

Capítulo 2

PSICROMETRIA BÁSICA

Psicrometria é o estudo das propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor d'água. Isto é de fundamental importância nos processos combinados de transferência de calor e massa que ocorrem em refrigeração e condicionamento de ar.

2.2-Composição do Ar

O ar atmosférico é composto de uma mistura de 4 componentes principais (gases), com traços de um número de outros, e vapor d'água. A composição do ar seco (apenas os 4 componentes) é relativamente constante variando levemente com o tempo, localização e altitude.

É razoável considerar todos os gases como uma substância homogênea (ar seco), mas tratar o vapor d'água separadamente porque este é passível de condensação nas condições de pressão e temperatura encontradas na atmosfera.

A composição padrão para o ar é mostrado na tabela 1.

Tabela 1 - Composição Padrão para o Ar.

Constituinte	Massa molecular [kg/kmol]	Fração molar (%)
Oxigênio - O ₂	32,000	20,95
Nitrogênio - N ₂	28,016	78,09
Argônio - Ar	39,944	0,93
Dióxido de Carbono - CO ₂	44,010	0,03

Baseado na tabela acima, pode-se calcular a massa molecular do ar seco, Ma.

$$M_a = \sum_{i=1}^4 M_i X_i$$

onde, Mi é a massa molecular dos constituintes e Xi é a fração molar dos constituintes. Então:

$$M_a = 28,966 \text{ kg/kmol}$$

A constante do gás para o ar seco, Ra, será:

$$Ra = R/M_a = 8314,26 \text{ J/kmol K} / 28,966 \text{ kg/kmol} = 287,035 \text{ J/kg K}$$

R - Constante Universal dos Gases.

O vapor d'água por sua vez não é uma mistura, mas um composto químico. Desta forma, não se utiliza a técnica da proporcionalidade no cálculo da massa molecular.

Soma-se apenas as massas dos elementos constituintes como indicado pela fórmula química.

Para o H₂O:

Constituinte	Massa molecular [kg/kmol]
Hidrogênio - H	1,01
Oxigênio - O	16,00

$$\text{Então: } M_s = 2 \times 1,01 + 1 \times 16,00 = 18,02 \text{ kg/kmol}$$

A constante do gás para o vapor d'água será:

$$R_s = R / M_s = 8314,26 / 18,02 = 461,52 \text{ J/kg K}$$

2.3-Carta Psicrométrica/Propriedades Psicrométricas

É um diagrama que mostra o conjunto de propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor d'água.

➤ Objetivos do estudo da carta:

- Ter conhecimento dos pontos básicos da carta psicrométrica (conhecer as aproximações feitas no traçado da carta).
- Ser capaz através do conhecimento das equações, de calcular qualquer propriedade psicrométrica para condições diferentes das condições em que a carta foi traçada. Ex.: pressão atmosférica.

2.3.1-Lei dos gases

A partir de agora o ar atmosférico será considerado como uma mistura de dois gases perfeitos, ou seja,

$$pv = RT$$

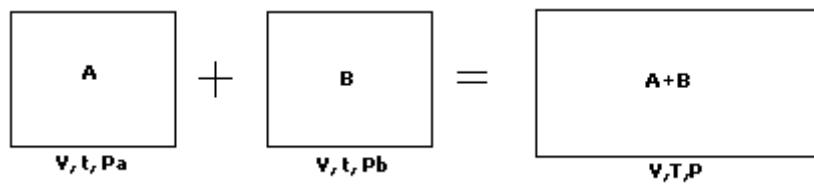
$$c_p = \frac{dh}{dT} \quad (\text{Entalpia, } h, \text{ é uma função somente da temperatura } T)$$

Por questão de convenção, a temperatura absoluta será representada por T e a temperatura em graus Celsius por t.

2.3.2-Lei de Dalton

No modelo de Dalton considera-se que cada componente da mistura ocupa todo o volume e está na temperatura da mistura.

Considera-se também que tanto a mistura como os componentes comportam-se como gases ideais.



Para a mistura: $pV = NRT$

Para os componentes: $p_A V = N_A RT$ e $p_B V = N_B RT$

se $N = N_A + N_B$ então,

$$\frac{pV}{RT} = \frac{p_A V}{RT} + \frac{p_B V}{RT}$$

$$p = p_A + p_B$$

onde, p_A e p_B são denominados pressões parciais.

Pode-se então expressar a Lei de Dalton em duas partes:

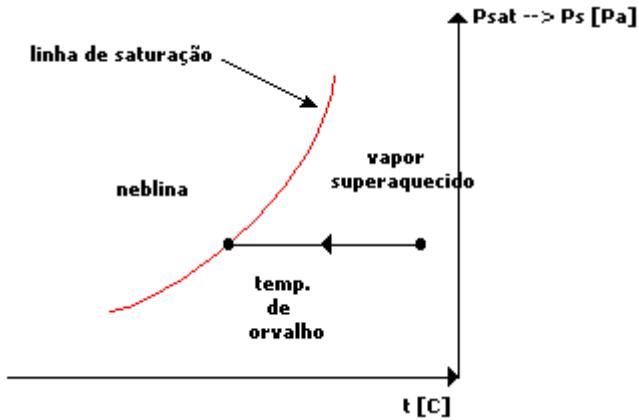
- A pressão exercida por cada gás na mistura é independente da presença dos outros gases, e
- A pressão total exercida pela mistura é igual a soma das pressões parciais.

O ar é considerado uma mistura de dois componentes, ar seco e vapor d'água

	Ar seco	Vapor D'água	Ar Seco +Vapor D'água
T[°C]	20	20	20
m _a [kg]	1	0	1
m _s [kg]	0	0,007376	0,007376
p _a [Pa]	100143	0	100143
p _s [Pa]	0	1182	1182
p _{atm} [Pa]	100143	1182	101325

2.3.3-Linha de Saturação/ Temperatura de Orvalho

Inicialmente, traça-se em coordenadas t (temperatura) e p_{sat} (pressão de saturação do vapor d'água) para o vapor d'água puro (tab. A-1 do livro do Stoecker).



