



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Fundamentos de Psicrometria

ANTONIO MOREIRA DOS SANTOS
PAULO SELEGHIM JUNIOR

SÃO CARLOS
2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FUNDAMENTOS DE PSICROMETRIA

Antonio Moreira dos Santos

Paulo Seleglim Junior

São Carlos - 1991

Publicação - 001/91

APOSTILA
S233f

APOSTILA

5232 f

syntex st 1624446

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – Nos termos da Lei que resguarda os Direitos Autorais, é proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho, de qualquer forma ou por qualquer meio – eletrônico ou mecânico, inclusive através de processos xerográficos, de fotocópia e de gravação – sem permissão, por escrito, do(s) autor(es).

PSICROMETRIA

1 - Introdução

Psicrometria é o nome dado ao estudo das propriedades e transformações termodinâmicas da mistura formada pelo ar e por vapor d'água. Diversos fenômenos meteorológicos tais como as chuvas e a formação de nevoeiros são fundamentalmente fenômenos psicrométricos. A engenharia de refrigeração e de condicionamento de ar, fundamenta-se também na psicrometria pois, envolve trocas de calor entre superfícies molhadas e o ar atmosférico que, como se sabe, contém vapor d'água.

2 - Hipóteses e algumas equações

A grande maioria dos fenômenos psicrométricos de interesse para os engenheiros, meteorologistas e etc., acontece com ar atmosférico. Desta forma as temperaturas usuais vão de poucos graus abaixo de 0°C até 40 ou 50°C. A pressão total é comumente de uma atmosfera padrão (101,3 KPa). Esses fatos justificam supor que tanto o ar como o vapor d'água comportam-se como gases perfeitos, ou seja: obedecem a lei dos gases perfeitos, seus calores específicos são constantes e as entalpias dependem unicamente da temperatura.

Essas hipóteses parecem ser razoáveis para o ar mas para a água justificam-se apenas devido a sua pressão parcial. Normalmente o ar úmido apresenta pressões parciais de vapor da ordem de centésimos da pressão atmosférica e, nesse nível de pressão, a lei dos gases perfeitos apresenta bons resultados mesmo para estados de vapor saturado, como é sugerido pela figura 1.



Consideremos por exemplo que a fração de vapor de uma amostra de ar úmido a temperatura de 25°C , tenha uma pressão (parcial) de $3,17\text{ KPa}$, portanto, no estado de saturação. Calculando o volume específico através da lei dos gases perfeitos obtemos $v_v = 43,38\text{ m}^3/\text{kg}$

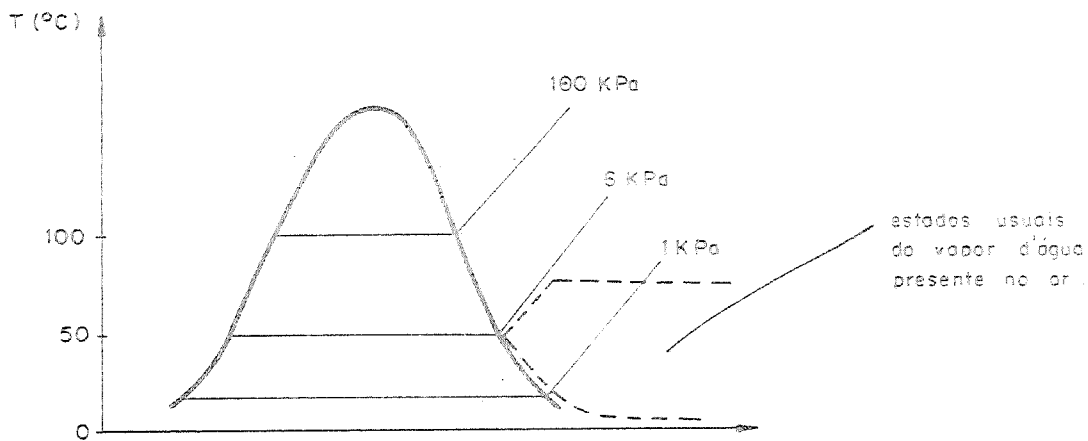


Figura 1

Um diagrama de equilíbrio forneceria um volume específico de:

$$v_v = 43,38\text{ m}^3/\text{kg}$$

Os índices das expressões acima referem-se a seguinte nomenclatura:

"A": relativo ao ar	$\left\{ \begin{array}{l} P_A - \text{pressão parcial do ar} \\ v_A - \text{volume específico do ar} \end{array} \right.$
"V": relativo ao vapor	$\left\{ \begin{array}{l} P_V - \text{pressão parcial do vapor} \\ v_V - \text{volume específico do vapor} \end{array} \right.$
"M": relativo a mistura	$\left\{ \begin{array}{l} P_M - \text{pressão parcial da mistura} \\ v_M - \text{volume específico da mistura} \end{array} \right.$

Imaginemos agora uma amostra de ar atmosférico confinada em um cilindro de volume V , como mostra a Figura 2. A massa de ar e a massa de vapor são respectivamente indicadas por m_A e m_V . A lei dos gases perfeitos diz que

$$P_A v_A = P_A \frac{V}{m_A} = R_A T \quad \text{para o ar}$$

$$P_V v_V = P_V \frac{V}{m_V} = R_V T \quad \text{para o vapor}$$

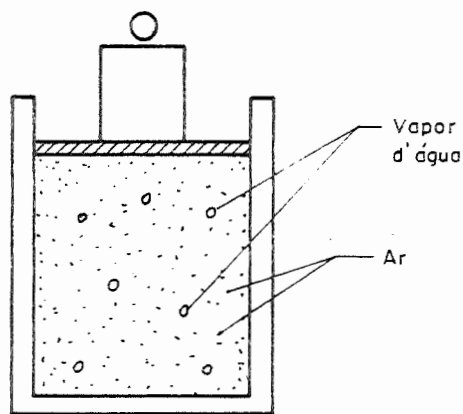


Figura 2

Dividindo uma expressão pela outra resulta

$$\frac{P_A}{P_V} \cdot \frac{m_A}{m_V} = \frac{R_A}{R_V}$$

O membro da direita, R_A/R_V , é uma constante igual a 0,622 ($R_A = 0,287$ kJ/kgK e $R_V = 0,4615$ kJ/kgK). Definindo por unidade específica o seguinte quociente e, indicando-a por w

$$w = \frac{m_V}{m_A}$$

resulta :

$$P_A = \frac{0,622}{w} \cdot P_V$$

Lembrando que, segundo a lei de Dalton, a pressão total atmosférica (P) dada pela soma das pressões parciais

$$P = P_A + P_V$$

obtemos finalmente que

$$P = P_V \left[1 + \frac{0,622}{w} \right]$$

3 - Condensação

Apesar do vapor d'água presente no ar atmosférico comportar-se como um gás perfeito, pode ocorrer condensação se a pressão parcial ou a temperatura caírem abaixo dos valores de saturação. Consideremos então, duas transformações que levariam o vapor a se condensar.

- PRESSÃO CONSTANTE

A Figura 3 sugere a forma como poderíamos condensar o vapor mantendo constante a pressão total e, conseqüentemente as pressões parciais (porque?).

O estado final 2, sobre a linha de saturação, é comumente designado por ponto de orvalho e, a temperatura correspondente a esse estado, por temperatura de orvalho (T_{DP} de "dew point").

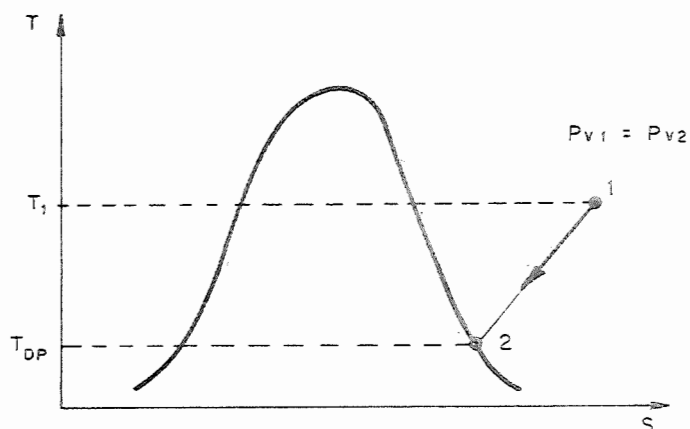
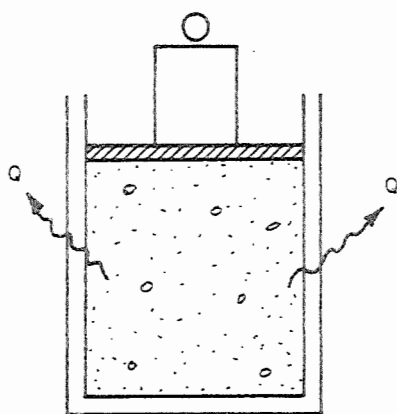


Figura 3

- TEMPERATURA CONSTANTE

Na Figura 4 é indicado uma das maneiras possíveis de condensar o vapor a temperatura constante.

