

PSICROMETRIA

I.1 Introdução

A compreensão do comportamento da mistura ar e vapor de água são um tópico de grande importância para o estudo do conforto térmico de ambientes para produção comercial e intensiva de animais e plantas, assim como na conservação de produtos agrícolas após a colheita, quando a relação entre o produto e o ar depende de processos como secagem (aquecimento e/ou resfriamento), umidificação, refrigeração. Por causa disso, a Termodinâmica reservou um capítulo à parte para estudar a mistura desses dois gases: a Psicrometria, palavra grega “psukros”, que significa umidade.

A determinação dos parâmetros psicrométricos é realizada a partir da equação virial, todavia, para a maioria das aplicações práticas os resultados têm-se mostrado bastante satisfatórios, quando se admite o comportamento de gás perfeito, tanto para o vapor de água, como para o ar atmosférico seco.

Para as condições mais comuns de aplicação no campo de Engenharia Agrícola são apresentadas, a seguir, algumas propriedades e ou parâmetros mais conhecidos e, que serão usados no decorrer deste livro.

I.2 Parâmetros Fundamentais

1.2.1. Constantes fundamentais

$$R_a = \frac{R}{M_a} = 287,0 \frac{J}{kg.K} = 53,4 \frac{lb_f.pés}{lbm.R} = \text{constante do ar seco} \quad (1.2.1)$$

onde:

$$R = 1.545,32 \frac{lb_f.pés}{lbmol.R} = 8.314,0 \frac{J}{kgmol.K} = \text{constante universal dos gases;}$$

M_a = peso molecular do ar seco = 28,965.

$$R_v = \frac{R}{M_v} = 462,0 \frac{J}{kg.K} = 85,8 \frac{lb_f.pés}{lbm.R} = \text{constante do vapor de água} \quad (1.2.2)$$

onde:

M_v = peso molecular do vapor de água = 18,05

$$\rho_a = \frac{p_a}{R_a.T} = \text{densidade do ar seco, ao nível do mar, kg/m}^3 \quad (1.2.3)$$

$$P_{atm} = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{CO_2} + p_{OG} + p_v = \text{pressão atmosférica, Pa} \quad (1.2.4)$$

$$p_a = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{CO_2} + p_{OG} = \text{pressão do ar seco, Pa} \quad (1.2.4.1)$$

$$p_v = \text{pressão do vapor de água, Pa} \quad (1.2.4.2)$$

$$\text{Então, } P_{atm} = p_a + p_v \quad (1.2.4')$$

1.2.2. Umidade específica W : é razão entre a massa de vapor de H_2O (m_v) e a massa de ar seco (m_a) na mistura.

$$W = \frac{m_v}{m_a} \quad (1.2.5)$$

1.2.3. Umidade Relativa ϕ : é a razão da fração molar do vapor de água (X_v) numa mistura com a fração molar (X_s) do vapor de água numa mistura saturada na mesma temperatura e pressão.

$$\text{Então, } \phi = \frac{X_v}{X_s} \Big|_{T,P} \quad (1.2.6)$$

$$\text{Sabendo-se que } x_v = \frac{p_v}{P_{atm}} \quad (1.2.6.1)$$

$$\text{e que } x_s = \frac{p_s}{P_{atm}} \quad (1.2.6.2)$$

$$\text{tem-se, então que } \phi = \frac{p_v}{p_s} \quad (1.2.6.3)$$

1.2.4. Grau de Saturação μ = é a razão entre a umidade específica (W) e umidade específica de uma mistura saturada (W_s) na mesma temperatura e pressão.

Então,

$$\mu = \frac{W}{W_s} \Big|_{T,P} \quad (1.2.7)$$

1.2.5. Temperatura de ponto de orvalho: é a temperatura do ar úmido saturado à mesma pressão e umidade específica de uma mistura de ar dada.

Segundo Albright (1990), a temperatura de ponto de orvalho é uma função da pressão parcial do vapor de água (p_v) e pode ser calculado pôr uma das seguintes equações:

$$t_{po} = -60,45 + 7,0322 \ln(p_v) + 0,37(\ln(p_v))^2 \quad (1.2.8.1)$$

para $-60 \leq t_{bs}$ (temperatura de bulbo seco) < 0 °C e t_{po} em °C, ou

$$t_{po} = -35,957 - 1,8726(p_v) + 1,1689(\ln(p_v))^2 \quad (1.2.8.2)$$

para $0 \leq t_{bs}$ (temperatura de bulbo seco) ≤ 70 °C e t_{po} em °C, onde p_v é em Pascal.

Usando a lei dos gases perfeitos, chega-se a seguinte relação:

$$m_v = \frac{p_v \cdot V}{R_v \cdot T} = \frac{p_v \cdot V \cdot M_v}{R \cdot T} \quad (1.2.9.1)$$

e

$$m_a = \frac{p_a \cdot V}{R_a \cdot T} = \frac{p_a \cdot V \cdot M_a}{R \cdot T} \quad (1.2.9.2)$$

Dividindo a eq. (1.2.9.1) pela eq. (1.2.9.2) obtém-se a seguinte relação:

$$W = \frac{M_v \cdot p_v}{M_a \cdot p_a} = 0,6219 \frac{p_v}{p_a} \quad (1.2.9.3)$$

Usando a equação (1.2.4'), obtém-se, finalmente, onde a umidade específica (ou absoluta) é uma função, somente, da pressão parcial do vapor de água e da pressão atmosférica local, ou seja:

$$W = 0,6219 \frac{p_v}{P_{atm} - p_v} \quad (1.2.9.4)$$

Através da equação (1.2.6.3) e colocando p_v em evidência, obtém uma relação entre umidades relativa e absoluta, a saber:

$$W = 0,6219 \frac{\phi \cdot p_s}{p_a} \quad (1.2.9.5)$$

1.2.6. Entalpia de uma mistura de gases perfeitos é igual a soma das entalpias de cada constituinte e é referida à unidade de massa do mesmo. Para a mistura ar-

vapor de água, o ar seco é usado como referência, devido ao fato da quantidade de vapor de água variar dependendo do processo. Portanto, temos:

$$h = h_a + W \cdot h_v$$

(1.2.10.1)

onde

h = entalpia da mistura, (KJ/Kg_a)

h_a = entalpia do ar seco, (KJ/Kg_a)

h_v = entalpia do vapor de água, (KJ/Kg_v).

Todavia, sabemos que:

$$h_a = cp_a \cdot T$$

(1.2.10.2)

e

$$h_v = h_{vs} + cp_v \cdot T$$

(1.2.10.3)

onde

cp_a = calor específico do ar seco (assumido constante) = 1.0 kJ/(kg. °C)

cp_v = calor específico do vapor de água (assumido constante) = 1,86 kJ/(kg. °C)

h_{vs} = entalpia do vapor de água saturada, à 0°C = 2501,3 kJ/kg.

