

Módulo VIII – Princípios da Psicrometria. Bulbo Seco e Úmido. Cartas Psicrométricas.

Ar Úmido

Ar úmido significa uma mistura de ar seco (substância pura) mais vapor d'água. É assumida que essa mistura comporta-se como gás ideal então a pressão para cada um dos componentes é dado por:

$$p_a = \frac{n_a \bar{R}T}{V} = \frac{m_a \left(\frac{\bar{R}}{M_a} \right) T}{V} \quad e \quad p_v = \frac{n_v \bar{R}T}{V} = \frac{m_v \left(\frac{\bar{R}}{M_v} \right) T}{V}$$

onde n_a e n_v ; m_a e m_v ; M_a e M_v são o número de mols, a massa e a massa molecular para o ar seco e o vapor d'água, respectivamente.

Analisando as frações molares temos que:

$$p_a = y_a p \quad e \quad p_v = y_v p$$

Ar saturado é uma mistura de ar seco e vapor d'água saturada, sendo que a quantidade de vapor d'água no ar úmido varia de zero no ar seco a um máximo, que depende da pressão e temperatura.

Razão de Mistura, Umidade Relativa e Entalpia de Mistura.

Razão de mistura é definida como a razão da massa do vapor d'água e a massa de ar seco, ou expressa por meio de pressões parciais:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_v p_v V / \bar{R}T}{M_a p_a V / \bar{R}T} = \frac{M_v p_v}{M_a p_a}$$

Sendo a razão das massas moleculares aproximadamente 0,622 e $p_a = p - p_v$, temos:

$$\omega = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}$$

Umidade relativa é definida como a razão entre as frações molares do vapor d'água em uma dada amostra de ar úmido e a fração molar em uma amostra de ar úmido saturado à mesma temperatura e pressão da mistura.

$$\varphi = \frac{y_v}{y_{v,sat}} \Bigg|_{T,p} = \frac{p_v}{p_g} \Bigg|_{T,p}$$

onde p_g = é a pressão de saturação da água à temperatura da mistura.

Valores de entalpia, energia interna e entropia para ar úmido podem ser obtidos pela soma das contribuições de cada componente:

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

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

A entalpia de vapor d'água superaquecido a baixas pressões de vapor é muito próxima dos valores correspondentes de vapor saturado a uma dada temperatura, logo $h_v \approx h_g(T)$. A entalpia do ar seco, há, pode ser otida de tabelas de gás ideal apropriadas.

Já a entropia específica do vapor d'água é dada por:

$$s_v(T, p_v) = s_g(T) - R \ln \varphi$$

onde s_g é a entropia específica de vapor saturado à temperatura das tabelas de vapor e φ é a umidade relativa.

Diferentemente do que estamos estudando até agora, mistura de gases ideais, muitos sistemas em interesse são constituídos por uma mistura de ar seco e vapor d'água em contato com uma fase líquida, ou sólida, de água. Esses sistemas são mais complexos, mas podem ser descritos com algumas idealizações:

- Ar seco e vapor d'água comportam-se como gases ideais independentes.
- O equilíbrio entre as fases líquida e de vapor d'água não significativamente alterado pela presença de ar.
- A pressão parcial do vapor d'água é igual à pressão de saturação da água correspondente à temperatura da mistura.

Ponto de Orvalho

Quando a temperatura do vapor d'água é diminuída, ocorrer a condensação parcial desse vapor. Exemplo, condensação do orvalho sobre a grama, e de vapor em vidros de janelas e tubos. Portanto o ponto de orvalho é subsequente a diminuição da temperatura quando o vapor encontra-se no estado de vapor saturado.

Podemos determinar a razão de mistura ω (ar-vapor d'água) conhecendo três propriedades: pressão, temperatura e temperatura de saturação adiabática (T_{sa}).

$$\omega = \frac{h_a(T_{sa}) - h_a(T) + \omega' [h_g(T_{sa}) - h_f(T_{sa})]}{h_g(T) - h_f(T_{sa})}$$

onde h_f e h_g são as entalpias da água líquida saturada e do vapor d'água saturado, respectivamente, h_a é a entalpia do ar seco que pode ser obtido nas tabelas de gás ideal ou pela equação:

$$h_a(T_{sa}) - h_a(T) = c_{pa}(T_{sa} - T)$$

onde c_{pa} é uma constante adequada para o calor específico de ar seco. Já ω' é dado por:

$$\omega' = 0,622 \frac{p_g(T_{sa})}{p - p_g(T_{sa})}$$

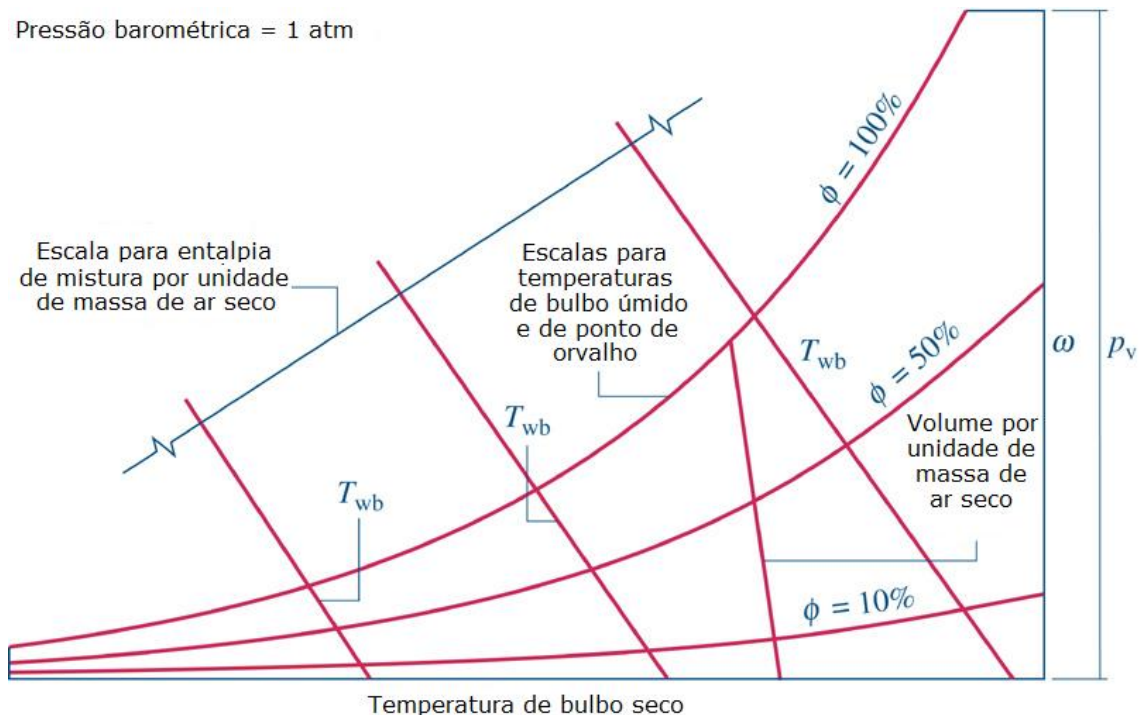
onde $p_g(T_{sa})$ é a pressão de saturação à temperatura de saturação adiabática e p é a pressão da mistura.

Medições das Temperaturas de Bulbo Úmido e de Bulbo Seco

A temperatura de bulbo úmido é lida de um termômetro de bulbo úmido, isto é, um termômetro usual. Já temperatura de bulbo seco é a temperatura que seria medida por um termômetro posicionado na mistura. O equipamento que tem a montagem desses dois termômetros juntos é chamado de psicrômetro.

Cartas Psicrométricas

São gráficos que apresentam várias propriedades importantes de ar úmido. Algumas propriedades importantes dessas cartas são mostradas na figura a seguir e discutidas.



- A abscissa encontra-se a temperatura de bulbo seco e na ordenada a razão de mistura.
- A pressão de vapor também pode ser mostrada sobre a ordenada, como se vê.

- As curvas de umidade relativa constante são mostradas em cartas psicrométricas ($\phi = 100\%$, 50% e 10% são evidenciadas). Como o ponto de orvalho é o estado em que a mistura se torna saturada quando esfriada a pressão de vapor constante, pode-se determinar a temperatura de ponto de orvalho correspondente a um dado estado de ar úmido. Ao seguir-se a linha de ω constante até a linha de saturação, $\phi = 100\%$. A temperatura do ponto de orvalho e a temperatura de bulbo seco são idênticas para estados sobre a curva de saturação.
- Cartas psicrométricas também fornecem valores de entalpia da mistura por unidade de massa de ar seco na mistura: $h_a + \omega h_v$.
- Outro parâmetro importante fornecido é a temperatura de bulbo úmido.
- As linhas isotérmicas de bulbo úmido são aproximadamente linhas isentálpicas de mistura por unidade de massa de ar seco, sendo que algumas cartas são desenhadas para mostrar o afastamento entre as linhas isotérmicas de bulbo úmido e as linhas isentálpicas de mistura.
- Essas cartas também apresentam linhas que representam o volume por unidade de massa de ar seco.

Exercícios Resolvidos

- 1) Uma amostra de ar úmido de 1 lbm, inicialmente a 70°F , $14,7 \text{ lbf/in}^2$ e 70% de umidade relativa é resfriada a 40°F enquanto se mantém a pressão constante. Determine:
 - a) a razão de mistura inicial,
 - b) a temperatura de ponto de orvalho, em $^\circ\text{F}$, e
 - c) a quantidade de vapor d'água que se condensa, em lbm.