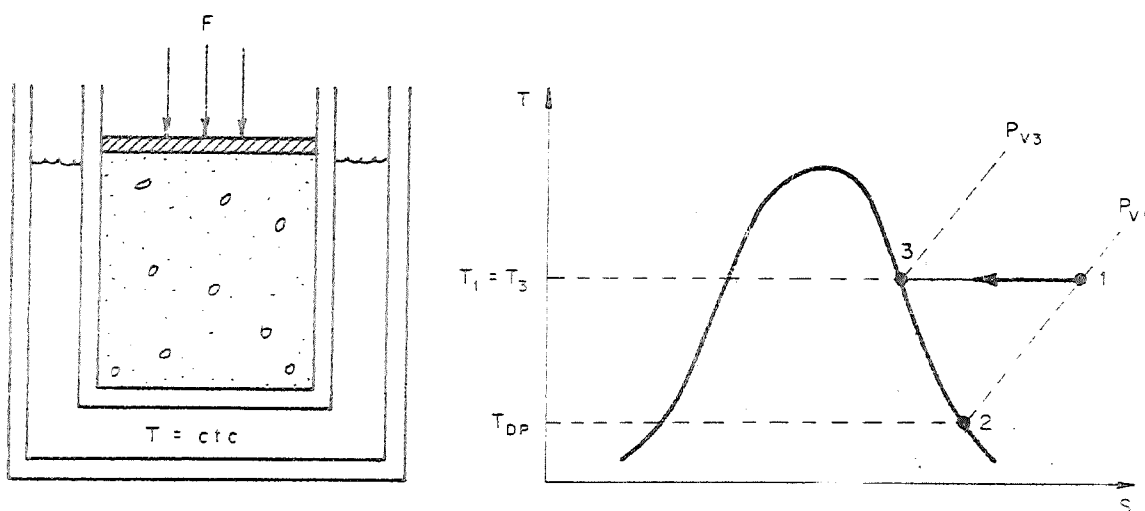


Figura 4

A pressão correspondente ao estado final 3 é chamada de pressão de saturação. A relação entre a pressão parcial de vapor (inicial) e a pressão de saturação é definida como umidade relativa (ϕ).

$$\phi = \frac{P_V}{P_{SAT}} \quad | \quad T = cte$$

Exemplo: determine a pressão parcial do vapor, a umidade específica e a temperatura de orvalho do ar atmosférico assumindo que sua temperatura seja de 30°C , a umidade relativa de 60% e pressão atmosférica de 100 kPa.

Determinação de P_v :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Tabela saturação} \\ \text{Água (T = 30°C)} \end{array} \right\} P_{SAT} = 4,246 \text{ kPa}$$

pela definição de umidade relativa

$$\phi = \frac{P_v}{P_{SAT}} \quad \Big| \quad 30^\circ$$

$$P_v = \phi \cdot P_{SAT} = 0,6 \cdot 4,246$$

resulta então

$$P_v = 2,548 \text{ kPa}$$

Determinação w :

$$\begin{aligned} P &= P_v (1 + 0,622/w) \\ 100 &= 2,548 (1 + 0,622/w) \end{aligned}$$

do que se obtém

$$w = 0,01626$$

Determinação T_{DP} :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Tabela saturação} \\ \text{água (P}_v = 2,5 \text{ kPa)} \end{array} \right\} T_{DP} \cong 21,1^\circ\text{C}$$

4 - Entalpia, entropia e energia interna do ar úmido

A entalpia (extensiva) da mistura formada pelo ar e pelo vapor d'água é dada pela soma das entalpias das partes

$$H_M = H_A + H_V$$

ou em termos das entalpias específicas

$$H_M = m_A h_A + m_V h_V$$

É usual em psicrometria, definir as propriedades intensivas da mistura em função da massa de ar e não da massa total ($m_A + m_V$). Esse procedimento se justifica pois em muitos fenômenos psicrométricos a massa total de ar úmido varia devido a condensação do vapor, o que não acontece com a massa de ar que permanece constante. Assim é conveniente definir como entalpia específica da mistura.

$$h_M = \frac{H_M}{m_A}$$

substituindo na expressão anterior

$$h_M = h_A + \left[\frac{m_V}{m_A} \right] h_V$$

e como $m_V/m_A = w$ resulta

$$h_M = h_A + w \cdot h_V$$

Tanto o ar como o vapor supostamente comportam-se como gases perfeitos e, portanto, é possível calcular suas entalpias em função do calor específico a pressão constante e da temperatura:

$$h_A = c_{P/A} \cdot T$$

$$h_V = c_{P/V} \cdot T$$

onde

$$C_{P/A} = 1,00 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 0,240 \frac{\text{kcal}}{\text{kg K}}$$

$$C_{P/V} = 1,85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 0,445 \frac{\text{kcal}}{\text{kg K}}$$

A expressão que define a entalpia da mistura fica assim

$$h_M = \left[C_{P/A} + w C_{P/V} \right] T$$

É possível chegar, por procedimentos análogos, a resultados semelhantes quando é considerada a entropia da mistura ou sua energia interna. Desta forma

$$U_M = U_A + U_V$$

$$U_M = m_A u_A + m_V u_V$$

A energia específica é definida também em função da massa de ar

$$u_M = \frac{U_M}{m_A}$$

$$u_H = u_A + \left(\frac{m_V}{m_A} \right) u_V$$

$$u_H = u_A + w \cdot u_V$$

Exemplo: 1kg de ar umido é confinado por um recipiente indeformável d pressão de 101,3 kPa e temperatura de 20°C. A umidade relativa é de 60%. Calor é então adicionado até que a temperatura se eleve para 50°C (Fig. 5). Calcule a quantidade de calor necessária e a umidade relativa final.

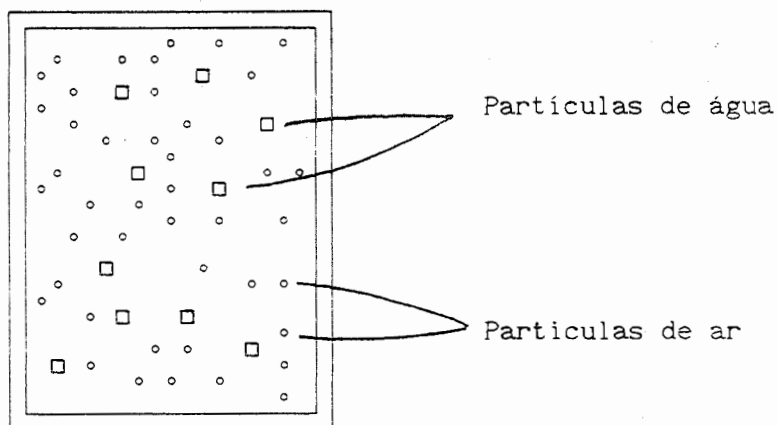


Figura 5

Solução - determinação de ϕ_2 :

