

## CAPÍTULO 7

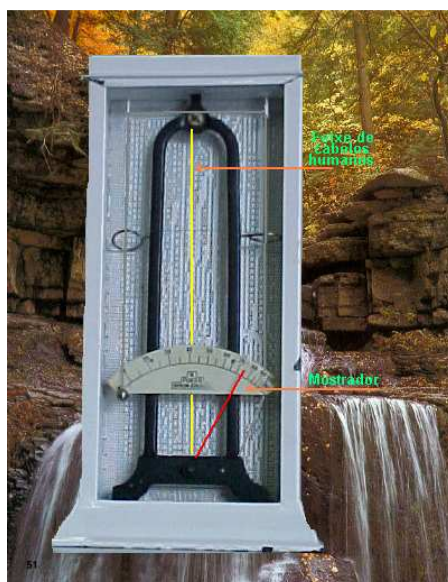
### PSICROMETRIA

#### 1. Introdução

- a) Quantificação do vapor d'água na atmosfera.
- b) Importância da quantificação da umidade atmosférica:
  - Dimensionamento de sistemas de acondicionamento térmico para animais e plantas
  - Estimativa do tempo e da energia requerida para secagem de produtos agrícolas.
  - Controle da umidade do ar dentro de uma unidade de armazenamento de frutas, hortaliças, ovos, cereais, etc.
  - Estudos de doenças e pragas

#### 2. Aparelhos utilizados

##### a) Higrômetros



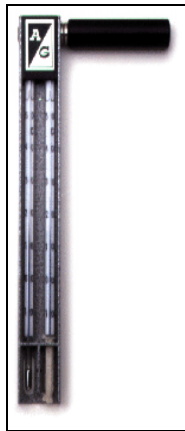
##### b) Psicômetros

]

- não-aspirados
- aspirados



(a)



(b)



(c)

**FINALIDADE:** determinar as temperaturas para estimativa da umidade relativa do ar.

**UNIDADE DE MEDIDA:** graus Celsius (°C).

**MANUTENÇÃO:** diária; completar a água do reservatório sempre que necessário.

**LOCAL DE INSTALAÇÃO:** dentro do abrigo termométrico, em um suporte apropriado.

Figura 15. Psicrômetros. (a) aspirado (b) de funda e (c) com ventilação natural.

c) Higrógrafos

### 3. Quantificação da umidade do ar

- a) Analítico
- b) Tabular
- c) Gráfico

#### 3.1. Método analítico

- a. Vantagem: precisão
- b) Desvantagem: “relativamente” demorado

#### 3.1.1. Determinação da Pressão Parcial exercida pelo vapor d’água na atmosfera

a . Ar saturado

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{[(7,5 \cdot t) / (237,3 + t)]}$$

$e_s$  = pressão de saturação do vapor d'água, hPa  
 $t$  = temperatura em °C

**b . Ar não-saturado**

$$e = e_{su} - A . P . (t - t_u)$$

$e$  = pressão atual real de vapor d'água na atmosfera, hPa  
 $e_{su}$  = pressão de saturação do vapor d'água à temperatura do termômetro de bulbo molhado (hPa):

$$e_{su} = 6,1078 . 10^{[(7,5.t_u)/(237,3 + t_u)]}$$

$A$  = constante do psicrômetro:  $6,7 . 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para aspirados  
 $8,0 . 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para não-aspirados

$P$  = pressão atmosférica do local, hPa

$t$  e  $t_u$  = temperaturas dos termômetros de bulbos seco e molhado, respectivamente, °C.