Portanto, a equação (1.2.10.1) pode ser aproximada pôr:

$$h = 1,0 \cdot T + W(2501,3 + 1,86 \cdot T)$$

(1.2.10.4)

Exemplo : Calcular a entalpia do ar saturado à 15,6°C e pressão atmosférica padrão.

Solução: As equações a serem usadas são:

$$W_s = 0,6219 \frac{p_s}{p_a} = 0,6219 \frac{p_s}{P_{atm} - p_s}$$

e

$$h_s = cp_a \cdot T + W_s (h_{vs} - cp_v \cdot T)$$

logo

$$W_s = 0,6219 \frac{1767,9}{101325 - 1767,9} = 0,01104 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$$

$$h_s = 1,0 \cdot 15,6 + 0,01104(2501,3 - 1,86 \cdot 15,6) = 43,5 \text{ kJ/kg}_a$$

1.2.7. Saturação Adiabática:

Vimos anteriormente, que à uma dada pressão e temperatura de uma mistura de ar e vapor d'água, é necessária mais uma propriedade para especificar o estado desta mistura. A exceção é a saturação adiabática ou ponto de saturação.

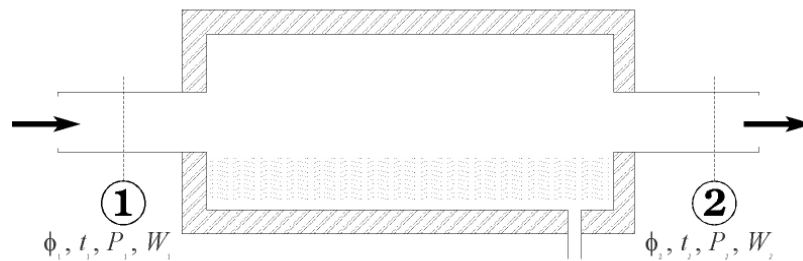


Figura 1.2.11.1 Esquema de um sistema de saturação adiabática

Condições ou hipóteses:

- $UR_2 = 100\% \Rightarrow$ Ar no ponto 2 é saturado
- $t_2 =$ Temperatura adiabática de saturação (t_{as})
- Estado constante
- Fluxo constante

Balanco de energia

$$h_{a1} + W_1 h_{v1} + (W_2 - W_1) h_{H_2O_l} = W_2 h_{v2} + h_{a2} \quad (1.2.11.1)$$

Rearranjando a equação (1.2.11.1) e inserindo a equação (1.2.10.2), obtém-se:

$$W_1 (h_{v1} - h_{H_2O_l}) = c p_a (t_2 - t_1) + W_2 (h_{v2} - h_{H_2O_l}) \quad (1.2.11.2)$$

$$W_1 (h_{v1} - h_{H_2O_l}) = c p_a (t_2 - t_1) + W_2 h_{fg} \quad (1.2.11.3)$$

onde,

h_{fg} = entalpia de vaporização da água, kJ/kg_v

logo, observa-se que

- $t_2 = t_{as} = f(\phi_1, P_1, t_1 \text{ e } P_2)$
- $\phi_1 = f'(t_1, P_1, t_2, P_2)$

Exemplo: Saturador Adiabático

Dados: $P_1 = 101325 \text{ Pa}$

$$t_1 = 26,7^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 17,8^\circ\text{C}$$

Determinar : W_1 e ϕ_1

Solução:

A mistura do ar é saturada no ponto 2, portanto $p_{v2} = p_{s2}$. Então,

$$W_2 = 0,6219 \frac{p_{v2}}{p_a} = 0,6219 \frac{2029,81}{101325 - 2029,81} = 0,01271 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$$

$$W_1 = \frac{cp_a(t_2 - t_1) + W_2 h_{fg2}}{h_{v1} - h_{H_2O_l}} = \frac{1 \cdot (17,8 - 26,7) + 0,01271 \cdot 2459}{255 - 75} = 0,00902 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$$

Todavia,

$$W_1 = 0,6219 \frac{p_{v1}}{P_{atm} - p_{v1}} = 0,6219 \frac{p_{v1}}{101325 - p_{v1}} = 0,00902 \Rightarrow p_{v1} = 1.448,3 \text{ Pa}$$

Então

$$\phi_1 = \frac{p_{v1}}{p_{s1}} = \frac{1.448,3}{3.488,9} = 0,415$$

$$\phi_1 = 41,5\%$$

Portanto o estado do ar úmido pode ser determinado através da pressão e da temperatura. Conclusão:

1 Saturação adiabática não é um meio prático de se determinar tais condições porque o sistema teria que ser infinitamente longo na direção do fluxo.

2 Existe um meio mais prático de se obter as condições de uma mistura de ar; é através da temperatura de bulbo úmido e a carta psicrométrica.

1.2.8. Temperatura de Bulbo úmido e Carta Psicrométrica

Psicrômetro: É constituído de dois termômetros, um indica a temperatura de bulbo seco (t_1 , no processo de saturação adiabática); o outro, envolvido numa capa de algodão molhado, indica a temperatura de bulbo úmido (t_2 , no processo de saturação adiabática).

P_1 e P_2 são pressões barométricas.

Embora o processo de transferência de calor e massa do termômetro de bulbo úmido não seja o mesmo que o processo de saturação adiabática, o erro é pequeno quando este termômetro é usado nas seguintes condições:

- a) Diferença entre a temperatura de bulbo úmido e temperatura termodinâmica de bulbo úmido for menor que $0,25^\circ\text{C}$ à pressão atmosférica e $T > 0^\circ\text{C}$;
- b) $T_{bs} - T_{bu} < 11^\circ\text{C}$;
- c) Inexistência de condições incomuns de radiação;
- d) Para termômetro de bulbo úmido descoberto (não protegido) a velocidade do ar deve ser maior que 0,5 m/s. (Fig. 1.2.8.1):