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{P_2}{101,3} = \frac{50 + 273}{20 + 273}$$

$$P_2 = 111,7 \text{ kPa}$$

$$\phi_1 = \frac{P_{v1}}{P_{SAT}} \Big|_{20^\circ}$$

$$0,6 = \frac{P_{v1}}{2,339 \text{ kPa}}$$

$$P_{v1} = 1,403 \text{ kPa}$$

$$P_1 = P_{v1} (1 + 0,622/w_1)$$

$$101,3 = 1,403 (1 + 0,622/w_1)$$

$$w_1 = 8,736 \cdot 10^{-3} = w_2$$

$$P_2 = P_{v2} (1 + 0,622/w_2)$$

$$111,7 = P_{v2} (1 + 0,622/8,736 \cdot 10^{-3})$$

$$P_{v2} = 1,546 \text{ kPa}$$

$$\phi_2 = \frac{P_{v2}}{P_{SAT}} \Big|_{50^\circ\text{C}} = \frac{1,546}{12,349}$$

a umidade relativa resulta assim

$$\phi_2 = 0,125 = 12,5\%$$

Determinação de q_{12} :

$$q_{12} - w_{12} = u_{M2} - u_{M1}$$

$$w_{12} = 0$$

$$u_M = h_M - P v = m_A h_M - P m_A v_A$$

$$u_M = m_A (h_M - P v_A)$$

$$q_{12} = m_A \left[h_{M2} - h_{M1} - v_A (P_2 - P_1) \right]$$

$$m_A = \frac{1 \text{ kg}}{1 + w} = \frac{1}{1 + 8,736 \cdot 10^{-3}}$$

$$m_A = 0,991 \text{ kg}$$

$$h_{M1} = (C_{P/A} + C_{P/V}) T_1 =$$

$$= (1,0 + 8,736 \cdot 10^{-3} \cdot 1,85) (20 + 273)$$

$$h_{M1} = 295,2 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{M2} = (C_{P/A} + w_2 C_{P/V}) T_2 =$$

$$= (1,0 + 8,736 \cdot 10^{-3} \cdot 1,85) (50 + 273)$$

$$h_{M2} = 325,4 \text{ kJ/kg}$$

$$v_{A1} = \frac{R T_{A1}}{P_{A1}} = \frac{0,287 (20 + 273)}{101,3 - 1,403}$$

$$v_{A1} = 0,842 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_{A1} = v_{A2} \text{ (porque?)}$$

$$q_{12} = 0,991 \left[325,4 - 295,2 - 0,842 (111,7 - 101,3) \right]$$

$$q_{12} = + 21,5\text{kJ}$$

5 - Temperatura de saturação adiabática

Há uma dificuldade intrínseca associada ao uso das umidades específica e relativa para especificar a composição do ar úmido: elas não podem ser medidas diretamente. Um processo indireto de medida, chamado de saturação adiabática (Figura 6), pode ser empregado.

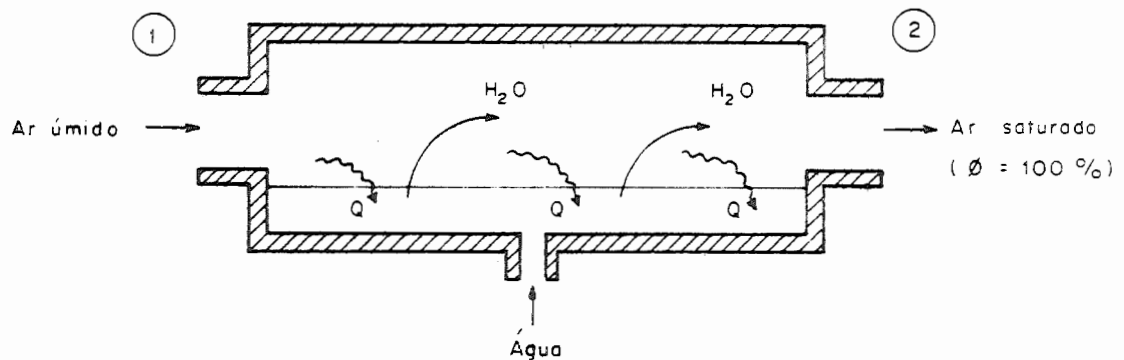


Figura 6

- O ar úmido ao entrar no tubo de saturação tende a absorver água do reservatório. Esta ao mudar da fase líquida para a fase vapor absorve calor do fluxo de ar. Isto faz com que a temperatura do ar diminua.
- Sendo o tubo de saturação suficientemente longo, é razoável supor que o ar na saída esteja saturado, ou seja, contendo a máxima quantidade possível de vapor d'água.

Desta forma podemos dizer que, em relação as grandezas nas seções 1 e 2

$$\phi_1 = \phi_2 = 100\%$$

$$T_1 = T_2$$

$$w_1 = w_2$$

Balanço da massa :

$$\text{ar: } \dot{m}_{A1} + \dot{m}_{A2} = \dot{m}_A$$

$$\text{vapor: } \dot{m}_{V1} + \dot{m}_L = \dot{m}_{V2}$$

Lembrando que $\dot{m}_V = w \dot{m}_A$

$$w_1 \dot{m}_{A1} + \dot{m}_L = w_2 \dot{m}_{A2}$$

$$\dot{m}_L = (w_2 - w_1) \dot{m}_A$$

- Balanço de Energia

$$\dot{m}_L h_L + \dot{m}_A h_{M1} = \dot{m}_A h_{M2}$$

substituindo o resultado anterior resulta

$$(w_2 - w_1) \dot{m}_A h_L + \dot{m}_A h_{M1} = \dot{m}_A h_{M2}$$

$$(w_2 - w_1) h_L + h_{M1} = h_{M2}$$

expressando as entalpias do ar úmido em função das temperaturas e isolando w_1 obtemos

$$w_2 = \frac{C_{P/A} (T_2 - T_1) + w_1 (C_{P/V} T_2 - h_L)}{C_{P/V} T_1 - h_L}$$

Observações:

- i - w_2 corresponde a umidade específica de uma mistura saturada a temperatura de saturação adiabática T_2 .
- ii - h_L é a entalpia do líquido a temperatura T_2 e a pressão atmosférica portanto, o estado corresponde ao de líquido comprimido. Porém, a pressão, neste caso, afeta muito pouco a entalpia de forma que podemos tomar o valor correspondente ao estado de líquido saturado a temperatura T_2 .
- iii - A entalpia, assim como muitas outras, é uma propriedade termodinâmica potencial e deve ser expressa segundo um estado referencial arbitrário. Quando escrevemos $h = c_p \cdot T$ estamos assumindo que $h = 0$ quando $T = 0$, referencial este que não corresponde ao das tabelas, de onde eventualmente vamos ler o valor de h_L . Uma maneira possível de se compatibilizar os valores de h_{M1} , h_{M2} e h_L é ler h_{LV} (independente do referencial) e subtrair de $h_V = C_{P/V} \cdot T$ (entalpia do vapor saturado), ou seja

$$h_L = c_{P/V} \cdot T - h_{LV}$$

Exemplo: $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = 10^\circ\text{C}$ e $p = 101,3 \text{ kPa}$, calcule ϕ :

$$P_{V2} = P_{SAT} \Big|_{10^\circ\text{C}} = 1,228 \text{ kPa}$$

$$P = P_{V2} (1 + 0,622/w_2)$$

$$101,3 = 1,228 (1 + 0,622/w_2)$$

$$w_2 = 7,63 \cdot 10^{-3}$$

$$h_L = C_{P/V} T_2 - h_{LV} = 1,85 (10 + 273) - 2477,7$$

$$h_L = -1953,9 \text{ kJ/kg}$$

$$w_1 = \frac{c_{P/A} (T_2 - T_1) + w_2 (c_{P/V} T_2 - h_L)}{c_{P/V} T_1 - h_L}$$

$$w_1 = \frac{1,0[(10+273)-(20+273)] + 7,63 \cdot 10^{-3} [1,85 \cdot (10+273) + 1953,9]}{1,85 (20 + 273) + 1953,9}$$

$$w_1 = 0,00357$$

$$P = P_{V1} (1 + 0,622/w_1)$$

$$101,3 = P_{V1} (1 + 0,622/0,00357)$$

$$P_{V1} = 0,578 \text{ kPa}$$

$$P_{SAT} \Big|_{20^\circ\text{C}} = 2,339 \text{ kPa}$$

$$\phi_1 = \frac{P_{v1}}{P_{SAT}} \Bigg|_{20^\circ\text{C}} = \frac{0,578}{2,339} = 0,247$$

$$\phi_1 = 24,7\%$$

6 - Temperatura de bulbo seco e bulbo úmido

O processo de saturação adiabática não é uma maneira prática de se medir a temperatura de saturação adiabática. Para contornar essa dificuldade é usual medir a temperatura de bulbo úmido (TBU). O bulbo de um termômetro é mantido constantemente umedecido através de uma mecha de algodão ou de tecido (Figura 7). Um fluxo de ar faz a água se evaporar absorvendo calor. A temperatura assim registrada pelo termômetro é a TBU e, para os fins de engenharia, pode ser considerada igual a temperatura de saturação adiabática.

