



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CLIMATIZAÇÃO GERAL

João Frade

Revisão – 2006

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	3
2.	PSICROMETRIA.....	4
3.	PROBLEMA TIPO	7
4.	CARTA PSICROMÉTRICA.....	10
5.	PROCESSOS DE AR HÚMIDO	11
5.1	Aquecimento Simples ou Sensível	12
5.2	Humidificação com Vapor	14
5.3	Arrefecimento com Humidificação - Saturação Adiabática.....	16
5.4	Arrefecimento com Desumidificação.....	18
5.4.1	Baterias húmidas:	21
5.4.2	Baterias secas:	22
6.	BIBLIOGRAFIA	30

1. INTRODUÇÃO

Em cada instante o ar contido num qualquer local está sujeito à acção de cargas térmicas, internas e externas, que lhe provocam alterações da temperatura e do teor de vapor de água.

As alterações das condições ambientais são provocadas pela acção de fontes internas, como por exemplo iluminação, pessoas, equipamentos, etc, por transmissão de calor através da envolvente do local: radiação através de superfícies transparentes, condução através de superfícies opacas, convecção nas superfícies exteriores e interiores, tendo ainda de serem consideradas as eventuais infiltrações.

Ao longo do semestre lectivo pretende-se fornecer os conhecimentos que permitam a compreensão Física dos fenómenos em jogo, os seus efeitos, a forma de os quantificar e contrariar, por forma a conseguir que se mantenham as condições de temperatura e humidade pretendidas, no local em questão – Condições de Projecto.

Note-se que estas condições variam constantemente, em torno dos valores pretendidos, não se mantendo fixas no tempo visto que os fenómenos de transmissão de calor, referidos anteriormente, nunca se processam em regime estacionário.

2. PSICROMETRIA

Capítulo da Física que estuda o ar atmosférico ou ar húmido, que passaremos a referir simplesmente por “ar”.

Vamos considerar o ar como uma mistura de dois gases, ar seco e vapor de água, ambos considerados como gases perfeitos, obedecendo a mistura à lei de DALTON.

No caso do vapor de água, o valor da constante do gás será, como usualmente, obtido pelo quociente entre o valor da constante universal dos gases perfeitos e o valor da mole do gás (18 g/mole ou 18 kg/kilomole).

No caso do ar seco, não se tratando de um composto mas sim de uma mistura, a constante do gás será obtida pelo quociente entre o valor da constante universal dos gases perfeitos e o valor da massa ponderada dos gases constituintes (azoto, oxigénio, dióxido de carbono, gases raros, etc).

Como nas disciplinas precedentes, a designação “específico”, aplicada a uma qualquer propriedade do ar seco ou do vapor de água, será referida ao valor da grandeza correspondente à unidade de massa, ou à unidade de volume do fluido em análise, sendo a propriedade representada por um símbolo minúsculo.

No caso do ar (húmido ou atmosférico) este adjectivo será aplicado a uma porção de ar que não corresponde nem à unidade de massa nem à unidade de volume, mas sim a um **volume de mistura que contenha no seu interior a unidade de massa de ar seco misturada com ω kg de vapor de água**, sendo as suas propriedades referidas como “específicas”, e por isso representadas por minúsculas.

Note-se que o vapor misturado no ar pode, devido a alterações de temperatura ou de pressão, mudar de fase, condensando, alterando assim o seu teor no volume ocupado pela unidade de massa de ar seco anteriormente referido.

Consideremos então o esquema apresentado na página seguinte que facilitará a compreensão do que foi exposto.

AR SECO

Constante para o ar seco

$$R_a = \frac{8,3144 \text{ J/mol} \cdot \text{K}}{28,9645} = 0,287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$R_a = \frac{848}{29} = 29,24 \text{ kgm/kg} \cdot \text{K}$$

Volume específico do ar seco

$$v_a = \frac{R_a T}{p_a} \text{ m}^3/\text{kg}$$

VAPOR DE ÁGUA

Constante para o vapor de água

$$R_v = \frac{8,3144 \text{ J/mol} \cdot \text{K}}{18,015} = 0,4615 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$R_v = \frac{848}{18} = 47,11 \text{ kgm/kg} \cdot \text{K}$$

Volume específico do vapor

$$v_v = \frac{R_v T}{p_v} \text{ m}^3/\text{kg}$$

Entre as temperaturas de -40 a 80°C para o ar seco e de -70 a 125°C para o vapor
Consideramos constantes os valores do calor específico a pressão constante:

$$cp_a = 1,006 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$cp_a = 0,24 \text{ kcal/kg} \cdot \text{K}$$

$$cp_v = 1,84 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$cp_v = 0,45 \text{ kcal/kg} \cdot \text{K}$$

Entalpia específica:

$$h_a = 1,006(t - 0) = 1,006t \text{ kJ/kg}$$

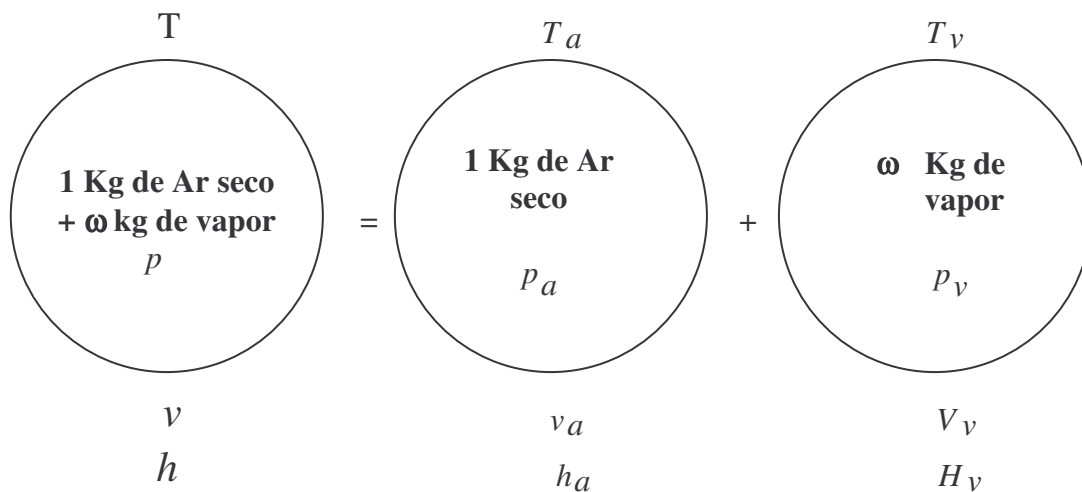
$$h_a = 0,24(t - 0) = 0,24t \text{ kcal/kg}$$

$$h_v = 2500,7 + 1,84t \text{ kJ/kg}$$

$$h_v = 597 + 0,45t \text{ kcal/kg}$$

↓ entalpia do vapor a 0°C

AR HÚMIDO



Lei de Dalton : $T = T_a = T_v$

$$V = v_a = V_v = \omega \times v_v$$

$$p = p_a + p_v$$

$$h = h_a + H_v = h_a + \omega \times h_v$$

- v – volume específico da mistura
 h – entalpia específica da mistura
 v_a – volume específico do ar seco à temperatura da mistura e à sua pressão parcial (pressão a que o ar seco ficaria submetido se só ele ocupasse o volume v da mistura à mesma temperatura)
 h_a – entalpia específica do ar seco (específica porque no interior do volume v se encontra a unidade de massa de ar seco – 1kg)
 V_v – volume do vapor à sua pressão parcial e à temperatura da mistura (não específico porque no interior do volume v não se encontra a unidade de massa de vapor mas sim ω kg)
 H_v – entalpia do vapor (não específica porque no interior do volume v não se encontra a unidade de massa de vapor mas sim ω kg)

Humidade Específica ou (absoluta):

$$\omega = \frac{M_v}{m_a} = 0,622 \frac{P_v}{p - P_v} \quad (\text{kg/kg})$$

Expressão obtida do seguinte modo: $v_v = v_a$

$$\omega \times v_v = v_a$$

$$\omega = \frac{v_a}{v_v} = \frac{\frac{P_a T}{R_a}}{\frac{P_v T}{R_v}} = \frac{R_a}{R_v} \times \frac{P_v}{P_a}$$

$$\omega = \frac{0,287}{0,4615} \times \frac{P_v}{p - P_v} = 0,622 \frac{P_v}{p - P_v} \quad (\text{kg/kg})$$

Quantidade de vapor misturada com cada quilograma de ar húmido, ou seja, a massa de vapor contida no volume v .

