

Introdução à Psicrometria

Parte1

Introdução

- Estudo de sistemas envolvendo ar seco e água
 - Ar seco + vapor d'água (+ eventualmente condensado)
- Importante na análise de diversos sistemas
 - Ar condicionado
 - Torres de resfriamento
 - Controle de umidade,
 - Etc.

Mistura de gases e princípios psicrométricos

- Pressão de mistura e pressões parciais
 - Ar é uma mistura de gases que se comporta como gás perfeito em uma ampla faixa de T e P
 - Ar seco: quando não há vapor d'água
 - Ar úmido: quando há vapor d'água no ar
 - À $P=1\text{atm}$:
 - Ar seco é gás perfeito
 - Vapor d'água também é gás perfeito
 - Por ex:
 - à $T = 20^\circ\text{C}$, $P_{\text{vap}} = 2,338 \text{ kPa}$
onde P_{vap} é a pressão de vapor da água = pressão do vapor d'água em equilíbrio termodinâmico com o ar
 - Logo, $v=RT/P_v = 57,8 \text{ m}^3/\text{kg} = v_g$ à 20°C de tabelas
 - Assim, ar úmido = mistura de gases ideais => gás ideal

Mistura de gases e princípios psicrométricos

- Estudo da mistura de gases : Modelo de Dalton
 - Gás => forças intermoleculares desprezíveis
 - Vol. Moléculas << Vol. Ocupado pelo gás
 - Moléculas podem se deslocar “livremente” por todo o volume
- Modelo Dalton
 - Cada componente se comporta como gás ideal sozinho a T e V da mistura

$$p_i = \frac{n_i \bar{R} T}{V}$$

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_j = \sum_{i=1}^j n_i$$

Relações entre P, V e T : Dalton

- Segue-se que:

$$\frac{p_i}{p} = \frac{n_i \overline{RT}/V}{n \overline{RT}/V} = \frac{n_i}{n} = y_i$$

$$p_i = y_i p$$

- Cada componente exerce uma pressão parcial P_i . Ainda:

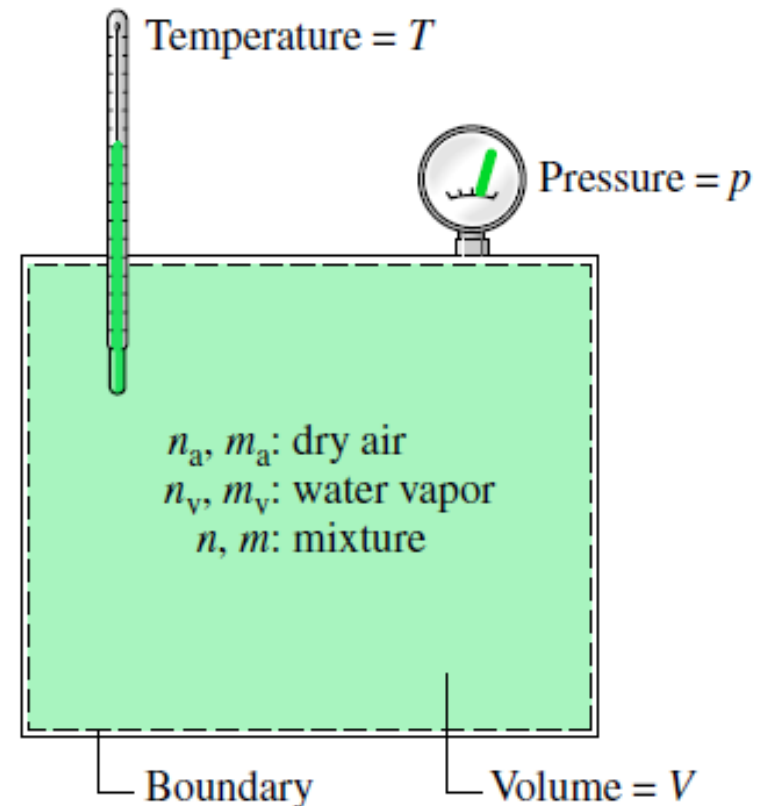
$$\sum_{i=1}^j p_i = \sum_{i=1}^j y_i p = p \sum_{i=1}^j y_i$$

$$p = \sum_{i=1}^j p_i$$

Mistura de gases ideais

- Considere uma mistura de gases ideais
- Considere que a mistura é um gás ideal com P = pressão e T = temperatura em um volume V
- Para tal mistura a Lei dos Gases Perfeitos se aplica

$$p = n \frac{\bar{RT}}{V}$$



Relações entre P, V e T : Dalton

- Assim, para uma mistura ar seco + vapor d'água:

$$p = p_a + p_v$$

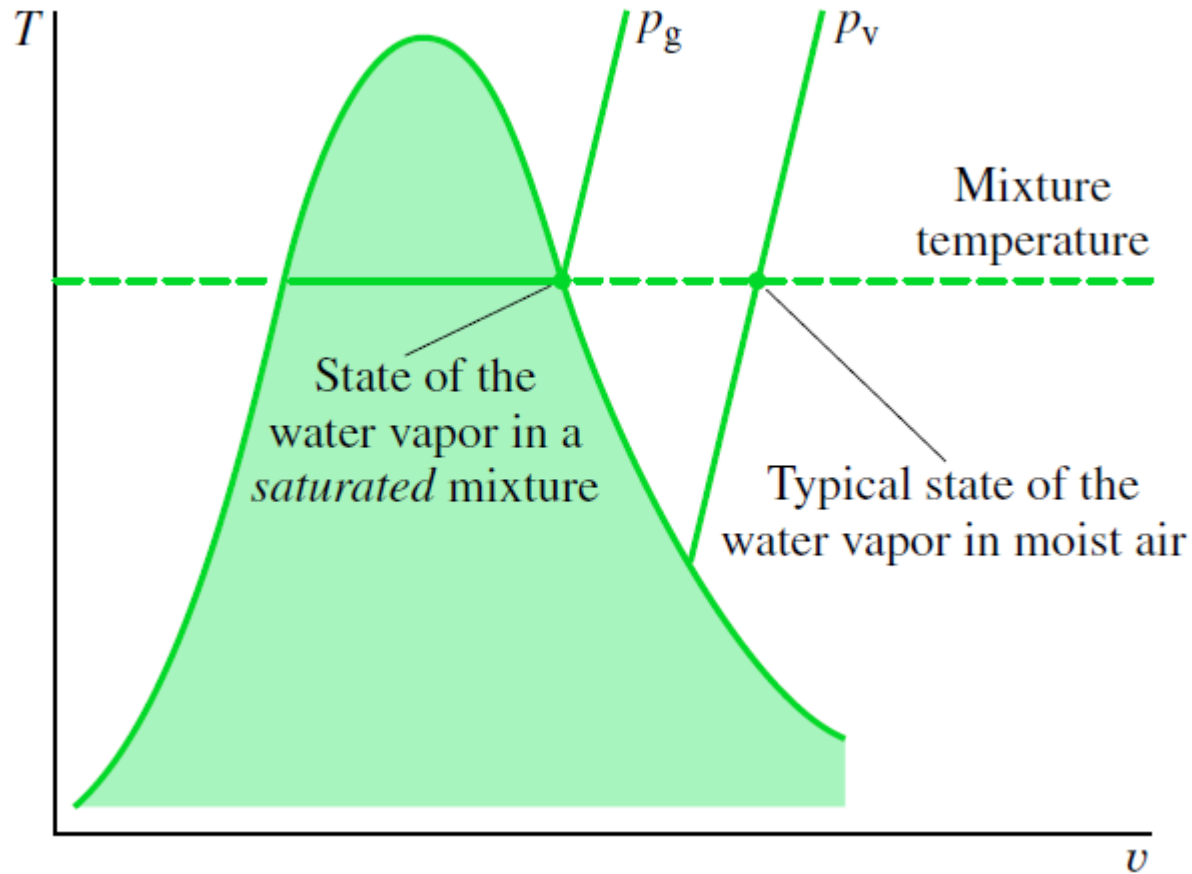
$$p_a = \frac{n_a \bar{R} T}{V} = \frac{m_a (\bar{R}/M_a) T}{V} \quad p_v = \frac{n_v \bar{R} T}{V} = \frac{m_v (\bar{R}/M_v) T}{V}$$

$$p_a = y_a P$$

$$p_v = y_v P$$

OBS: normalmente a quantidade de vapor d'água presente é muito menor que a quantidade de ar.

Estado do Vapor



Para vapor a T e $P=P_v \Rightarrow$ vapor superaquecido

Para vapor a T e $P=P_g \Rightarrow$ vapor saturado \Rightarrow ar saturado

A quantidade de vapor d'água no ar varia de zero a um valor máximo, que depende de T da mistura e da pressão parcial do vapor

Umidade relativa e razão de umidade

- Existem diversas formas de descrever o ar úmido
 - As mais comuns são a umidade relativa ϕ e a razão de umidade ω
- Umidade relativa (ou umidade):
 - Razão entre a fração molar de vapor d'água no ar úmido e a fração molar de vapor em uma amostra de ar saturado na mesma temperatura e pressão

$$\phi = \frac{y_v}{y_{v,\text{sat}}})_{T,p} \quad , \text{ ou,} \quad \phi = \frac{P_v}{P_g})_{T,p}$$

pois $P_v = y_v P$ $P_g = y_{v,\text{sat}} P$

Umidade relativa e razão de umidade

- Razão de umidade (ou umidade específica, ou razão de mistura)
 - Razão da massa de vapor d'água em relação à massa de ar seco

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

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

Onde $M_v/M_a = 0,622$ e $P_a = P - P_v$, logo:

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

Umidade relativa e razão de umidade

- Combinando as relações anteriores, é possível chegar a relações entre ϕ e ω

$$\omega = 0,622\phi \frac{P_g}{P_a}$$

$$\phi = 1,608\omega \frac{P_a}{P_g}$$

Entalpia e energia interna do ar úmido

- Para uma mistura de gases perfeitos:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_j = \sum_{i=1}^j U_i$$
$$H = H_1 + H_2 + \dots + H_j = \sum_{i=1}^j H_i$$

- Assim, para H

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

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

- E para U

$$U = m_a u_a + m_v u_v$$

$$\frac{U}{m_a} = u_a + \omega u_v$$

Entalpia e energia interna do ar úmido

- Onde h_a , u_a , h_v , u_v são avaliados a T da mistura
- OBS: para vapor d'água como gás ideal:
 - $h_v(T) \approx h_g(T)$
 - $u_v(T) \approx u_g(T)$
 - Podemos utilizar então tabelas de vapor saturado

Entropia do ar úmido

- Pode ser avaliada como:

$$\frac{S}{m_a} = s_a + \omega s_v$$

- Entretanto s_a e s_v devem ser avaliadas a T mistura e a suas respectivas pressões parciais.
- Para o vapor d'água, é possível mostrar que:

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

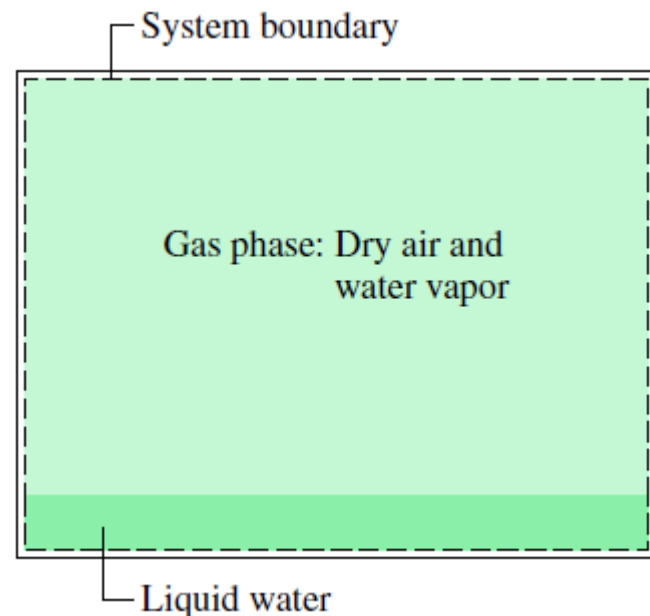
Ar úmido em equilíbrio com condensado

- Hipóteses:
 - O ar seco e o vapor d'água comportam-se como gases ideais (a P parciais e T da mistura)
 - O equilíbrio entre as fases líquida e gasosa da água não é afetado pela presença do ar seco
 - A pressão parcial do vapor d'água é igual à pressão de saturação da água na temperatura da mistura: $P_v = P_g(T)$