Para diferenciar a TBU da temperatura medida normalmente com o termômetro, denota-se esta última por temperatura de bulbo seco (TBS).

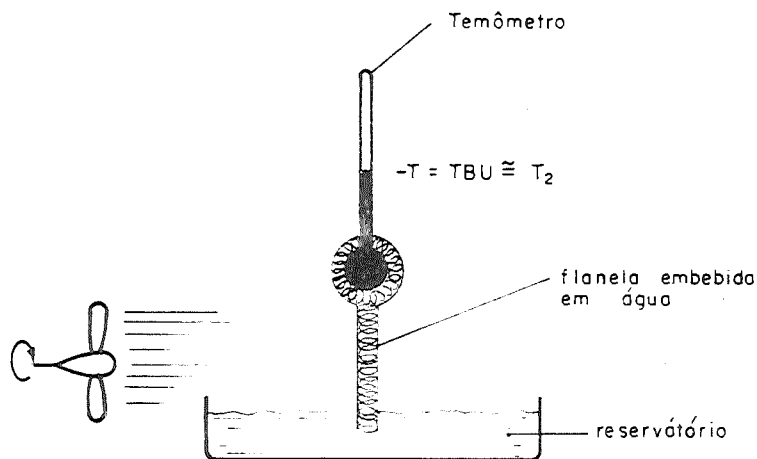


Figura 7

7 - Carta Psicrométrica

Tendo em vista que

- i - podemos concluir das expressões deduzidas anteriormente que dados qualquer par de propriedades do ar úmido, além da pressão total, fica completamente especificado o estado termodinâmico da mistura
- ii - A grande maioria dos fenômenos psicrométricos de interesse para nós ocorre a pressão constante de uma atmosfera (101,3 kPa)

um diagrama bidimensional pode representar as propriedades da mistura, fixada a pressão total. Esse diagrama é conhecido como carta psicrométrica e é indicada esquematicamente na Figura 8.

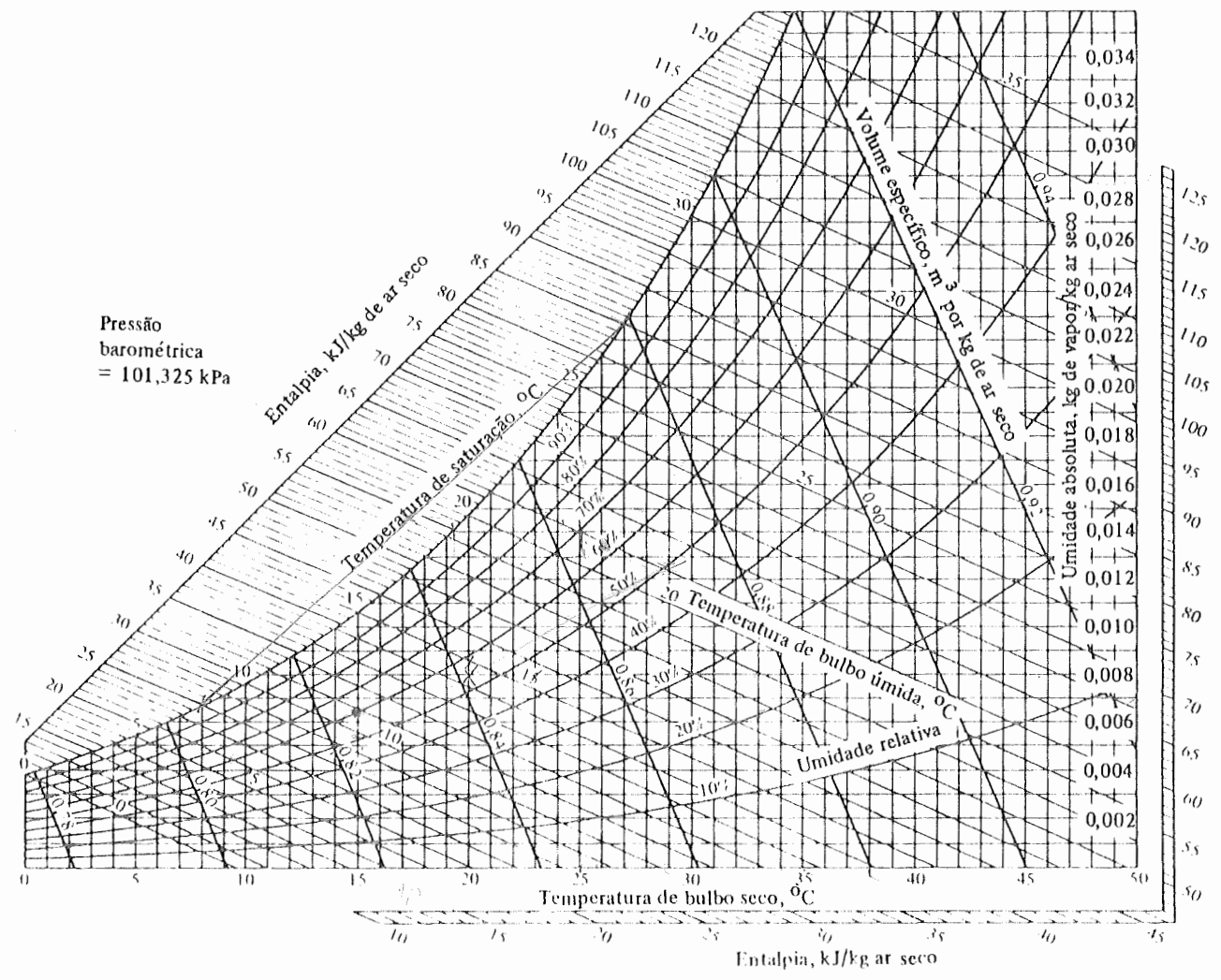


Figura 8

8 - Aplicações em condicionamento de ar

De uma maneira geral os processos de condicionamento de ar são usados para controlar principalmente sua temperatura e umidade, seja para proporcionar conforto, seja para garantir condições favoráveis de operação de equipamentos sensíveis como teares mecânicos e computadores. A psicrometria é portanto, uma ferramenta básica para o profissional que vai atuar nesta área.

Os processos que ocorrem em um sistema de condicionamento de ar, complexo ou não, podem sempre ser fracionados em uma sequência de operações simples. Desta forma estudaremos em detalhes algumas dessas operações.

- *Aquecimento e resfriamento simples*

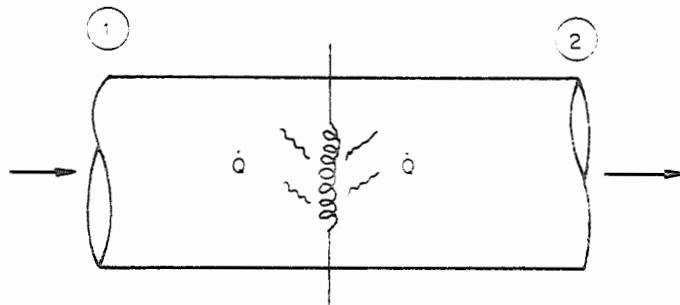


Figura 9

Balanço de Massa :

$$\text{ar:} \quad \dot{m}_{A1} = \dot{m}_{A2} = \dot{m}_A$$

$$\text{água:} \quad \dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2} = \dot{m}_v$$

Substituindo uma expressão na outra

$$\dot{m}_{A1} w_1 = \dot{m}_{A2} w_2$$

$$w_1 = w_2$$

Esta operação pode ser visualizada na carta psicrométrica por um segmento horizontal, como indica a Figura 10. O sentido da transformação é para a direita se o ar estiver sendo aquecido e, para a esquerda se estiver sendo resfriado.