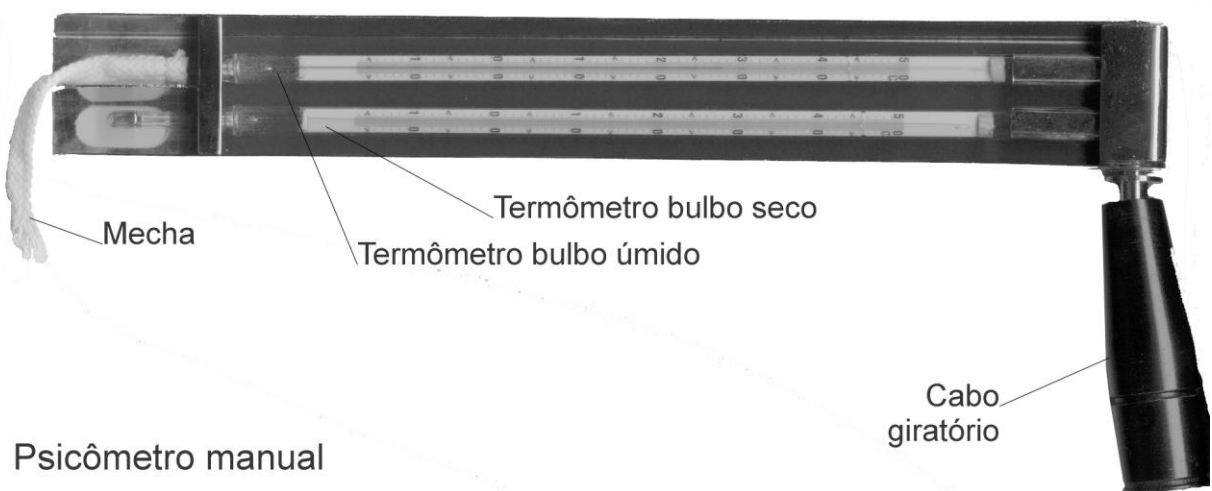


Figura 1.2.8.1 Psicrômetro ou higrômetro giratório.

Carta Psicrométrica

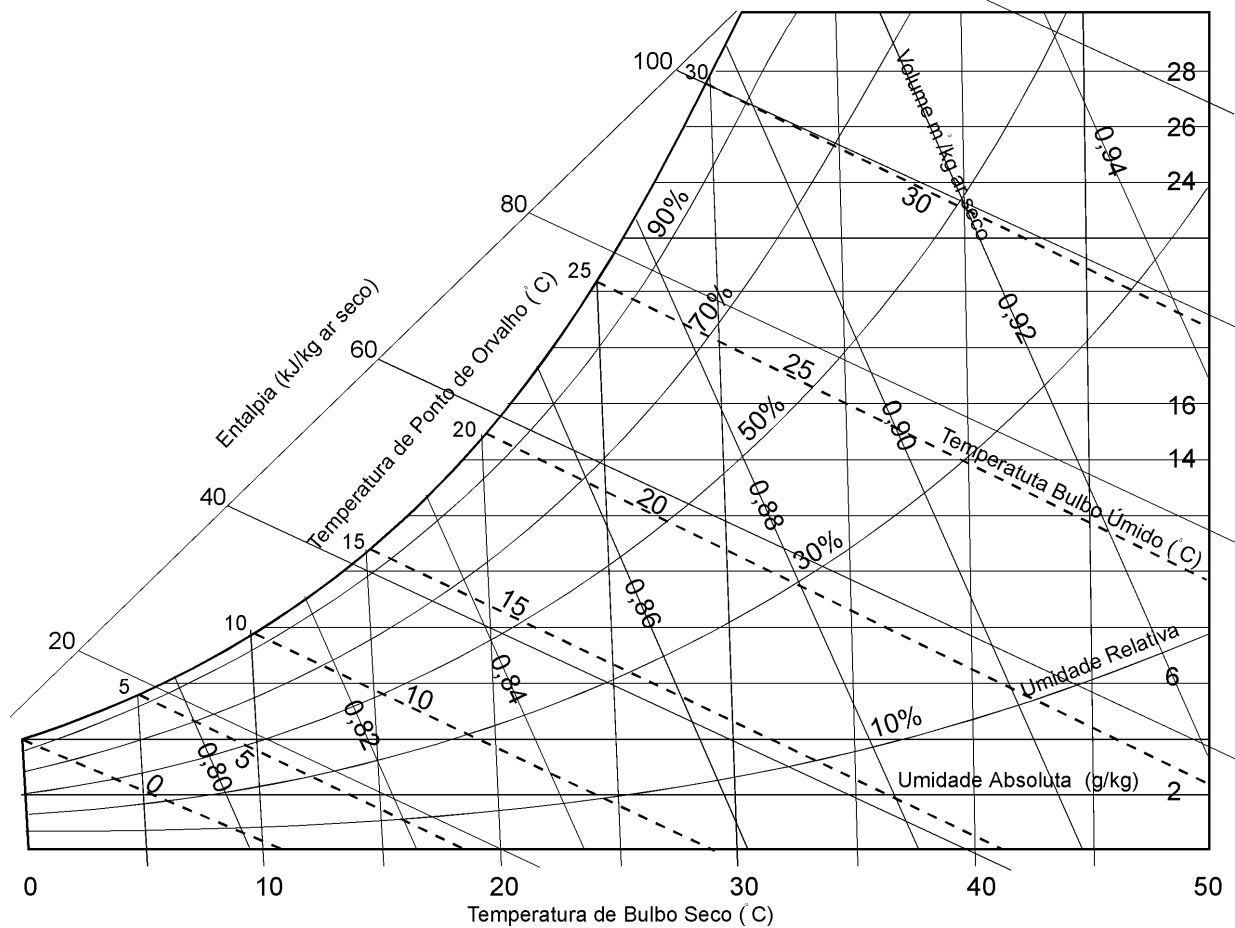


Fig. 1.2.8.2. Carta psicrométrica para temperaturas e pressão normais.

Exercício : Dado T_{bs} e T_{bu}

Calcular: W , ϕ , h , e T_{po}

I.3 Processos Psicrométricos Clássicos

1.3.1 Aquecimento ou Resfriamento do Ar

(Aquecimento ou Resfriamento sem perda ou ganho de Umidade)