Neste caso:

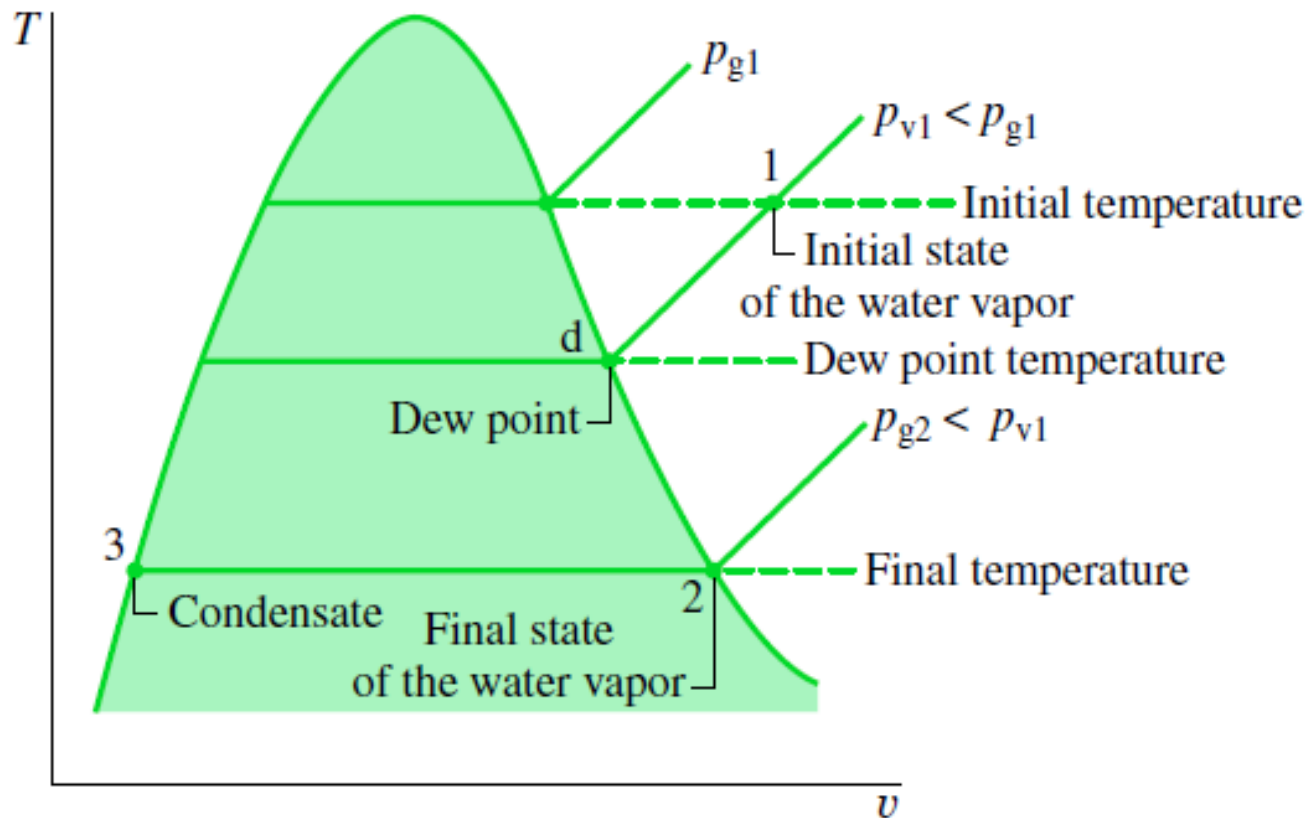
Vapor d'água = vapor saturado

Água líquida = líquido saturado



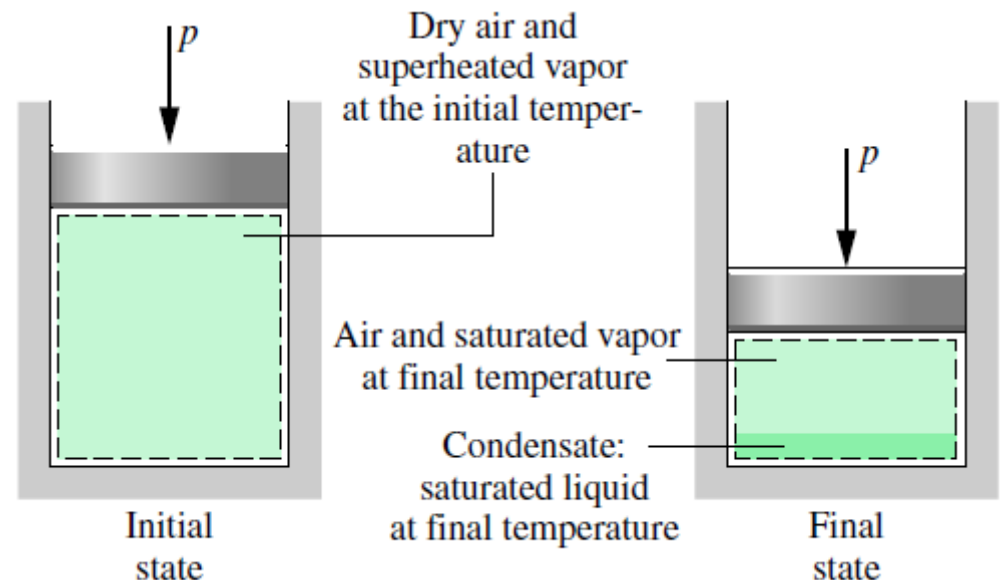
Ponto de orvalho

- Temperatura T_0 na qual a condensação da água começa se ar úmido é resfriado à pressão constante
 - Processo 1 -> d na figura abaixo



