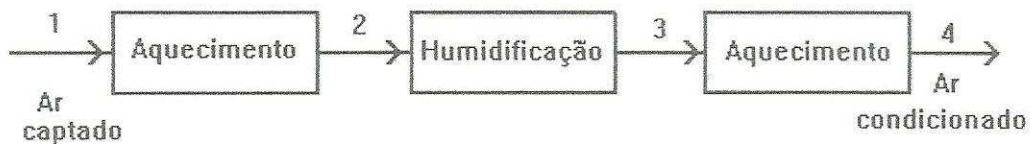


Caso 4.5

Uma unidade fabril exige um caudal horário de 2500 m^3 (PTT) de ar condicionado à temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, com $\%H_R = 45\%$ e à pressão atmosférica normal.

I) Durante o Inverno, quando o ar se encontra a $5 \text{ }^\circ\text{C}$ com uma temperatura de termómetro húmido de $2 \text{ }^\circ\text{C}$, o condicionamento do ar é realizado por: aquecimento do ar captado; humedificação em spray até à saturação (em condições praticamente adiabáticas); novo aquecimento até à temperatura final.



a) Represente sobre um esboço da carta psicrométrica do sistema, o processo de condicionamento do ar e obtenha para as misturas gasosas, correspondentes aos diferentes passos do processo, os seguintes índices de saturação: humidade absoluta, ponto de orvalho, % de humidade relativa, temperatura de termómetro seco e temperatura de termómetro húmido.

b) Calcule a massa de água evaporada por hora, na câmara de humedificação. (R: ~~15,7~~ kg/h)

c) Havendo a possibilidade de realizar o condicionamento do ar fazendo apenas um aquecimento seguido de humedificação, defina as condições operatórias para cada uma das etapas do processo. Comente as vantagens e desvantagens deste processamento, em comparação com o anterior.

II) No Verão, o ar é tipicamente caracterizado por uma temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ e por um ponto de orvalho de $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Para se conseguirem as condições desejadas, faz-se um arrefecimento seguido de um aquecimento.

a) Represente sobre a carta psicrométrica, o processo de condicionamento do ar.

b) Qual a operação intermédia indispensável à realização sequencial das duas operações indicadas?

Os problemas de psicrometria podem ser resolvidos utilizando-se a carta psicrométrica, tabelas e esboços da carta psicrométrica.

O uso da carta psicrométrica e de tabelas permite ler valores e efectuar cálculos envolvendo os índices de saturação e assim resolver numericamente os problemas.

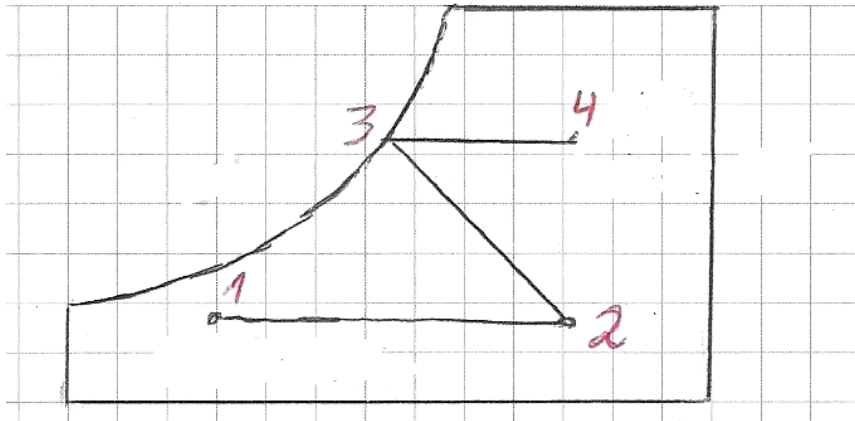
Os esboços permitem perceber situações e resoluções e são um óptimo meio de apresentar os valores calculados. Com este fim são muito comuns em Exames e Testes. Nos Exames geralmente os alunos não entregam cartas psicrométicas mas sim esboços das cartas.