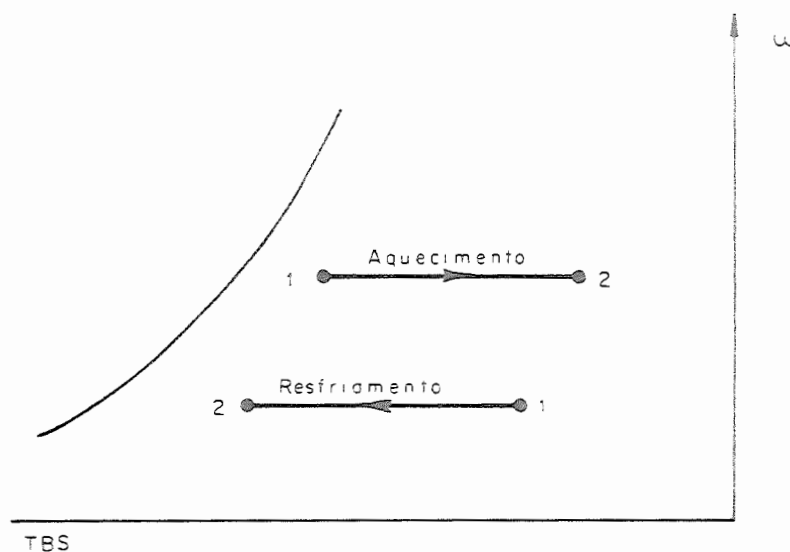


Figura 10

Balanço de energia :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_A h_{M2} - \dot{m}_A h_{M1}$$

como o trabalho é nulo, $\dot{W} = 0$, temos que

$$\dot{Q} = \dot{m}_A (h_{M2} - h_{M1})$$

ou ainda

$$q_{12} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_A} = h_{M2} - h_{M1}$$

Exemplo (Figura 11): determine a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um fluxo de ar, cuja umidade é de $\phi = 80\%$, de 10°C para 30°C . Calcule também a umidade relativa após o aquecimento.

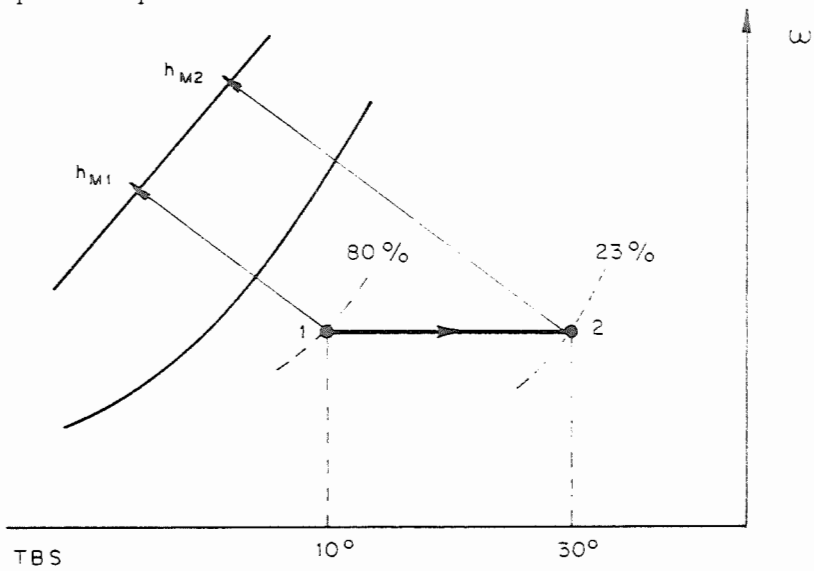


Figura 11

As entalpias são lidas diretamente da carta psicrométrica como indicado na Figura 11 e, seus valores são de

$$h_{M1} = 25 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{M2} = 45 \text{ kJ/kg}$$

Assim o cálculo do calor trocado pode ser feito

$$q_{12} = h_{M2} - h_{M1} = 45 - 25$$

$$q_{12} = 20 \text{ kJ/kg}$$

A umidade relativa é obtida localizando o ponto 2 pela interseção da linha horizontal da operação de aquecimento, com a linha vertical de temperatura de bulbo seco igual a 30°C (Figura 11) obtemos

$$\phi_2 = 23\%$$

observação: cálculo feito através das expressões

$$h_M = (C_{P/A} + w C_{P/V}) T$$

$$h_{M1} = (0,1 + 0,006 \cdot 1,85) (10 + 273) = 286,1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{M2} = (0,1 + 0,006 \cdot 1,85) (30 + 273) = 306,4 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{12} = 306,4 - 286,1 = 20,3 \text{ kJ/kg}$$

- Resfriamento com desumidificação

Balço de massa :

$$\text{ar:} \quad \dot{m}_{A1} = \dot{m}_{A2} = \dot{m}_A$$

$$\text{água:} \quad \dot{m}_{v1} = \dot{m}_L + \dot{m}_{v2}$$

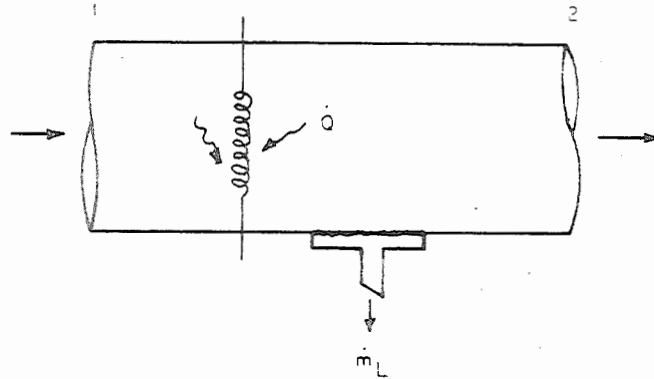


Figura 12

Trabalhando as expressões

$$w_1 \dot{m}_A = \dot{m}_L + w_2 \dot{m}_A$$

$$\dot{m}_L = \dot{m}_A (w_1 - w_2)$$

O resfriamento neste caso é tal que provoca a condensação de parte do vapor d'água. Isso ocorre porque é removida do fluxo de ar úmido, uma quantidade de calor maior do que seria necessário para levá-lo ao estado de saturação. A operação, visualizada na carta psicrométrica da figura 13, é composta de duas etapas: resfriamento simples até a linha de saturação e a condensação sobre a linha de saturação.

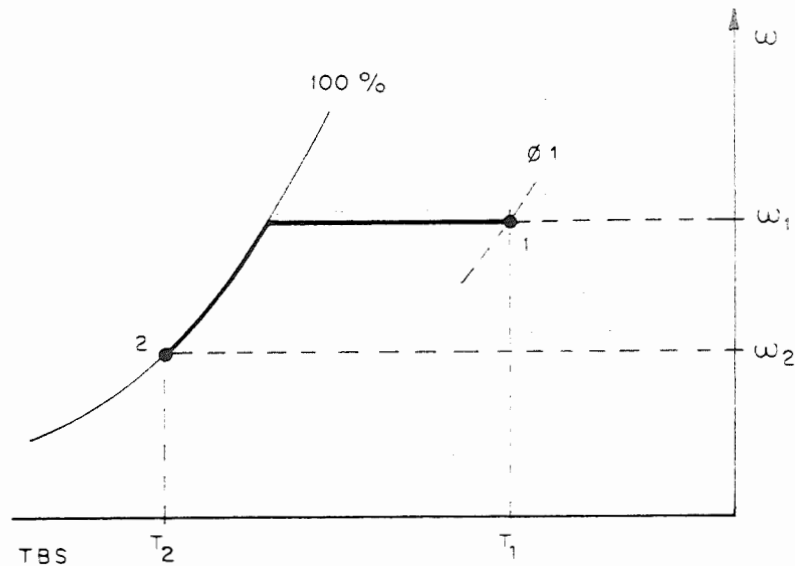


Figura 13

Balanço de energia :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_A h_{M2} + \dot{m}_L h_L - \dot{m}_A h_{M1}$$

substituindo as relações obtidas do balanço de massa e, como também neste caso $\dot{W} = 0$, obtemos

$$q_{12} = \dot{Q}/\dot{m}_A = h_{M2} - h_{M1} + (w_1 - w_2) h_L$$

Exemplo: Uma unidade de resfriamento (figura 14) capta um fluxo de 82,4 kg/min de ar atmosférico a 40°C e processa de forma que a temperatura e a umidade relativa na saída são respectivamente de 25°C e 50%. Calcule a potência frigorífica e a potência de aquecimento desta unidade.