Qual seria o efeito do ar seco no diagrama acima, ou seja, no comportamento do vapor d'água?

A princípio nenhum. O vapor comporta-se como se nenhum traço de ar estivesse presente, ou seja, para uma dada pressão (pressão parcial) a condensação ocorrerá a mesma temperatura.

Devido a uma leve interação entre as moléculas de ar e vapor d'água, existe uma pequena diferença da ordem de 0,5% (tab. A-2 do livro do Stoecker).

A figura anterior é considerada então válida para a mistura ar-vapor d'água. Neste caso, a ordenada deixa de ser p_{sat} e passa a ser p_s (pressão parcial do vapor d'água na mistura).

$$\ln(p_s) = C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6 \ln(T)$$

De acordo com a ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers), a pressão de saturação do vapor d'água pode ser escrita como:

$C_1 = -5,8002206 \text{ E}3$	$C_4 = 4,1764768 \text{ E}-5$	$p_s \Rightarrow [\text{Pa}]$
$C_2 = 1,3914993$	$C_5 = -1,4452093 \text{ E}-8$	$T \Rightarrow [\text{K}]$
$C_3 = -4,8640239 \text{ E}-2$	$C_6 = 6,5459673$	$0^\circ\text{C} < t < 200^\circ\text{C}$

A temperatura de orvalho é a temperatura na qual tem início a condensação se o ar for resfriado a pressão parcial constante, (temperatura de saturação).

2.3.4- Umidade Relativa (ϕ)

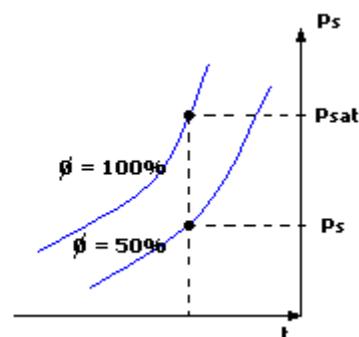
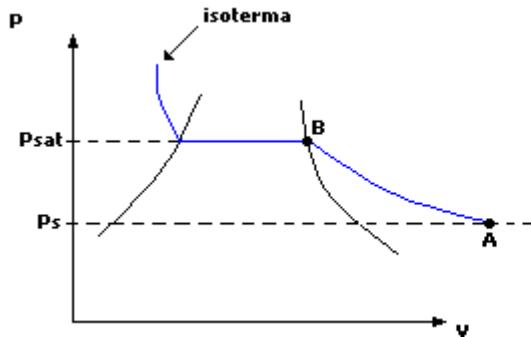
É definida como sendo a razão entre a fração molar do vapor d'água na mistura e a fração molar do vapor d'água no ar saturado à mesma temperatura e pressão total.

$$\phi = \left(\frac{X_s}{X_{sat}} \right)_{t,p} \times 100$$

$$\text{mas } X_s = N_s/N \quad \text{e} \quad X_{sat} = N_{sat}/N$$

para gases perfeitos: $pV = NRT$ então $N = pV/RT$
substituindo:

$$\phi = \frac{N_s/N}{N_{sat}/N} = \frac{N_s}{N_{sat}} = \frac{p_s V / RT}{p_{sat} V / RT} \Rightarrow \phi = \left(\frac{p_s}{p_{sat}} \right)_{t,p} \times 100$$



2.3.5-Umidade Absoluta

É a razão entre a massa de vapor d'água, m_s , e a massa de ar seco, m_a , na mistura.

$$w = \frac{m_s}{m_a}$$

onde w é a umidade absoluta (kg_s/kg_a).

Utilizando a lei dos gases perfeitos $pv = RT$, tem-se para o vapor d'água:

$$p_s v_s = R_s T \Rightarrow p_s \frac{V}{m_s} = R_s T \Rightarrow m_s = \frac{p_s V}{R_s T}$$

De forma similar para o ar,

$$m_a = \frac{p_a V}{R_a T}$$

Substituindo as massa na expressão de w :

$$w = \frac{m_s}{m_a} = \frac{\frac{p_s V}{R_s T}}{\frac{p_a V}{R_a T}} = \frac{p_s R_a}{p_a R_s}$$

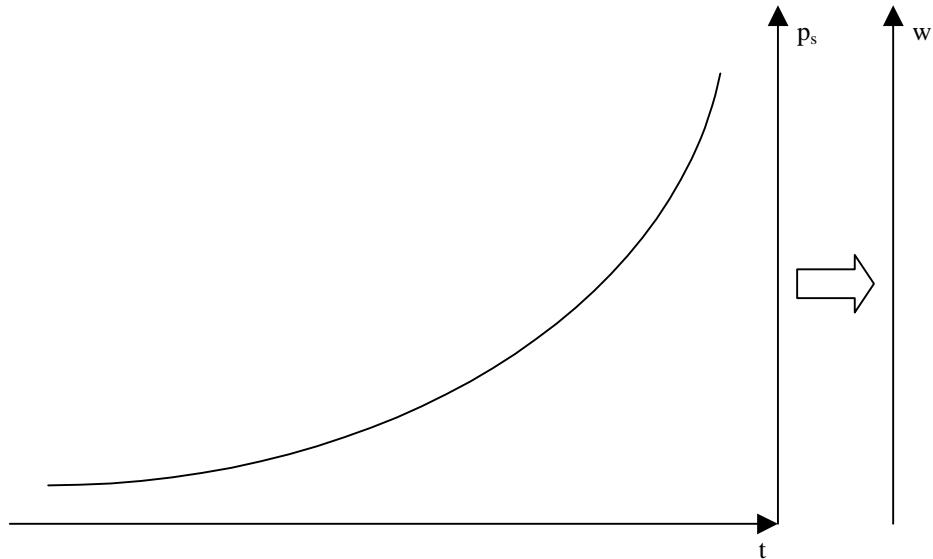
Como já visto, $R_a=287,035 \text{ J/kg K}$ e $R_s=461,52 \text{ J/kg K}$. Substituindo:

$$w = 0,622 \frac{p_s}{p_a}$$

mas $p_t = p_a + p_s$ ou $p_a = p_t - p_s$. Assim,

$$w = 0,622 \frac{p_s}{p_t - p_s}$$

Conhecendo a relação entre w e p_s pode-se fazer uma mudança de coordenada e desta forma substituir a ordenada da carta psicrométrica por w :