Ar condicionado

Parte I

Alínea a) – Esboço do tratamento do ar

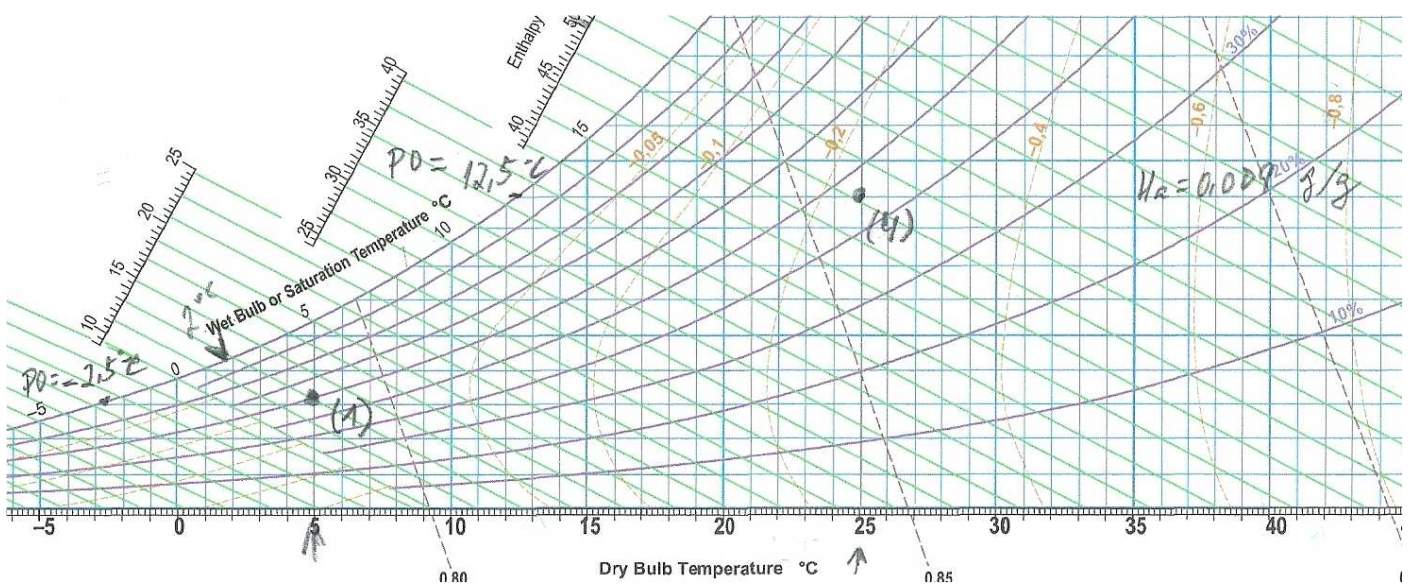
Situação de Inverno – O condicionamento do ar durante o inverno é descrito pelo esboço abaixo:



O ar entra com as características de (1), depois é aquecido até (2), humidificado até à saturação (3) e por fim aquecido até ter as características desejadas (4).

Esta é a descrição do que fisicamente ocorre no condicionamento do ar de Inverno, mas em termos de cálculo partimos de (1) e seguimos o percurso (1) → (2). Depois partimos de (4) e seguimos o percurso (4) → (3) → (2). Por fim obtemos o ponto (2) como interseção das rectas 1-2 e das rectas 3-2.

Para começarmos o cálculo temos de recorrer à carta psicrométrica para caracterizarmos os pontos (1) ($T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\theta_h = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) e (4) ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\%H_R = 45\%$).



O índices de saturação obtidos podem ser apresentados na forma de tabela:

Ponto	1	2	3	4
Ha	0,0032			0,009
PO (°C)	-2,5			12,5
%H _R	60			(45)
T	(5)			(25)
θh (°C)	(2)			17,2
Hm	0,00516			0,01452

Nesta tabela os valores entre parêntesis são os indicados no enunciado.