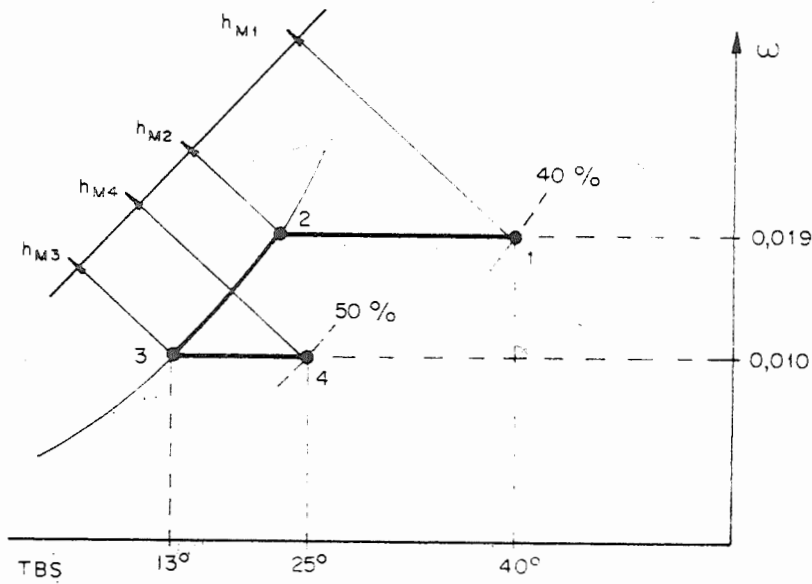


Figura 14

Os dados obtidos da carta são

$$h_{M1} = 91 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{M2} = 76 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{M3} = 39 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{M4} = 51 \text{ kJ/kg}$$

$$w_1 = 0,019$$

$$w_4 = 0,010$$

A vazão de condensado pode ser calculada pela expressão

$$\dot{m}_L = \dot{m}_A (w_1 - w_4) = 82,4 (0,019 - 0,010)$$

$$\dot{m}_L = 0,7416 \text{ kg/min}$$

A entalpia do condensado é obtida do diagrama de equilíbrio

$$\left. \begin{array}{l} \text{Tabela água} \\ \text{líquido sat.} \\ \text{a } 13^\circ\text{C} \end{array} \right\} h_L = 54,60 \text{ kJ/kg}$$

Assim o calor transferido entre as seções 1 e 3

$$\dot{Q}_{13} = \dot{m}_A \left[h_{M3} - h_{M1} + (w_1 - w_3) h_L \right]$$

$$\dot{Q}_{13} = \frac{82,4}{60} \left[39 - 91 + (0,010 - 0,019) \cdot 54,6 \right]$$

$$\dot{Q}_{13} = - 72,01 \text{ KW}$$

O calor transferido entre as seções 3 e 4 se calcula por

$$\dot{Q}_{34} = \dot{m}_A \left[h_{M4} - h_{M3} \right]$$

$$\dot{Q}_{34} = \frac{82,4}{60} (51 - 39)$$

$$Q_{34} = 16,48 \text{ KW}$$

- Aquecimento com umidificação

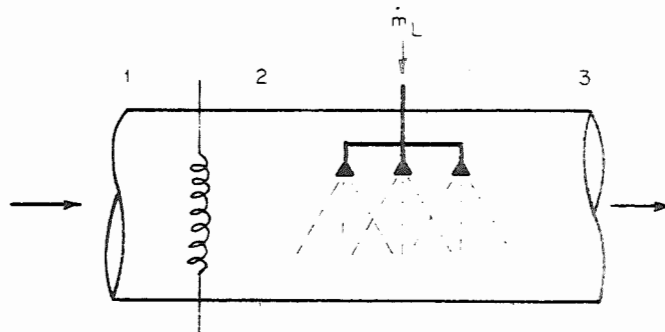


Figura 15

Balanço de massa :

$$\text{ar:} \quad \dot{m}_{A1} = \dot{m}_{A2} = \dot{m}_A$$

$$\text{água:} \quad \dot{m}_L = \dot{m}_A (w_1 - w_2)$$

Balanço de energia :

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_A [h_{M2} - h_{M1}]$$

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m}_A [h_{M3} - h_{M2}] + \dot{m}_L h_L$$

O processo é visualizado na carta psicrométrica, conforme indicado na figura 16. A inclinação do segmento correspondente d transformação 2-3 depende da quantidade e do estado da água aspergida.

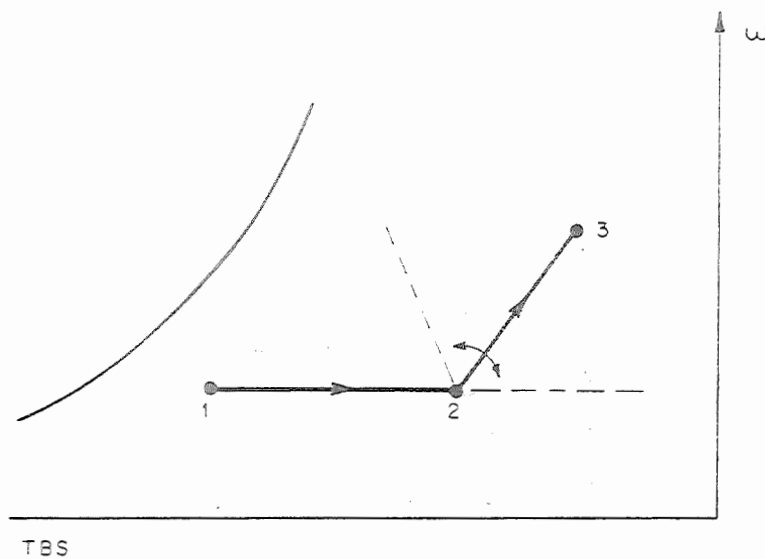


figura 16

Exemplo: calcule a potência de aquecimento, a quantidade e o estado da água aspergida para $\dot{w} = 1 \text{ kg/s}$ e os seguintes dados : $T_1 = 5^\circ\text{C}$, $T_2 = 24^\circ\text{C}$, $T_3 = 25^\circ\text{C}$, $\phi_1 = 90\%$, $P = 101,3 \text{ KPa}$ e $\phi_3 = 45\%$.

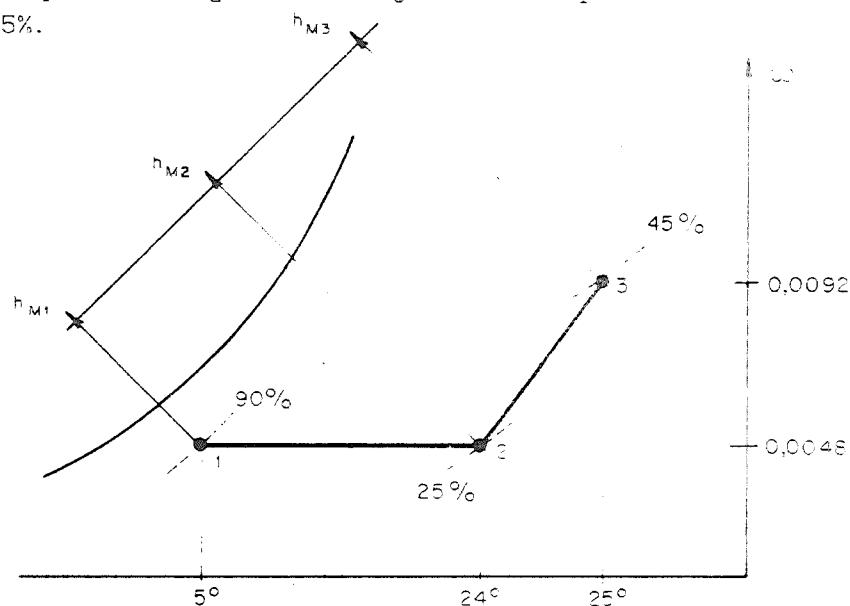


Figura 17

os dados obtidos da carta são

$$h_{M1} = 18 \text{ kJ/kg} \quad w_1 = 0,0048 = w_2$$

$$h_{M2} = 36 \text{ kJ/kg} \quad w_3 = 0,0092$$

$$h_{M3} = 48 \text{ kJ/kg} \quad \phi_2 = 25\%$$

A potência de aquecimento \dot{Q}_{12} pode ser calculada por

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_A [h_{M2} - h_{M1}] = 1 \cdot (36 - 18)$$