2.3.6-Entalpia

Através do modelo de Dalton, pode-se concluir que a entalpia de uma mistura é igual a soma das entalpias de cada constituinte:

$$H = H_a + H_s$$

Divide-se pela massa de ar seco para se obter a entalpia em termos específicos.

$$\frac{H}{m_a} = \frac{H_a}{m_a} + \frac{H_s}{m_a} \quad \Rightarrow \quad h = h_a + \frac{m_s}{m_a} \frac{H_s}{m_s}$$

onde h é a entalpia específica do ar úmido¹ e h_a é a entalpia específica do ar seco. Sabendo que $w = m_s / m_a$ e que $H_s/m_s (=h_s)$ é a entalpia específica do vapor d'água, tem-se

$$h = h_a + w_s h_s$$

A entalpia é uma propriedade que é definida em relação a um estado de referência. Neste caso o estado de referência será a temperatura de 0°C.

Ar seco

Para o ar seco, considera-se que a entalpia é igual a zero ($h_{ar}=0\text{kJ/kg}$) à temperatura de 0°C ($t_r=0^\circ\text{C}$).

$$\int_{h_{ar}}^{h_a} dh = c_{pa} \int_{t_r}^t dt$$

$$h_a - h_{ar} = c_{pa} (t - t_r)$$

Assim,

$$h_a = c_{pa} t$$

O calor específico do ar é aproximadamente 1,0kJ/kg.

Vapor d'água

No caso do vapor d'água, a entalpia do líquido será assumida como zero. Sendo assim a entalpia do vapor saturado à 0°C é igual a 2501kJ/kg ($=h_{sr}$). Portanto,

$$\int_{h_{sr}}^{h_s} dh = c_{ps} \int_{t_r}^t dt$$

$$h_s - h_{sr} = c_{ps} (t - t_r)$$

Assim,

$$h_s = h_{sr} + c_{ps} t$$

Se o calor específico do vapor for considerado como 1,805kJ/kgK, tem-se,

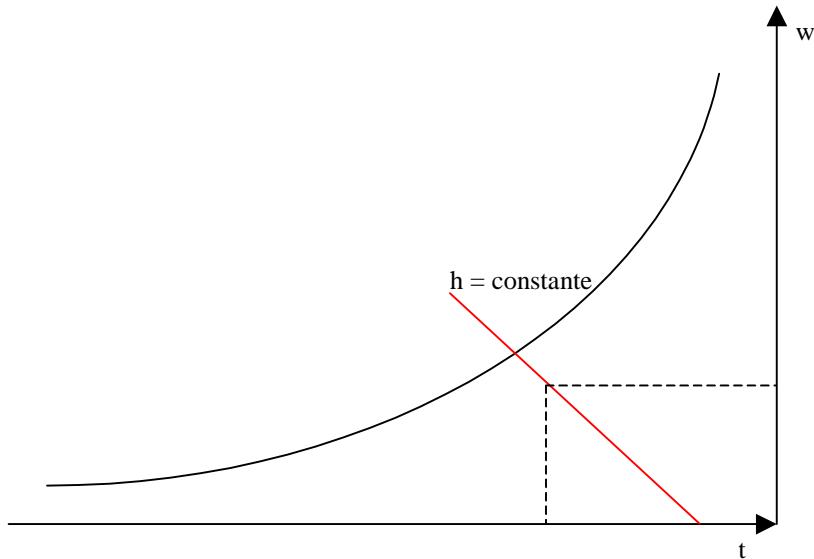
$$h_s = 2501 + 1,805t$$

¹ Note que esta é a **entalpia da mistura em relação à massa de ar seco**. A razão de se definir esta propriedade desta forma será vista posteriormente.

Substituindo,

$$h = 1,0t + w_s(2501 + 1,805t)$$

Na carta psicrométrica,



2.3.7-Volume Específico (v)

É a razão entre o volume da mistura (ar- vapor d'água), e a massa de ar seco,

$$v = V/m_a$$

Como o volume da mistura é igual ao volume de ar seco, pode-se dizer que este é a razão entre o volume ocupado pelo ar seco, e a massa de ar seco, ou seja:

$$v_a = V_a/m_a \quad (\text{Lei de Dalton})$$

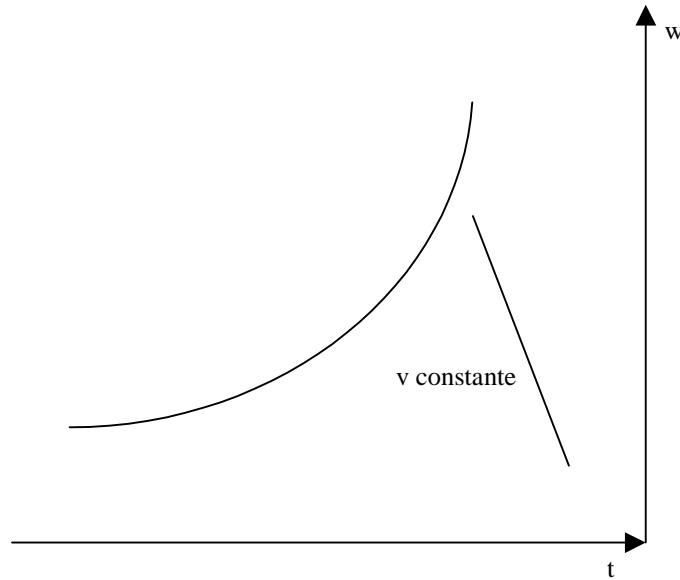
Da equação dos gases perfeitos tem-se que,

$$p_a v_a = R_a T$$

como $v_a = V$

$$v = \frac{R_a T}{p_a} \quad \text{ou} \quad v = \frac{R_a T}{p_t - p_s}$$

Na carta, pode-se fixar o valor de v e arbitrar um valor para T , tendo assim p_s e consequentemente o valor de w .