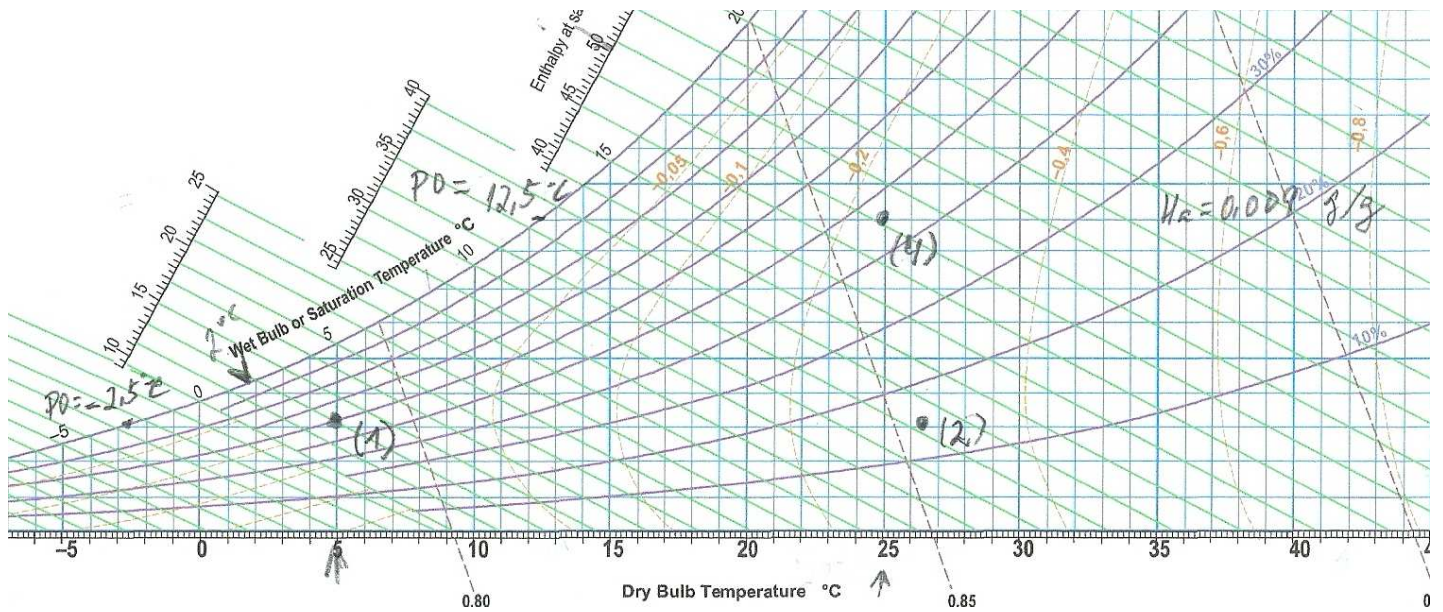
A partir do ponto (1) ocorre um aquecimento, logo Ha = constante, PO = constante e Hm = constante. Assim podemos preencher parte da coluna referida ao ponto (2):

Ponto	1	2	3	4
Ha	0,0032	0,0032		0,009
PO (°C)	-2,5	-2,5		12,5
%H _R	60			(45)
T	(5)			(25)
θh (°C)	(2)			17,2
Hm	0,00516	0,00516		0,01452

A partir do ponto (4) ocorre um arrefecimento, logo Ha = constante, PO = constante e Hm = constante. E sabemos que o ponto (3) corresponde à saturação logo %H = %H_R = 100 % e as três temperaturas (PO, T e θh) são iguais.

