



CAPÍTULO 12 – MISTURA DE GASES IDEAIS E APLICAÇÕES À PSICROMETRIA

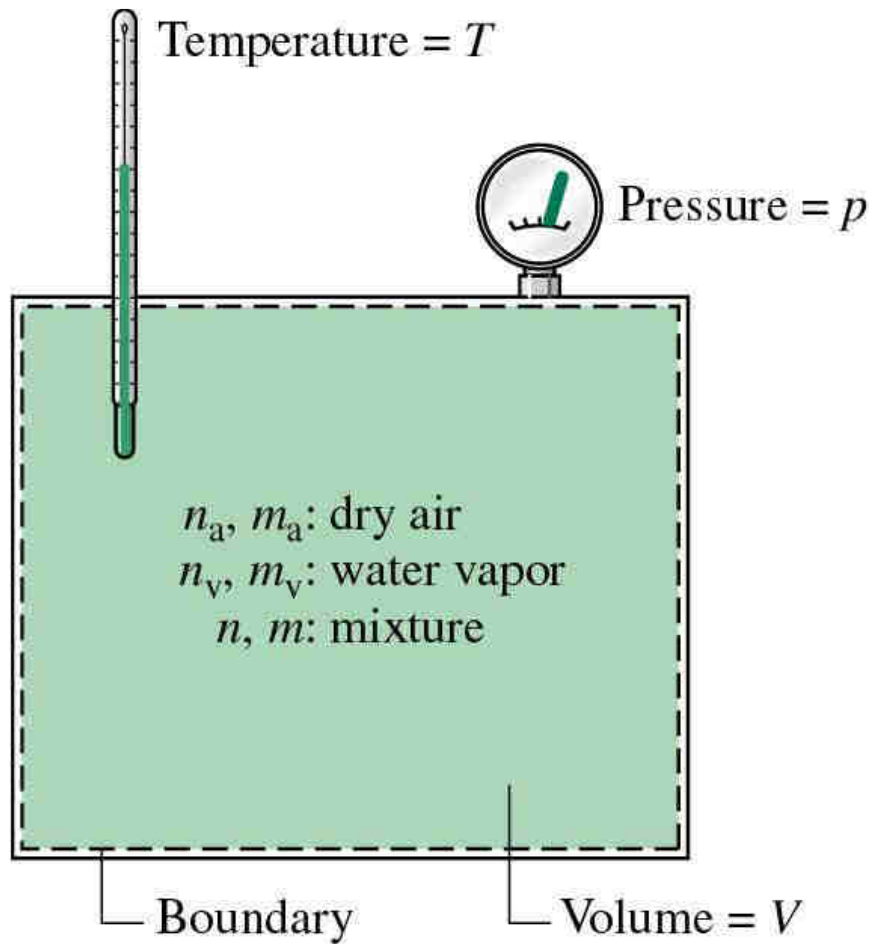
Prof. Dr. Santiago del Rio Oliveira

12.5 APRESENTANDO OS PRINCÍPIOS DA PSICROMETRIA

- Psicrometria é o estudo de sistemas que envolvem misturas de ar seco e de vapor d'água, podendo água condensada também estar presente.
- É essencial no estudo de condicionamento de ar, torres de arrefecimento, processos de secagem, etc.

12.5.1 Ar úmido

- Ar úmido é a mistura de ar seco e vapor d'água, onde o ar seco é considerado um componente puro.
- A figura abaixo mostra um sistema fechado que consiste em ar úmido ocupando um volume V à pressão de mistura p e à temperatura T . Considerando que a mistura obedece à equação do gás ideal:



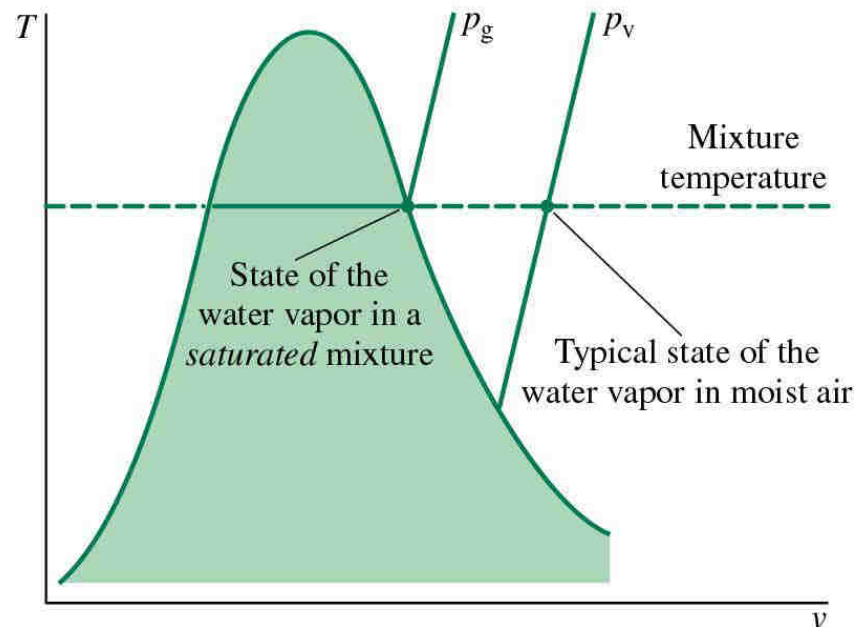
$$p = \frac{n\bar{R}T}{V} = \frac{m(\bar{R}/M)T}{V}$$

Pressão parcial do ar seco:

$$p_a = \frac{n_a\bar{R}T}{V} = \frac{m_a(\bar{R}/M_a)T}{V}$$

Pressão parcial do vapor d'água:

$$p_v = \frac{n_v\bar{R}T}{V} = \frac{m_v(\bar{R}/M_v)T}{V}$$



- A quantidade de água é **muito inferior** à quantidade de ar seco.
- Na figura ao lado, pode-se ver um estado comum de vapor d'água em ar úmido (**vapor superaquecido**).
- Quando a pressão parcial do vapor d'água é a **pressão de saturação da água na temperatura de mistura**, diz-se que a mistura é saturada.
- **Ar úmido saturado** é uma mistura de ar seco e **vapor d'água saturado**.

12.5.2 Razão de mistura, umidade relativa. entalpia de mistura e entropia de mistura

- A composição do ar úmido pode ser descrita de diversas formas: **número de mols de ar seco e de vapor d'água** ou **pelas frações molares** e pela **massa de ar seco e de vapor d'água** ou pelas **frações mássicas** ou pela **razão de mistura ω** (razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco):

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

- A razão de mistura (ou **umidade específica**) também pode ser calculada como:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\frac{p_v V}{(\bar{R}/M_v)T}}{\frac{p_a V}{(\bar{R}/M_a)T}} = \frac{p_v V}{(\bar{R}/M_v)T} \frac{(\bar{R}/M_a)T}{p_a V} = \frac{p_v M_v}{p_a M_a} = \frac{p_v (18,02)}{(p - p_v)(28,97)} = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}$$

- **Umidade relativa** ϕ é a razão entre a fração molar do vapor d'água y_v , em dada amostra de ar úmido e a fração molar $y_{v,\text{sat}}$ em uma amostra de ar úmido saturada à mesma temperatura e pressão de mistura:

$$\phi = \frac{y_v}{y_{v,\text{sat}}} \bigg)_{T,p}$$

- Como $p_v = y_v p$ e $p_{v,\text{sat}} = y_{v,\text{sat}} p$ a equação acima pode ser reescrita como:

$$\phi = \frac{p_v}{p_{v,\text{sat}}} \bigg)_{T,p}$$

- A **razão de mistura** e a **umidade relativa** podem ser medidas em laboratório utilizando um aparelho chamado de **higrômetro**.