**3.1.2. Termos utilizados para quantificação do vapor d'água e da energia do ar.**

**a . Densidade absoluta do vapor d'água ou umidade absoluta:** é a massa de vapor d'água contida na unidade de volume de ar

$$\rho_v = 216,68 . e / T = m_v/V \text{ (g/m}^3\text{)}$$

Nota: o Volume específico do vapor d'água ( $\alpha_v$ ) é o inverso de sua densidade absoluta

$$\alpha_v = 1 / \rho_v$$

**b . Densidade absoluta do ar seco:** 'é a massa de ar seco contida num volume unitário de ar

$$\rho_d = 348,37 . (P - e) / T = m_d/V ; \text{(g/m}^3\text{)}$$

Nota: o Volume específico do ar seco ( $\alpha_d$ ) é o inverso da densidade absoluta do ar seco

$$\alpha_d = 1 / \rho_d$$

**c . Densidade absoluta do ar:** é a massa de ar contida na unidade de volume de ar ( $\text{g/m}^3$ )

$$\rho_a = \rho_v + \rho_d$$

Nota: o Volume específico do ar seco ( $\alpha_d$ ) é o inverso da densidade absoluta do ar seco

$$\alpha_a = 1 / \rho_a$$

**d . Umidade específica do ar:** é a massa de vapor de água contida na unidade de massa de ar (seco + vapor d'água) ( $\text{g/g}$ )

$$q = 0,622 \cdot e / ( P - 0,378 \cdot e )$$

**e . Razão de mistura do ar:** é a massa de vapor de água contida na unidade de massa de ar seco ( $\text{g/g}$ )

$$r = 0,622 \cdot e / ( P - e )$$

Nota: Como a quantidade de vapor d'água presente no ar é bem menor que a quantidade de ar seco, costuma-se multiplicar os valores de **q** e **r** por 1000, dando o resultado em **g/Kg**.

**f . Umidade relativa do ar:** é a relação entre a quantidade de água presente e aquela que prevaleceria em condições saturadas, à mesma temperatura, (%)

$$f = e \cdot 100 / e_s$$

**g . Temperatura do Ponto de Orvalho:** é a temperatura na qual a saturação ocorreria se o ar fosse resfriado à pressão constante e sem adição ou remoção de vapor d'água.

$$T_d = (186,4905 - 237,3 \log e) / (\log e - 8,2859)$$

**h . Entalpia Específica do ar:** é a relação entre o conteúdo de energia do ar e a massa de ar seco. Na prática, a temperatura de referencia utilizada para o cálculo da entalpia é 0°C, de tal forma que o conteúdo de energia do ar seco a essa temperatura é imposto igual a zero.

$$Eh/m_d = rL + 1007 \cdot t + 1876 \cdot r \cdot (t - T_d) + 4186 \cdot r \cdot T_d$$

Eh/md = entalpia específica do ar, J/kg de ar seco  
 r = razão de mistura, kg de vapor d'água/kg de ar seco  
 L = calor latente de evaporação, J/kg de vapor d'água:

$$L = 2.5 \cdot 10^6 - 2370 \cdot t$$

t e Td = temperatura do ar e do ponto de orvalho

### 3.1.3. Transformação de mmHg para hPa.

1 atm  $\approx$  1 bar  $\rightarrow$  760 mmHg

que corresponde a uma coluna de mercúrio com 760 mm (ou 76 cm) de altura. Se a coluna tiver 1m<sup>2</sup> de base, qual a massa de Hg?

760 mmHg = 76 cmHg (altura)  
 1m<sup>2</sup> = 100<sup>2</sup> cm<sup>2</sup> = 1.10<sup>4</sup> cm<sup>2</sup> (base)

Volume do paralelepípedo = base . altura = 76.10<sup>4</sup> cm<sup>3</sup>

Como a densidade do mercúrio  $\approx$  13,59 g/cm<sup>3</sup> e

densidade = massa/volume  $\Rightarrow$  **massa = densidade . volume**

m<sub>Hg</sub> = (13,59) . (76 . 10<sup>4</sup>) = 1,03284 . 10<sup>7</sup> g = 10328,4 kg

Força = massa . aceleração  $\Rightarrow$  **Força Peso = massa . aceleração gravitacional**  
 P<sub>Hg</sub> = (10328,4) . (9,81) = 101321,6 N

### **Pressão = Força/Área**

Pressão = 101321,6 N / 1m<sup>2</sup> (área da base da coluna de Hg)

Pressão = 101321,6 Pa

1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup> e 1 hPa = 100 Pa

Logo a pressão exercida por uma coluna de mercúrio de 760 mm (ou 76 cm) é igual a 1013,22 hPa.