Ex.: Ar úmido atravessa um trocador de calor

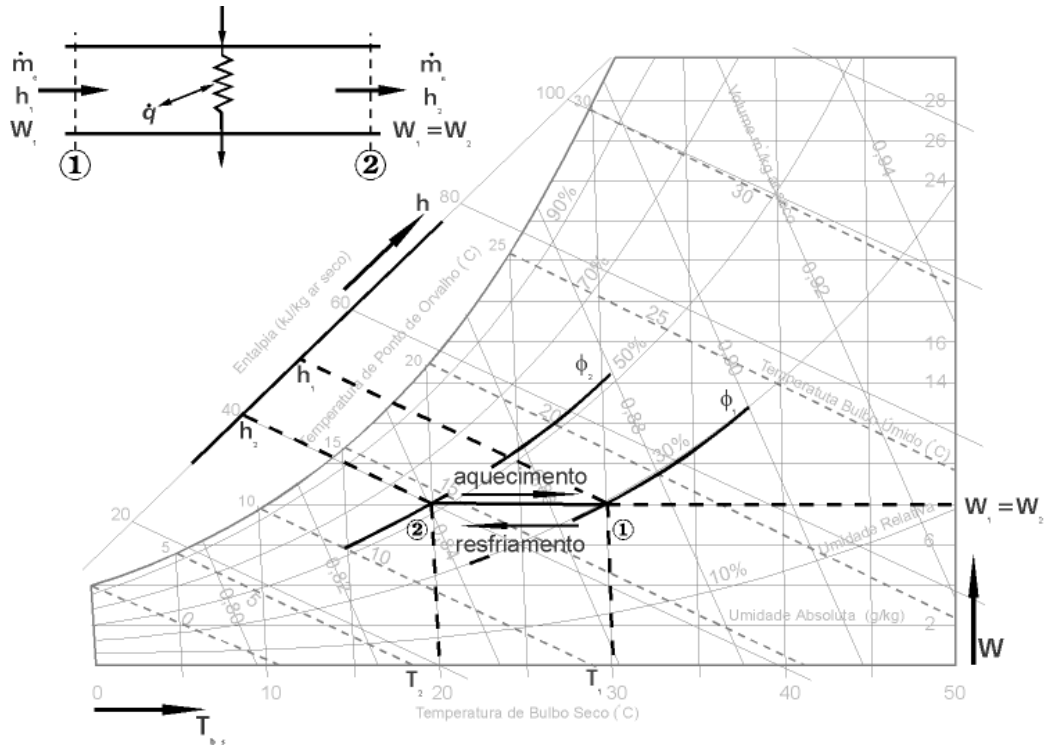


Figura 1.3.1 - Esquema de Sistema de Aquecimento ou Resfriamento

Balanco de Energia

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{q} = \dot{m}_a h_2 \quad (1.3.1)$$

ou, aproximadamente

$$\dot{m}_a c_{p1} T_1 + \dot{q} = \dot{m}_a c_{p2} T_2 \quad (1.3.1')$$

onde, as entalpias e os calores específicos dos estados 1 e 2 são definidas como sendo:

$$h_1 = h_{a1} + W_1 \cdot h_{v1} \quad (1.3.2)$$

$$h_2 = h_{a2} + W_2 \cdot h_{v2} \quad (1.3.3)$$

$$c_p = c_{pa} + W \cdot c_{pv} \quad (1.3.4)$$

logo, a equação (1.3.1') pode ser simplificada, resultando em

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot c_p (T_2 - T_1) \quad (1.3.5)$$

Exemplo : Encontrar a quantidade de calor requerida para aquecer $150 \text{ m}^3/\text{s}$ de ar a 65°C e 90% UR até 100°C sem adição de umidade

$$\dot{m}_a = \frac{v_1 \cdot A_1}{v_1} = \frac{\dot{V}}{v_1} \quad (1.3.6)$$

onde,

v_1 = velocidade do ar, m/s

A_1 = área da seção de entrada, m^2

V_1 = vazão volumétrica do ar, m^3/s

v_1 = volume específico do ar, m^3/kg_a .

Da Carta Psicrométrica $\rightarrow v_1 = 1,27 \text{ m}^3/\text{kg}_a$, para $T_{bs} = 65^\circ\text{C}$ e UR = 90%, logo

$$\dot{m}_a = \frac{150}{1,27} = 118,11 \text{ kg}_a/\text{s}$$

então,

$$\dot{q} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) = \dot{m}_a \cdot c_p (T_2 - T_1) = 118,11 \cdot 1,02 (100 - 65) = 4.133,86 \text{ kJ/s}$$

1.3.2. Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido

Quando resfria-se o ar abaixo de seu ponto de orvalho parte do vapor H_2O condensará e deixará a mistura do ar, desumidificando-a.

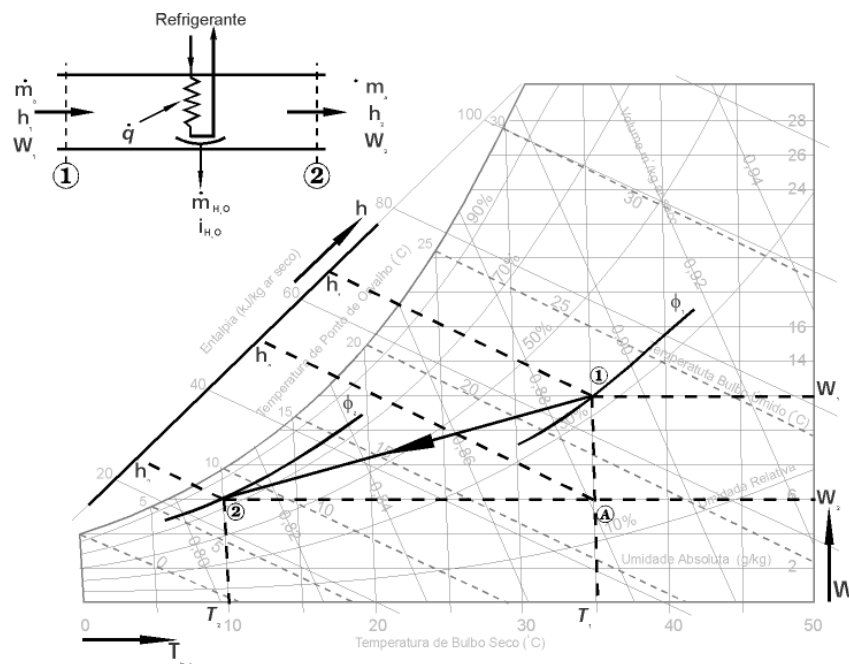


Figura 1.3.2 - Processo de Resfriamento e Desumidificação

Balanço de Energia:

$$\dot{m}_a \cdot h_1 = \dot{q} + \dot{m}_a \cdot h_2 + \dot{m}_v \cdot h_{fg} \quad (1.3.7)$$

onde

h_{fg} = entalpia de vaporização, kJ/kg_v

Balanço de massa para o vapor de água:

Admitindo-se fluxo constante, tem-se

$$\dot{m}_a \cdot W_1 = \dot{m}_v + \dot{m}_a \cdot W_2 \quad (1.3.8)$$

logo

$$\dot{m}_v = \dot{m}_a \cdot (W_1 - W_2) \quad (1.3.9)$$

Combinando as equações (1.3.7) com (1.3.9), obtém-se

$$\dot{q} = \dot{m}_a \cdot (h_1 - h_2) - \dot{m}_a \cdot (W_1 - W_2) \cdot h_{fg} \quad (1.3.10)$$

Esta última equação representa a quantidade total de calor transferido do ar úmido. Enquanto que o último termo da mesma equação (lado direito) é comumente pequeno em relação aos outros e é geralmente desprezado.