- **Avaliando H , U e S :** são avaliados considerando os componentes da mistura:

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

- Dividindo a equação acima por m_a obtemos a **entalpia da mistura por unidade de massa de ar seco**:

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

- Para a **energia interna da mistura** a abordagem é semelhante:

$$U = U_a + U_v = m_a u_a + m_v u_v \Rightarrow \frac{U}{m_a} = \frac{m_a}{m_a} u_a + \frac{m_v}{m_a} u_v \Rightarrow \frac{U}{m_a} = u_a + \omega u_v$$

- Os valores de entalpia e energia interna específicas do vapor d'água h_v e u_v podem ser tomados como h_g e u_g na **temperatura da mistura**, ou seja:

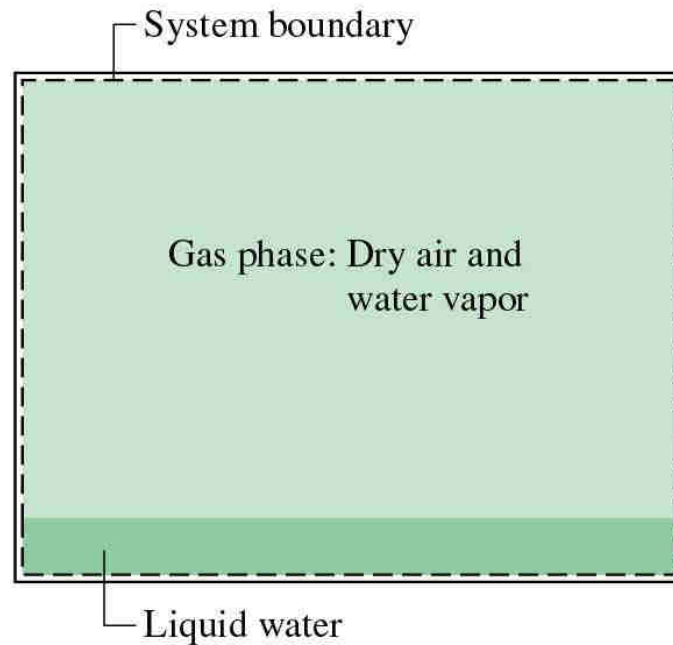
$$h_v \approx h_g(T) \quad \text{e} \quad u_v \approx u_g(T)$$

- Na entropia do ar úmido, a contribuição de cada componente é determinada na **temperatura de mistura** e na **pressão parcial do componente** na mistura:

$$s_v(T, p_v) = s_g(T) - R \ln \frac{p_v}{p_g} = s_g(T) - R \ln \phi$$

12.5.3 Modelando ar úmido em contato com água líquida

- Algumas situações de interesse são uma **mistura de ar seco e vapor d'água** (ar úmido) em **contato com água na fase líquida**.
- Às vezes, a fase líquida irá **evaporar** até que a fase gasosa se torne **saturada**.



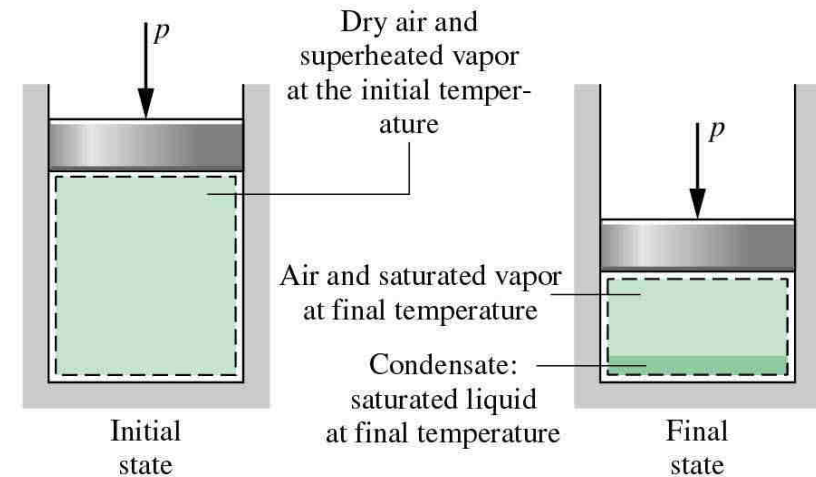
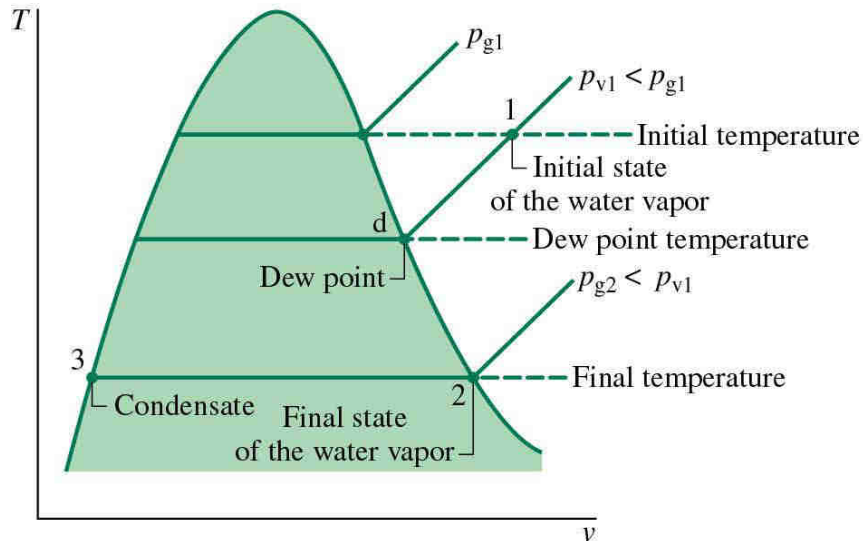
Idealizações:

- Ar seco e o vapor d'água se comportam como gases ideais independentes.
- A pressão parcial do vapor d'água é igual à pressão de saturação da água na temperatura de mistura.

12.5.4 Ponto de orvalho

- Quando a **temperatura é reduzida**, parte do **vapor d'água** contido no ar úmido pode **condensar**.
- É comum nas vidraças no inverno ou em dutos por onde escoar água fria.

- Considere o seguinte processo de resfriamento:

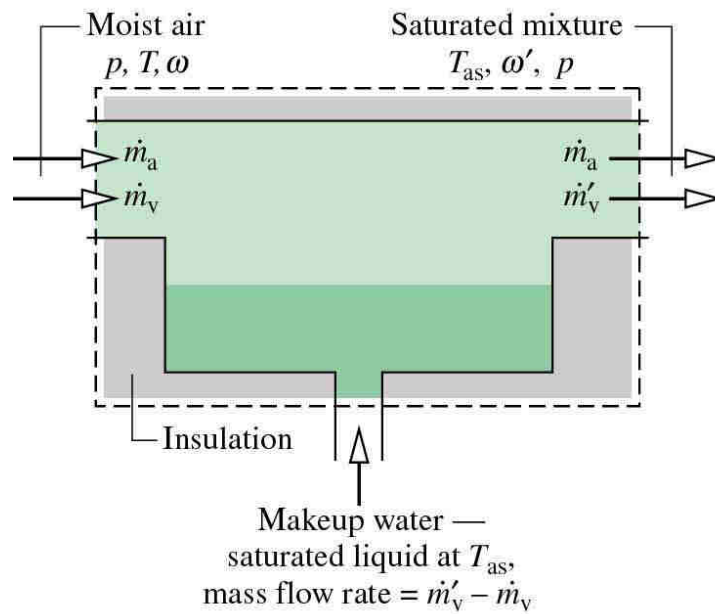


- Na etapa inicial, tanto a **pressão** quanto a **composição da mistura** permanecem constantes (estado 1 a d).
- O estado d é o **ponto de orvalho** (dew point).