O valor mais é 1013,25 hPa, sendo as diferenças devidas a aproximações na densidade do mercúrio e na aceleração gravitacional.

$$1013,25 \text{ hPa} = 760 \text{ mm Hg} = 1 \text{ atm} \approx 1 \text{ bar}$$

### **FORMULÁRIO**

1. Pressão de vapor de saturação

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{[(7,5 \cdot t) / (237,3 + t)]}$$

2. Pressão de vapor d'água atual

$$e = e_{su} - A \cdot P \cdot (t - t_u)$$

3. Densidade absoluta ou umidade absoluta do vapor d'água

$$\rho_v = 216,68 \cdot e / T = m_v/V ; (\text{g/m}^3)$$

4. Densidade absoluta do ar seco

$$\rho_d = 348,37 \cdot (P - e) / T = m_d/V ; (\text{g/m}^3)$$

5. Densidade absoluta do ar

$$\rho_a = \rho_v + \rho_d$$

6. Umidade específica do ar

$$q = 0,622 \cdot e / (P - 0,378 \cdot e)$$

7. Razão de mistura

$$r = 0,622 \cdot e / (P - e)$$

8. Umidade Relativa

$$f = e \cdot 100 / e_s$$

9. Temperatura do Ponto de Orvalho

$$T_d = (186,4905 - 237,3 \log e) / (\log e - 8,2859)$$

10. Entalpia específica do ar seco

$$Eh/m_d = rL + 1007 \cdot t + 1876 \cdot r \cdot (t - T_d) + 4186 \cdot r \cdot T_d$$

$$e$$

$$L = 2,5 \cdot 10^6 - 2370 \cdot t$$

**EXERCÍCIOS**

1. Suponha que você esteja em Viçosa, a 650 m acima do nível do mar, às 6:00h da manhã você acorda (ou nem dormiu), olha para o barômetro posto meteorológico que você montou no quintal de sua casa e ele registra 938 hPa, olha para o psicrômetro, que é aspirado, dentro do seu abrigo meteorológico e ele mostra Temperatura de bulbo seco = 18°C e Temperatura de bulbo molhado = 18°C. **Qual a pressão do vapor d'água?**

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{(7,5 \cdot t) / (237,3 + t)}$$

**Situação 1**

Substituindo t por 18

$$e_s = 20,64 \text{ hPa}$$

Como 1013,25 hPa = 760 mmHg

$$e_s = 15,48 \text{ mmHg}$$

2. Suponha que agora sejam 14:00 h e o barômetro continue com a mesma leitura, mas o termômetro de bulbo seco mostre 28°C e o de bulbo molhado, 24°C. **Qual a pressão de vapor d'água atual?**

$$e = e_{su} - A \cdot P \cdot (t - t_u)$$

**Situação 2**

$$e_{su} = 6,1078 \cdot 10^{\left[ \frac{7,5 \cdot 24}{237,3 + 24} \right]}$$

$$e_{su} = 29,84 \text{ hPa}$$

$$e = 29,84 - 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot 938 \cdot (28 - 24)$$

$$e = 27,33 \text{ hPa} \text{ ou } e = 20,50 \text{ mmHg}$$

3. Nas duas situações quais as **densidades absolutas do vapor d'água**, ou umidades absolutas do vapor d'água?

$$\rho_v = 216,68 \cdot e / T = m_v / V ; (\text{g/m}^3)$$



Situação 1

$$\rho_v = \frac{216,68 \cdot 20,64}{(273,15 + 18)}$$

$$\rho_v = 15,36 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{m}^3_{\text{ar}}$$

Situação 2

$$\rho_v = \frac{216,68 \cdot 27,33}{(273,15 + 28)}$$

$$\rho_v = 19,66 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{m}^3_{\text{ar}}$$