Exemplo: Ar úmido com $T_{bs} = 26.7^\circ\text{C}$ e $T_{bu} = 19.4^\circ\text{C}$ é resfriado até $T_{bs} = 14.4^\circ\text{C}$ e UR = 80% à uma vazão de $56.6 \text{ m}^3/\text{min}$ ($0.94 \text{ m}^3/\text{s}$) e o vapor de água condensado deixa o sistema a 15.6°C . Calcule q .

$$\dot{q} = \dot{m}_a (h_1 - h_2) - \dot{m}_a (W_1 - W_2) h_{fg}$$

Da Carta Psicrométrica obtém-se

$$\rho_1 = 1,153 \text{ kg/m}^3$$

$$h_1 = 55 \text{ kJ/kg}_a$$

$$W_1 = 0,011 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$$

$$H_{fg \text{ tabela}} = 65,1 \text{ kJ/kg}_v$$

$$h_2 = 35 \text{ kJ/kg}_a$$

$$W_2 = 0,0085 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$$

logo

$$\dot{m}_a = \dot{V} \cdot \rho = 0,94 \frac{m^3}{s} \cdot 1,153 \frac{kg}{m^3} = 1,088 kg/s$$

$$\dot{q} = 1,088(55 - 35) - 1,088(0,011 - 0,0085) \cdot 65,1$$

$$\dot{q} = 21,76 - 0,18 = 21,58 \text{ kJ/s}$$

Nota 1: O último termo da equação acima, representa a energia de condensação, e é bem insignificante, o que geralmente é verdadeiro para a maioria dos processos de resfriamento e desumidificação.

Nota 2: Resfriamento e Desumidificação envolve tanto calor sensível quanto latente.

Calor Sensível = alteração (decréscimo, neste caso) da temperatura de bulbo seco.

Calor latente = alteração na umidade específica (decréscimo neste caso).

Portanto,

$$\dot{q}_s = \dot{m}_a \cdot cp(t_1 - t_2) \quad (1.3.11)$$

$$\dot{q}_l = \dot{m}_a \cdot (W_1 - W_2) \cdot h_{fg} \quad (1.3.12)$$

Para o exemplo anterior, tem-se

$$\dot{q}_l = \dot{m}_a \cdot (h_1 - h_a)$$

$$\dot{q}_s = \dot{m}_a \cdot (h_a - h_2)$$

logo

$$\dot{q}_T = \dot{q}_s + \dot{q}_l \quad (1.3.13)$$

A razão entre o calor sensível (q_s) e o calor total ($q_s + q_l$) é conhecida como o Fator de Calor Sensível (FCS), muito útil neste processo e no dimensionamento de seus equipamentos, portanto:

$$FCS = \frac{\dot{q}_s}{\dot{q}_s + \dot{q}_l} = \frac{\dot{q}_s}{\dot{q}_T} \quad (1.3.14)$$

1.3.3. Aquecimento e Umidificação do Ar Úmido

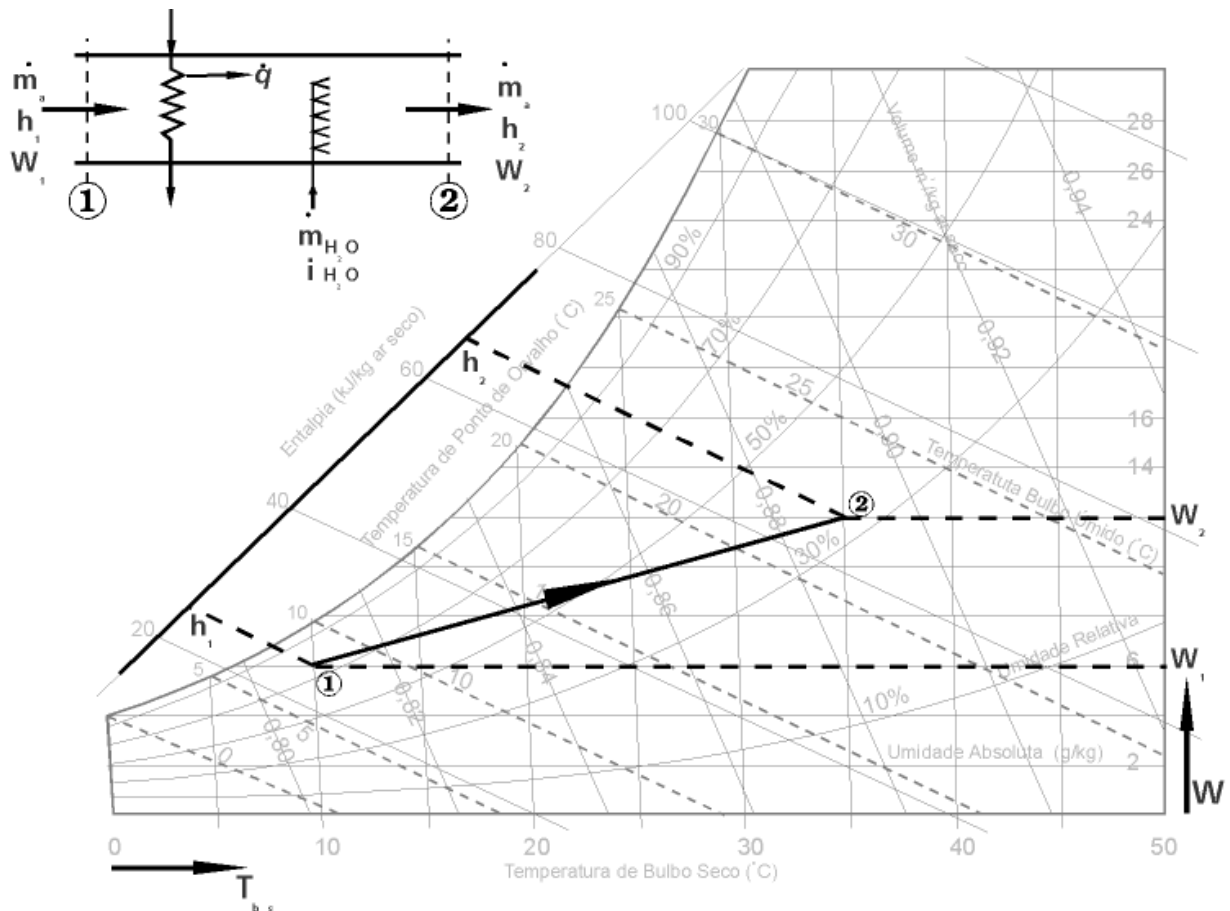


Figura 1.3.3 - Processo de Aquecimento e Umidificação

Balanco de Energia

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{q} + \dot{m}_v h_v = \dot{m}_a h_2 \quad (1.3.15)$$

Balanco de Massa

$$\dot{m}_a W_1 + \dot{m}_v = \dot{m}_a W_2 \quad (1.3.16)$$

Colocando $\dot{m}_a$ em evidência na equação (1.3.15) e inserindo o resultado em (1.3.16), obtém-se:

$$\frac{\dot{q}}{\dot{m}_v} + h_v = \frac{(h_2 - h_1)}{(W_2 - W_1)} = \frac{\Delta h}{\Delta W} \quad (1.3.17)$$

Obs.: A equação (1.3.17) dá a direção da reta que liga os estados iniciais e finais, deste processo, na carta psicrométrica.