Resolução:

a)

Da tabela de água saturada $p_g = 0,363 \text{ lbf/in}^2$

$$p_{v1} = \phi p_g = (0,7)0,363 = 0,2541 \text{ lbf/in}^2$$

$$\omega' = 0,622 \frac{p_g(T_{sa})}{p - p_g(T_{sa})} = 0,622 \frac{0,2541}{14,7 - 0,2541} = 0,011 \frac{\text{lb(vapor)}}{\text{lb(ar seco)}}$$

b)

A temperatura do ponto de orvalho é a temperatura de saturação à pressão parcial p_{v1} , que interpolando da tabela é: $T = 60^\circ\text{F}$

c)

Quantidade de condensado

$$m_w = m_{v1} - m_{v2}$$

Para estimar m_{v1} , temos:

$$m_{amostra} = m_a + m_{v1}$$

$$m_{amostra} = \frac{m_{v1}}{\omega_1} + m_{v1}$$

$$m_{v1} = \frac{m_{amostra}}{\left(\frac{1}{\omega_1}\right) + 1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,011}\right) + 1} = 0,0109 \text{ lb (vapor)}$$

$$m_{amostra} = m_a + m_{v1} \rightarrow m_a = 1 - 0,0109 = 0,9891 \text{ lbm (ar seco)}$$

Para estimar m_{v2} , a pressão parcial do vapor d'água restante no sistema no estado final é a pressão de saturação correspondente a 40°F , sendo da tabela $p_g = 0,122 \text{ lbf/in}^2$.

$$\omega_2 = 0,622 \frac{0,122}{14,7 - 0,122} = 0,0052 \frac{\text{lb(vapor)}}{\text{lb(ar seco)}}$$

$$m_{v2} = \omega_2 m_a = 0,0052(0,9891) = 0,0051 \text{ lb (vapor)}$$

$$m_w = 0,0109 - 0,0051 = 0,0058 \text{ lb (condensado)}$$

2) Uma mistura de ar-vapor d'água está contida em um reservatório de pressão fechado e rígido, com um volume de 35 m^3 a $0,15 \text{ MPa}$, 120°C e $\phi = 10\%$. A mistura é resfriada até que sua temperatura seja reduzida a 22°C . Determine a transferência de calor durante o processo.

Resolução:

$$\Delta U = Q - W$$

Sendo $W = 0$ temos que:

$$Q = U_2 - U_1$$

$$U_1 = m_a u_{a1} + m_{v1} u_{v1} = m_a u_{a1} + m_{v1} u_{g1}$$

$$U_2 = m_a u_{a2} + m_{v2} u_{v2} = m_a u_{a2} + m_{v2} u_{g2} + m_{w2} u_{f2}$$

Onde os índices a, u e w indicam ar seco, vapor d'água e água líquida respectivamente.

$$Q = m_a(u_{a2} - u_{a1}) + m_{v2}u_{g2} + m_{w2}u_{f2} - m_{v1}u_{g1}$$

$$p_{v1} = \varphi_1 p_{g1} = (0,10)198,5 = 19,85 \text{ kPa}$$

$$m_a = \frac{p_{a1} \vartheta}{\left(\frac{\bar{R}}{M_a}\right) T_1} = \frac{[(1,5 - 0,1985) \times 10^5 \text{ N/m}^2](35 \text{ m}^3)}{\left(\frac{8314}{2897} \text{ Nm/kgK}\right) 393 \text{ K}} = 40,389 \text{ kg}$$

$$v_{v1} = \frac{\left(\frac{\bar{R}}{M_v}\right) T_1}{p_{v1}} = \frac{\left(\frac{8314}{18} \text{ Nm/kgK}\right) 393 \text{ K}}{0,1985 \times 10^5 \text{ N/m}^2} = 9,145 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$m_{v1} = \frac{\vartheta}{v_{v1}} = \frac{35}{9,145} = 3,827 \text{ kg}$$

$$x_2 = \frac{u_{v2} - u_{f2}}{u_{g2} - u_{f2}} = \frac{0,145 - 0,0010022}{51,447 - 0,0010022} = 0,178$$

$$m_{v2} = (0,178)3,827 = 0,681 \text{ kg}$$

$$m_{w2} = m_{v1} - m_{v2} = 3,827 - 0,681 = 3,146 \text{ kg}$$

Pegando os valores da energia interna nas tabelas de ar seco e água, temos:

$$Q = m_a(u_{a2} - u_{a1}) + m_{v2}u_{g2} + m_{w2}u_{f2} - m_{v1}u_{g1}$$

$$Q = 40,389(210,49 - 281,1) + 0,681(2405,7) + 3,146(92,32) - 3,827(2529,3)$$

$$Q = -10603 \text{ kJ}$$