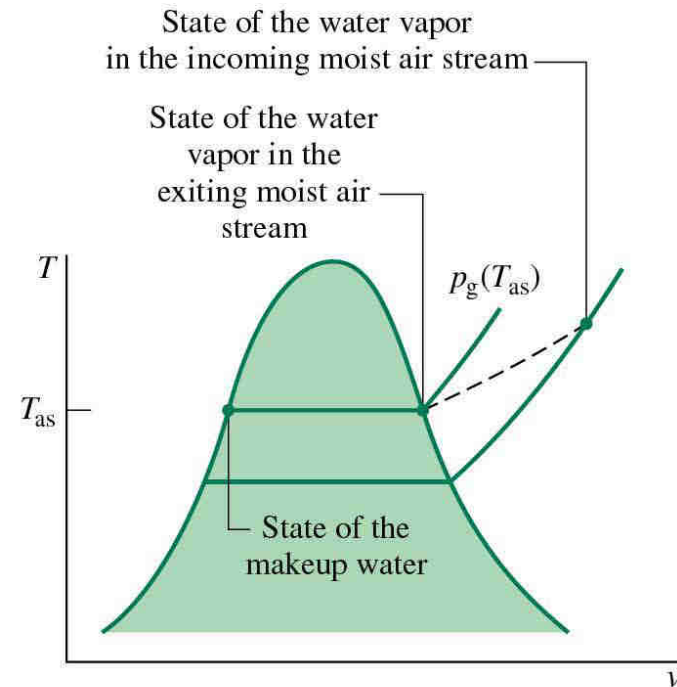
- Quando a temperatura for menor que a temperatura do ponto de orvalho uma parcela do vapor d'água condensa.
- No estado final, o sistema é composto de ar úmido e água na fase líquida.
- O vapor que permanece é considerado saturado na temperatura final com a pressão de saturação p_{g2} correspondente a essa temperatura.
- O condensado estaria como líquido saturado na temperatura final.
- A pressão parcial do vapor d'água no estado final p_{g2} é inferior ao valor inicial p_{v1} , uma vez que ocorre condensação.
- A pressão parcial diminui já que a fração molar de vapor d'água presente no estado final é inferior ao valor inicial.

12.5.5 Estimativa da umidade absoluta de mistura por meio da temperatura de saturação adiabática

- A umidade específica ω de uma mistura de ar e vapor d'água pode ser determinada a partir do conhecimento de **três propriedades**: p , T e T_{as} (temperatura de saturação adiabática).



(a)



(b)

- **Modelando um saturador adiabático:** é um equipamento com **duas entradas** e **uma saída** no qual escoar ar úmido. O dispositivo opera em **regime permanente** e com **troca de calor** com a vizinhança **desprezível**.
- Ar úmido de **umidade desconhecida** ω é admitido com p e T conhecidos.
- À medida que atravessa o equipamento, a mistura entra em contato com **água líquida** no interior do equipamento e como o **ar úmido não se encontra saturado** ($\phi < 100\%$) uma **parcela da água líquida se evapora**.
- A **temperatura do ar úmido é reduzida** à medida que o ar atravessa o duto e para um duto suficientemente longo, a mistura estará **saturada na saída** ($\phi = 100\%$).
- Como a mistura saturada seria atingida **sem troca de calor com a vizinhança**, a temperatura da mistura na descarga é a **temperatura adiabática de saturação**.

- A **vazão mássica da água de reposição** ocorre na temperatura T_{as} na taxa na qual a água líquida se evapora $(\dot{m}'_v - \dot{m}_v)$.
- **Análise:** um **balanço de massa** no equipamento fornece:

$$(\dot{m}_a)_e = (\dot{m}_a)_s = \dot{m}_a \quad \text{e} \quad (\dot{m}_v)_e + \dot{m}_w = (\dot{m}'_v)_s$$

- Um **balanço de energia** no equipamento fornece:

$$(\dot{m}_a h_a + \dot{m}_v h_v)_{\text{ar úmido entrando}} + [(\dot{m}'_v - \dot{m}_v) h_w]_{\text{água de reposição}} = (\dot{m}_a h_a + \dot{m}'_v h_v)_{\text{ar úmido saindo}}$$

- Dividindo por $\dot{m}_a$ e fazendo $\omega = \dot{m}_v / \dot{m}_a$ e $\omega' = \dot{m}'_v / \dot{m}_a$ obtém-se:

$$(h_a + \omega h_g)_{\text{ar úmido entrando}} + [(\omega' - \omega) h_f]_{\text{água de reposição}} = (h_a + \omega' h_g)_{\text{ar úmido saindo}}$$

- Na equação acima $h_v = h_g(T)$ e $h_w = h_f(T_{as})$ e ω' pode ser obtido sabendo-se que na descarga o **vapor d'água é saturado** e sua pressão parcial é a **pressão de saturação** correspondente a **temperatura de saturação adiabática**.

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

- Reescrevendo o balanço de energia:

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

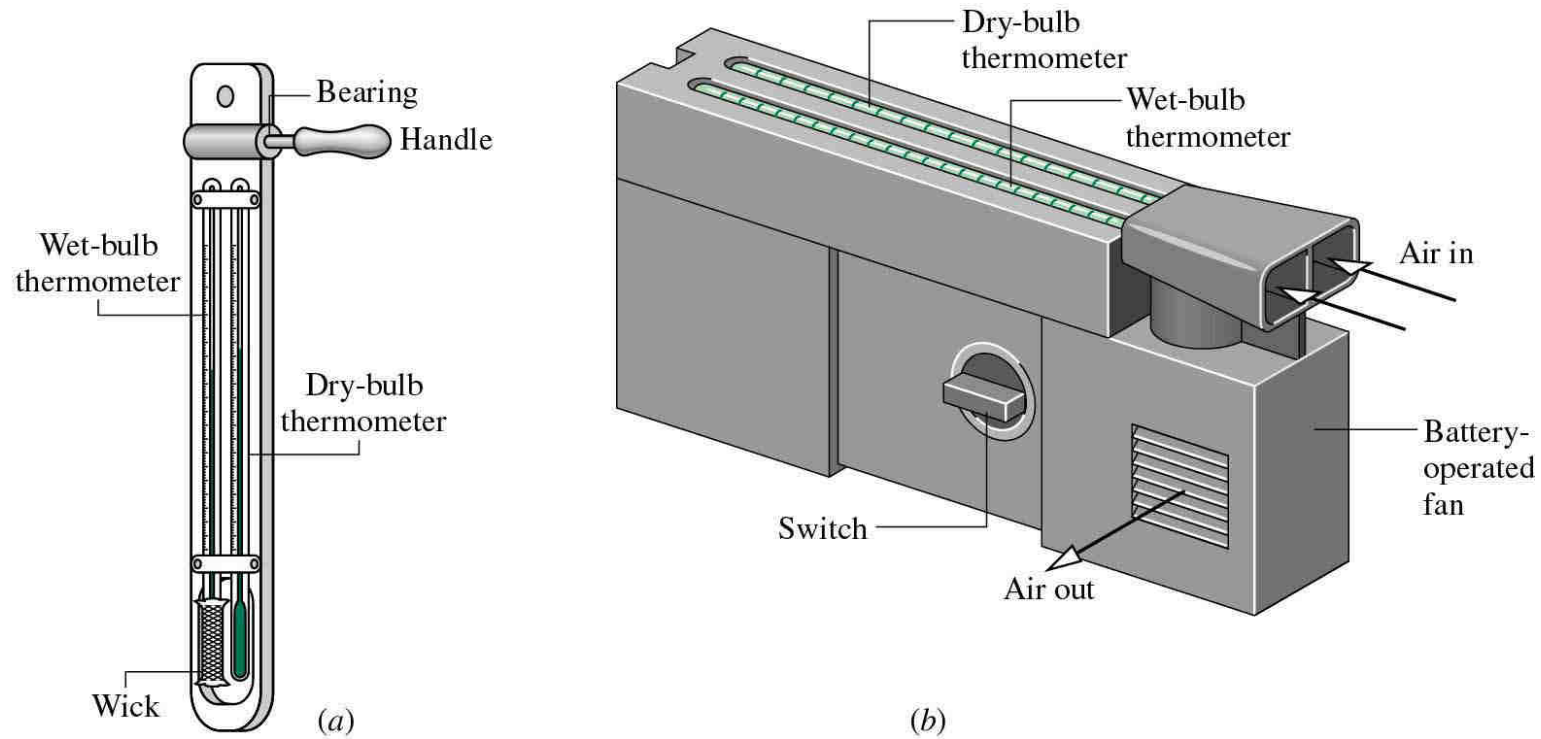
- Resolvendo para a umidade ω obtém-se:

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

12.6 PSICRÔMETROS: MEDIÇÃO DAS TEMPERATURAS DE BULBO ÚMIDO E DE BULBO SECO

- **Temperatura de bulbo úmido (TBU):** é obtida a partir de um termômetro de vidro contendo líquido cujo bulbo é colocado em uma mecha de tecido úmida (**medição da umidade relativa do ar**).
- **Temperatura de bulbo seco (TBS):** temperatura que seria medida por um termômetro colocado na mistura (**temperatura do ar ambiente**).
- Um instrumento que mede a TBU e a TBS é chamado de **psicrômetro**.
- Para misturas de vapor d'água na faixa de pressões e temperaturas do ar atmosférico, a temperatura de saturação adiabática é aproximadamente igual à temperatura de bulbo úmido. Dessa forma, $T_{bu} \approx T_{as}$ e a umidade de tais misturas pode ser calculada como:

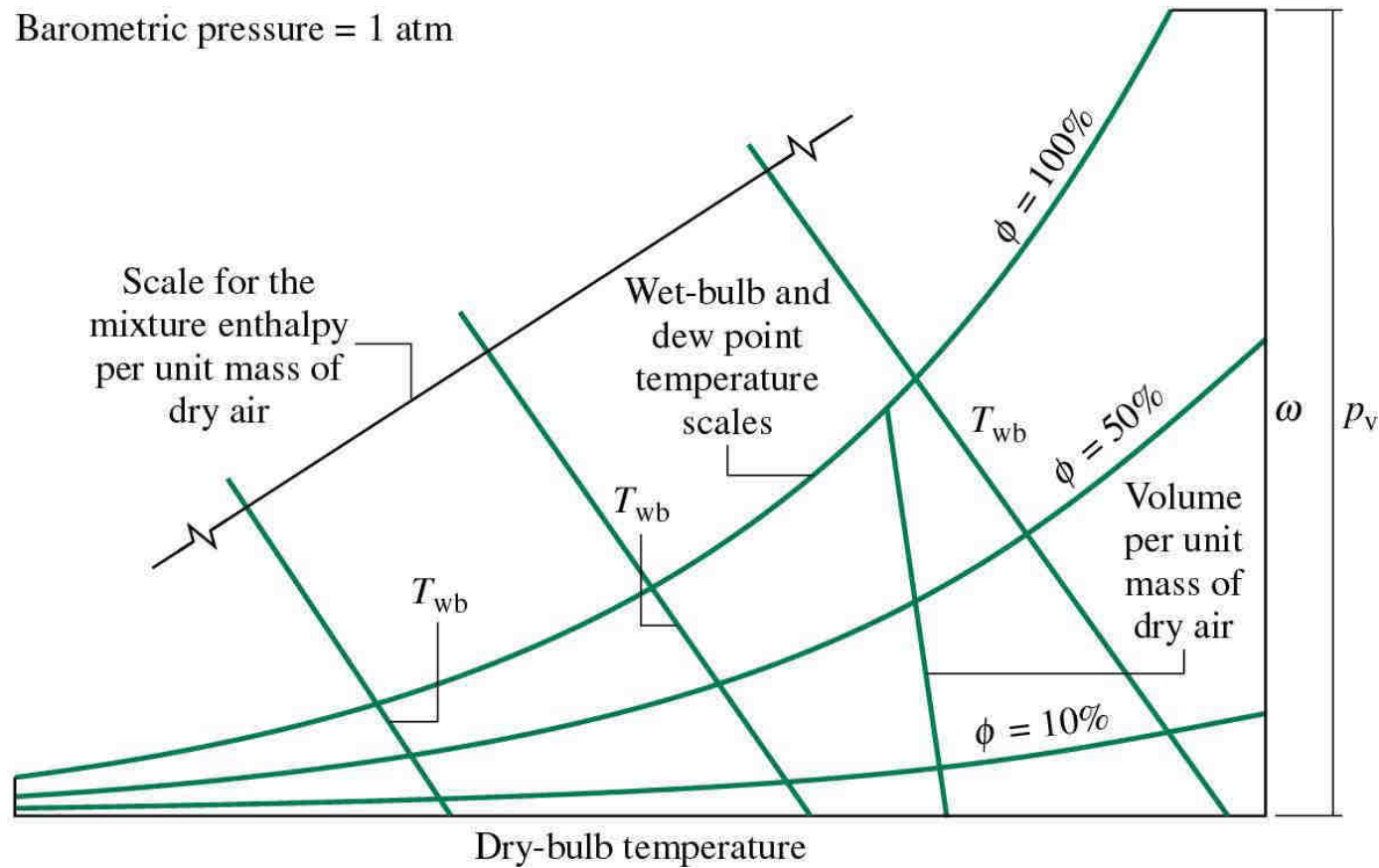
$$\omega = \frac{h_a(T_{bu}) - h_a(T) + \omega' [h_g(T_{bu}) - h_f(T_{bu})]}{h_g(T) - h_f(T_{bu})}$$