Humidade Específica de Saturação:

$$\omega_s = 0,622 \frac{P_S}{p - P_S} \quad (\text{kg/kg})$$

Quantidade máxima de vapor de água que cada kg de ar seco pode conter à pressão atmosférica normal e à temperatura considerada.

Humidade Relativa:

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} \times 100 \text{ (\%)}$$

Relação entre a pressão parcial do vapor e a pressão de saturação (pressão a que o vapor muda para a fase líquida), à temperatura T considerada.

Indica-nos em percentagem a relação entre a pressão parcial do vapor e a sua pressão de saturação (pressão a que o vapor começa passar para o estado líquido, deixando por isso de existir na mistura na forma de vapor) à temperatura considerada.

Dá-nos uma ideia sobre a possibilidade de ocorrerem condensações nas superfícies frias dum determinado local – por exemplo vidros de janelas exteriores, na estação fria.

Grau de Saturação:

$$\chi = \frac{\omega}{\omega_s} \times 100 = \frac{p - p_s}{p - p_v} \cdot \varphi \text{ (\%)}$$

Indica-nos a percentagem de vapor contido na mistura relativamente à quantidade máxima de vapor que a mistura pode conter à mesma temperatura.

O seu valor é sempre muito próximo do valor da humidade relativa.

Temperatura de Saturação ou Ponto de Orvalho: t_c ou O

Temperatura a que o vapor contido na mistura começa a condensar, mudando para o estado líquido, à sua pressão parcial.

Nesta situação dizemos incorrectamente que o ar (mistura) está saturado, uma vez que não é o ar que é susceptível de mudança de fase à pressão atmosférica normal, mas sim o vapor de água nele existente.

3. PROBLEMA TIPO

Para ar húmido à pressão atmosférica normal, ao nível do mar, à temperatura seca de 27°C e, com uma humidade relativa de 50%, determinar analiticamente:

$$- p_v, p_a, v, t_c \text{ ou } O, \omega, \omega_s, \chi, \rho_v, h$$

Resolução:

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 27^\circ C \\ \phi = 50\% \\ p = 760 \text{ mmHg} = 10335,1 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 101,325 \text{ kPa} \end{array} \right.$$

$$\phi = \frac{p_v}{p_s} \times 100 \Rightarrow p_v = \frac{50}{100} \times p_s = 0,5 \times 3,5674 \Rightarrow p_v = 1,7837 \text{ kPa}$$

↓
(da tabela de vapor $t = 27^\circ C$)

$$p_v = 1,7837 \text{ kPa} \Rightarrow \text{interpolando na tabela de vapor} \Rightarrow t_c = O = 15,7^\circ C$$

$$p_a = p - p_v = 101,325 - 1,7837 \Rightarrow p_a = 99,5413 \text{ kPa}$$

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = 0,622 \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} \Rightarrow \omega = 0,01115 \text{ kg} / \text{kg}$$

O volume específico da mistura poderá ser calculado através dos volumes específicos do ar seco ou do vapor de água:

$$v_a = \frac{R_a T}{p_a} \text{ m}^3 / \text{kg} = \frac{0,287 \times 300}{99,5413} = 0,865 \text{ m}^3 / \text{kg} \Rightarrow v = 0,865 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$v_v = \frac{R_v T}{p_v} \text{ m}^3 / \text{kg} = \frac{0,4615 \times 300}{1,7837} = 77,6196 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$v = V_v = \omega \cdot v_v = 0,01115 \times 77,6196 \text{ m}^3 / \text{kg} \Rightarrow v = 0,865 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

como não podia deixar de ser obtivemos valor idêntico ao anteriormente achado

$$\rho_v = \frac{1 \text{ kg}}{v_v \text{ m}^3} \Rightarrow \rho_v = \frac{1}{77,6196} = 0,0129 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\omega_s = \frac{m_{vs}}{m_a} = 0,622 \frac{p_s}{p_a} = 0,622 \frac{p_s}{p - p_s} = 0,622 \frac{3,5674}{101,325 - 3,5674} = 0,0227 \text{ kg} / \text{kg}$$

$$\chi = \frac{\omega}{\omega_S} \times 100 = \frac{0,01115}{0,0227} \times 100 \cong 49 \text{ (\%)}$$

$$h_a = 1,006(t - 0) = 1,006 \times 27 = 27,162 \text{ kJ/kg}$$

$$h_v = 2500,7 + 1,84t = 2500,7 + 1,84 \times 27 = 2550,38 \text{ kJ/kg}$$

$$h = h_a + H_v = h_a + \omega \cdot h_v = 27,162 + 0,01115 \times 2550,38 \cong 55,6 \text{ kJ/kg}$$

Com o exemplo anterior, que será o único efectuado durante o semestre lectivo, fornece-se uma ferramenta que permite, dados dois parâmetros do estado do ar, o cálculo de todas as outras propriedades, possibilitando a análise e quantificação da energia, teor de vapor, etc, numa qualquer evolução entre dois estados.

Saliento a necessidade de compreensão do significado físico de cada grandeza calculada no exemplo dado, uma vez que em seguida passaremos a utilizar, na resolução dos problemas mais frequentes, uma nova ferramenta que torna mais expedita a determinação das propriedades do ar húmido, desde que se conheçam duas das suas propriedades – **CARTA PSICROMÉTRICA**.

Trata-se dum ábaco que permite uma fácil visualização da variação das principais propriedades do ar, numa evolução entre dois estados, a **pressão constante**, e que possibilita, por leitura directa, obter o valor dessas propriedades sem que se tenha de recorrer ao cálculo exemplificado no problema tipo, para cada um dos estados.

A carta psicrométrica é construída para uma determinada pressão, normalmente associada à altitude, não permitindo a visualização de evoluções entre dois estados a pressões diferentes, tendo nestes casos que se recorrer ao cálculo analítico apresentado no problema tipo.

Dada a simplicidade de utilização da carta é frequente o esquecimento do significado físico das propriedades do ar aí representadas, das leis da física que regem cada um dos fenómenos ocorrentes em qualquer evolução do estado do ar húmido, facto que considero de extrema gravidade por ser limitador da capacidade de análise e estudo de fenómenos em que a carta psicrométrica não possa ser utilizada.