4. Nas duas situações quais as **densidades absolutas do ar seco**?

$$\rho_d = 348,37 \cdot (P - e) / T = m_d/V ; (\text{g}/\text{m}^3)$$

Situação 1

$$\rho_d = \frac{348,37 \cdot (938 - 20,64)}{(273,15 + 18)}$$

$$\rho_d = 1097,65 \text{ g}_{\text{ar seco}} / \text{m}^3_{\text{ar}}$$

Situação 2

$$\rho_d = \frac{348,37 \cdot (938 - 27,33)}{(273,15 + 18)}$$

$$\rho_d = 1053,46 \text{ g}_{\text{ar seco}} / \text{m}^3_{\text{ar}}$$

5. Nas duas situações quais as **densidades absolutas do ar**?

$$\rho_a = \rho_v + \rho_d$$

Situação 1

$$\rho_a = 15,36 + 1097,65$$

$$\rho_a = 1113,01 \text{ g}_{\text{ar}} / \text{m}^3_{\text{ar}}$$

Situação 2

$$\rho_a = 19,66 + 1053,46$$

$$\rho_a = 1073,12 \text{ g}_{\text{ar}} / \text{m}^3_{\text{ar}}$$

6. Nas duas situações quais as **umidade específicas do ar** ?

$$q = 0,622 \cdot e / (P - 0,378 \cdot e)$$

Situação 1

$$q = \frac{0,622 \cdot 20,64}{(938 - 0,378 \cdot 20,64)}$$

$$q = 0,0138 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{g}_{\text{ar}} \text{ ou}$$

$$q = 13,8 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{ar}}$$

Situação 2

$$q = \frac{0,622 \cdot 27,33}{(938 - 0,378 \cdot 27,33)}$$

$$q = 0,0183 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{g}_{\text{ar}} \text{ ou}$$

$$q = 18,3 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{ar}}$$

7. Nas duas situações quais as **razões de mistura**?

$$r = 0,622 \cdot e / (P - e)$$

Situação 1

$$q = \frac{0,622 \cdot 20,64}{(938 - 20,64)}$$

$$q = 0,0140 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{g}_{\text{ar}} \text{ ou}$$

$$q = 14,0 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{ar}}$$

Situação 1

$$q = \frac{0,622 \cdot 20,64}{(938 - 20,64)}$$

$$q = 0,0140 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{g}_{\text{ar}} \text{ ou}$$

$$q = 14,0 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{ar}}$$

8. Nas duas situações quais as **Umidades Relativas**?

$$f = e \cdot 100 / e_s$$

Situação 1

$$e = e_s$$

$$f = \frac{20,64}{20,64} \cdot 100$$

$$f = 100 \%$$

Situação 2

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{\left[ \frac{(7,528)}{(237,3 + 28)} \right]}$$

$$e_s = 37,80 \text{ hPa}$$

$$f = \frac{27,33}{37,80} \cdot 100$$

$$f = 72,3 \%$$

9. Nas duas situações quais as **Temperaturas do Ponto de Orvalho**?

$$T_d = (186,4905 - 237,3 \log e) / (\log e - 8,2859)$$

Situação 1

$$e = e_s$$

$$f = \frac{20,64}{20,64} \cdot 100$$

$$f = 100 \%$$

Situação 2

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{\left[ \frac{(7,528)}{(237,3 + 28)} \right]}$$

$$e_s = 37,80 \text{ hPa}$$

$$f = \frac{27,33}{37,80} \cdot 100$$

$$f = 72,3 \%$$

10. Nas duas situações quais as **Entalpias específicas do ar**?

$$Eh/m_d = rL + 1007 \cdot t + 1876 \cdot r \cdot (t - T_d) + 4186 \cdot r \cdot T_d$$

$$L = 2,5 \cdot 10^6 - 2370 \cdot t$$

Situação 1

$$t = 18^{\circ}\text{C}; T_d = 18^{\circ}\text{C}$$

$$L = 2,5 \cdot 10^6 - 2370 \cdot 18$$

$$L \approx 2,46 \cdot 10^6 \text{ J/kg vapor}$$

$$r = 0,0140 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{g}_{\text{ar seco}}$$