Exemplo: Ar úmido com $T_{bs}=15,6^{\circ}\text{C}$ e $UR=20\%$ flui através de um aquecedor e umidificador a uma vazão de $0,76 \text{ m}^3/\text{s}$. Calor é transferido ao ar numa quantidade de $29,3 \text{ kW}$. Vapor de H_2O saturada é injetado no sistema a 100°C e $22,7 \text{ kg/h}$. Determine o estado final da mistura se o processo ocorre a 101325 Pa .

Estado (1):

$$W_1 = 0,0025 \text{ kg/kg}_a \quad h_v = 2.676,1 \text{ kJ/kg}_v$$

$$v_1 = 0,824 \text{ m}^3/\text{kg}_a$$

$$h_1 = 24,5 \text{ kJ/kg}_a$$

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}}{v_1} = \frac{0,76}{0,824} = 0,92 \text{ kg/s} = 3.320,4 \text{ kg/h}$$

$$W_2 = W_1 + \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} = 0,0025 + \frac{22,7}{3320,4} = 0,0093 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$$

$$h_2 = h_1 + \frac{\dot{q}}{\dot{m}_a} + \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} h_v = 24,5 + \frac{29,3}{0,92} + \frac{0,01}{0,92} \cdot 2.676,1 = 74,7 \text{ kJ/kg}$$

Com W_2 e h_2 tem-se $\rightarrow t_{bs2} = 49,0^{\circ}\text{C}$ e $t_{bu2} = 24,5^{\circ}\text{C}$

1.3.4. Umidificação do Ar Úmido

Umidade pode ser adicionada ao ar sem adição de calor

$$\frac{\Delta h}{\Delta W} = \frac{h_2 - h_1}{W_2 - W_1} = h_v \quad (1.3.18)$$

Como pode ser observado na equação (1.3.18) a direção do processo na carta psicrométrica pode variar consideravelmente.

Casos:

- I. Se a água injetada é vapor saturado na temperatura de bulbo seco, o processo continuará em temperatura de bulbo seco constante.
- II. Se a entalpia da água (h_v) é maior que a entalpia de saturação (h_s), o ar será aquecido e umidificado.
- III. Se a entalpia da água (h_v) é menor que a entalpia de saturação o ar será resfriado e umidificado.
- IV. Se a água é injetada na temperatura de bulbo úmido do ar, o processo segue a linha de temperatura constante de bulbo úmido.

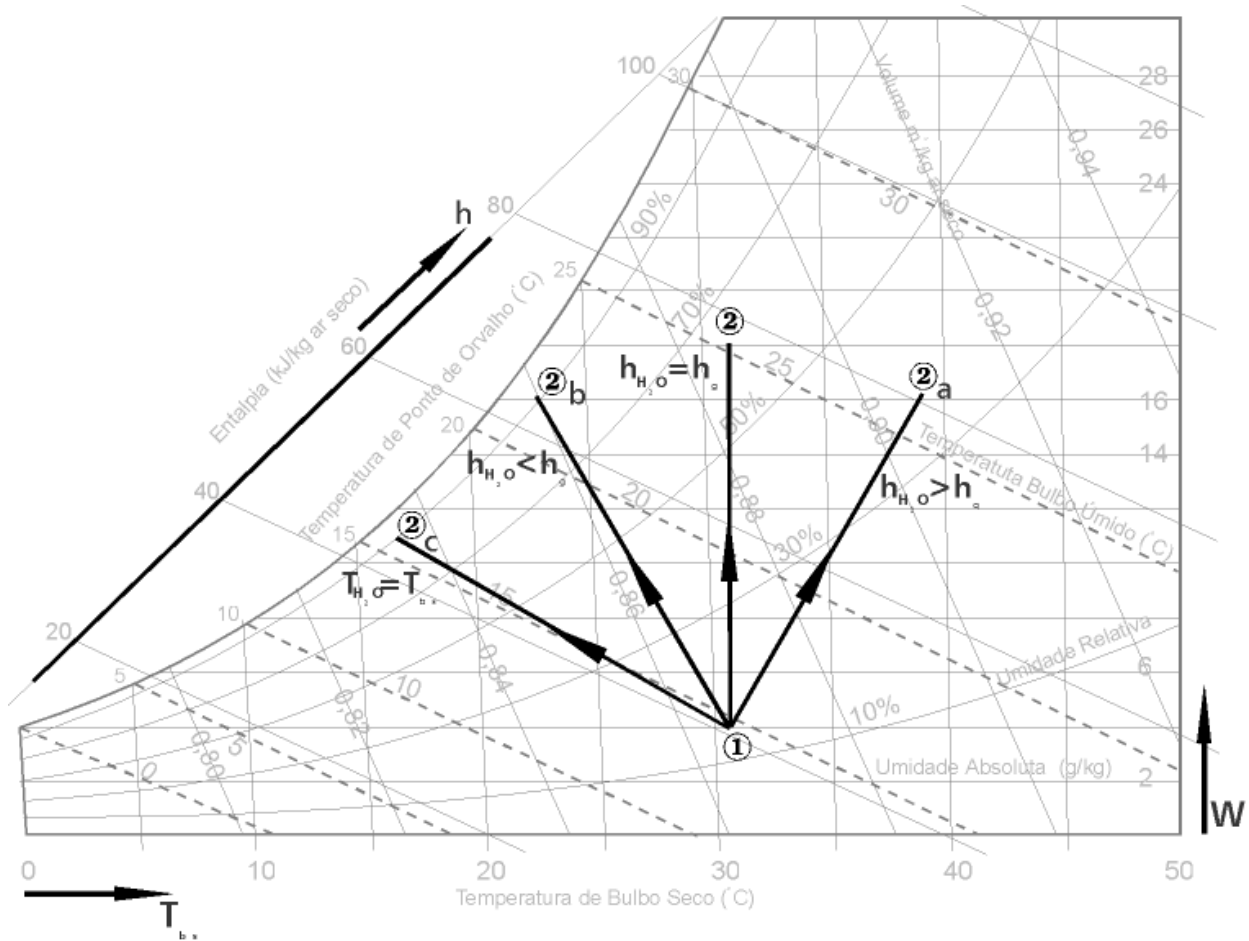


Figura 1.3.4 - Processo de Umidificação sem Transferência de Calor

1.3.5. Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar

Hipóteses: Condições adiabáticas e fluxos constantes

Balanco de energia

$$\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_{a2} h_2 = \dot{m}_{a3} h_3 \quad (1.3.19)$$