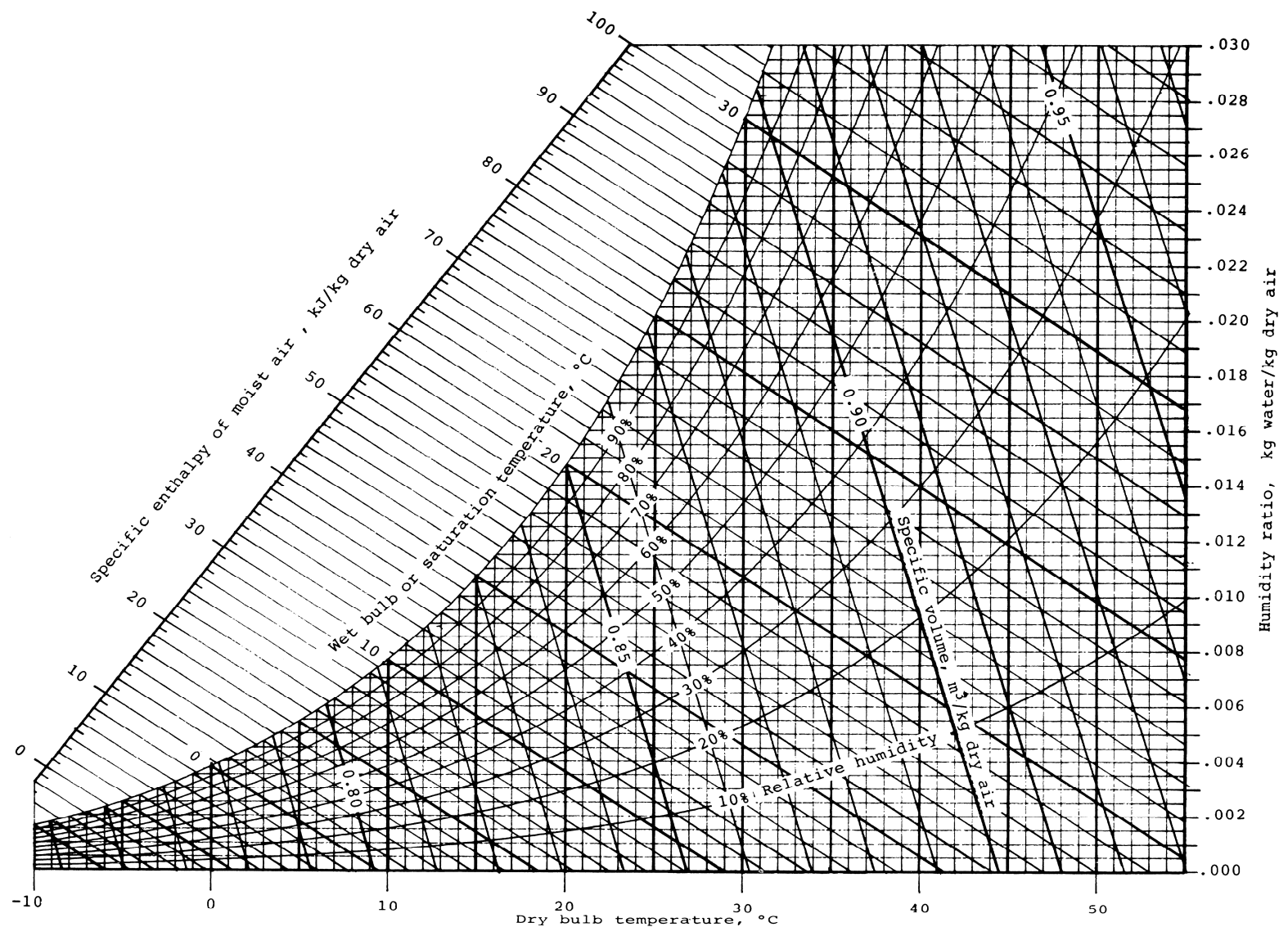
Psicrômetros. (a) Psicrômetro manual. (b) Psicrômetro mecânico.

12.7 CARTAS PSICROMÉTRICAS

- São representações gráficas de diversas propriedades do ar úmido

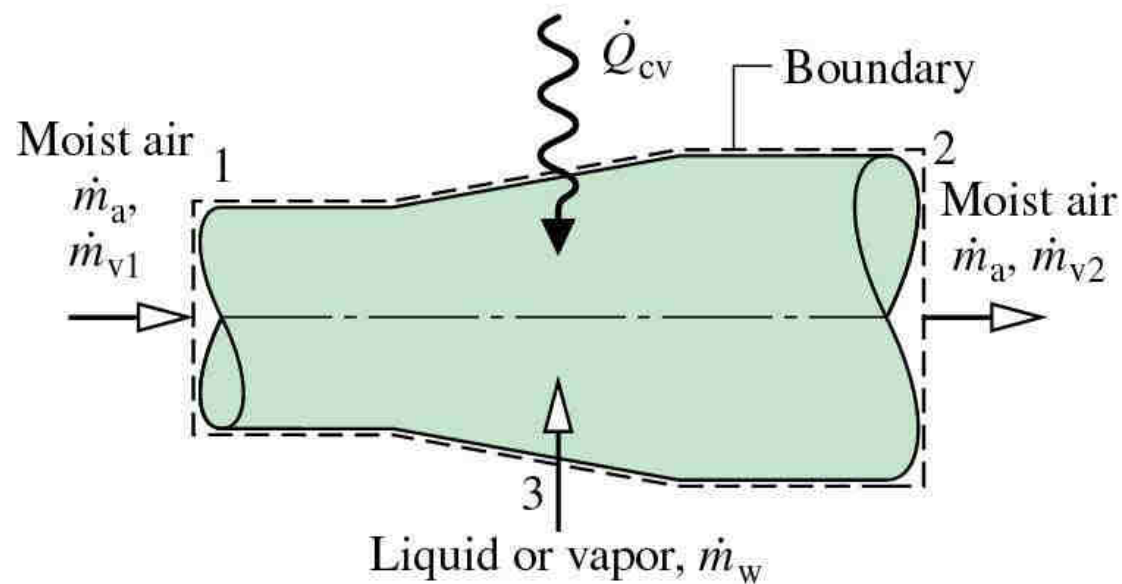


- Cartas completas podem ser vistas na **Figura A-9** do apêndice do livro-texto.
- São construídas para **pressões de mistura de 1 atm**, mas cartas para outras pressões também estão disponíveis.
- Abscissa (**temperatura de bulbo seco**); Ordenada (**umidade relativa e pressão parcial de vapor**).
- Verificar as linhas de **umidade relativa constantes**. A temperatura de orvalho correspondente a um dado estado de ar úmido pode ser determinada prolongando-se uma linha de ω constante até $\phi = 100\%$.
- Nas cartas também pode ser lido valores de **entalpia de mistura por unidade de massa de ar seco**: $h_a + \omega h_v$.
- Devem também ser verificados os valores da **temperatura de bulbo úmido e volume por unidade de massa de ar seco**.



12.8 ANÁLISE DE PROCESSOS DE CONDICIONAMENTO DE AR

12.8.1 Aplicando balanços de massa e energia aos sistemas de condicionamento de ar



- São comuns em sistemas de condicionamento de ar, tais como **aquecimento**, **resfriamento**, **umidificação** e **desumidificação**.