$$\frac{E_h}{m_d} = 53,6 \text{ KJ / kg ar seco}$$

Situação 2

$$t = 28^{\circ}\text{C}; T_d = 22,55^{\circ}\text{C}$$

$$L = 2,5 \cdot 10^6 - 2370 \cdot 28$$

$$L \approx 2,43 \cdot 10^6 \text{ J/kg vapor}$$

$$r = 0,0187 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{g}_{\text{ar seco}}$$

$$\frac{E_h}{m_d} = 75,7 \text{ KJ / kg ar seco}$$

11. Suponha agora que a massa da situação 2 absorvesse  $5 \text{ g/m}^3$  de vapor d'água mantendo a mesma temperatura. Qual seria a nova temperatura do ponto de orvalho?

Do exercício 3:  $\rho_v = 19,66 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{m}^3_{\text{ar}}$

Assim absorvendo 5 a nova densidade absoluta do vapor d'água será:

$$\rho'_v = 19,66 + 5 = 24,66 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{m}^3_{\text{ar}}$$

$$\text{como } \rho_v = \frac{261,68 \cdot e}{(273,15 + t)} \Rightarrow e = \frac{\rho_v \cdot (273,15 + t)}{216,68} \Rightarrow e = \frac{\rho'_v \cdot (273,15 + 28)}{216,68}$$

$$\boxed{e = 34,27 \text{ hPa}} \Rightarrow \boxed{T_d = 26,33^{\circ}\text{C}} \Rightarrow f = \frac{34,27 \cdot 100}{37,80} = 90,7\%$$

Nova Pressão de Vapor
Nova Temperatura do Ponto de Orvalho
Nova Umidade Relativa

12. Considere a nova situação, do exercício 11, quanta água ( $\text{g/m}^3$ ) irá condensar se a temperatura, medida pela temperatura do termômetro de bulbo seco cair para  $22^{\circ}\text{C}$ ?

$$e_s^{22^{\circ}\text{C}} = 6,1078 \cdot 10^{\left[ \frac{(7,5 \cdot 22)}{(237,3 + 22)} \right]}$$

$$e_s^{22^{\circ}\text{C}} = 26,46 \text{ hPa}$$

$$\rho_v^{22^{\circ}\text{C}} = \frac{261,68 \cdot 26,46}{(273,15 + 22)}$$

$$\rho_v^{22^{\circ}\text{C}} = 19,42 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{m}^3_{\text{ar}}$$

(Ar saturado a  $22^{\circ}\text{C}$ )

Se o ar contém  $\rho'_v = 24,66 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{m}^3_{\text{ar}}$

(do exercício 11)

Condensará:

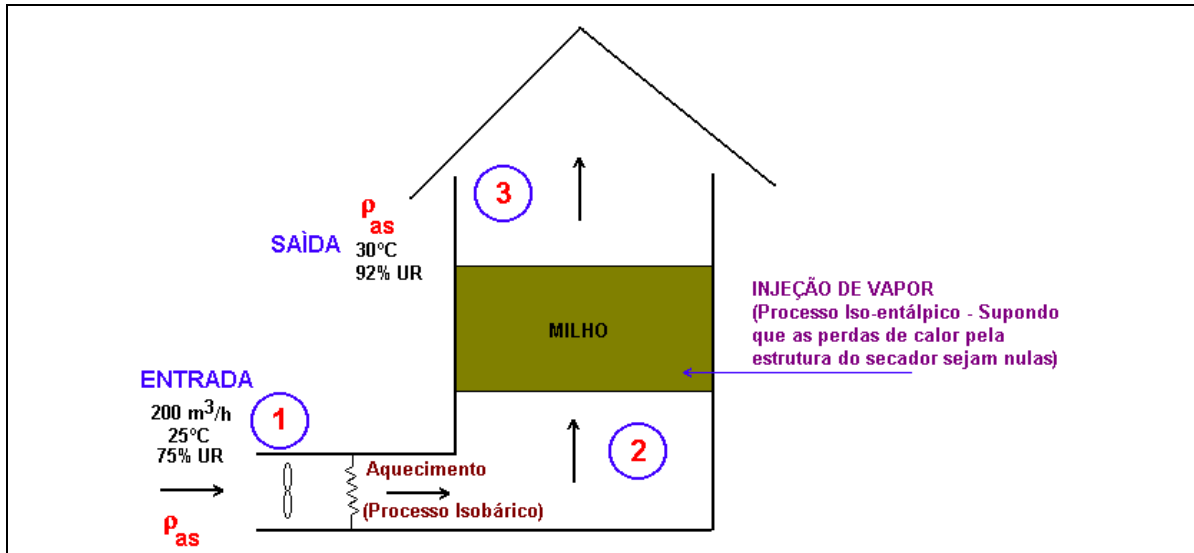
$$\Delta \rho_v = \rho'_v - \rho_v^{22^{\circ}\text{C}}$$