Balanco de Massa do Ar Seco

$$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3} \quad (1.3.20)$$

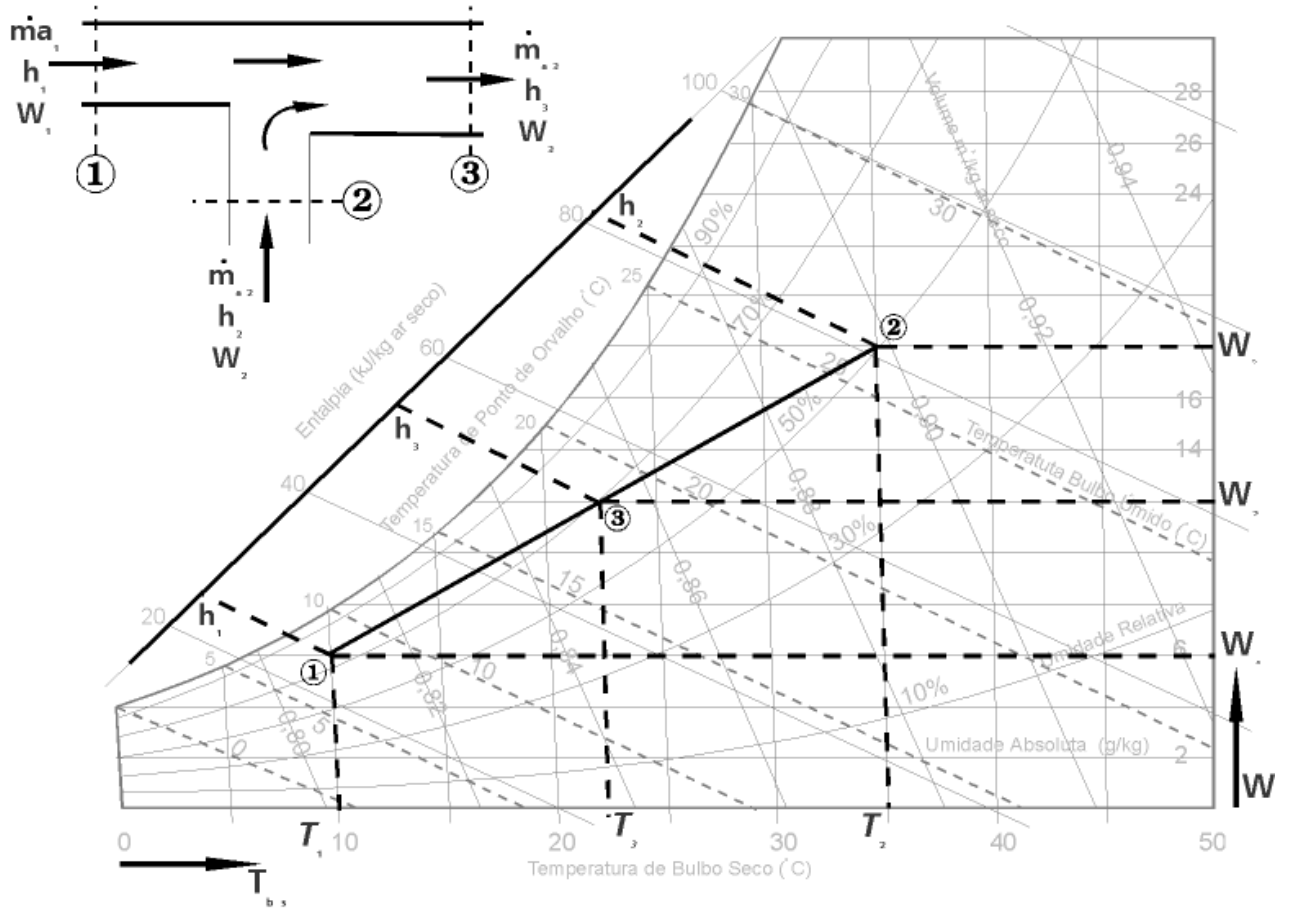


Figura 1.3.5 - Processo de Mistura Adiabática

Balço de Massa do Vapor de água

$$\dot{m}_{a1}W_1 + \dot{m}_{a2}W_2 = \dot{m}_{a3}W_3 \quad (1.3.21)$$

Combinando as equações (1.3.19), (1.3.20) e (1.3.21) e eliminando $\dot{m}_{a3}$ obtém-se

$$\frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} = \frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} \quad (1.3.22)$$

A equação (1.3.22) mostra que o estado final da mistura dos dois fluxos de ar deve estar numa linha reta entre os estados 1 e 2. Pode ser visto, também, que o comprimento destes segmentos de linha são proporcionais às massas de ar seco misturadas.

$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{\vec{32}}{\vec{13}}; \quad \frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a3}} = \frac{\vec{32}}{\vec{12}}; \quad \frac{\dot{m}_{a2}}{\dot{m}_{a3}} = \frac{\vec{13}}{\vec{12}} \quad (1.3.23)$$

Este fato permite um conveniente método gráfico para solucionar problemas de misturas de fluxos de ar em lugar das equações (1.3.19), (1.3.20) e (1.3.21). Deve-se notar, porém, que o fluxo de massa é usado para a solução gráfica. Fluxo de volume pode ser usado somente para obter resultados aproximados.

Exemplo: $56,6 \text{ m}^3/\text{min}$ de ar a $T_{bu} = 24^\circ\text{C}$ e $T_{bs} = 38^\circ\text{C}$ são misturados com $28,3 \text{ m}^3/\text{min}$ a $T_{bs} = 15,6^\circ\text{C}$ e $T_{bu} = 10^\circ\text{C}$. O processo é adiabático a um fluxo constante e pressão constante ao nível do mar. Encontre a condição de mistura dos gases.

Estado 1:

$$v_1 = 0,825 \text{ m}^3/\text{kg}_a$$

$$V_1 = 28,3 \text{ m}^3/\text{min} \Rightarrow m_{a1} = 2.058,2 \text{ kg}_a/\text{h}$$

$$W_1 = 0,0054 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$$

$$h_1 = 29,5 \text{ kJ/kg}_a$$

Estado 2:

$$v_2 = 0,90 \text{ m}^3/\text{kg}_a$$

$$V_2 = 56,6 \text{ m}^3/\text{min} \Rightarrow m_{a2} = 3.773,3 \text{ kg}_a/\text{h}$$

$$W_2 = 0,0132 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$$

$$h_2 = 72,5 \text{ kJ/kg}_a$$

$$\dot{m}_{a3} = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = 2.058,2 + 3.773,3 = 5.831,5 \text{ kg}_a/\text{h}$$

$$W_3 = \frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a3}} \cdot W_1 + \frac{\dot{m}_{a2}}{\dot{m}_{a3}} \cdot W_2 = \frac{2.058,2}{5.831,5} \cdot 0,0054 + \frac{3.773,3}{5.831,5} \cdot 0,0132 = 0,0104 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$$

$$h_3 = \frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a3}} \cdot h_1 + \frac{\dot{m}_{a2}}{\dot{m}_{a3}} \cdot h_2 = 0,35 \cdot 29,5 + 0,65 \cdot 72,5 = 57,5 \text{ kJ/kg}_a$$

com W_3 e h_3 encontra-se as demais propriedades através da carta psicrométrica ou tabelas termodinâmicas do ar, a saber:

$$t_{bs3} = 30^\circ\text{C}$$

$$t_{bu3} = 20^\circ\text{C}$$

1.3.6. Processo de Resfriamento Evaporativo do Ar

Muito comum em problemas e situações de condicionamento do ar para produção intensiva de animais e plantas, o resfriamento evaporativo é um caso

particular do processo de umidificação descrito anteriormente. Por ser um processo relativamente barato e de eficiência média para boa, tem sido muito usado na Engenharia Agrícola.