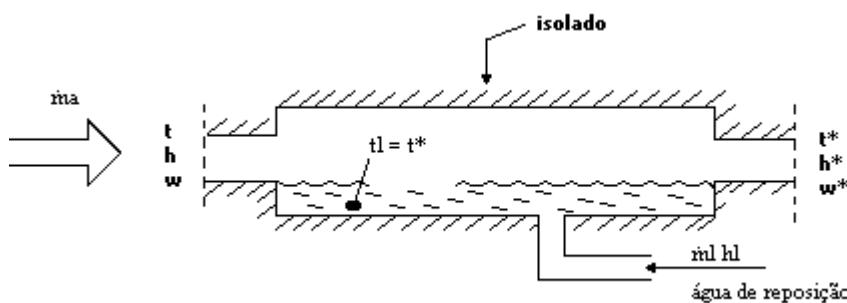


2.3.8- Temperatura de Saturação Adiabática ou Temperatura Termodinâmica de Bulbo Úmido (TTBU)

É temperatura na qual a através da evaporação para o ar satura o ar adiabaticamente nesta mesma temperatura.

Considere o dispositivo a seguir (saturador adiabático) onde o ar escoa sobre um filme de água. Este dispositivo é isolado (adiabático) e possui uma área infinita de forma que o ar na sua saída seja saturado.

- Obs.:
- * Condição de saturação: $A \rightarrow \infty$: $t_l = t^* ; \phi^* = 100\%;$
- Não existe diferença de temperatura e pressão parcial.



A água que é evaporada no processo é reposta por água à mesma temperatura daquela no reservatório.

Após este processo atingir o equilíbrio, a água no reservatório atinge uma temperatura denominada de temperatura termodinâmica de bulbo úmido.

Balanço de Massa de Vapor D'água

Hipótese:

- regime permanente;
- escoamento permanente.

$$\dot{m}_a w + \dot{m}_l = \dot{m}_a w^* \quad \text{portanto} \quad \dot{m}_l = \dot{m}_a (w^* - w)$$

Balanço de Energia

Hipóteses:

- regime permanente;
- energia potencial e cinética desprezíveis;
- escoamento uniforme.

$$\dot{m}_a h + \dot{m}_l h_l^* = \dot{m}_a h^*$$

Substituindo a conservação da massa :

$$\dot{m}_a h + \dot{m}_a (w^* - w) h_l^* = \dot{m}_a h^*$$

então

$$h + (w^* - w) h_l^* = h^*$$

Na saturação, apenas uma propriedade determina o estado termodinâmico do ar : w^* , h_l^* , e h^* são funções de t^* .

Portanto, t^* depende apenas de h e w (estado do ar na entrada do saturador) e assim é também uma propriedade termodinâmica.

Demonstração:

$$h = c_{pa} \cdot t + w \cdot h_s \quad (\text{entalpia da mistura na entrada})$$

$$h^* = c_{pa} \cdot t^* + w^* \cdot h_s^* \quad (\text{entalpia da mistura na saturação})$$

além disso,

$$h_s = h_s^* + c_{ps}(t - t^*) \quad (\text{entalpia do vapor d'água})$$

$$h_s^* = h_l^* + h_{lv}^*$$

substituindo no balanço de energia:

$$c_{pa} \cdot t + w [h_l^* + h_{lv}^* + c_{ps}(t - t^*)] + (w^* - w) \cdot h_l^* = c_{pa} \cdot t^* + w^* (h_l^* + h_{lv}^*)$$

rearranjando,

$$(C_{pa} + w \cdot C_{ps}) \cdot t - (C_{pa} + w \cdot C_{ps}) \cdot t^* + w \cdot h'_{lv} = w^* \cdot h'_{lv}$$

ainda, $(C_{pa} + w \cdot C_{ps}) \cdot (t - t^*) = h'_{lv} \cdot (w^* - w)$

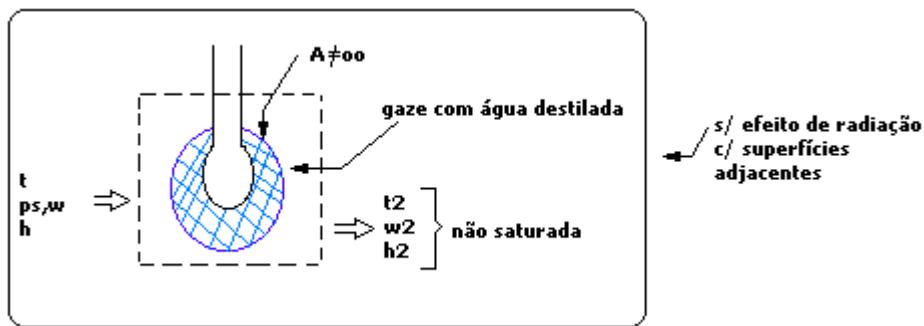
$C_{pm} = C_{pa} + w \cdot C_{ps}$ é o calor específico da mistura
finalmente,

$$t^* = t - \frac{h'_{lv}}{C_{pm}} (w^* - w) \quad \rightarrow \quad t^* = t - \frac{F_1(t^*)}{C_{pm}} [F_2(t^*) - w]$$

$t^* = t^*(t, w)$ é uma propriedade termodinâmica.