$$\Delta \rho_v = 24,66 - 19,42$$

$$\boxed{\Delta \rho_v = 5,24 \text{ g}_{\text{vapor}} / \text{m}^3_{\text{ar}}}$$

É a massa de vapor d'água que irá condensar por  $\text{m}^3$  de ar

13. Utiliza-se de um secador que trabalha com fluxo de ar, na entrada, de  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  para secar uma tonelada de milho de 14% a 10% de umidade em peso. O ar na entrada possui  $25^\circ\text{C}$  e a umidade relativa é igual a 75%. Na saída o ar está com  $30^\circ\text{C}$  e 92% de umidade relativa. Quanto tempo levará para secar a tonelada de milho sabendo que a capacidade do secador é 200 kg de sementes? (Pressão atmosférica = 950 hPa)



Na entrada o ar tem  $25^\circ\text{C}$  e  $f = 75\%$

A pressão de saturação do vapor d'água no ar que entra é igual a **31,67 hPa (=  $e_s(25^\circ\text{C})$ )**

A pressão real do vapor d'água na atmosfera (**e**) será  $e = e_s \cdot f / 100 = 25 \cdot 31,67 / 100 = 23,76 \text{ hPa}$ .

Logo a **razão de mistura**, na entrada, será:

$$r_{in} = 0,0160 \text{ g}_{\text{vapor}}/\text{g}_{\text{ar seco}}$$

A massa de ar seco a cada  $\text{m}^3$  de ar que entra no secador é  $\rho_{a.s.} = 1082,26 \text{ g}_{a.s.}/\text{m}^3_{\text{ar}}$

Logo, a massa de ar seco total que entra no secador possui  $1082,26 \cdot 200 = 216452 \text{ g}_{a.s.}$

Assim a massa de vapor d'água que entra no secador é  $0,0160 \cdot 216452 = m_v^{in} = 3463,23 \text{ g}_v$

Na saída o ar tem  $30^\circ\text{C}$  e  $f = 92\%$

A pressão de saturação do vapor d'água no ar que sai é igual a **39,03 hPa (=  $e_s(30^\circ\text{C})$ )**

A pressão real do vapor d'água na atmosfera (**e**) será  $e = e_s \cdot f / 100 = 92 \cdot 39,03 / 100 = 29,28 \text{ hPa}$ .

Logo a **razão de mistura** na saída, será:

$$r_{out} = 0,0267 \text{ g}_{\text{vapor}}/\text{g}_{\text{ar seco}}$$

A massa de ar seco na entrada do secador é igual à massa de ar seco na saída, pela conservação da massa, e não estar ocorrendo nem acumulação nem perda de ar seco no interior do secador.

Assim a **massa de vapor d'água que sai do secador** é  $0,0267 \cdot 216452 = m_v^{out} = 5779,27 \text{ g}_v$

Dessa maneira o secador extrai  $(5779,27 - 3463,23) = 2316,04 \text{ g}$  de água na forma de vapor a cada hora.

