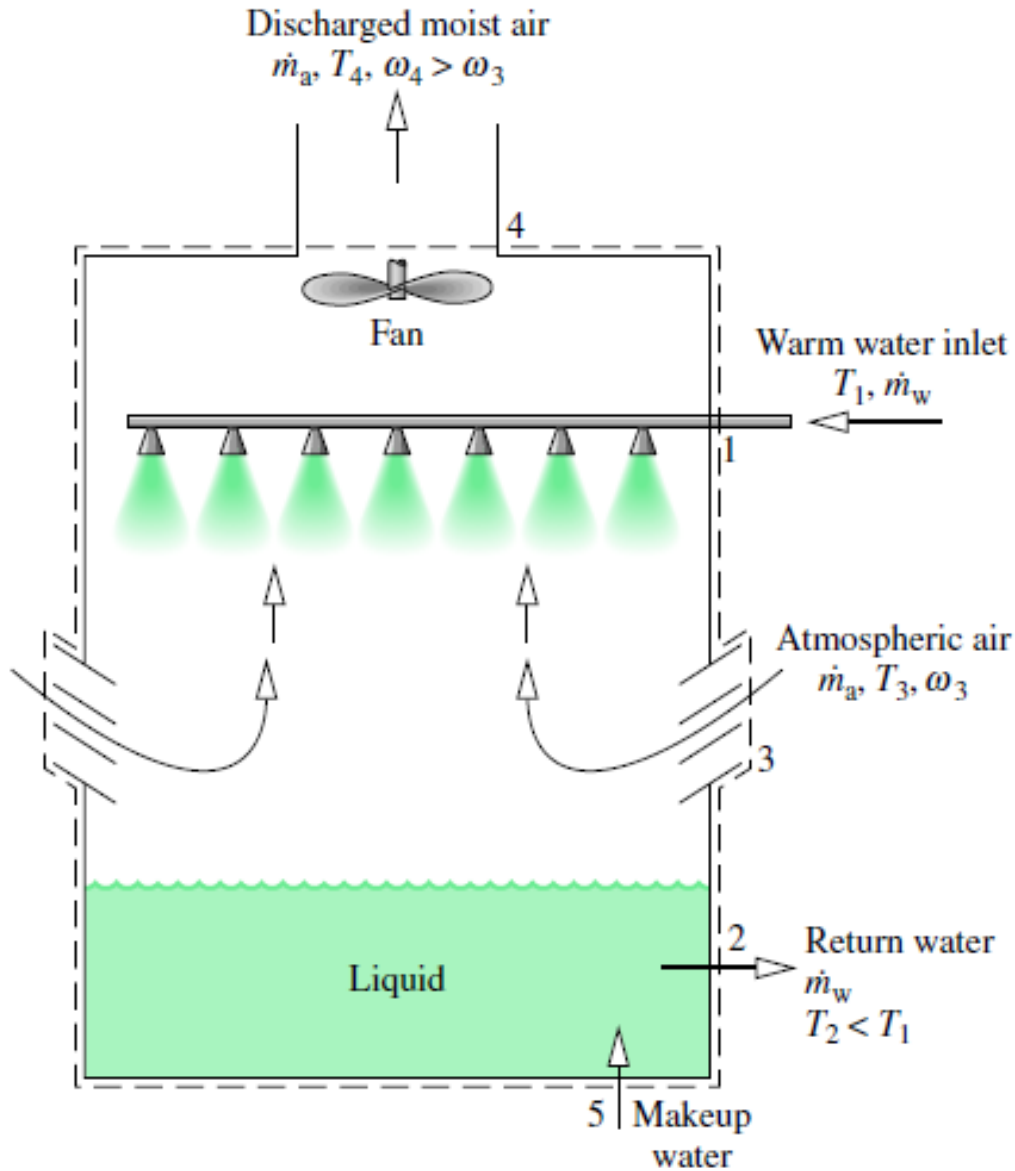
$$p_{v2} = \frac{\omega_2 p}{\omega_2 + 0.622} = 0.0176 \text{ bar}$$