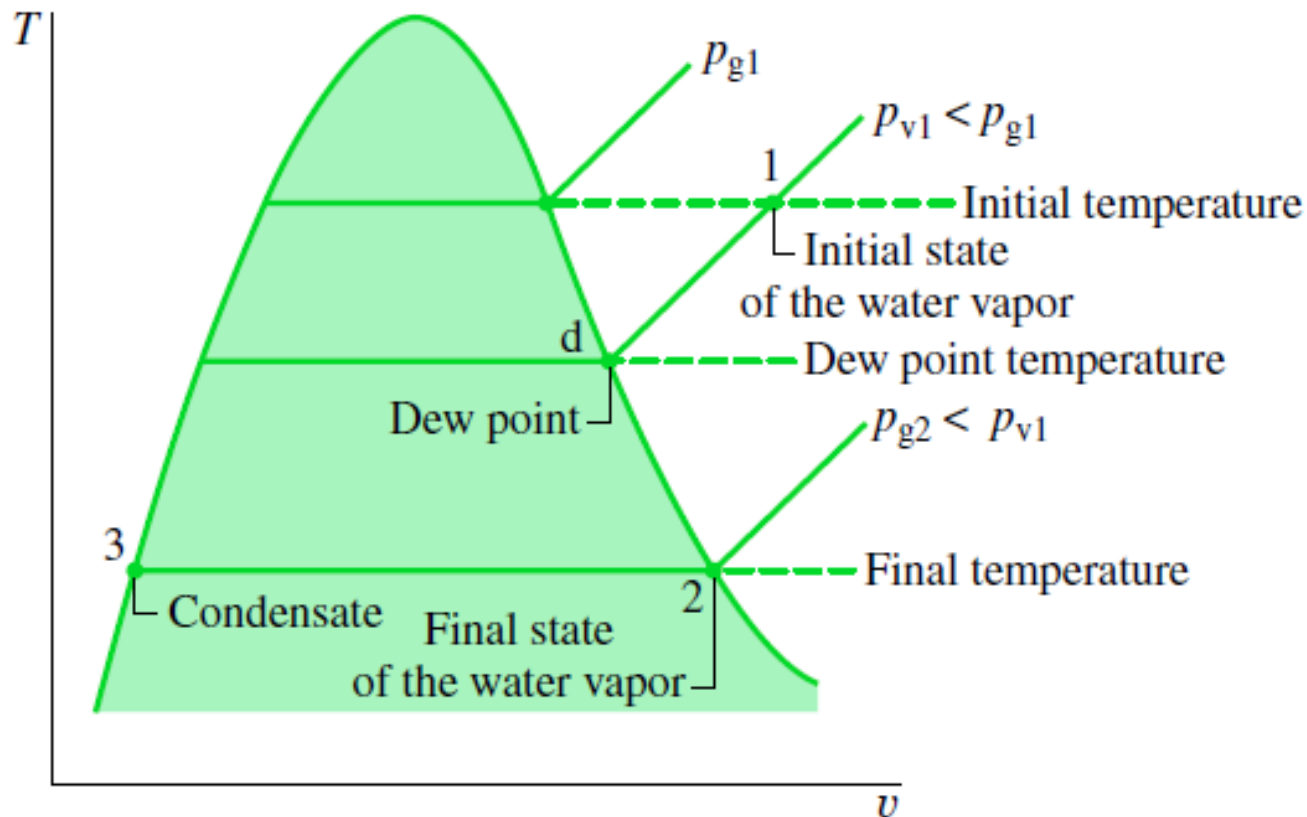
Ponto de orvalho e equilíbrio ar úmido - condensado

- Considere um SF composto de ar úmido
- Se resfriarmos o SF a $P_{\text{mistura}} = \text{CTE}$
 - $P_v = \text{cte}$ enquanto o vapor d'água for vapor superaquecido
 - Pois composição da mistura não mudou e $P_v = y_v P$
 - $T_{\text{saturação}} \text{ à } P = P_v \Rightarrow \text{Temp. pto d} = T_o$ (Temperatura de orvalho)
 - Para $T < T_o \Rightarrow$ condensação
 - Composição do gás muda
 - P_v diminuiu pois parte do vapor d'água condensou (e $P_v = y_v P$)



Ponto de orvalho e equilíbrio ar úmido - condensado

- O vapor que continuou no gás está no estado saturado, a $T = T$ final da mistura (pto. 2 no gráfico abaixo)
 - $P_{v2} = P_{g2} < P_{v1}$
- O condensado = líquido saturado a $T = T$ final da mistura (pto. 3 no gráfico abaixo)