4. CARTA PSICROMÉTRICA

ALTITUDE DEFINIDA

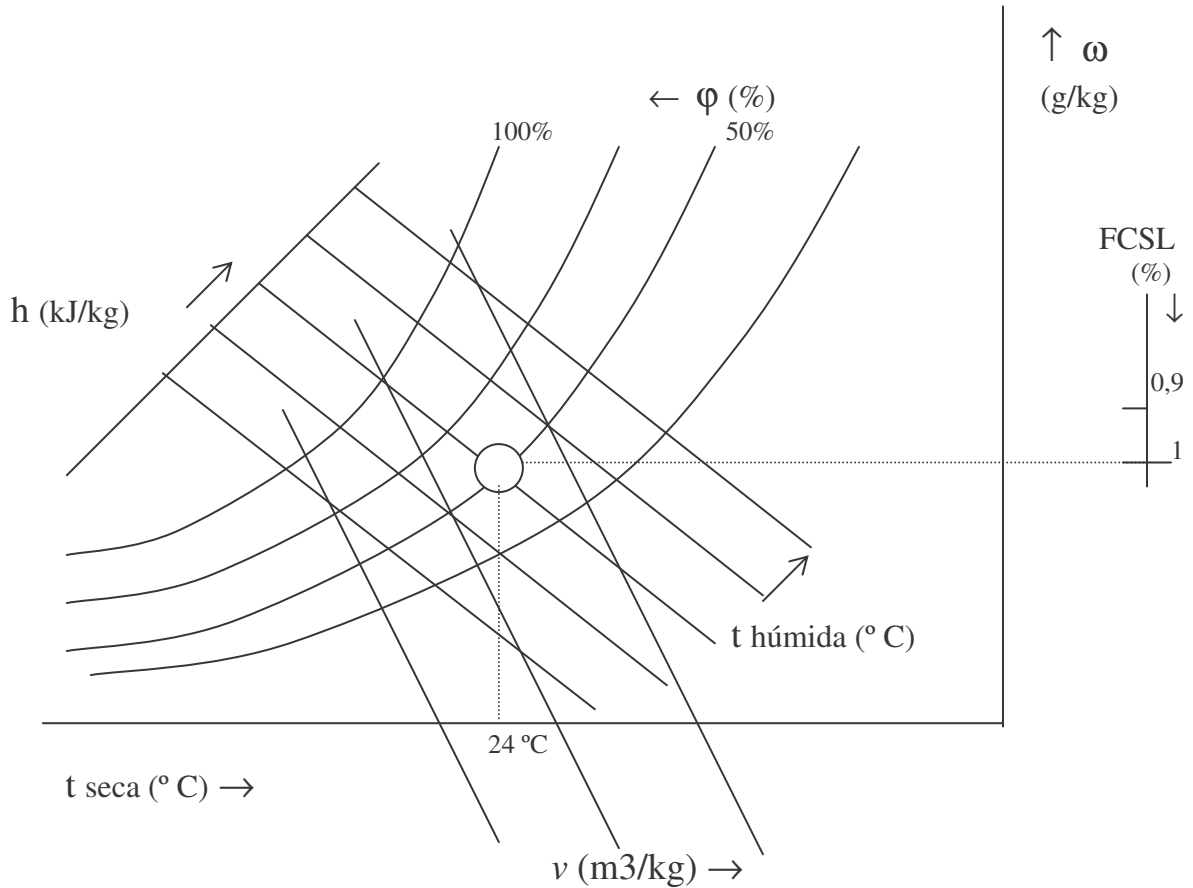


Figura 1

Na figura 1 representámos as linhas de entalpia constante, coincidentes com as de temperatura húmida constante, o que não é verdadeiro.

As linhas de entalpia constante são um pouco mais inclinadas, não sendo representadas separadamente para não sobrecarregar a figura, pelo que algumas cartas não as representam, outras incluem linhas com os factores de correcção a aplicar aos valores retirados da escala de entalpia, utilizando os valores da sua intersecção com as linhas de temperatura húmida constante.

Na figura 1, do lado direito, é ainda representada a escala de factor de calor sensível, ou factor térmico, para utilizar conjuntamente com o ponto assinalado com um círculo (correspondente a uma temperatura seca de 24 $^{\circ}$ C e 50% de humidade relativa), cujo significado será posteriormente explicado.

Conhecendo dois valores de duas propriedades do ar húmido, marcando o ponto correspondente na carta, podemos por leitura directa obter os valores das restantes propriedades com rigor assinalável, o que pode ser verificado comparando os valores obtidos por este modo com os obtidos analiticamente, no problema tipo.

5. PROCESSOS DE AR HÚMIDO

São os processos de que nos podemos servir para alterar as condições do estado do ar, por forma a que possamos contrariar os efeitos das cargas térmicas que sobre ele actuam.

Vamos, a partir de agora, passar a distinguir os ganhos térmicos em duas categorias:

- Ganhos Sensíveis – que provocam uma variação da temperatura seca do ar húmido, e consequentemente da sua entalpia e humidade relativa, **sem alteração da sua humidade específica**, dando por isso origem a evoluções segundo linhas horizontais na carta psicrométrica. São assim designados uma vez que somos sensíveis a mudanças de temperatura do ar que nos rodeia.
- Ganhos Latentes – que provocam alterações da humidade específica, e consequentemente da sua entalpia e humidade relativa, **sem variação significativa da temperatura seca**, dando origem a evoluções segundo rectas verticais na carta psicrométrica. São assim designados porque embora impliquem alterações da entalpia do ar húmido, somos pouco sensíveis a variações do teor de humidade desde que estas variações não impliquem variações superiores a cerca de 10% em torno da humidade relativa de 50%.

Os processos de ar húmido mais vulgarmente utilizados são o aquecimento simples ou sensível, a humidificação com injeção de vapor de água, o arrefecimento com humidificação e, finalmente, o arrefecimento com ou sem desumidificação.

Em qualquer dos processos consideraremos que o **caudal de ar seco permanecerá constante**, podendo eventualmente variar o teor de vapor de água (humidade específica), a ele associado.

Em qualquer evolução entre dois estados, definiremos o factor térmico da evolução como sendo a razão entre o calor sensível da evolução entre os dois estados, e o calor total trocado na evolução.

Na resolução prática dos problemas exemplificativos de cada processo utilizaremos sempre o mesmo caudal (de 1000 m³/h), por forma a que sejam obtidos valores de ordem de grandeza de referência, sensibilizando os alunos para futuros erros grosseiros.

5.1 Aquecimento Simples ou Sensível

Processo efectuado em **baterias de aquecimento** a água aquecida, vapor, baterias de condensação de ciclos frigoríficos (bombas de calor), ou de resistências eléctricas cada vez mais raramente utilizadas e apenas para pequenas potências.

Neste processo limitamo-nos a trocar calor sem que se alterem as proporções de ar seco e de vapor de água – sendo portanto um processo a humidade específica constante.

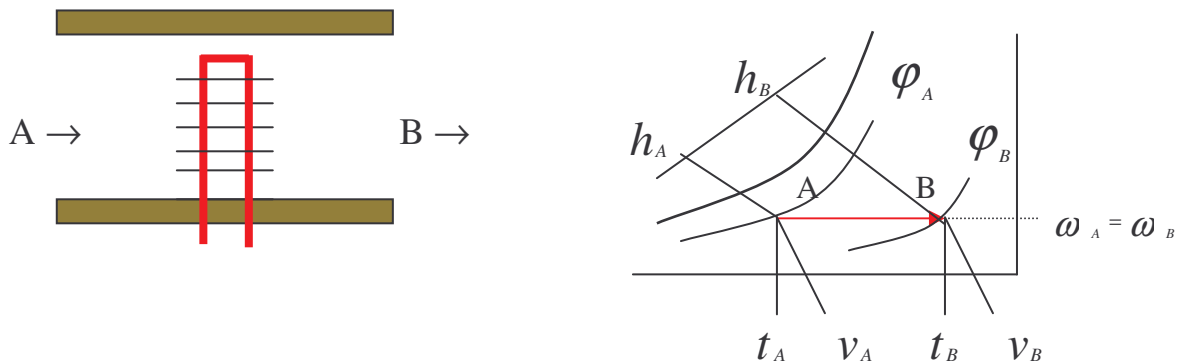


Figura 2

Características do processo:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{m}_{aA} = \dot{m}_{aB} \\ \dot{m}_{vA} = \dot{m}_{vB} \end{array} \right\} \Rightarrow \omega_A = \omega_B$$

Futuramente deixaremos de escrever o índice *a* sendo o caudal mássico sempre referido ao caudal de ar seco.

Exemplo: Pretende-se aquecer um caudal de 1000 m³ de ar húmido, a uma temperatura seca de 10°C e 90% de humidade relativa, até à temperatura seca de 20°C.

Determinar a potência da bateria de aquecimento, a humidade relativa e o volume específico da mistura à saída da bateria.

Resolução: Neste como nos exemplos seguintes começaremos sempre por determinar o caudal mássico de ar seco, que se manterá constante em cada uma das evoluções, considerando ainda que a evolução do estado do ar se efectua a pressão atmosférica constante e ao nível do mar.

$$t = 10^\circ \text{C}$$

$$\varphi = 90\%$$

$$p = 760 \text{ mmHg} = 10335,1 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 101,325 \text{ kPa}$$

Da carta psicrométrica para o nível do mar obtemos: $v_A = 0,806 \text{ m}^3 / \text{kg}$
 $h_A = 27,3 \text{ kJ} / \text{kg}$

Na entrada da bateria obteremos um caudal mássico de ar seco igual ao da saída dado por:

$$\dot{m}_{aA} = \dot{m}_{aB} = \frac{\dot{V}}{v_A} = \frac{1000}{0,806} = 1241 \text{ kg} / \text{h} = 0,345 \text{ kg} / \text{s}$$

Como se trata de um aquecimento simples, a humidade específica à saída será igual à da entrada – da carta psicrométrica traçando uma linha horizontal até à temperatura de 20°C pretendida, obtendo-se:

$$\text{Ponto B} \quad \left\{ \begin{array}{l} h_B = 37,6 \text{ kJ} / \text{kg} \\ v_B = 0,834 \text{ m}^3 / \text{kg} \\ \varphi_B = 47,5\% \end{array} \right.$$

a potência requerida na bateria seria de:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_B - h_A) = 0,345(37,6 - 27,3) = 3,55 \text{ kW}$$

Note-se que o caudal volúmico à saída é superior ao da entrada dado que ocorreu um aumento do volume específico da mistura provocado pelo aumento de temperatura, obtendo-se:

$$\dot{V}_B = \dot{m}_B \times v_B = 1241 \text{ kg/h} \times 0,834 \text{ m}^3/\text{kg} = 1035 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Como a variação é relativamente pequena é usual considerar-se o volume específico constante e consequentemente o caudal volúmico também constante.