2.3.9-Temperatura de Bulbo Úmido (TBU)

O saturador adiabático não é conveniente para medidas de campo. Na prática utiliza-se um termômetro coberto com uma gaze úmida como mostado na figura



Balanço de Energia na Gaze

No equilíbrio: calor recebido por convecção = calor perdido por evaporação

$$H_c A (t - t') = \dot{m}_s h'_{lv}$$

onde: H_c é o coeficiente de convecção;

A é a área da gaze;

t' é a temperatura indicada pelo termômetro;

h'_{lv} é o calor latente de vaporização na temperatura indicada pelo termômetro;

\dot{m}_s é a taxa de evaporação.

A taxa de evaporação pode ser expressa da seguinte forma:

$$\dot{m}_s = K_d A (w' - w)$$

onde K_d é o coeficiente de difusão ($\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$). Substituindo,

$$H_c A (t - t') = K_d A (w' - w) h'_{lv}$$

Então

$$t' = t - \frac{K_d}{H_c} h'_{lv} (w' - w)$$

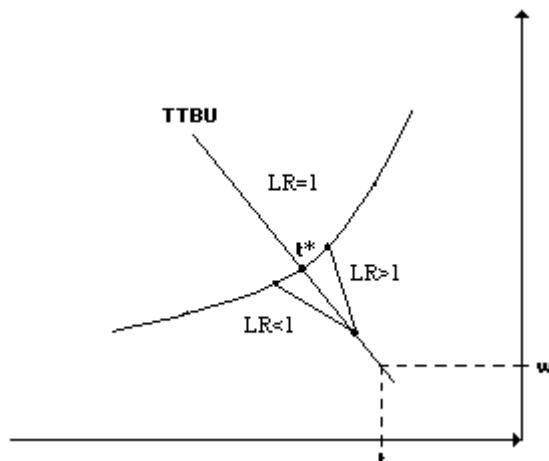
2.3.10-Diferença Entre t^* (TTBU) e t' (TBU)

$$t' = t - \frac{K_d}{H_c} h'_{lv} (w' - w)$$

$$t^* = t - \frac{1}{c_{pm}} h'_{lv} (w^* - w)$$

assim, para que $t^* = t'$ é necessário que: $K_d/H_c = 1/c_{pm}$ ou que:

$$\frac{H_c}{K_d c_{pm}} = 1 = LR$$



LR é o número de Lewis (número adimensional)

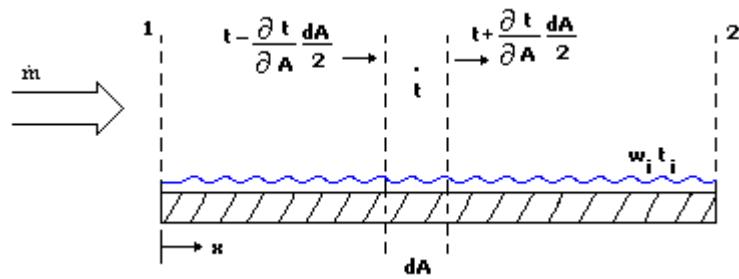
Se $LR > 1$ então $t' > t^*$

Se $LR < 1$ então $t' < t^*$

Para aplicações de condicionamento de ar $LR = 1,0$.

2.4-Lei da Linha Reta

Considere a figura abaixo, em que o ar flui sobre um filme de água



Balanço de Calor Sensível

$$\dot{m} \cdot c_{pm} \left(t - \frac{\partial t}{\partial A} \frac{dA}{2} \right) - \dot{m} \cdot c_{pm} \left(t + \frac{\partial t}{\partial A} \frac{dA}{2} \right) - H_c dA (t - t_i) = 0$$

Eliminando termos,

$$-\dot{m} \cdot c_{pm} \frac{\partial t}{\partial A} dA = H_c dA (t - t_i)$$

Uma vez que a temperatura é dependente apenas da área, a diferenciação parcial passa a ser total. Separando as variáveis e integrando, tem-se,

$$\int_{t_1}^{t_2} -\dot{m} \cdot c_{pm} \frac{dt}{t - t_i} = \int_0^A H_c \cdot dA \quad \therefore \quad \dot{m} \cdot c_{pm} \ln \left(\frac{t_i - t_2}{t_i - t_1} \right) = H_c \cdot A$$

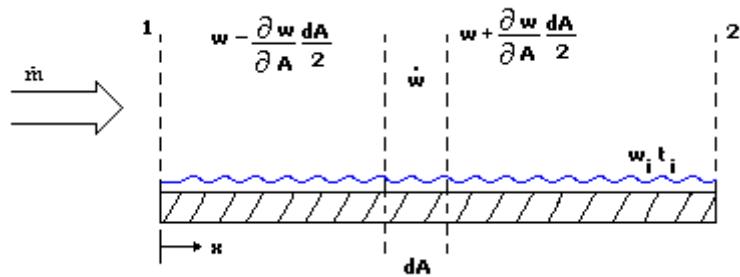
$$\text{Portanto,} \quad \ln \left(\frac{t_i - t_2}{t_i - t_1} \right) = \frac{H_c \cdot A}{\dot{m} \cdot c_{pm}} \quad (\text{I})$$

Balanço de Massa de Vapor

Considerando a figura a seguir e realizando um balanço de massa de vapor d'água, tem-se,

$$\dot{m} \left[w - \frac{\partial w}{\partial A} \frac{dA}{2} \right] - \dot{m} \left[w + \frac{\partial w}{\partial A} \frac{dA}{2} \right] - K_d \cdot dA (w - w_i) = 0$$

$$-\dot{m} \frac{\partial w}{\partial A} dA = K_d \cdot dA (w - w_i) \quad \text{então} \quad \dot{m} \frac{dw}{dA} = K_d \cdot dA (w_i - w)$$