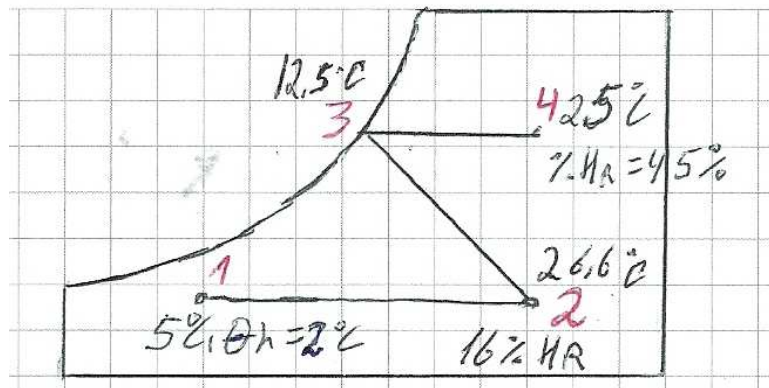
Ponto	1	2	3	4
Ha	0,0032	0,0032	0,009	0,009
PO (°C)	-2,5	-2,5	12,5	12,5
%H _R	60		100	(45)
T	(5)		12,5	(25)
θh (°C)	(2)		12,5	17,2
Hm	0,00516	0,00516	0,01452	0,01452

Por fim, pressupomos que de (2) para (3) ocorre uma humidificação adiabática (entalpia constante e θh = constante = 12,5 °C). Com o conhecimento de θh e de Ha em (2) podemos marcar o ponto (2) na carta psicrométrica e completar a Tabela:



Ponto	1	2	3	4
Ha	0,0032	0,0032	0,009	0,009
PO (°C)	-2,5	-2,5	12,5	12,5
%HR	60	16	100	(45)
T	(5)	26,6	12,5	(25)
θh (°C)	(2)	12,5	12,5	17,2
Hm	0,00516	0,00516	0,01452	0,01452

Com a informação da Tabela já podemos completar o esboço pedido no enunciado:



Alínea b) – Massa de água evaporada por hora

$$P V = Q_m R T$$

$$1 \times 2500 \times 10^3 = Q_m \times 0,082 \times (273,15 + 25)$$

Vem: $Q_m = 102256,6 \text{ mole/h}$

Fazendo-se a regra de três simples:

Ar total -----	ar seco -----	água
1+Hm -----	1 -----	Hm
1,01452 -----	1 -----	0,01452
102256,6 -----	100793,08 -----	1463,52

Ou usando-se a equação:

$$\text{ar seco} = \frac{\text{ar}}{1 + Hm} = \frac{102256,6}{1 + 0,01452} = 100793,08 \text{ mole agua / mole ar seco}$$

Aplicando-se a equação habitual em psicrometria

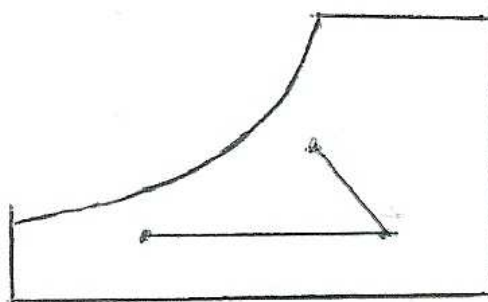
$$Ag\ ev = Q_{as} \times (Hm_3 - Hm_2)$$

$$Ag\ ev = 100793,08 \times (0,01452 - 0,00516) = 943,42 \text{ mole/h} = 16,98 \text{ kg/h}$$

Alínea c) – Comentar possibilidade de apenas se fazer um aquecimento e uma humidificação

A hipótese de se aquecer do ponto (1) ao ponto (2) depois de humidificar, a temperatura constante, até ao ponto (4) não é fisicamente possível. Com equipamento comum uma humidificação implica sempre arrefecimento.

Uma hipótese teoricamente possível é descrita na figura abaixo:



Aquecia-se até uma temperatura mais alta e depois bastava uma humidificação. Esta hipótese tem dois inconvenientes:

- Era necessário aquecer o ar a temperaturas mais altas e isso é dispendioso. O aquecimento do ar obedece à equação:

$$Q = h A \Delta T$$

Os gases possuem coeficientes de transferência de calor, h, muito baixos logo originam valores elevados de área de permuta, A.

Como o custo / dimensão dos permutadores de calor é função da Área, deve-se maximizar a diferença de temperatura, ΔT , para minimizar a área de permuta. Para se maximizar a ΔT deve-se evitar aquecimentos a temperaturas elevadas.