Como podemos observar a humidade relativa baixou de 90% para 47,5%, porque o estado do ar se afastou da saturação, não devendo no entanto este processo ser considerado uma desumidificação visto que o teor de vapor existente na mistura permaneceu constante.

Nesta evolução a temperatura de orvalho é a mesma à entrada e à saída da bateria.

Se considerarmos uma evolução de B para A estamos perante um processo de arrefecimento simples, que, como veremos mais adiante, ocorre nas baterias de arrefecimento “secas”, ou nos sistemas de tetos ou paredes arrefecidas.

5.2 Humidificação com Vapor

Processo efectuado em **humidificadores de vapor**, normalmente do tipo de eléctrodos submersos, ou por injeção de vapor produzido num gerador.

Neste processo embora estejamos a introduzir, no fluxo de ar húmido, vapor de água a uma temperatura de cerca de 100°C consideraremos que a temperatura seca permanece inalterada entre a entrada e a saída, pelas razões que adiante exporemos.

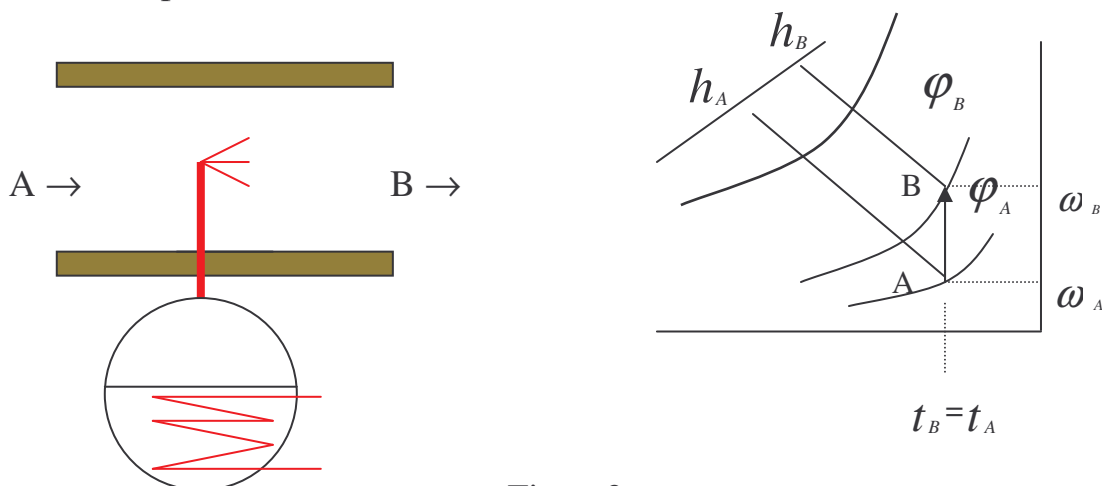


Figura3

Características do processo:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{m}_{aA} = \dot{m}_{aB} \\ t_{sB} \cong t_{sA} \end{array} \right\}$$

Exemplo: Pretende-se aumentar a humidade relativa a um caudal de 1000 m³/h de ar húmido, à temperatura seca de 25°C de 40 para 50%.

Determinar a potência necessária ao processo e a quantidade de vapor de água a injectar.

Resolução: Começamos por determinar o caudal mássico de ar seco, que se manterá constante no processo, considerando ainda que a evolução do estado do ar se passa a pressão atmosférica constante e ao nível do mar.

$$t = 25^\circ C$$

$$\varphi = 40\%$$

$$p = 760 \text{ mmHg} = 10335,1 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 101,325 \text{ kPa}$$

Da carta psicrométrica para o nível do mar obtemos:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_A = 0,849 \text{ m}^3 / \text{kg} \\ h_A = 45,2 \text{ kJ} / \text{kg} \\ \omega_A = 7,9 \text{ g} / \text{kg} \end{array} \right.$$

O caudal mássico de ar seco na entrada e saída do humidificador será dado por:

$$\dot{m}_{aA} = \dot{m}_{aB} = \frac{\dot{V}}{v_A} = \frac{1000}{0,849} = 1177,9 \text{ kg} / \text{h} = 0,327 \text{ kg} / \text{s}$$

Da carta psicrométrica obteríamos para o ponto de saída:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_B = 50,3 \text{ kJ} / \text{kg} \\ \omega_B = 9,9 \text{ g} / \text{kg} \end{array} \right.$$

A energia necessária ao processo seria determinada pelo balanço de entalpia:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_B - h_A) = 0,327(50,3 - 45,2) = 1,67 \text{ kW}$$

A quantidade de vapor de água necessária seria determinada pelo balanço entre o vapor transportado pela massa de ar seco entre a entrada e a saída:

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}(\omega_B - \omega_A) = 1177,9(0,0099 - 0,0079) = 2,25 \text{ kg/h}$$

Como se vê acrescentámos uma massa 2,25 kg de vapor a cerca de 100°C, a 1177,9 kg de ar seco à temperatura de 25°C – Como a massa de ar seco é muito superior à de vapor desprezámos o aumento de temperatura da mistura, considerando o processo a temperatura seca constante.

5.3 Arrefecimento com Humidificação - Saturação Adiabática

Processo efectuado em **lavadores de ar** ou **saturadores adiabáticos**, no qual se consegue baixar a temperatura seca a um fluxo de ar injectando água pulverizada.

A água pulverizada em pequenas gotas muda de fase passando ao estado gasoso absorvendo ao fluxo de ar o calor necessário à mudança de fase, baixando a temperatura da mistura.

Mais uma vez o caudal de ar seco permanecerá constante entre a entrada e a saída, alterando-se apenas o teor de vapor de água transportado.

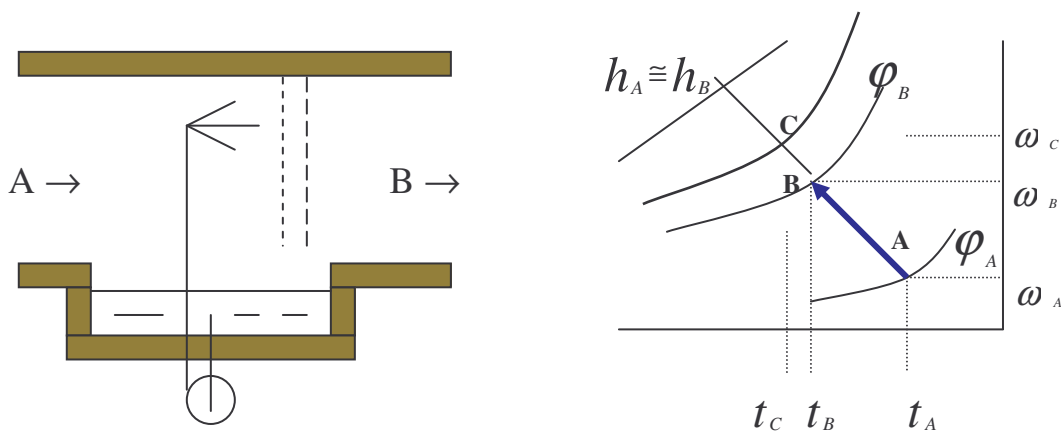


Figura 4

Características do processo:

$$\begin{cases} \dot{m}_{aA} = \dot{m}_{aB} \\ t_{hB} = t_{hA} \end{cases}$$

Visto tratar-se de uma mudança de fase – evaporação de água a pressão atmosférica constante.

Como $t_{h_B} = t_{h_A}$ então $h_A \cong h_B$, visto que as linhas de entalpia são quase coincidentes com as de temperatura húmida constante.

Define-se eficiência do lavador (η) como sendo a razão entre os comprimentos dos segmentos AB e BC, portanto $\frac{\omega_B - \omega_A}{\omega_C - \omega_A}$, ou ainda $\frac{t_A - t_S}{t_A - t_C}$

Exemplo: Num saturador adiabático pretende-se baixar 10°C a temperatura de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$, de ar húmido à temperatura seca de 30°C 30% de humidade relativa.