Separando as variáveis e integrando, obtém-se,

$$\dot{m} \int_{w_1}^{w_2} \frac{dw}{w_i - w} = \int_0^A k_d dA$$

portanto,

$$\ln\left(\frac{w_i - w_2}{w_i - w_1}\right) = \frac{K_d \cdot A}{\dot{m}} \quad (\text{II})$$

Dividindo a expressão (I) pela expressão (II) tem-se,

$$\frac{\ln\left(\frac{t_i - t_2}{t_i - t_1}\right)}{\ln\left(\frac{w_i - w_2}{w_i - w_1}\right)} = \frac{H_c A / \dot{m} \cdot c_{pm}}{K_d \cdot A / \dot{m}} = \frac{H_c}{K_d \cdot c_{pm}} = LR$$

Rearranjando,

$$\ln\left(\frac{t_i - t_2}{t_i - t_1}\right) = LR \cdot \ln\left(\frac{w_i - w_2}{w_i - w_1}\right) \quad \therefore \quad \ln\left(\frac{t_i - t_2}{t_i - t_1}\right) = \ln\left(\frac{w_i - w_2}{w_i - w_1}\right)^{LR}$$

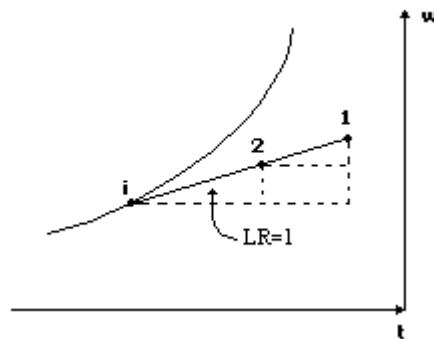
Finalmente,

$$\left(\frac{t_i - t_2}{t_i - t_1}\right) = \left(\frac{w_i - w_2}{w_i - w_1}\right)^{LR}$$

Os processos de transferência de calor e massa ocorrem de tal forma que a relação acima se verifica.

Notar que quando $LR = 1,0$ (situação normalmente admitida), a relação anterior é a equação de uma reta.

Processo de Condensação



2.5-Medições Psicrométricas

Geralmente mede-se a temperatura de bulbo seco (tbs) e a temperatura de bulbo úmido (tbu).

Como tbs e tbu são variáveis independentes, determina-se o estado termodinâmico do ar (todas as demais variáveis podem ser determinadas a partir destas duas variáveis).

2.5.1-Tipos de Psicrómetro

- giratório
- aspiração

2.5.2-Recomendações para Medir TBU

- a) deve existir sobre o bulbo dos termômetros proteção contra radiação;
- b) o bulbo úmido deve estar sempre bem molhado ;
- c) a velocidade do ar deve ser de 100 a 300 m/min (reduz os efeitos das trocas por radiação).

2.6-Comparação Entre as Cartas da CARRIER e da ASHRAE

CARRIER:

Coordenadas w e t. Apresenta apenas linhas de tbu constantes, sendo a entalpia calculada através de um fator de correção (desvio de entalpia).

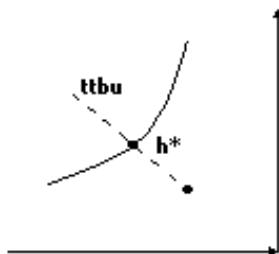
$$h + (w^* - w)h_l^* = h^*$$

Processo de saturação adiabática ocorre a ttbu constante mas não a entalpia constante.

$$\text{A carta apresenta um fator de correção} \quad h = h^* + \text{correção}$$

h^* é obtida na interseção de ttbu com a linha de saturação ;

correção é obtida na condição do ar.



ASHRAE:

Coordenadas h e w . As linhas de t não são verticais e nem paralelas entre si. Apresenta linhas de $ttbu$ e h distintas.

Existem 7 cartas da ASHRAE.

nº	1	2	3	4	5	6	7
Temperatura [°C]	0 a 50	-40 a 10	10 a 120	100 a 120	0 a 50	0 a 50	0 a 50
Altitude [m]	0	0	0	0	750	1500	2250
Pressão [kPa]	101,325	101,325	101,325	101,325	92,66	84,54	77,04

Exercícios Resolvidos:

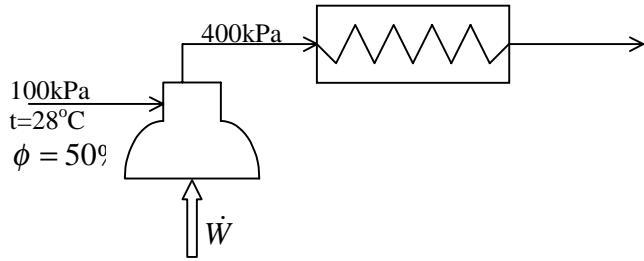
- 01) (3.8-Stoecker) O ar entra em um compressor a 28°C , com 50% de umidade relativa e 101 kPa de pressão. Após ser comprimido até 400 kPa o ar passa por um resfriador intermediário, onde deve ser resfriado sem que ocorra condensação de vapor d'água. Até que temperatura mínima o ar pode ser resfriado nesse trocador de calor?

Dados:

$$p_1 = 101 \text{ kPa}; \quad t_1 = 28^{\circ}\text{C}; \quad \phi_1 = 50\%;$$

$$p_2 = 400 \text{ kPa}.$$

Determinar: temperatura mínima após o trocador.



Solução:

$$w_1 = w_2 \\ w_1 \text{ (carta)} = 0,012 \text{ kg}_s/\text{kg}_a$$

$$w_2 = 0,622 \frac{p_{s2}}{p_{t2} - p_{s2}} \Rightarrow p_{s2} = \frac{w_2}{w_2 + 0,622} p_{t2} = \frac{0,012}{0,012 + 0,622} \times 400$$

$$p_{s2} = 7,571 \text{ kPa}$$

A partir da pressão de saturação do vapor (tab. A1 do Stoecker), tem-se que $t = 40,5^\circ\text{C}$.