$$\dot{Q}_{12} = 18 \text{ Kw}$$

Determinação das condições de aspersão

$$\dot{m}_L = \dot{m}_A (w_3 - w_1) = 1 (0,0092 - 0,0048)$$

$$\dot{m}_L = 0,0044 \text{ kg/s}$$

$$h_L = \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_L} [h_{M2} - h_{M1}] = \frac{1}{0,0044} \cdot (48 - 36)$$

$$h_L = 2727,27 \text{ KJ/Kg}$$

O estado da água aspergida é determinado num de um diagrama de equilíbrio

$$\text{tabela vapor superaquecido} \left\{ \begin{array}{l} h_L = 2727 \text{ kJ/kg} \\ P = 101,3 \text{ KPa} \end{array} \right\} \quad T \cong 125 \text{ C}$$

- resfriamento evaporativo

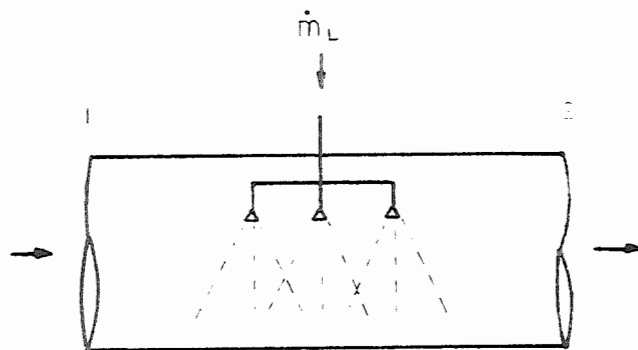


Figura 18

Balanço de massa :

$$\text{ar:} \quad \dot{m}_{A1} = \dot{m}_{A2} = \dot{m}_A$$

$$\text{água:} \quad \dot{m}_L = \dot{m}_A (w_1 - w_2)$$

Balanço de energia :

$$\dot{m}_A [h_{M2} - h_{M1}] - \dot{m}_L h_L = 0$$

Exemplo: $120 \text{ m}^3/\text{min}$ de ar proveniente de uma região desértica, TBS = 40 C e $\phi = 10\%$, devem ser umidificados de forma que sua temperatura se reduza para 20°C. Determine a umidade absoluta final e a descarga de água que deve ser adicionada.

Determinação de w_1

$$\phi_1 = \frac{P_{v1}}{P_{SAT}} \Big|_{40^\circ\text{C}} = 0,1 = \frac{P_{v1}}{7,384 \text{ KPa}}$$

$$P_{v1} = 0,7384 \text{ KPa}$$

$$P = P_{v1} (1 + 0,622/w_1) = 101,3 = 0,7384 (1 + 0,622/w_1)$$

$$w_1 = 0,0046$$

determinação da descarga de ar úmido

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = \dot{V} = 120 \text{ m}^3/\text{min} \quad (\text{porque ?})$$

usando a relação

$$\dot{V} = \dot{m}_A v_A = \dot{m}_V v_V$$

podemos obter \dot{m}_A

$$P_{A1} v_{A1} = RT_1$$

$$(101,3 - 0,7384) v_{A1} = 0,287 (273 + 40)$$

$$v_{A1} = 0,8933 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{m}_A = \dot{V} / v_{A1} = \frac{120}{0,8933} \cdot \frac{1}{60}$$

Portanto

$$\dot{m}_A = 2,239 \text{ Kg/s}$$

A determinação de \dot{m}_L e w_2 é feita através das expressões abaixo, relativas ao balanço de massa e de energia :

$$\dot{m}_L = \dot{m}_A (w_2 - w_1)$$

$$0 = \dot{m}_A [h_{M2} - h_{M1}] + \dot{m}_L h_L$$

escrevendo as entalpias em função das temperaturas, a expressão do balanço de energia fica

$$0 = \dot{m}_A \left[(T_2 - T_1) \cdot C_{P/A} + (T_2 w_2 - T_1 w_1) \cdot C_{P/V} \right] - \dot{m}_L h_L$$

Para resolver este sistema de equações, cujas incógnitas são w_2 e \dot{m}_L , devemos fazer uma hipótese sobre o valor de h_L . A água

para a asperção pode ser proveniente de um riacho estando a temperatura ambiente ou, de um poço, estando portanto mais fria. Vamos supor que a temperatura da água seja de 30° o que significa supor uma entalpia (calculada no mesmo referencial das outras):

$$h_L = C_{p/v} \cdot T - h_{L_v} = 1,85 (30 + 273) - 2430,5$$

$$h_L = - 1869,95 \text{ kJ/kg}$$

Desta forma, resolvendo o sistema obtemos

$$\dot{m}_L = 0,019 \text{ kg/s}$$

$$w_2 = 0,013$$

- *Mistura adiabática*

Balço de massa :

$$\text{ar:} \quad \dot{m}_{A1} + \dot{m}_{A2} = \dot{m}_{A3}$$

$$\text{águas:} \quad \dot{m}_{A1} w_1 + \dot{m}_{A2} w_2 = \dot{m}_{A3} w_3$$

Substituindo uma expressão na outra e isolando w_3 obtemos

$$w_3 = \frac{w_1 \dot{m}_{A1} + w_2 \dot{m}_{A2}}{\dot{m}_{A1} + \dot{m}_{A2}}$$

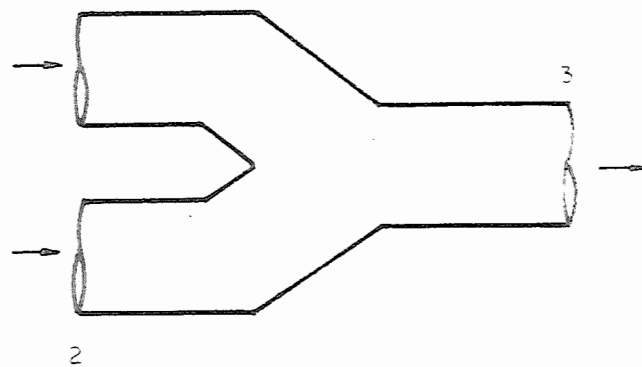


Figura 19

ou ainda, a relação entre as descargas na seção 1 e 3

$$\frac{\dot{m}_{A1}}{\dot{m}_{A3}} = \frac{w_3 - w_2}{w_1 - w_2}$$

Balço de energia :

$$\dot{m}_{A1} h_{M3} + \dot{m}_{A2} h_{M2} - \dot{m}_{A3} h_{M3} = 0$$

Calculando novamente a relação entre as vazões em 1 e 2 temos

$$\frac{\dot{m}_{A1}}{\dot{m}_{A3}} = \frac{h_{M3} - h_{M2}}{h_{M1} - h_{M2}}$$

Desta forma podemos concluir que

$$\frac{w_3 - w_2}{w_1 - w_2} = \frac{h_{M3} - h_{M2}}{h_{M1} - h_{M2}}$$

Essas relações mostram que a operação de mistura adiabática obedecem, na carta psicrometrica, leis de semelhança de triângulos. Desta forma o estado 3, resultante da mistura de ar nos estados 1 e 2, localiza-se sobre o segmento 2-3, conforme esquematizado na figura 20.