Determinar a quantidade de água a evaporar, a humidade relativa final, e a eficiência do saturador (lavador).

Resolução: Começemos por determinar o caudal mássico de ar seco, que se manterá constante no processo, considerando ainda que a evolução do estado do ar se passa a pressão atmosférica constante e ao nível do mar.

$$t = 30^\circ\text{C}$$

$$\varphi = 30\%$$

$$p = 760 \text{ mmHg} = 10335,1 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 101,325 \text{ kPa}$$

Da carta psicrométrica para o nível do mar obtemos:

$$\text{Ponto A} \left\{ \begin{array}{l} v_A = 0,863 \text{ m}^3 / \text{kg} \\ t_h = 17,9^\circ\text{C} \\ \omega_A = 7,9 \text{ g} / \text{kg} \end{array} \right.$$

O caudal mássico de ar seco na entrada e saída do humidificador será dado

$$\text{por: } \dot{m}_{aA} = \dot{m}_{aB} = \frac{\dot{V}}{v_A} = \frac{1000}{0,863} = 1158,7 \text{ kg} / \text{h} = 0,322 \text{ kg} / \text{s}$$

Da carta psicrométrica obteríamos para o ponto B de saída:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_s = 20^\circ\text{C} \\ t_h = 17,9^\circ\text{C} \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \varphi_B = 82\% \\ \omega_B = 12 \text{ g} / \text{kg} \end{array} \right.$$

A água a evaporar necessária ao processo seria determinada pelo balanço de humidade específica (balanço entre o vapor transportado pela massa de ar seco entre a entrada e a saída):

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}(\omega_B - \omega_A) = 1158,7(0,012 - 0,0079) = 4,75 \text{ kg/h}$$

Como se vê, com uma massa 4,75 kg de água, à temperatura ambiente, conseguimos baixar 10°C à temperatura de 1000 m³ de ar húmido.

Eficiência do lavador:

$$\eta = \frac{t_A - t_B}{t_A - t_C} = \frac{30 - 20}{30 - 17,9} \cong 83\%$$

Note-se que a humidade relativa de saída tem um valor elevado (82%).

Este processo, de baixo custo, poderá ser utilizado em instalações com 100% de ar novo, nas quais a humidade relativa interior possa, sem inconveniente, atingir valores relativamente elevados (60 a 65%), como por exemplo em fábricas de confecções, salas de cogeração, salas de caldeiras, etc, ou ainda em espaços abertos, como aconteceu nas exposições de Sevilha ou, mais recentemente, em Lisboa.

5.4 Arrefecimento com Desumidificação

Processo efectuado em baterias de arrefecimento, a água arrefecida em unidades arrefecedoras de água usualmente designadas por chillers, ou evaporadores de ciclos frigoríficos, no caso de baterias de expansão directa.

Na generalidade das situações de verão, o ar de um determinado local tenderá, em cada hora, a evoluir dum estado inicial A para um estado final B, alterando-se as suas condições de temperatura e humidade, e conseqüentemente, todas as restantes propriedades, de acordo com as cargas sensível Q_s e latente Q_L do local.

A carga sensível provocará uma evolução correspondente a um aquecimento simples, e a carga latente uma evolução correspondente a uma humidificação com vapor, evoluindo o estado do ar, na carta psicrométrica, da esquerda para a direita e de baixo para cima (aumento de temperatura seca e de

humidade absoluta), com um declive, característico da sala e que apenas dependerá das proporções entre as referidas cargas.

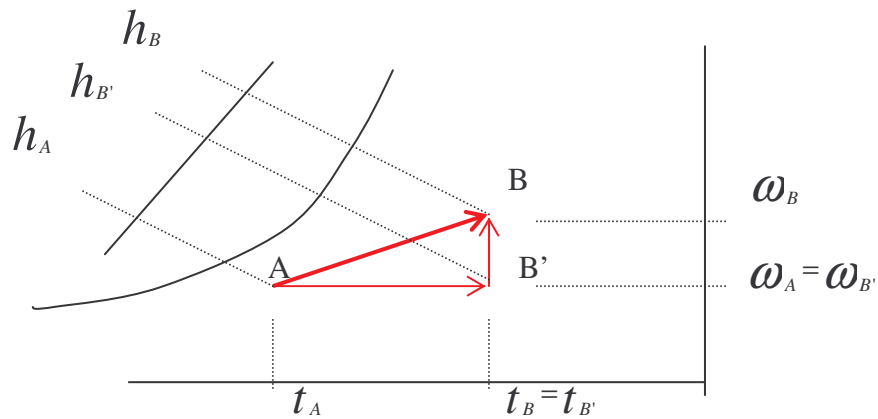


Figura 5

Às diferenças de temperatura e de entalpia entre os pontos B' e A corresponderá o efeito produzido pela carga sensível.

Às diferenças de humidade absoluta e de entalpia entre os pontos B e B' corresponderá o efeito produzido pela carga latente.

Para contrariarmos o efeito das cargas que actuam sobre o ar da sala, vamos insuflar ar, na sala, a uma temperatura e humidade inferiores, por forma a que sob o efeito das referidas cargas, o estado final seja o pretendido em termos de temperatura e humidade.

Note-se que só conseguiremos obter o estado final pretendido desde que insuflarmos ar em condições representadas por pontos localizados sobre uma recta AB, designada **linha de insuflação** ou **linha característica da sala**, com declive definido pelo factor de calor sensível da sala (FCSL), pois só assim se respeita a proporção entre cargas sensível e latente que actuam sobre o ar da sala.

Definimos factor de calor sensível da sala como sendo a razão entre as cargas sensível e total, que actuam sobre o ar da sala.

$$FCSL = \frac{Q_S}{Q_T} = \frac{Q_S}{Q_S + Q_L}$$

À diferença entre a temperatura da sala e a temperatura de insuflação designaremos Δt de insuflação, que no caso de instalações destinadas a conforto, não deverá ultrapassar os 9°C.

Como é lógico, para retirarmos a mesma carga de uma sala, quanto maior for o Δt menor será o caudal que necessitaremos de insuflar na sala, visto que como sabemos da termodinâmica:

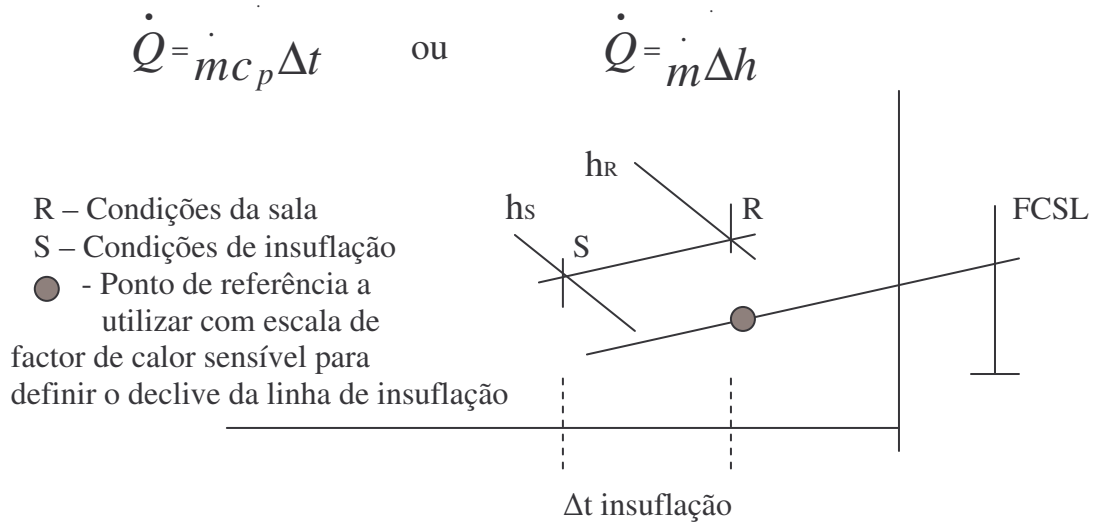


Figura 6

Consideremos agora a bateria de arrefecimento representada na figura

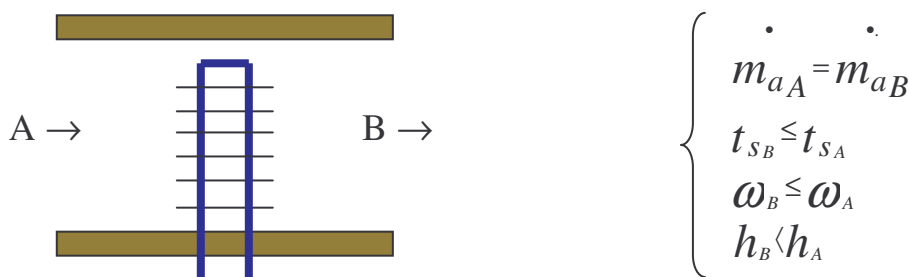


Figura 7

As baterias de frio são normalmente constituídas por tubos de cobre mecanicamente expandidos em alhetas de alumínio, destinadas ao aumento da superfície de permuta.