$$\phi_2 = \frac{0.0176}{0.02487} = 0.708 (70.8\%)$$

Ou, alternativamente, ϕ_2 poderia ser obtido diretamente da carta psicrométrica



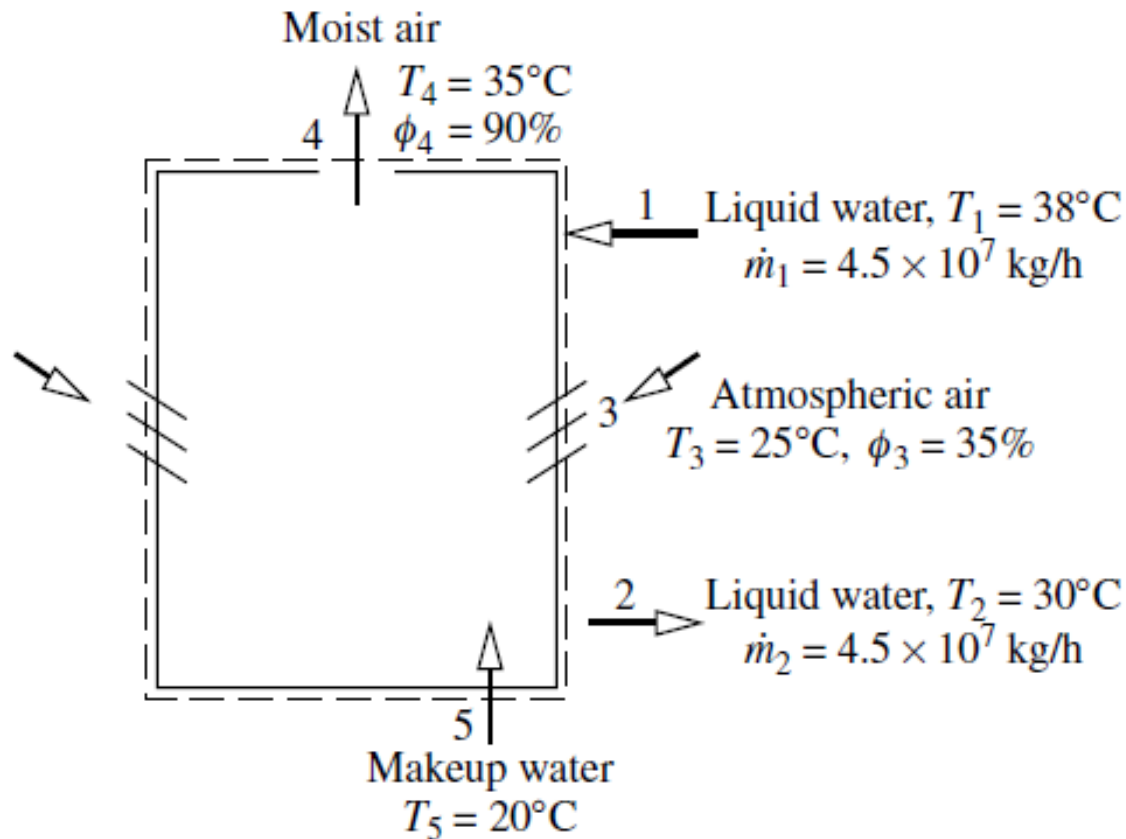
Torres de resfriamento



Em geral o calor trocado entre a torre (dispositivo em si) e a vizinhança é desprezado

O trabalho dos ventiladores e/ou exaustores também é desprezado (face às demais variações de energia envolvidas)

Water exiting the condenser of a power plant at 38°C enters a cooling tower with a mass flow rate of $4.5 \times 10^7 \text{ kg/h}$. A stream of cooled water is returned to the condenser from a cooling tower with a temperature of 30°C and the same flow rate. Makeup water is added in a separate stream at 20°C . Atmospheric air enters the cooling tower at 25°C and 35% relative humidity. Moist air exits the tower at 35°C and 90% relative humidity. Determine the mass flow rates of the dry air and the makeup water, in kg/h . The cooling tower operates at steady state. Heat transfer with the surroundings and the fan power can each be neglected, as can changes in kinetic and potential energy. The pressure remains constant throughout at 1 atm.



Solução: balanços de massa e de energia

Massa:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{a3} &= \dot{m}_{a4} && \text{(dry air)} \\ \dot{m}_1 + \dot{m}_5 + \dot{m}_{v3} &= \dot{m}_2 + \dot{m}_{v4} && \text{(water)}\end{aligned}$$

Mas, do próprio enunciado: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$

O que nos dá para a água: $\dot{m}_5 = \dot{m}_{v4} - \dot{m}_{v3} \Rightarrow \dot{m}_5 = \dot{m}_a(\omega_4 - \omega_3)$

Energia:

$$0 = \dot{m}_1 h_{w1} + (\dot{m}_a h_{a3} + \dot{m}_{v3} h_{v3}) + \dot{m}_5 h_{w5} - \dot{m}_2 h_{w2} - (\dot{m}_a h_{a4} + \dot{m}_{v4} h_{v4})$$

Onde $h_v = h_v(T) = h_g(T)$ pois vapor considerado gás perf. Para o líquido, $h_w = h_f(T)$, pois está líq. Saturado:

$$0 = \dot{m}_1 h_{f1} + (\dot{m}_a h_{a3} + \dot{m}_{v3} h_{g3}) + \dot{m}_5 h_{f5} - \dot{m}_2 h_{f2} - (\dot{m}_a h_{a4} + \dot{m}_{v4} h_{g4})$$

Rearranjando os termos:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_1(h_{f1} - h_{f2})}{h_{a4} - h_{a3} + \omega_4 h_{g4} - \omega_3 h_{g3} - (\omega_4 - \omega_3)h_{f5}}$$

ω_3 e ω_4 podem ser calculados, ou obtidos diretamente da carta psicrométrica

$$\dot{m}_a = 2.03 \times 10^7 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_a(\omega_4 - \omega_3) = 5.24 \times 10^5 \text{ kg/h}$$

Alternativamente, poderíamos ter rearranjado os termos para obter as entalpias (sublinhadas abaixo) diretamente da carta psicrométrica:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_1(h_{f1} - h_{f2})}{\underline{(h_{a4} + \omega_4 h_{g4})} - \underline{(h_{a3} + \omega_3 h_{g3})} - (\omega_4 - \omega_3)h_{f5}}$$