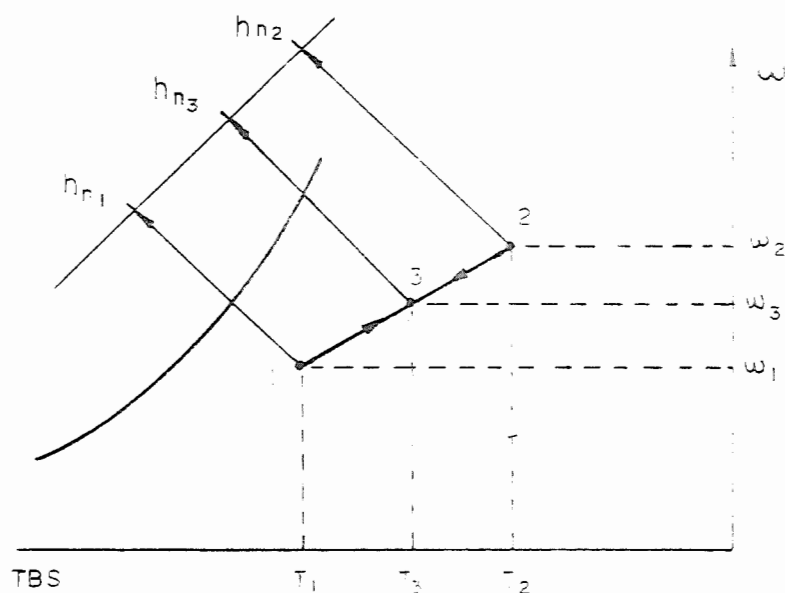


Figura 20

Exemplo: Determine as condições na seção 3 do misturador esquematizado, juntamente com os dados, na figura 21.

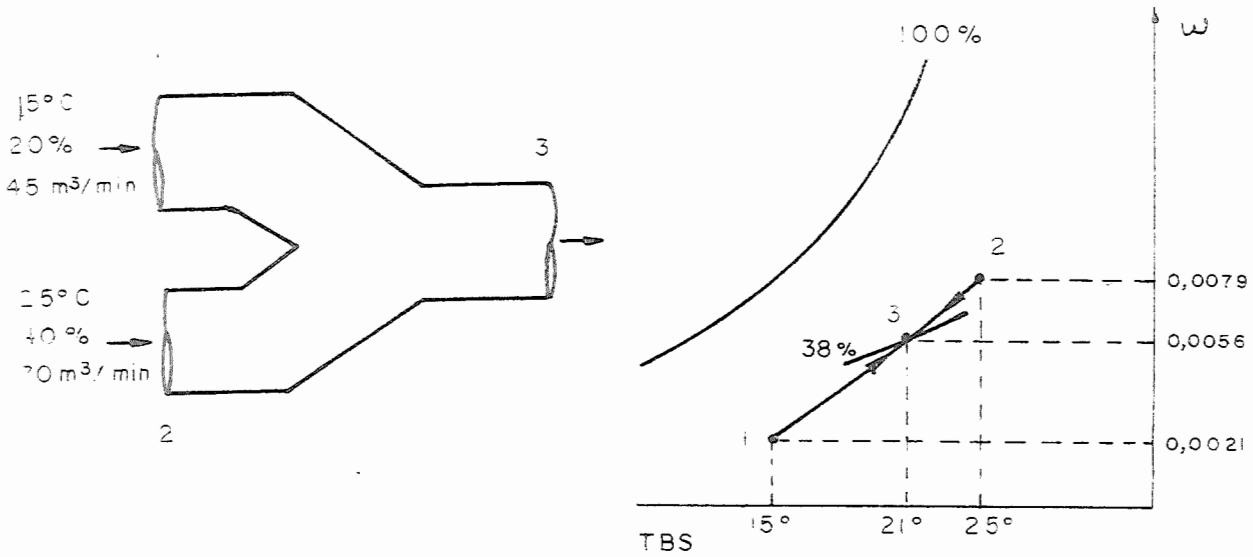


Figura 21

Transformação das descargas volumétricas em descargas mássicas .

$$P_{v1} = \phi_1 \cdot P_{SAT} \Big|_{15^\circ C} = 1,7051 \cdot 0,2$$

$$P_{v1} = 0,341 \text{ KPa}$$

$$P = P_{v1} (1 + 0,622/w_1) = 0,341 (1 + 0,622/w_1)$$

$$w_1 = 0,00210$$

$$v_{A1} = \frac{R_A T_1}{P_{A1}} = \frac{0,287 (15 + 273)}{101,3 - 0,341}$$

$$v_{A1} = 0,817 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{m}_{A1} = \dot{V}_1 / v_{A1} = 45 / 0,817$$

$$\dot{m}_{A1} = 54,96 \text{ Kg/min}$$

Da mesma forma obtemos \dot{m}_{A2} e \dot{m}_{A3} :

$$\dot{m}_{A2} = 81,87 \text{ kg/min}$$

$$\dot{m}_{A3} = 136,83 \text{ kg/min}$$

O cálculo de w_3 é feito através da expressão do balanço de massa. Feito isso encontramos o valor de

$$w_3 = 0,00556$$

A umidade absoluta w_3 localiza o ponto 3 sobre o segmento 2-3. Podemos assim ler os seguintes valores :

$$T_3 = 21^\circ\text{C}$$

$$\phi_3 = 38\%$$

9 - Exercícios propostos

1) Ar úmido entra em um duto a 20°C , 60% de umidade relativa e vazão de $150 \text{ m}^3/\text{min}$ e, após sofrer aquecimento, sai a temperatura de 30°C . Durante o processo a pressão permanece constante. Determine : a) o calor transferido em KW, b) a umidade relativa na saída do duto e c) os estados e o processo na carta psicrométrica.

2) A pressão ao longo de um saturador adiabático é constante e igual a $101,3 \text{ KPa}$. A temperatura na entrada é de 30°C e na saída

é de 20°C . Calcular a umidade relativa e específica do ar úmido na entrada do saturador.

3) Uma mistura de ar-vapor tem TBS de 35°C e umidade relativa de 80%. A pressão total é de 100 KPa. Determine : a) a pressão parcial do vapor d'água, b) a umidade específica, c) a temperatura do ponto de orvalho, d) a umidade específica do ponto de orvalho, e) a TBU e f) a entalpia específica da mistura.

4) Um reservatório rígido e fechado, contém 1 Kg de ar úmido a uma pressão de 1 atm, TBS de 25°C e umidade relativa de 50%. O sistema é aquecido até que a TBS chegue a 45°C . Determine : a) a pressão de saturação do vapor no estado inicial e final, b) a umidade específica no estado inicial e final, c) a pressão final da mistura, d) o calor trocado no processo e e) a variação de entropia considerando que a fonte quente está a 100°C .

5) Ar a TBS de 41°C e umidade relativa de 10%, passa por um resfriador evaporativo numa vazão de $120\text{ m}^3/\text{min}$ e sai com TBS de 21°C . Determine a umidade relativa do ar ao deixar o resfriador e a descarga, em Kg/s, da água que deve ser aspergida.

6) Ar atmosférico a TBS de 33°C e umidade de 20% é resfriado até 15°C e, em seguida, misturado adiabaticamente com ar recirculado com TBS de 29°C e umidade de 50%. Produz-se assim $80\text{ m}^3/\text{min}$ a TBS de 20°C . Determine a umidade relativa da mistura, as descargas e a taxa de calor transferido na seção de resfriamento.

7) Uma torre de resfriamento é usada para dissipar 7,5 MW de calor de um fluxo de água, proveniente do condensador de uma termoeétrica. A temperatura desta é reduzida de 35°C para 24°C . As condições do ar externo são de 20°C e 30% que, após deixar a

torre, passam para 30°C e 90%. Água de reposição está disponível a 20°C . Determine a descarga volumétrica de ar passando pela torre e a vazão de água de reposição.

8) $1,3 \text{ Kg/s}$ de ar a 4°C e 90% de umidade, deve ser aquecido e umidificado até 23°C e 45%. Vapor saturado a 120°C é utilizado na seção de umidificação. Determine a potência térmica de aquecimento e a vazão de vapor necessária.

9) Ar úmido é confinado em um êmbolo-cilindro a pressão de 125 KPa, TBS de 20°C e umidade relativa de 60%. O êmbolo é então movido de forma a elevar adiabaticamente a pressão até 300 KPa. Determine a umidade relativa e a TBS nesta situação.

10) Uma torre de resfriamento é usada para resfriar 110 Kg/s de água de 40°C para 30°C . As condições do ar atmosférico são TBS de 35°C e umidade de 30%. O ar ao deixar a torre está saturado a temperatura de 49°C e, água de reposição está disponível a 25°C . Determine as vazões de ar e água de reposição.