Pelo princípio de igual temperatura e não escorregamento, o fluido (ar húmido) em contacto com as alhetas da bateria fica à temperatura da alheta,

designada por temperatura equivalente de superfície ou adp, abreviatura, em língua Inglesa, do ponto de orvalho da bateria, desenvolvendo-se, ao longo da superfície da alheta, uma camada limite térmica, na qual a temperatura tenderá a evoluir da temperatura da alheta para a temperatura do escoamento não perturbado, correspondente às condições de entrada na bateria, resultando num estado final com condições intermédias entre estes dois estados.

Este estado final, resultante da mistura de ar nas condições de entrada com ar nas condições de contacto com a bateria, dependerá de uma característica da bateria designada por factor de “By-Pass”.

O Factor de By-Pass determinará a posição do ponto de saída da bateria de frio sobre a recta que unirá os pontos correspondentes às condições de entrada na bateria e da temperatura equivalente de superfície (ADP), este último sobre a linha de saturação.

Como é óbvio o ponto representativo das condições de saída da bateria de frio, estará tanto mais próximo das condições ADP quanto menor for o valor do factor de By-Pass – menor será o caudal que passará na bateria sem ser tratado.

As baterias poderão ter comportamentos diferentes consoante a sua temperatura equivalente de superfície:

5.4.1 Baterias húmidas:

No caso da temperatura equivalente de superfície ser inferior à temperatura do ponto de orvalho do ar de entrada, originará a condensação do vapor contido nas partículas de ar, que entrem em contacto com as alhetas, provocando um abaixamento do valor global da humidade específica do ar que passa na bateria, e por conseguinte uma desumidificação.

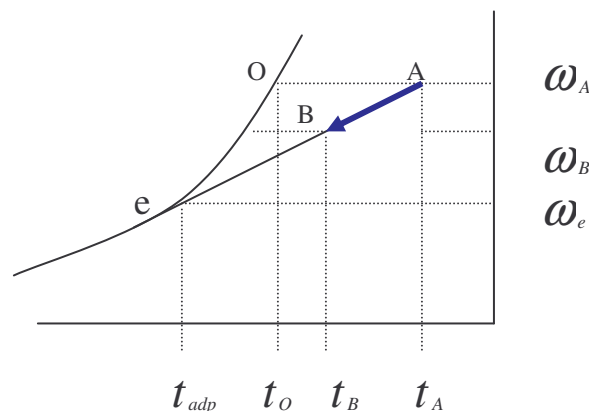


Figura 8

Factor de By-Pass da bateria:

$$FB = \frac{\overline{eB}}{eA} = \frac{t_B - t_{adp}}{t_A - t_{adp}} = \frac{h_B - h_e}{h_A - h_e} = \frac{\omega_B - \omega_e}{\omega_A - \omega_e}$$

5.4.2 Baterias secas:

No caso da temperatura equivalente de superfície, adp, ter um valor superior ao ponto de orvalho do ar que entra na bateria, o ar não atingirá a saturação, não sofrendo alteração o teor de vapor nele contido, tratando-se de um processo a humidade específica constante – arrefecimento simples, referido quando estudámos o aquecimento simples ou sensível, não ocorrendo, neste caso, desumidificação.

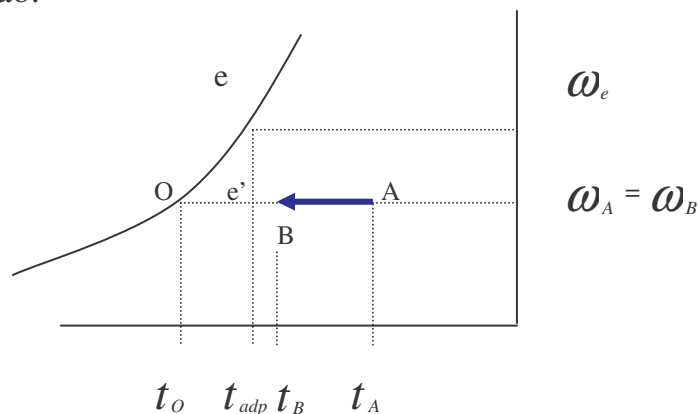


Figura 9

Como no caso das baterias húmidas o factor de By-Pass da bateria será definido por:

$$FB = \frac{\overline{e'B}}{e'A} = \frac{t_B - t_{adp}}{t_A - t_{adp}} = \frac{h_B - h_{e'}}{h_A - h_{e'}}$$

No processo em estudo consideraremos apenas os fenómenos que ocorrem nas baterias húmidas, visto estarmos a estudar o arrefecimento com desumidificação.

Consideremos o esquema da figura, correspondente ao sistema inferiormente representado:

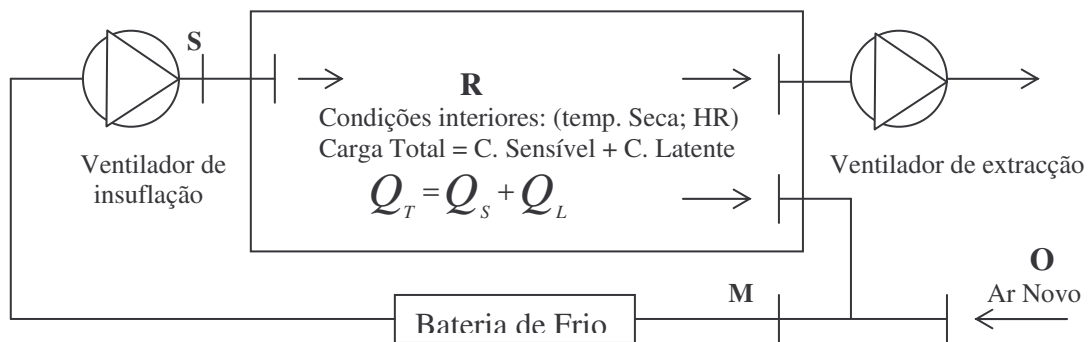
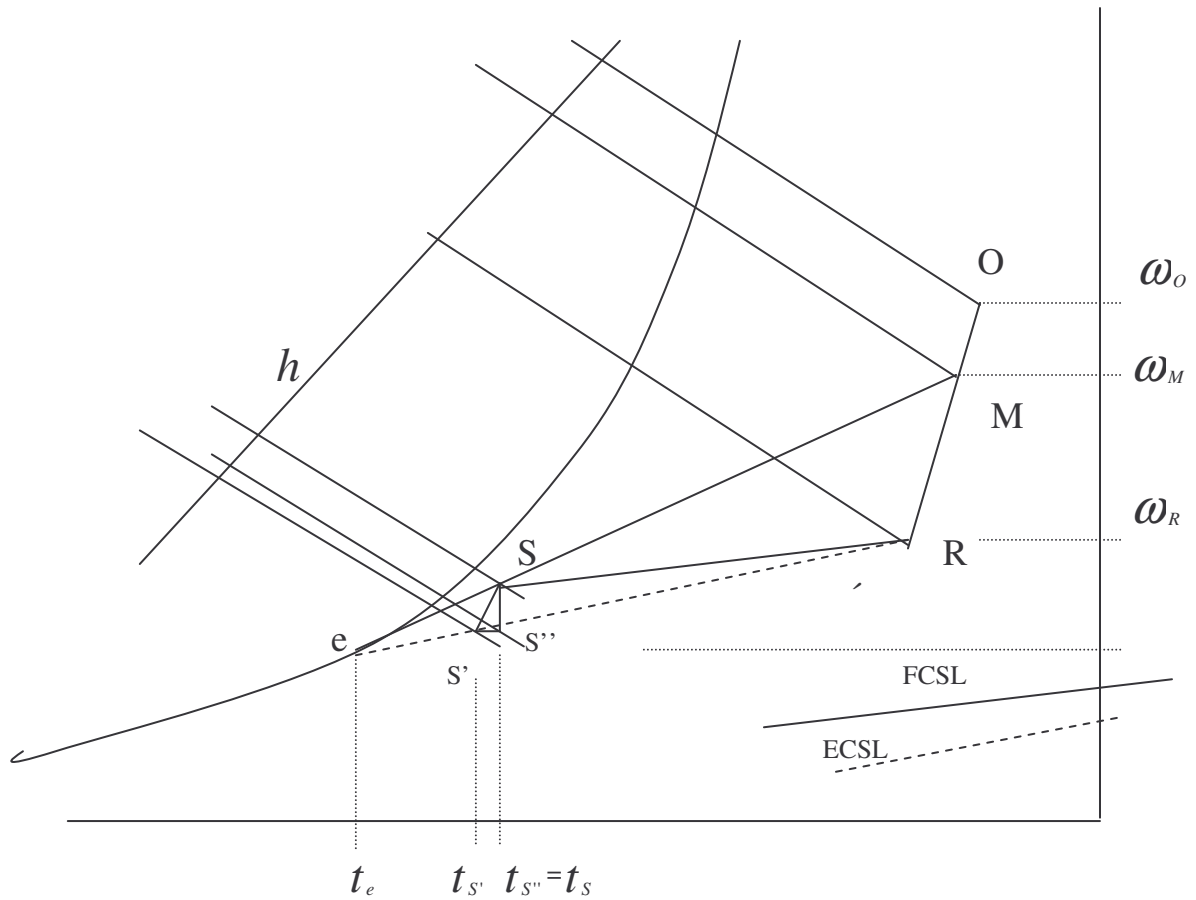