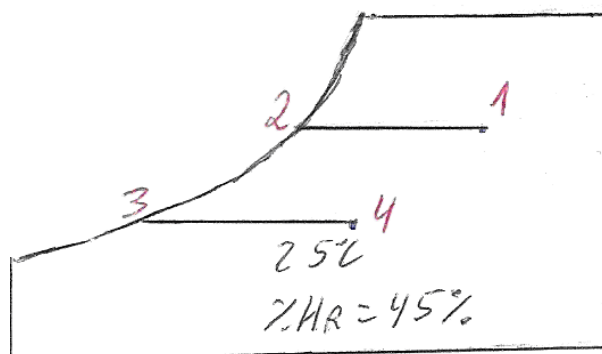
- Para humedecer o ar este passa através de um chuveiro a deitar água. Assim é muito difícil controlar a humidade final do ar ou seja saber-se quando pára a humificação do ar e a evaporação da água.

No procedimento habitual esta dificuldade não existe, pois ao humedecer-se o ar do ponto (2) para o ponto (3) chega-se à saturação do ar e obviamente aí pára a evaporação da água e a humificação do ar.

Parte II

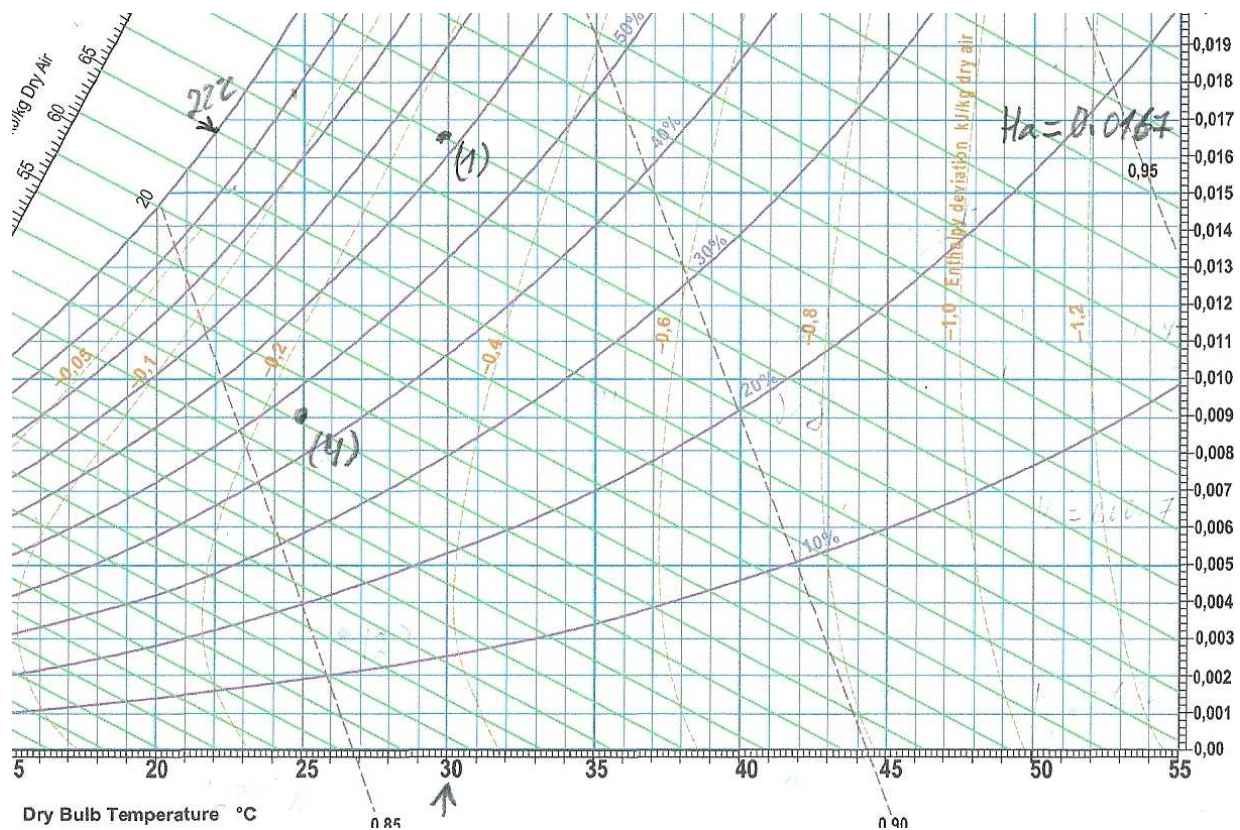
Alínea a) – Esboço do tratamento do ar

Situação de Verão – O condicionamento do ar durante o Inverno é descrito no esboço abaixo:



O ponto (4), ar tratado, é semelhante ao calculado na Parte I

Para começarmos o cálculo temos de recorrer à carta psicrométrica para caracterizarmos o ponto (1) ($T = 30^\circ\text{C}$ e $PO = 22^\circ\text{C}$):



O índices de saturação obtidos podem ser apresentados na forma de tabela. Nesta tabela a coluna (4) é semelhante à da Parte I deste problema:

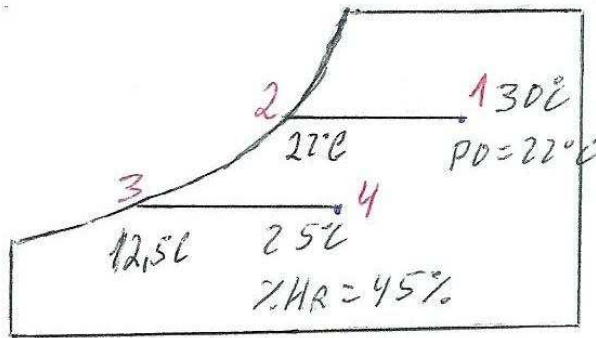
Ponto	1	2	3	4
Ha	0,0167			0,009
PO (°C)	(22)			12,5
%H _R	62			(45)
T	(30)			(25)
θh (°C)	24,1			17,2
Hm	0,02694			0,01452

A partir do ponto (1) ocorre um arrefecimento até ao ponto (2), logo $H_a = \text{constante}$, $P_O = \text{constante} = 22^\circ\text{C}$ e $H_m = \text{constante}$. E sabemos que o ponto (2) corresponde à saturação logo $\%H = \%H_R = 100\%$ e as três temperaturas (P_O , T e θ_h) são iguais a 22°C .