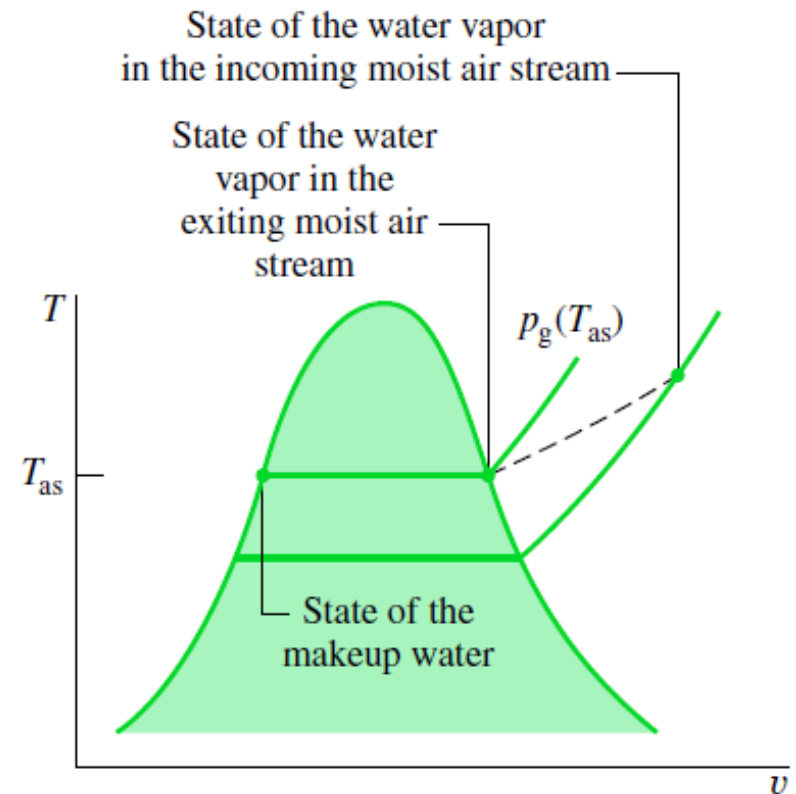
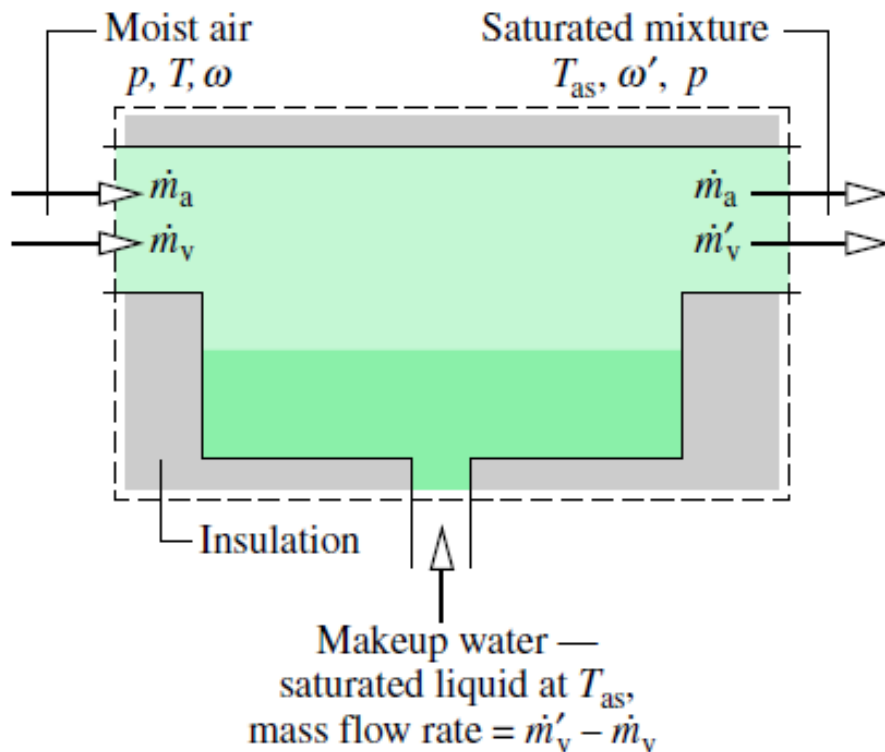
Ponto de orvalho e equilíbrio ar úmido - condensado

- Muitas aplicações termodinâmicas se encontram com este equilíbrio
- Por exemplo:
 - Serpentina do evaporador do ar condicionado
 - Superfície externa de um copo gelado...



Temperatura de saturação Adiabática (T_{as})

- T_{as} = temperatura do ar úmido ao atingir $\phi = 1$ em um processo adiabático e com adição de vapor d'água ao ar
 - Útil na determinação de umidade no ar



Determinação da umidade

- Pode ser determinada a partir de medidas de T e P
 - Para o VC anterior, em RP, com taxas de calor e trabalho nulas

$$(\dot{m}_a h_a + \dot{m}_v h_v)_{\text{moist air entering}} + [(\dot{m}'_v - \dot{m}_v) h_w]_{\text{makeup water}} = (\dot{m}_a h_a + \dot{m}'_v h_v)_{\text{moist air exiting}}$$

- Observando que:
 - $h_{v,\text{in}} = h_{g,\text{in}} = h_g(T)$
 - $h_{v,\text{out}} = h_{g,\text{out}} = h_g(T_{\text{as}})$
 - $h_{l,\text{in}} = h_l = h_f(T_{\text{as}})$
- Dividindo por \dot{m}_a

$$(h_a + \omega h_g)_{\text{moist air entering}} + [(\omega' - \omega) h_f]_{\text{makeup water}} = (h_a + \omega' h_g)_{\text{moist air exiting}}$$