Figura 10

Consideremos a figura 10 representativa do sistema na carta psicrométrica e o significado dos pontos e linhas nela representadas.

Ponto R – Ponto representativo das condições interiores da sala

Ponto O – Ponto representativo das condições exteriores

- Ponto M – Ponto representativo das condições resultantes da mistura de caudais de ar novo e de retorno da sala – coincidentes com as condições do ar à entrada da bateria de arrefecimento
- Ponto e (adp) – Ponto representativo das condições do ar que entra em contacto com as alhetas da bateria, ou seja, à temperatura da alheta, pelo princípio de não escorregamento e igual temperatura, e 100% de humidade relativa, visto que esta temperatura é inferior à do ponto de orvalho das condições de entrada na bateria.
- Ponto S – Ponto representativo das condições de insuflação na sala – coincidentes com as de saída da bateria de arrefecimento – resultantes da mistura dos caudais de ar nas condições de entrada, com as que entraram em contacto com as alhetas da bateria (ar saturado à temperatura das alhetas).
Convencionou-se designar por “ar tratado” o ar que entra em contacto com as alhetas, e “ar de By-Pass”, o ar que passa na bateria, saindo nas condições em que entrou na mesma.
- Linha RS – Linha característica da sala, paralela à linha de factor de calor sensível do local (FCSL), que define o declive resultante da razão entre cargas sensível e total da sala, sobre a qual se encontrará o ponto de insuflação, e por isso também chamada de linha de insuflação.
- Linha eR – Linha imaginária com declive definido pelo factor de calor sensível efectivo do local (ECSL), definido de forma análoga à de factor de calor sensível do local, considerando os acréscimos das cargas, sensível e latente, devidas ao ar exterior (q_s e q_L).

Exemplo 1: Uma sala que se pretende climatizar está submetida às seguintes condições:

- Carga Térmica Total (kW) – 100
- Carga Térmica Sensível (kW) – 90
- Temperatura Seca Interior (°C) – 25
- Humidade Relativa Interior (%) – 50
- Temperatura Exterior (°C) – 33
- Humidade Relativa Exterior (%) – 45%
- Temperatura de Insuflação (°C) – 16
- Caudal de Ar novo (m³/h) – 5000
- Nível do mar

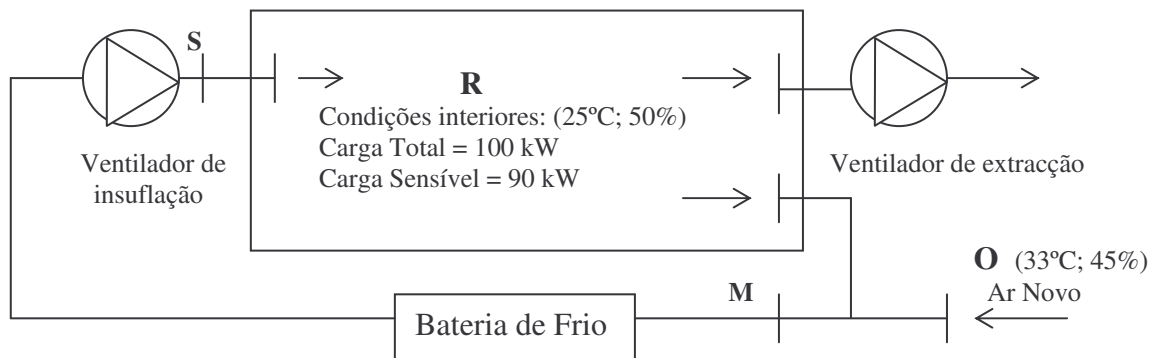


Figura 11

Determinar:

- Temperatura equivalente de superfície (ADP)
- Factor de By-Pass
- Capacidade Frigorífica Total da bateria de frio
- Capacidade Frigorífica Sensível da bateria
- Factor térmico da evolução na bateria
- Capacidade Desumidificadora da bateria

Resolução: Começamos por determinar as características do ponto de insuflação, que estará localizado sobre a linha característica da sala, paralela à linha de factor de calor sensível do local.

$$FCSL = \frac{Q_s}{Q_T} = \frac{Q_s}{Q_s + Q_L} = 0,9$$

$$\text{Ponto R} \left\{ \begin{array}{l} t_R = 25^\circ C \\ \varphi_R = 50\% \end{array} \right. \xrightarrow{\text{da Carta Psicrométrica}} h_R = 50,3 kJ / kg$$

Traçando a linha característica da sala (linha de insuflação), que passará pelo ponto R, representativo das condições interiores da sala, com um declive definido pelo factor de calor sensível, e sabendo que o ponto de insuflação estará sobre esta recta, com a temperatura de insuflação dada obtemos as suas características:

$$t_s = 16^\circ C \xrightarrow{\text{da carta Psicrométrica}} \left\{ \begin{array}{l} h_s = 40,5 kJ / kg \\ \omega_s = 9,6 g / kg \end{array} \right.$$