- No figura, ar úmido (moist air) é admitido em 1 e descarregado em 2. Somente água admitida em 3 (líquido ou vapor). Pode ocorrer ou não transferência de calor entre o volume de controle e a vizinhança.
- **Balanço de massa** – em regime permanente obtém-se:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (\text{ar seco})$$

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_w = \dot{m}_{v2} \quad (\text{vapor d'água})$$

- Sabendo que $\dot{m}_{v1} = \omega_1 \dot{m}_a$ e $\dot{m}_{v2} = \omega_2 \dot{m}_a$ obtém-se: $\dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)$
- **Balanço de energia** – fazendo $\dot{W} = 0$ e desprezando efeitos de energia cinética e potencial obtém-se:

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

- Sabendo que $h_{v1} \approx h_{g1}$, $h_{v2} \approx h_{g2}$, $\dot{m}_{v1} = \omega_1 \dot{m}_a$ e $\dot{m}_{v2} = \omega_2 \dot{m}_a$ obtém-se:

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

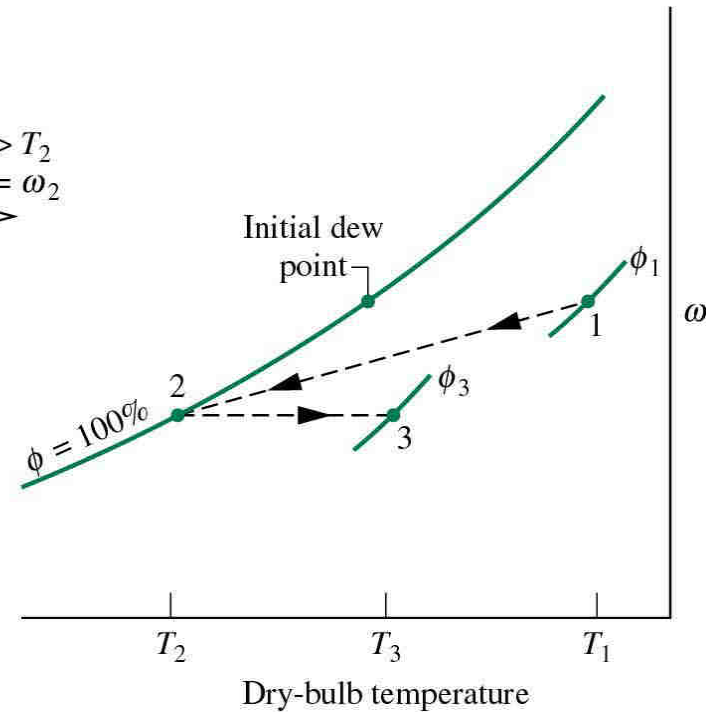
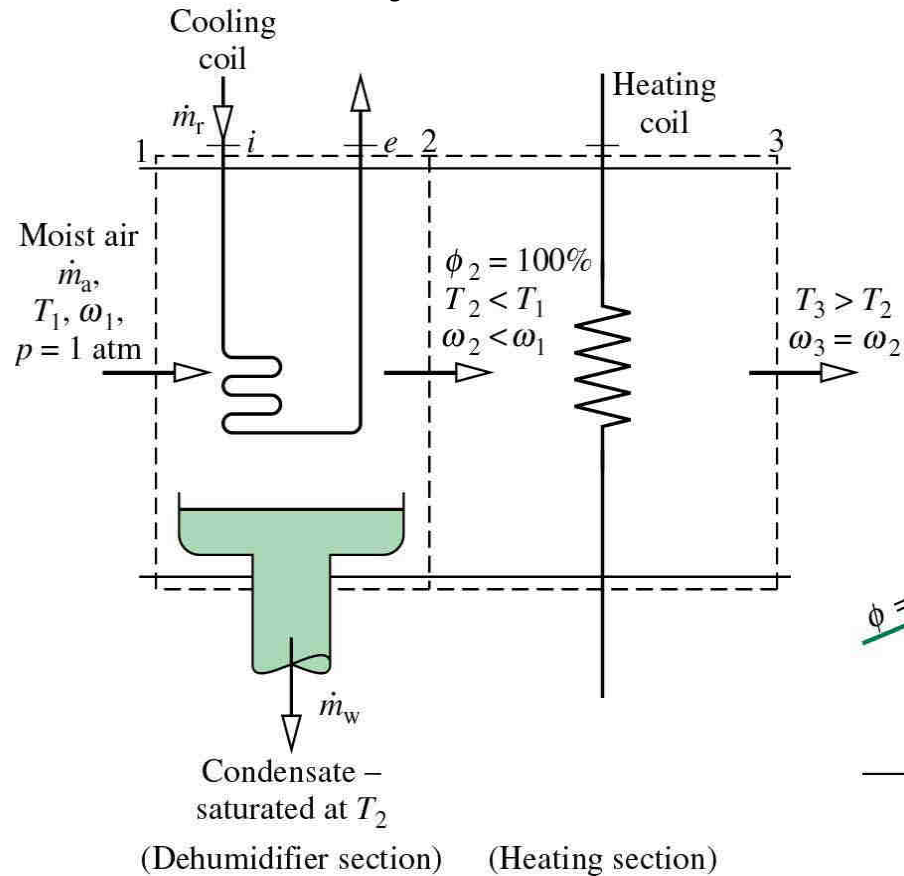
- Finalmente, sabendo que $\dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)$ obtém-se:

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

12.8.2 Condicionamento de ar úmido a composição constante

- Os sistemas de condicionamento de ar de edifícios frequentemente aquecem ou resfriam um fluxo de ar úmido sem variação na quantidade de vapor d'água presente.
- Nesses casos, a **umidade absoluta permanece constante**, enquanto a umidade relativa e outros parâmetros do ar úmido variam.

12.8.3 Desumidificação



- Ar úmido entra em um estado 1 e escoa através de uma serpentina de resfriamento no interior da qual escoa refrigerante ou água resfriada.

- Uma parcela do vapor d'água inicialmente presente na mistura condensa e ar úmido saturado deixa a seção de desumidificação no estado 2.
- A água condensada é resfriada a T_2 antes que saia do desumidificador
- Como o ar úmido que deixa o desumidificador está saturado a uma temperatura abaixo do ar úmido sendo admitido, o escoamento de ar úmido pode não ser apropriado para utilização direta em ambientes habitados.
- Isso pode ser contornado realizando a passagem desse escoamento através de uma seção de aquecimento posterior, levando a uma condição de conforto térmico.
- **Balanco de massa na seção de desumidificação:**

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \text{ (ar seco)} \qquad \dot{m}_{v1} = \dot{m}_w + \dot{m}_{v2} \text{ (água)}$$

- Resolvendo para a **vazão mássica de condensado**:

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

- Como **umidade não é adicionada ou removida** na seção de aquecimento, $\omega_3 = \omega_2$ de tal forma que:

$$\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} = \omega_1 - \omega_2 = \omega_1 - \omega_3$$

- **Balanco de energia na seção de desumidificação:**

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

- Utilizando $\dot{m}_{v1} = \omega_1 \dot{m}_a$, $\dot{m}_{v2} = \omega_2 \dot{m}_a$ e $\dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_1 - \omega_2)$ obtém-se:

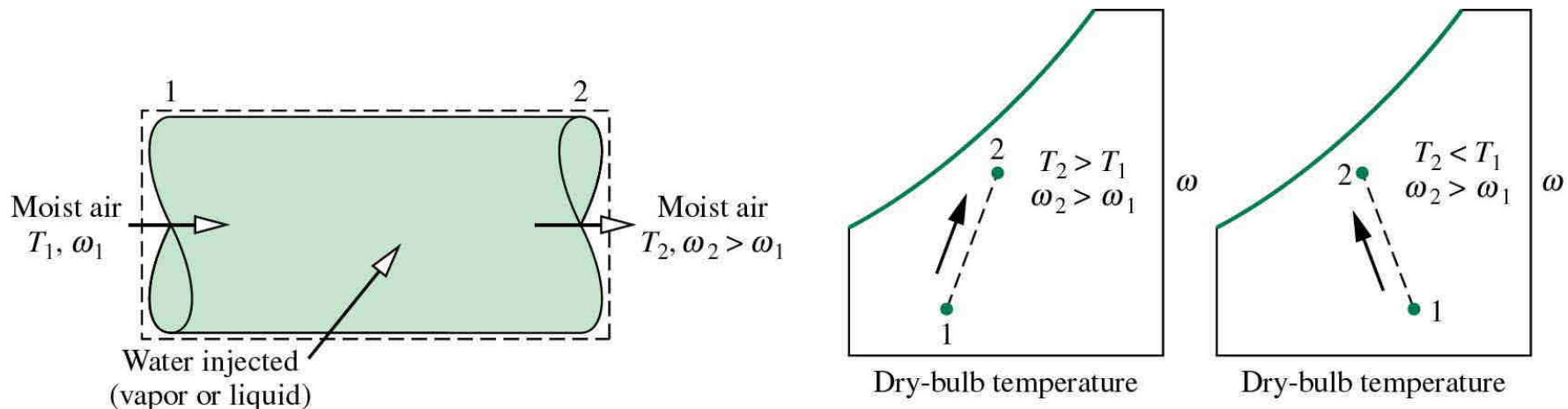
$$0 = \dot{m}_r (h_i - h_e) + \dot{m}_a [(h_{a1} - h_{a2}) + \omega_1 h_{g1} - \omega_2 h_{v2} - (\omega_1 - \omega_2) h_{f2}]$$

- Resolvendo para a **vazão mássica de refrigerante por unidade de massa de ar seco escoando através do equipamento:**

$$\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_a} = \frac{[(h_{a1} - h_{a2}) + \omega_1 h_{g1} - \omega_2 h_{v2} - (\omega_1 - \omega_2) h_{f2}]}{h_e - h_i}$$

12.8.4 Umidificação

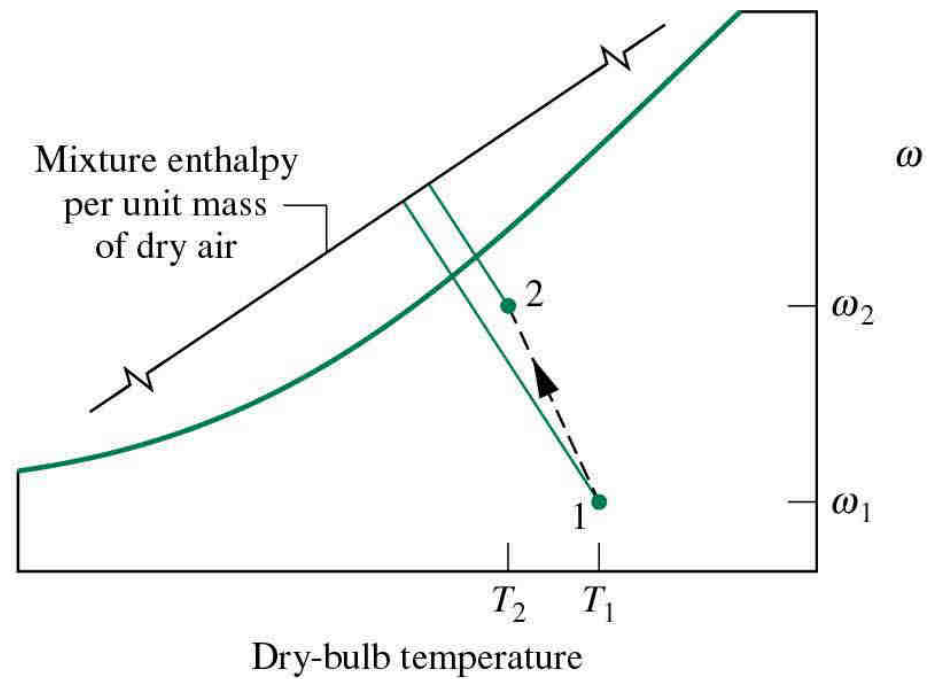
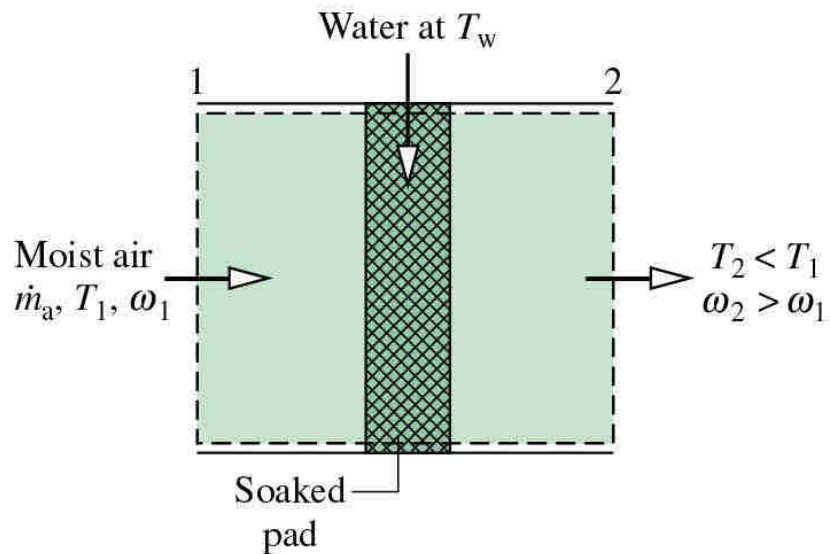
- Utilizada para **aumentar a umidade do ar** que circula em ambientes ocupados.
- Para isso utiliza-se **injeção de vapor d'água** ou **injeção de água líquida**.
- Na injeção de **vapor d'água**, a **umidade** e a **temperatura do ar úmido aumentam**.



- Na injeção de **água líquida**, a **umidade do ar úmido aumenta** mas a **temperatura do ar úmido pode diminuir**

12.8.5 Resfriamento evaporativo

- Utilizado em regiões de **clima quente e relativamente úmido**.
- Envolve a passagem de **água líquida no ar** e a passagem forçada do ar através de um painel com **excesso de umidade**.



- O ar úmido descarregado tem **temperatura reduzida** e **umidade aumentada**.
- A **umidade adicional** é normalmente **benéfica**.
- **Parte** ou **toda** a água líquida injetada pode **evaporar**.