$$\omega = \dot{m}_v / \dot{m}_a$$

$$\omega' = \dot{m}'_v / \dot{m}_a$$

Determinação da umidade

- Logo

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

- Onde, na saída $\phi=1$, logo

$$\omega' = 0.622 \frac{p_g(T_{as})}{p - p_g(T_{as})}$$

- E a umidade relativa pode então ser determinada de

$$\phi = 1,608 \omega \frac{P_a}{P_g}$$

- Obs: podemos fazer ainda $h_a(T_{as}) - h_a(T) = c_{pa}(T_{as} - T)$

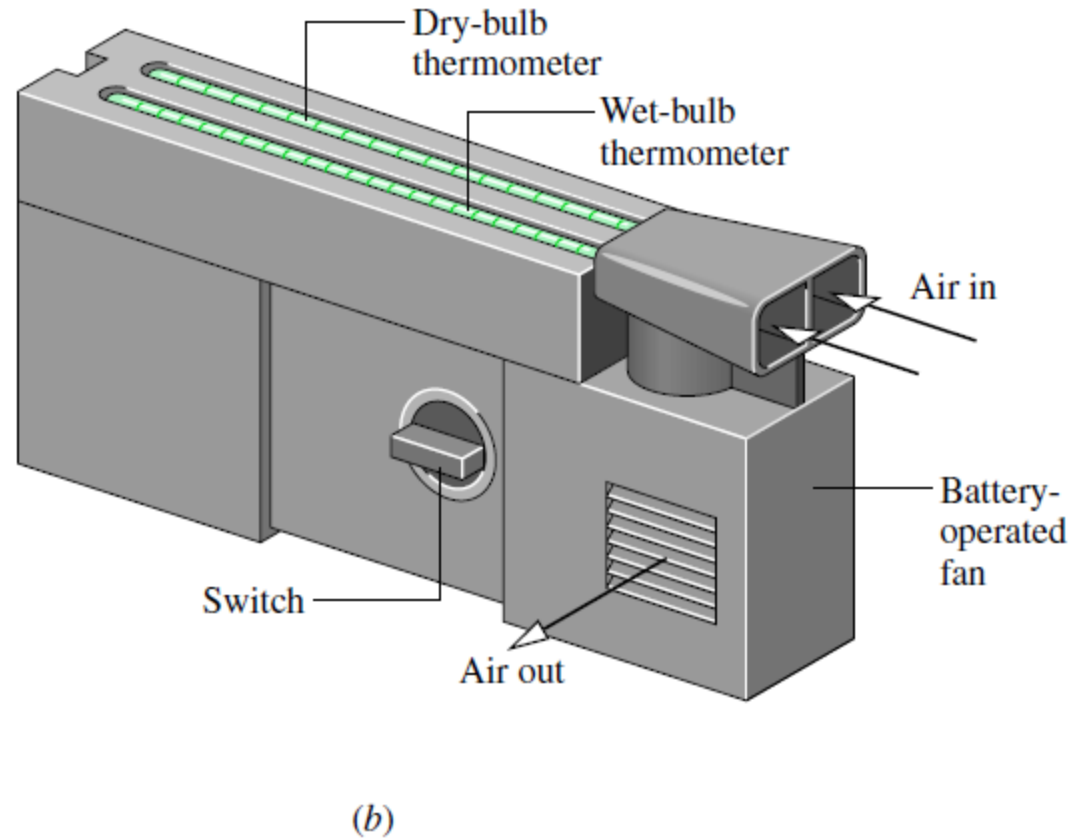
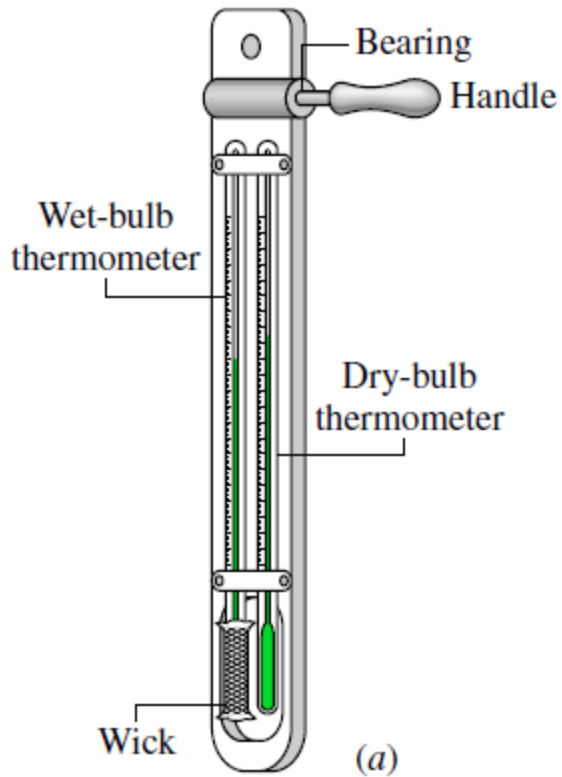
Resfriador de imersão

- OBS: um dispositivo como o da figura pode ser utilizado para resfriar uma corrente de ar
 - Funciona bem em climas secos

Temperatura de bulbo úmido T_{bu}

- Termômetro com bulbo embrulhado em tecido (pavio) saturado com água
- Faz-se passar corrente de ar pelo pavio
- Se o ar não estiver saturado:
 - Água no pavio evapora => troca de calor
 - Temperatura indicada pelo termômetro diminui => Temperatura de bulbo úmido T_{bu}
- Em condições P e T normais: $T_{bu} \approx T_{as}$
- Termômetro comum => Temperatura de bulbo seco T_{bs}
- Instrumento com T_{bs} e T_{bu} : psicrômetro
 - Permite calcular ϕ e ω pois tem-se T e $T_{as} \approx T_{bu}$

Psicrômetro



Questão

- As temperaturas de bulbo seco e úmido de uma corrente de ar a 14,7 Psia são 100°F e 80°F, respectivamente. Determine entalpia da mistura por unidade de ar seco, a razão de umidade, e a umidade relativa.

Solução

- Podemos utilizar a equação vista anteriormente, com T_{bu} no lugar de T_{as}

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

- onde
$$\omega' = 0,622 \frac{p_g(T_{as})}{p - p_g(T_{as})} = 0,622 \frac{0,5073}{14,7 - 0,5073} = 0,0222$$

- assim

$$\omega = \frac{c_{p,a}(T_{bu} - T_{bs}) + \omega' \cdot h_{lg}(T_{bu})}{h_g(T_{bs}) - h_l(T_{bu})} = \frac{0,24(80 - 100) + 0,0222 \cdot 1048}{1105 - 48,09}$$

$$\omega = 0,01747 \frac{kgH_2O}{kg \text{ ar seco}}$$

Solução

- Para a umidade relativa:

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} = 0,622 \frac{P_v}{14,7 - P_v} \Rightarrow P_v = 0,402 \text{ psia}$$

- logo

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} = 42,3\%$$

- Finalmente

$$\frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + \omega h_v = 35,6 \frac{\text{BTU}}{\text{lb ar seco}}$$

- OBS: na eq. anterior:

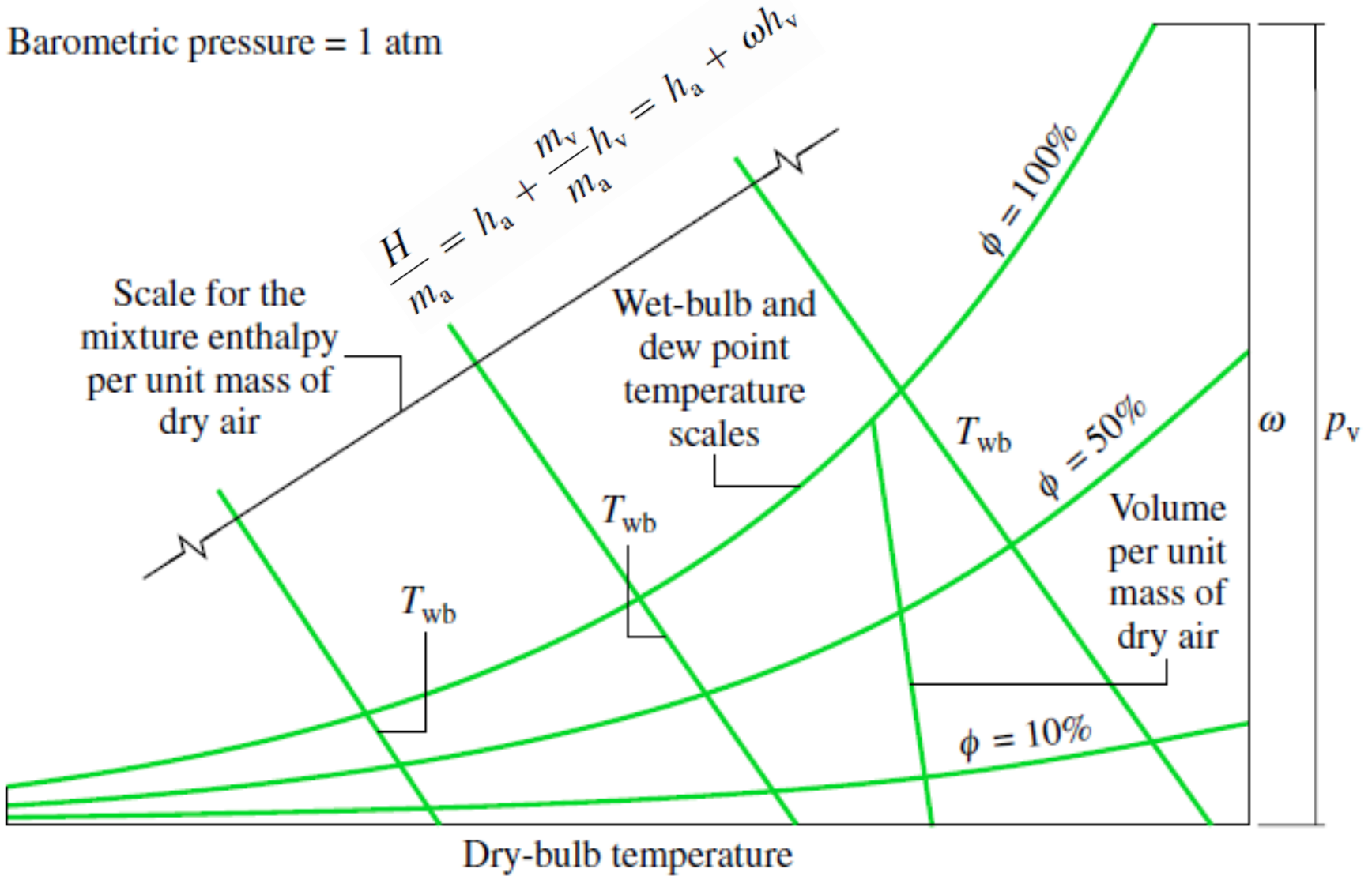
- $h_v(T) \approx h_g(T)$

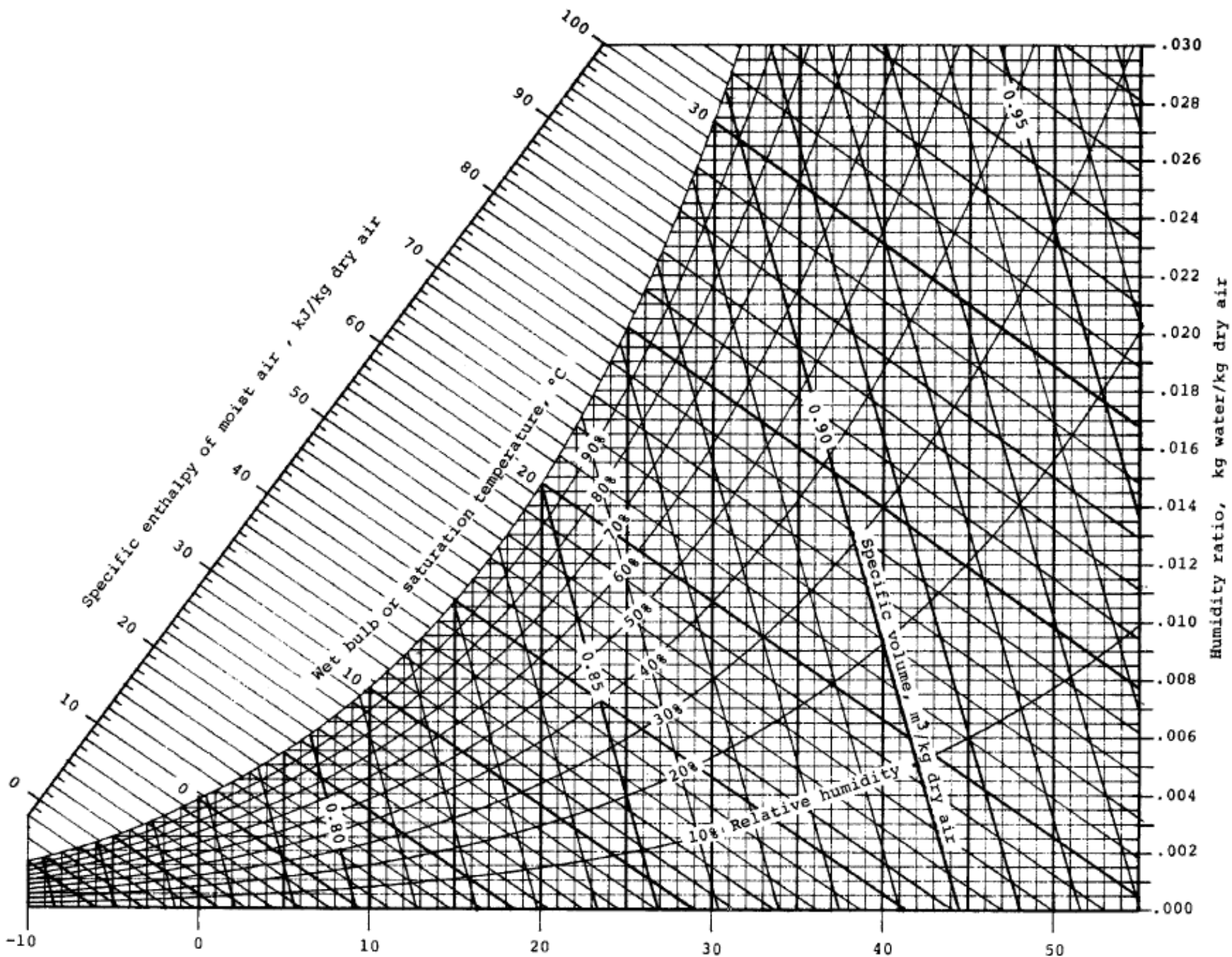
- $h_a = c_p (T_{bs} - T_{ref}) = c_p (T_{bs} - 32)$, pois a T_{ref} deve ser a mesma da tabela utilizada para o vapor d'água.