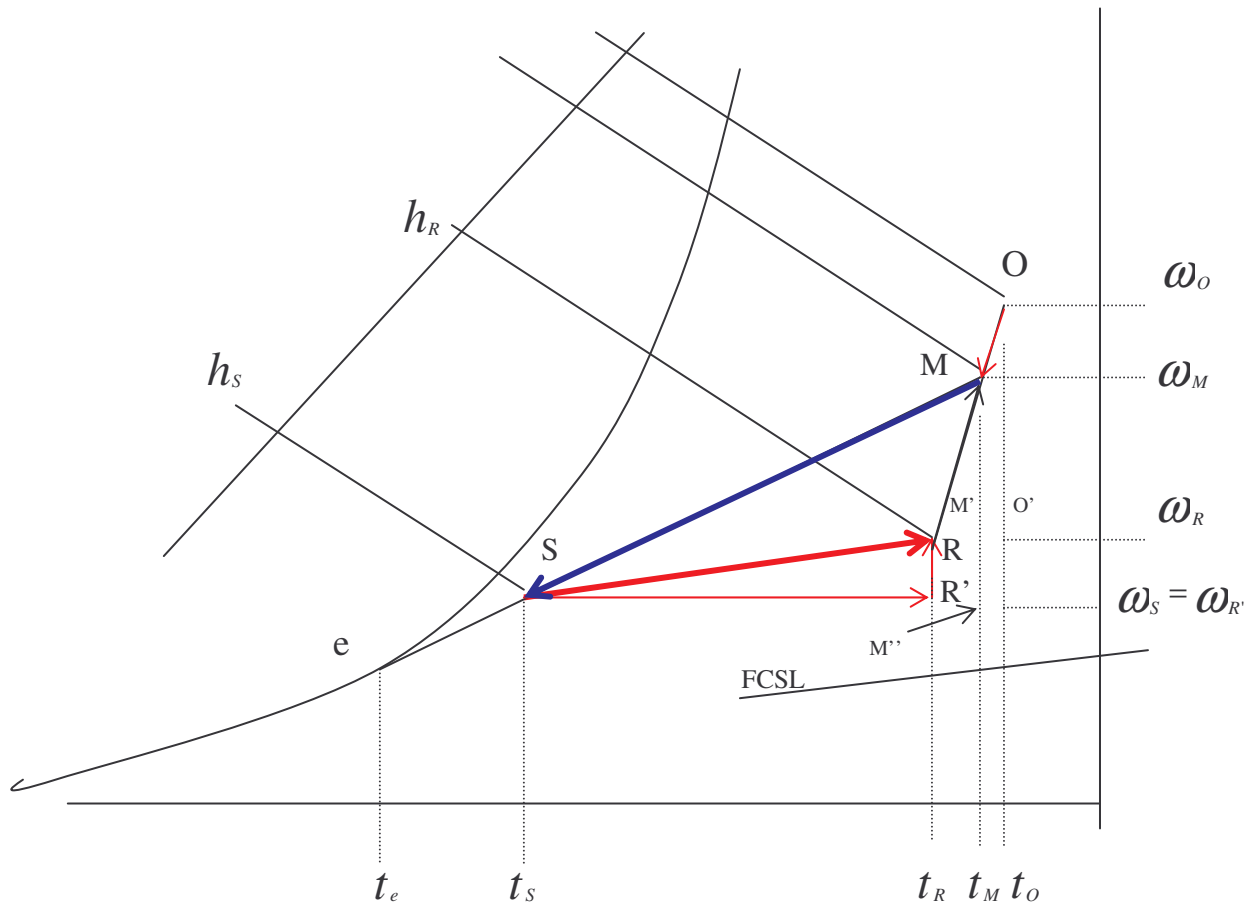


Figura 12

Com uma das expressões que se seguem determinamos o caudal mássico de ar seco a insuflar na sala:

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_S (h_R - h_S) = 100 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_S (h_{R'} - h_S) = 90 \text{ kW} \quad \text{ou}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_S (h_R - h_{R'}) = 10 \text{ kW}$$

Obtendo-se $\dot{m}_S = 10,2 \text{ kg/s}$

O caudal volúmico de insuflação poderia seguidamente ser calculado recorrendo ao volume específico no ponto S, ou através das seguintes expressões:

$$\dot{Q}_S = 1,23 \dot{V}_S (t_R - t_S) = 90000W \quad \text{com } \dot{V}_S \text{ em litros / segundo}$$

ou

$$\dot{Q}_L = 3 \dot{V}_S (\omega_R - \omega_S) = 10000W \quad \text{com } \dot{V}_S \text{ em litros / segundo} \\ \text{e } \omega \text{ em g / kg}$$

Com a diferença entre o caudal insuflado e de ar novo obtemos o caudal de retorno e consequentemente as condições de entrada na bateria de arrefecimento – ponto M, que por ser resultante duma mistura de caudais se encontrará sobre a recta que une os dois estados R e O

$$t_M = \frac{\dot{m}_R t_R + \dot{m}_O t_O}{\dot{m}_R + \dot{m}_O} \quad \text{ou,} \quad h_M = \frac{\dot{m}_R h_R + \dot{m}_O h_O}{\dot{m}_R + \dot{m}_O}, \text{ expressões resultantes do}$$

balanço de energia no ponto M, e ainda no que respeita à humidade específica:

$$\omega_M = \frac{\dot{m}_R \omega_R + \dot{m}_O \omega_O}{\dot{m}_R + \dot{m}_O} \quad \text{resultante do balanço de vapor no mesmo ponto M}$$

Obtendo-se para o ponto M, localizado sobre a recta que une os pontos R e O, representativos das condições interiores e exteriores da sala:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_M = \dot{m}_S \\ t_M = 26,2^\circ C \\ h_M = 53 kJ/kg \\ \omega_M = 10,4 g/kg \end{array} \right.$$

A bateria de frio levará o ar desde o ponto de mistura M até às condições de insuflação S, ficando definida a temperatura ADP, o factor de By-pass da bateria e as suas capacidades frigoríficas.

$$t_{adp} \cong 12,8^\circ C$$

Factor de BY-Pass da bateria:

$$FB = \frac{\overline{eB}}{eA} = \frac{t_B - t_{adp}}{t_A - t_{adp}} = \frac{h_B - h_e}{h_A - h_e} = \frac{\omega_B - \omega_e}{\omega_A - \omega_e} = 23 \%$$

Capacidade Frigorífica total da Bateria:

$$\dot{Q}_{totalBF} = \dot{m}_S (h_M - h_S) = 127,5 kW$$

Capacidade Frigorífica Sensível da Bateria:

$$\dot{Q}_{sensívelBF} = \dot{m}_S (h_{M'} - h_S) = 105,1 kW$$

Factor Térmico da evolução na Bateria:

$$FactorTérmico = \frac{\dot{Q}_S}{\dot{Q}_{Total}} = 0,82 = 82 \%$$

Capacidade Desumidificadora da Bateria:

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_S (\omega_M - \omega_S) = 8,16 g/s = 29,4 kg/h$$

Resumindo – Conhecidas as cargas que actuam sobre o ar da sala, as temperaturas de projecto e as necessidades de ar novo, estipulando a temperatura de insuflação, que não deverá ser inferior em cerca de 9°C à temperatura do local a climatizar, devemos adoptar os seguintes procedimentos:

- 1- Cálculo do Factor de Calor Sensível
- 2- Definição do ponto representativo das condições de insuflação
- 3- Cálculo do caudal de insuflação
- 4- Cálculo do caudal de retorno
- 5- Determinação das condições de entrada na bateria de frio
- 6- Traçado da linha de evolução na bateria de arrefecimento
- 7- Determinação das capacidades e características da bateria

Como podemos constatar, desde que fixemos as condições de insuflação todos os outros parâmetros incluindo o Factor de By-Pass, ficam automaticamente definidos.

No caso de partirmos da imposição dum valor do Factor de By-pass, os procedimentos não poderão ser os anteriormente definidos visto desconhecermos as condições de insuflação e, conseqüentemente, o caudal de insuflação na sala, devendo nestes casos proceder de modo diverso:

- Tendo em conta a figura 10, consideremos que, devido à existência dum certo valor do Factor de By-Pass, uma parte do ar exterior passará na bateria sem ser tratado. Neste caso as cargas internas do local serão acrescidas dos valores de carga sensível e latente transportados pela parte do caudal de ar novo que não foi tratado, e que serão respectivamente dadas por:

$$\dot{q}_s = \dot{m}_o (h_o - h_R) \times FB = \dot{m}_M (h_M - h_R) \times FB$$

$$\dot{q}_s = \dot{m}_o (h_o - h_R) \times FB = \dot{m}_M (h_M - h_R) \times FB$$

- Em seguida determinamos as cargas sensível e latente efectivas do local, Q_{SE} e Q_{LE} respectivamente, bem como o factor de calor sensível efectivo ECSL:

- A linha representativa do factor de calor sensível efectivo servirá para, passando pelo ponto representativo das condições da sala, determinar o ponto correspondente à temperatura equivalente de superfície (adp) da bateria de frio.

Como podemos observar, o novo ponto de insuflação S' terá uma temperatura e humidade específica inferiores às do ponto de insuflação S, dada a necessidade de se retirarem as cargas acrescidas pelo ar novo.

- Na intersecção da linha representativa da evolução na bateria de frio, obtida pela união do ponto de mistura M com o ponto e, correspondente à temperatura equivalente de superfície, obtemos o ponto de insuflação correspondente à nova bateria de frio.

6. BIBLIOGRAFIA

- PORCHER, G., Cours de climatisation, E.D.I.P.A., Auxerre, 1976
- Handbook of air conditioning system design, Carrier Air Conditioning Company, McGraw-Hill, New York 1999
- MESQUITA, A.L.S., GUIMARÃES, F.A., NEFUSSI, N., Engenharia de Ventilação Industrial, ed. Edgard Blucher Lda, 1ª Ed Brasil 1977.
- ASHRAE Handbook 2000 - 2003