Neste processo, que ocorre adiabaticamente, a água é injetada na temperatura de bulbo úmido do ar e o processo segue a linha de temperatura constante de bulbo úmido, a redução da temperatura inicial de bulbo seco acontece devido a evaporação da água, que para ocorrer “rouba” calor do ar, atingindo, este, um valor menor ao final do processo, sem, todavia, a necessidade de um equipamento para retirar este calor, além do sistema de ventilação e umidificação do ar.

A eficiência psicrométrica deste processo esta diretamente ligada à umidade relativa, pois quanto menor a umidade relativa melhor a eficiência do processo, pois

$$\eta_P = \frac{(T_{bs1} - T_{bs2})}{(T_{bs1} - T_{bu})} \quad (1.3.24)$$

onde

η_P = eficiência psicrométrica,

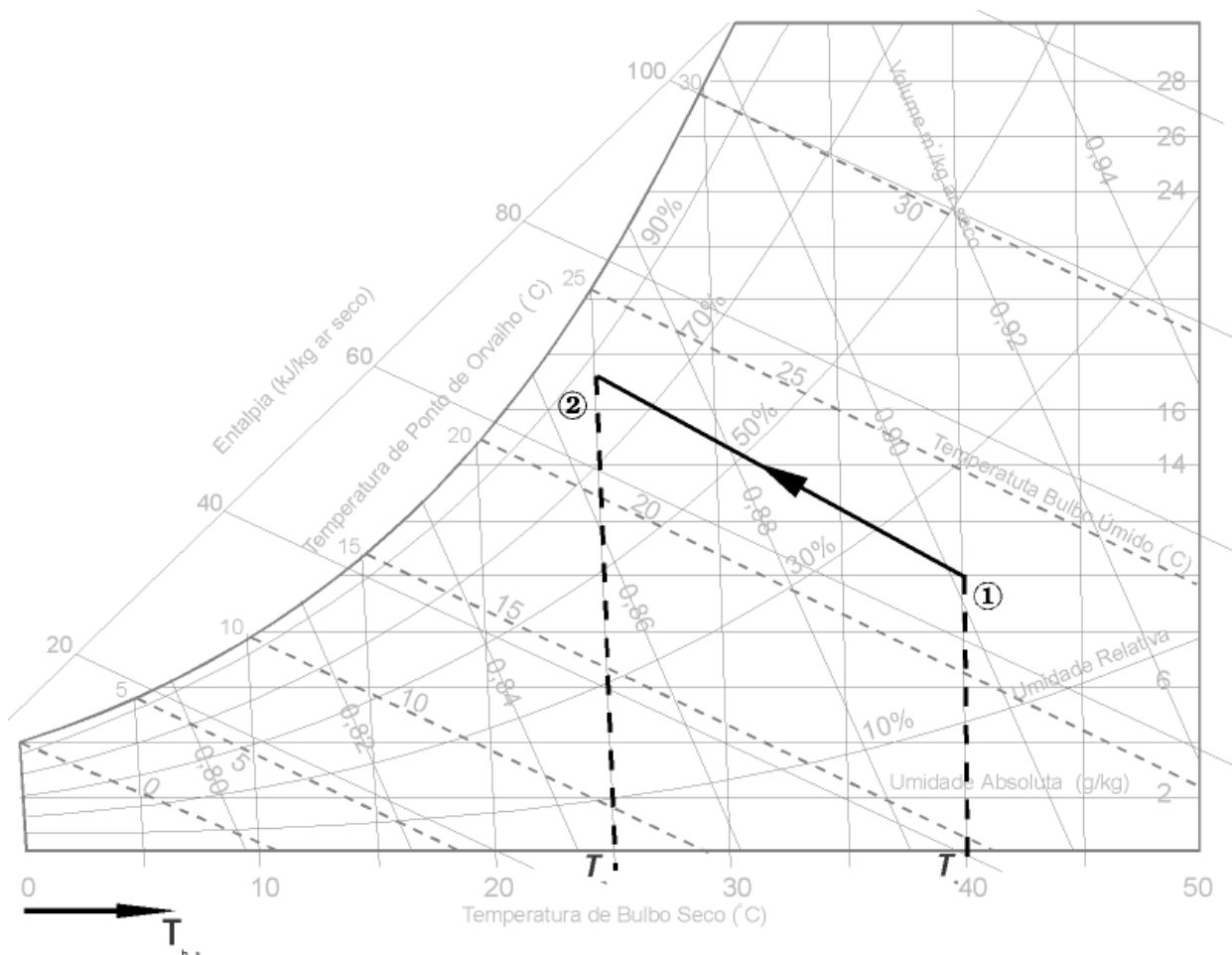


Figura 1.3.6. Esquema de um processo de resfriamento evaporativo e representação na Carta Psicrométrica.

Exemplo: Ar com $T_{bs} = 35^\circ\text{C}$ e $T_{bu} = 21^\circ\text{C}$ a um fluxo de massa de 0,28 kg/s entra em contato com um sistema de nebulização de água, que, adiabaticamente, umidifica o ar até 90%. Calcule a temperatura de bulbo seco do ar de saída, o fluxo de água adicionado, a eficiência psicrométrica do processo e o calor requerido no processo.

Como $T_{bu1} = T_{bu2} \Rightarrow h \approx \text{constante}$, logo com $\phi_2 = 0,90 \Rightarrow T_{bs2} \approx 22,2^\circ\text{C}$

$$\text{Então } \eta_p = \frac{(35 - 22)}{(35 - 21)} \approx 0,93 \text{ ou } \approx 93\%$$

Com $T_{bs1} = 35^\circ\text{C}$ e $T_{bu1} = 21^\circ\text{C} \Rightarrow W_1 = 0,00975 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$ e

com $T_{bs2} = 22,2^\circ\text{C}$ e $T_{bu1} = 21^\circ\text{C} \Rightarrow W_2 = 0,01525 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$

logo

$$\dot{m}_v = \dot{m}_a (W_2 - W_1) = 0,28 \cdot (0,01525 - 0,00975) = 0,0015 \text{ kg}_v/\text{s}$$

e

$${}_1\dot{q}_2 = \dot{m}_a (h_2 - h_1) = 0 \rightarrow \text{pois } \Delta h = 0$$