- 02) (01-Lista) Uma câmara frigorífica para resfriamento e armazenamento de maçãs, com temperatura interna de 1°C , foi construída numa localização onde a temperatura média do ar externo é de 35°C . Estimando que a temperatura superficial das paredes exteriores da câmara possa atingir até 15°C , pergunta-se qual a máxima umidade relativa que pode ocorrer no local sem que haja condensação nas paredes?

Condição de não condensação: $t_{orv} < 15^\circ\text{C}$

Analiticamente:

$$\phi = \frac{p_s}{p_{sat}} = \frac{p_s(15^\circ\text{C})}{p_{sat}(35^\circ\text{C})}$$

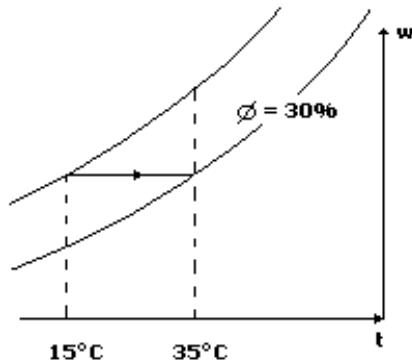
Tabela (A1 ou A2 do Stoecker): $p_{sat}(15^\circ\text{C}) = 1,7044 \text{ kPa}$; $p_{sat}(35^\circ\text{C}) = 5,6237 \text{ kPa}$.

Então: $\phi = 30\%$

Graficamente: Cruzamento entre $t_{bs} = 35^\circ\text{C}$ e $t_{orv} = 15^\circ\text{C}$

- 03) (3.5-Stoecker) Uma torre de resfriamento é um equipamento no qual ar resfria água previamente borrifada. Se $15 \text{ m}^3/\text{s}$ de ar a 35°C de temperatura de bulbo seco e 24°C de temperatura de bulbo úmido, a uma pressão atmosférica de 101 kPa , adentram em uma torre, deixando-a saturado a 31°C , pergunta-se : a) Até que temperatura essa corrente de ar

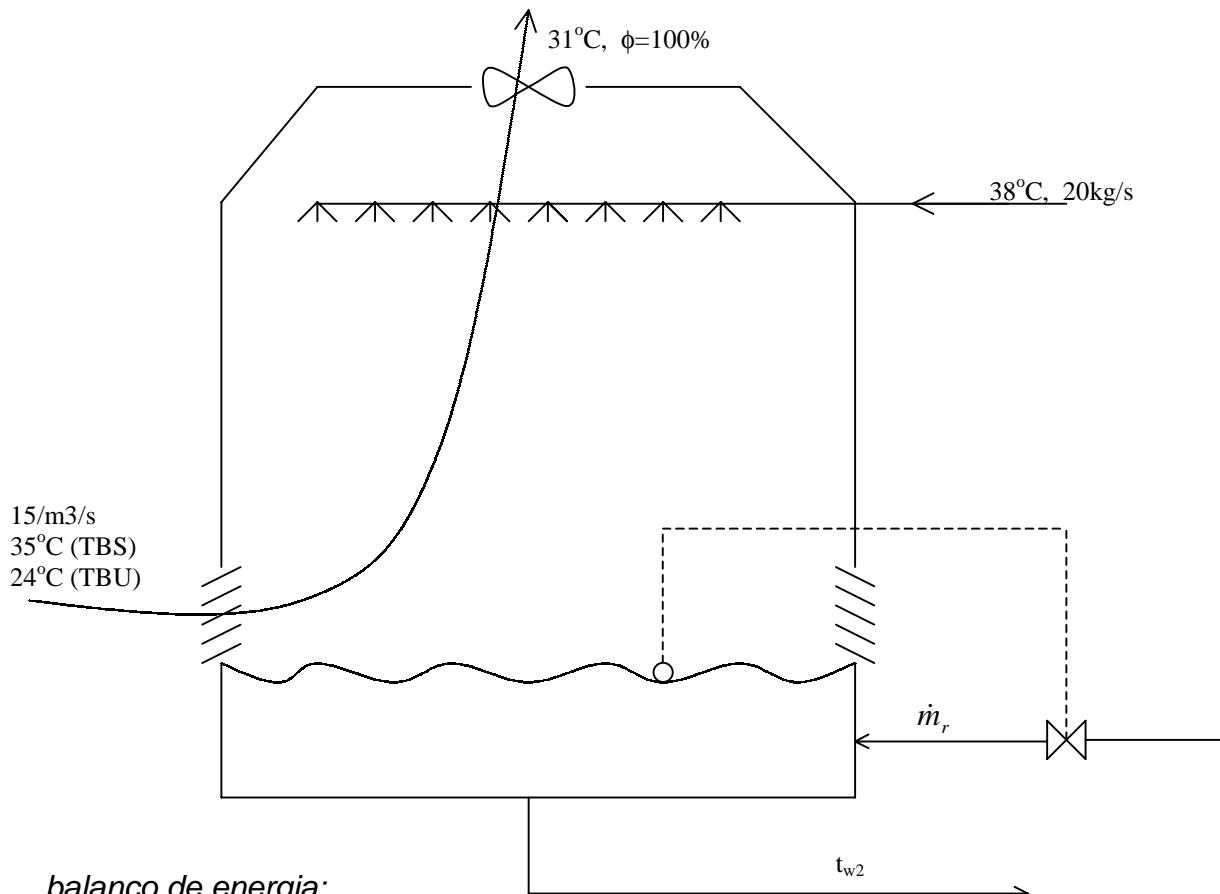
pode resfriar água borrifada a 38°C e com vazão de 20 kg/s? b) Quantos kg/s de água devem ser fornecidos para compensar a água que se evapora?