Carta psicrométrica (Fig. A-9)

- Maneira conveniente de relacionar propriedades associadas à mistura ar + vapor d'água
- Dadas 2 propriedades, lemos as outras
- Características (construção da carta)
 - Abscissa T_{bs} e ordenada ω
 - Também na ordenada: P_v
 - Obs: para encontrar T_o , basta seguir a linha $\omega = \text{cte}$ (ou $P_v = \text{cte}$) até $\phi = 1$
 - Linhas $T_{bu} = \text{cte} \Rightarrow$ equação ω
 - Linhas $h_a + \omega h_v = \text{cte}$ seguem +- linhas $T_{bu} = \text{cte}$
 - OBS: para determinação de h_a , a temperatura de referência é 273K
 - Linhas $V/m_a = \text{cte}$ são apresentadas

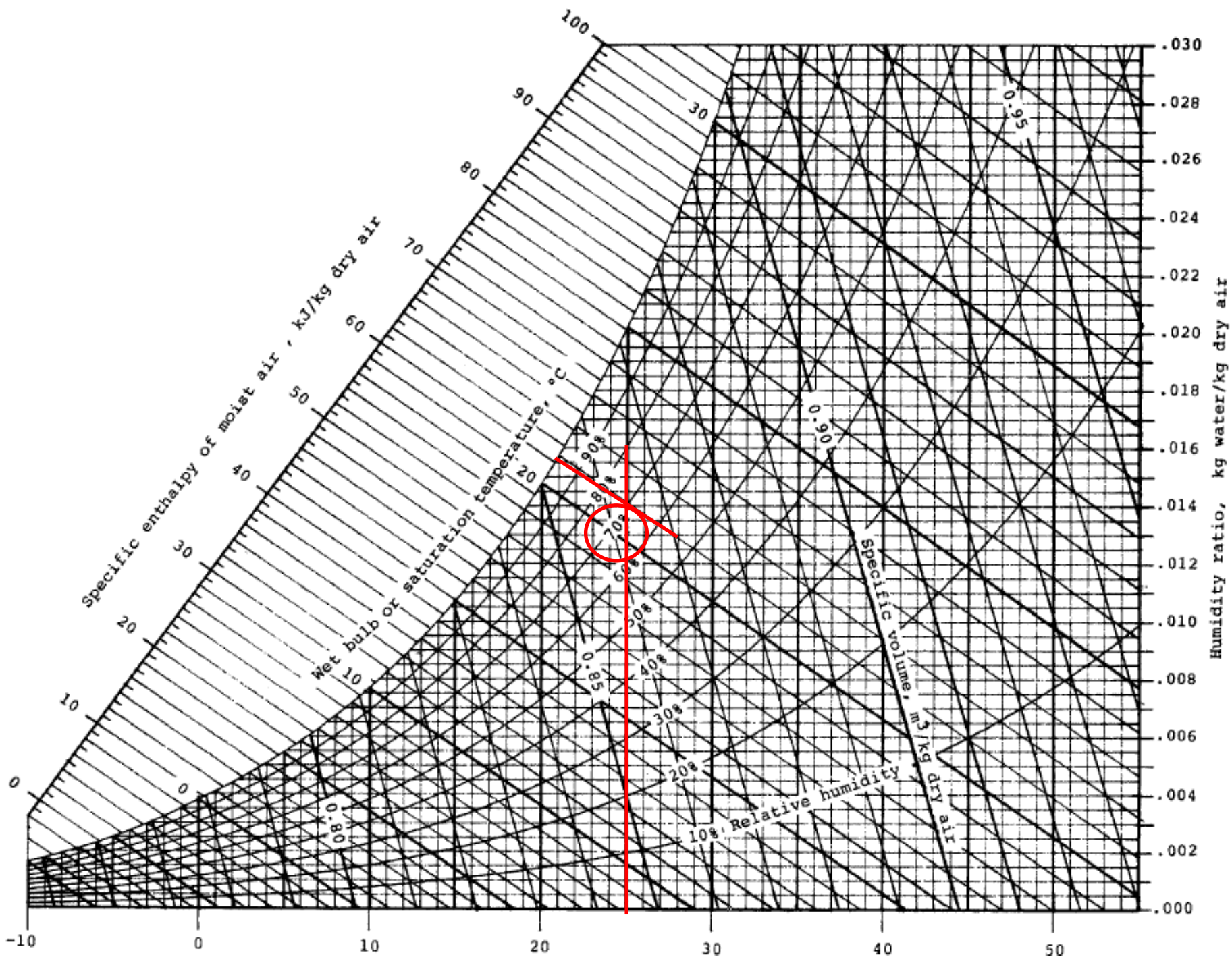
Barometric pressure = 1 atm





Questão

- Considere que as temperaturas de bulbo seco e a de bulbo úmido em um dado ambiente valem 25°C e 21°C , respectivamente. Obtenha a umidade relativa do ar neste ambiente?



Questão

- As temperaturas de bulbo seco e úmido de uma corrente de ar a 14,7 Psia são 100°F e 80°F, respectivamente. Determine entalpia da mistura por unidade de ar seco, a razão de umidade, e a umidade relativa.