Algo de semelhante se passa com o ponto (3). Sabemos que o ponto (3) corresponde à saturação logo $\%H = \%H_R = 100\%$ e as três temperaturas (P_O , T e θ_h) são iguais ao P_O de (4) que já era conhecido (P_O de (3) = P_O de (4) = $12,5^\circ\text{C}$).

Ponto	1	2	3	4
Ha	0,0167	0,0167	0,009	0,009
PO (°C)	(22)	22	12,5	12,5
%H _R	62	100	100	(45)
T	(30)	22	12,5	(25)
θh (°C)	24,1	22	12,5	17,2
Hm	0,02694	0,02694	0,01452	0,01452

Com a informação da Tabela já podemos completar o esboço pedido no enunciado:



Alínea b) – Qual é a operação intermédia ?

Entre os pontos (2) e (3) o ar está saturado e ocorre condensação e remoção da água. É por este motivo que de Verão os ar condicionados estão sempre a pingar para a rua.

Nota:

Todos temos a ideia que de Inverno chove e o ar está mais húmido e de Verão está tempo seco e o ar está seco.

Mas na realidade de Verão a H_m é superior à de Inverno logo existe mais água no ar.

O que se passa é que a chuva e a sensação de humidade não tem a ver com a H_m ou H_a (quantidade de água) mas sim com a $\%H$ ou $\%H_R$ (quantidade de água em comparação com a que existe na saturação).

De Inverno temos pouca água no ar mas como a temperatura é baixa estamos perto da saturação e sentimos o ar “húmido”. De Verão o ar tem muita água mas como a temperatura é alta estamos longe da saturação e sentimos o ar “seco”.