- **Balanço de massa** (considerando que toda a água injetada é evaporada e adicionada à corrente de ar úmido):

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \text{ (ar seco)} \quad \dot{m}_{v1} + \dot{m}_w = \dot{m}_{v2} \text{ (ar úmido)}$$

- Resolvendo para a vazão mássica de água para o painel úmido:

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

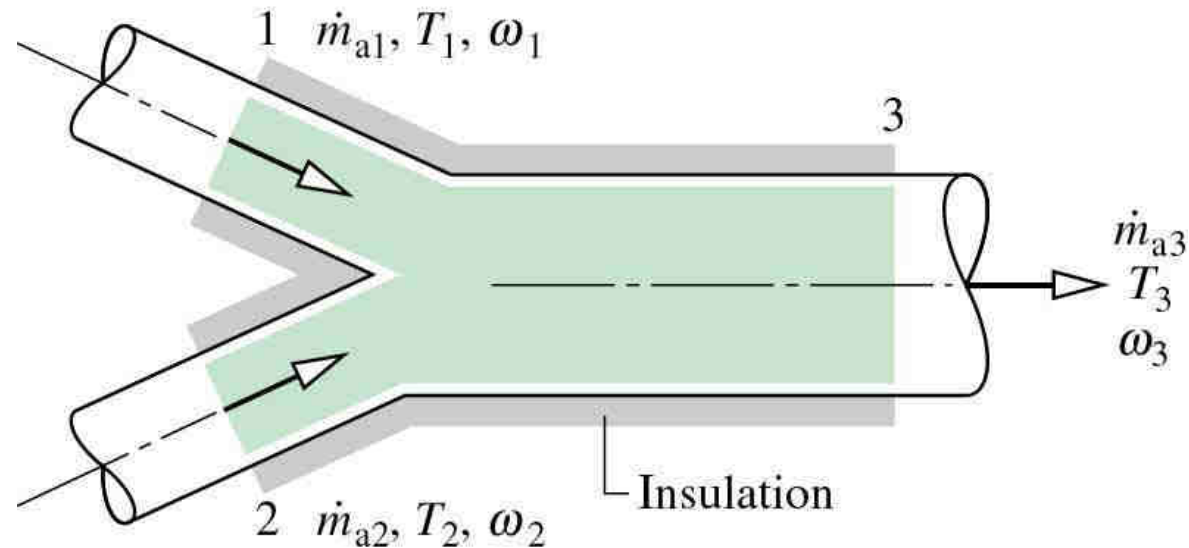
- **Balanço de energia:**

$$\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1} + \dot{m}_w h_w = \dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2}$$

- Utilizando $\dot{m}_{v1} = \omega_1 \dot{m}_a$, $\dot{m}_{v2} = \omega_2 \dot{m}_a$ e $\dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_1 - \omega_2)$ obtém-se:

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

12.8.6 Mistura adiabática de dois escoamentos de ar úmido



- **Balanço de massa:**

$$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3} \text{ (ar seco)} \quad \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v3} \text{ (vapor d'água)}$$

- Utilizando $\dot{m}_v = \omega \dot{m}_a$ o balanço de massa para o vapor d'água torna-se:

$$\omega_1 \dot{m}_{a1} + \omega_2 \dot{m}_{a2} = \omega_3 \dot{m}_{a3} \text{ (vapor d'água)}$$

- **Balanco de energia:**

$$\dot{m}_{a1} h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1} + \dot{m}_{a2} h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2} = \dot{m}_{a3} h_{a3} + \dot{m}_{v3} h_{v3}$$

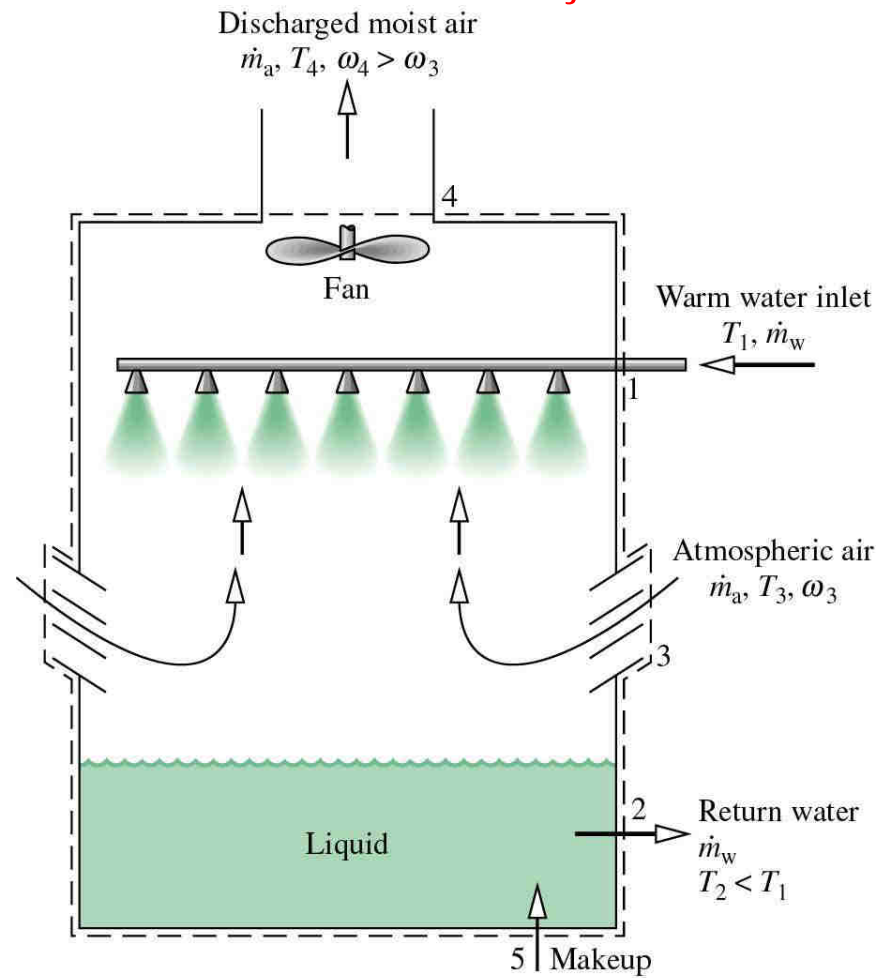
- Utilizando $\dot{m}_v = \omega \dot{m}_a$ o balanço de energia torna-se:

$$\dot{m}_{a1} (h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_{a2} (h_{a2} + \omega_2 h_{g2}) = \dot{m}_{a3} (h_{a3} + \omega_3 h_{g3})$$

12.9 TORRES DE RESFRIAMENTO

- Plantas industriais **rejeitam grande quantidade de energia para suas vizinhanças.**
- Embora essa energia possa ser descarregada em um **rio próximo**, existem locais com pouca água de resfriamento para equipamentos ou onde

preocupações ambientais impõe um limite na temperatura na qual a água de resfriamento pode ser retornada a vizinhança.



- Torres de arrefecimento são também utilizadas para fornecer água resfriada para aplicações industriais.
- A água aquecida a ser resfriada é admitida em 1 com vazão mássica $\dot{m}_w$ e temperatura T_1 sendo atomizada a partir da parte superior da torre.
- Ar atmosférico (ar úmido com $\dot{m}_a, T_3, \omega_3$) é aspirado em 3 pelo ventilador, apresentando movimento ascendente contrário ao movimento descendente das gotículas de água.
- Com a interação das duas correntes, uma pequena parcela da água evapora, sendo adicionada ao ar úmido que sai em 4 ($\omega_4 > \omega_3$).
- A água líquida restante fica no fundo da torre, e como consumiu energia para evaporar uma parcela da água, sua temperatura diminui ($T_2 < T_1$).

- Uma vez que uma quantidade de água sendo admitida é evaporada e adicionada ao ar úmido, uma **quantidade equivalente de água de reposição** é adicionada em 5, de forma que a **vazão mássica de retorno de água resfriada seja igual à vazão mássica de água aquecida sendo admitida em 1.**