a) da carta : $v_1 = 0,89 \text{ m}^3/\text{kg}_a$

$$\dot{m}_a = \frac{Q_1}{v_1} = \frac{15}{0,89} = 16,85 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$$



balanço de energia:

$$\dot{m}_w h_{w1} + \dot{m}_r h_r + \dot{m}_a h_1 = \dot{m}_a h_2 + \dot{m}_w h_{w2}$$

$$\dot{m}_a(h_2 - h_1) = \dot{m}_w(h_{w1} - h_{w2}), \quad \text{como } \frac{dh_w}{dt} = cp_w$$

$$\dot{m}_a(h_2 - h_1) = \dot{m}_w Cp_w(t_{w1} - t_{w2})$$

$$\left. \begin{array}{l} 35^{\circ}\text{C} - tbu \\ 24^{\circ}\text{C} - tbs \end{array} \right\} h_1 = 72 \text{ kJ/kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} 31^{\circ}\text{C} - tbs \\ \phi = 100\% \end{array} \right\} h_2 = 105 \text{ kJ/kg}$$

Substituindo,

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w Cp_w}(h_2 - h_1) \quad \text{então: } t_{w2} = 38 - \frac{16,85}{20 \times 4,19}(105 - 72) = 31,4^{\circ}\text{C}$$

observe que tanto a temperatura da água quanto do ar diminuem.

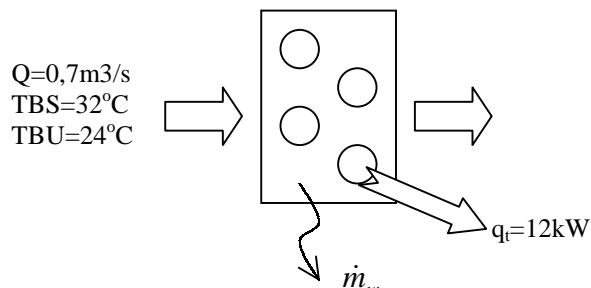
b) *balanço de massa de vapor d'água.*

$$\dot{m}_a w_1 + \dot{m}_r = \dot{m}_a w_2 \rightarrow \dot{m}_r = \dot{m}_a(w_2 - w_1) = 16,85(0,029 - 0,0142) = 0,249 \text{ kg/s}$$

04) (02-Lista) Uma vazão de ar de $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$, nas condições de tbs igual a 32°C e tbu de 24°C , flui através de uma serpentina de resfriamento. Considerando que a temperatura média superficial da serpentina é de 13°C e que a mesma possui uma capacidade total de refrigeração de 12 kW , calcule:

- a) As temperaturas de bulbo seco e úmido do ar na saída da serpentina.
- b) A taxa de remoção de água do ar.

Nota: A parcela de energia associada ao condensado pode ser desprezada.



a) *balanço de energia:*

$$\dot{m}_a h_1 - \dot{m}_w h_w - q_t = \dot{m}_a h_2$$

$$\left. \begin{array}{l} v_1 = 0,886 \text{ m}^3/\text{kg}_a \\ h_1 = 72 \text{ kJ/kg} \end{array} \right| tbs = 32^{\circ}\text{C}; tbu = 24^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{m}_a = \frac{Q}{v} = \frac{0,7}{0,866} = 0,79 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_a(h_2 - h_1) = q_t \rightarrow h_2 = (\dot{m}_a h_1 - q_t)/\dot{m}_a = (0,79 \times 72 - 12)/0,79 = 56,8 \text{ kJ/kg}_a$$

Analiticamente:

$$\text{Lei da linha reta: } \frac{t_i - t_2}{t_i - t_1} = \frac{w_i - w_2}{w_i - w_1} = \frac{h_i - h_2}{h_i - h_1}$$

então:

$$t_2 = t_i - \frac{h_i - h_2}{h_i - h_1} (t_i - t_1)$$

$$h_i(\text{saturado}) = 37 \text{ kJ/kg} \quad (13^\circ\text{C})$$

$$\text{Substituindo: } t_2 = 13 - \frac{37 - 56,8}{37 - 72} (13 - 32) = 23,7^\circ\text{C} \Rightarrow tbu = 19,8^\circ\text{C} \text{ (da carta)}$$

Graficamente:

Traça-se uma reta entre os pontos $32^\circ\text{C}(tbs)$ e $24^\circ\text{C}(tbu)$ e $13^\circ\text{C}(\text{saturado})$, na interseção de h_2 com a reta é o ponto 2.

b) balanço de massa de vapor d'água

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a(w_1 - w_2) = 0,79(0,0155 - 0,0128) = 0,0021 \text{ kg/s} = 2,1 \text{ g/s}$$

5) (3.4-Stoecker) Uma mistura de ar-vapor d'água apresenta uma temperatura de bulbo seco de 30°C a uma umidade absoluta de 0,015. Para as pressões barométricas de 85 e 101 kPa. Determine:

- a) entalpia.
- b) $T_{\text{orv.}}$.

$$a) \quad h = Cp_a \cdot t + w \cdot h_g$$

$$h_g(30^\circ\text{C}) = 2556,4 \text{ kJ/kg}_a$$

$$h = 1,0 \cdot 30 + 0,015 \times 2556,4 = 68,3 \text{ kJ/kg}$$

$$b) \quad w = 0,622 \frac{p_s}{p_t - p_s} \rightarrow p_s = \frac{p_t w}{0,622 + w}$$

$$p_{s1} = \frac{101.0,015}{0,622 + 0,015} = 2,378 \text{ kPa}$$

$$p_{s2} = \frac{85.0,015}{0,0622 + 0,015} = 2,0 \text{ kPa}$$

(tab. A-2):

$$\begin{cases} t_{orv}(101 \text{ kPa}) = 20,3^\circ\text{C} \\ t_{orv}(85 \text{ kPa}) = 17,5^\circ\text{C} \end{cases}$$