---

### CÁLCULO DA QUANTIDADE DE ÁGUA A SER RETIRADO DO MILHO

A umidade em base de massa é calculada como:

$$U = \frac{MF - MS}{MS} \cdot 100$$

Ao entrar no secador o milho tem **U = 14%** ou  $U = 0,14$  e a carga do secador é 200kg. Assim, rearranjando os termos da equação acima:

**0,14 = (200 - MS) / MS**, logo, **MS = 175,44 kg**, em que **MS** é a massa do milho seco.

Ao sair do secador o milho terá  $U = 10\%$  ou  $U = 0,10$ . Assim, rearranjando os termos da equação acima **0,10 = (MF - 175,44)/175,44**, logo **MF = 192,94 kg**, em que **MF** é a massa do milho com umidade de 10%.

Ou seja a massa do milho, ao final do processo de secagem, será de **MF = 192,94 kg**.

Se o milho entrou no secador com **200 kg** e saiu com **192,94**, **perdeu 7,06 kg de água** na forma de vapor.

---

Se o secador retira **2,316 kg água / hora**, levará **3,05 horas** para secar cada carga de **200kg** de milho. Logo, **1 ton** levará **15,25 horas**, ou **15 h 15 min**, descontado o tempo de manuseio das cargas.

## EXERCÍCIOS PARA FIXAÇÃO

- 4.1. Determine a pressão parcial exercida pelo vapor d'água no ar, se este **estivesse saturado** ( $f=100\%$ ) à temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ .
- 4.2. Determine a pressão parcial exercida pelo vapor d'água no ar, se este **não estivesse saturado** ( $f=70\%$ ) à temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ .
- 4.3. Qual a quantidade máxima de vapor d'água que  $1\text{m}^3$  de ar pode conter a  $15^{\circ}\text{C}$ ? Faça o mesmo cálculo para  $30^{\circ}\text{C}$ .
- 4.4. Determine a densidade absoluta e o volume específico do **ar seco** que se encontra a  $25^{\circ}\text{C}$ , com umidade relativa de  $50\%$  e submetido à pressão atmosférica de  $710\text{mmHg}$ .
- 4.5. Determine a densidade absoluta e o volume específico do **ar** que se encontra a  $25^{\circ}\text{C}$ , com umidade relativa de  $50\%$  e submetido à pressão atmosférica de  $710\text{mmHg}$ .
- 4.6. Determine a densidade absoluta do vapor d'água (umidade absoluta do ar), sabendo que a temperatura é de  $20^{\circ}\text{C}$  e que a pressão exercida pelo vapor d'água é de  $10\text{hPa}$ .
- 4.7. Um termo-higrógrafo registrou temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $50\%$ . Então determine a pressão real do vapor d'água; pressão de saturação; umidade absoluta; umidade absoluta de saturação e temperatura do ponto de orvalho.
- 4.8. Em um determinado nível da atmosfera registrou-se o seguinte:  $t=5^{\circ}\text{C}$ ,  $r=6,4\text{gramas}$  de vapor d'água/kg de ar seco e pressão atmosférica igual a  $750\text{hPa}$ . Então determine a pressão real do vapor; pressão de saturação; umidade específica; umidade específica de saturação; umidade absoluta; umidade absoluta de saturação; umidade relativa; e temperatura do ponto de orvalho.
- 4.9. Num abrigo meteorológico, às 21h, um psicrômetro aspirado indicou temperatura de  $16^{\circ}\text{C}$  e  $20^{\circ}\text{C}$ . Com o resfriamento noturno, a temperatura mínima do ar foi de  $13^{\circ}\text{C}$ . Pergunta-se: Houve condensação? Em caso afirmativo determine:
  - a. Quantos gramas de vapor por metro cúbico de ar foram condensados?
  - b. Qual a quantidade de calor perdida no processo por metro cúbico de ar?
- 4.10. Dentro de uma câmara fria foram instalados um higrômetro e um termômetro, para o controle da temperatura e umidade do ar. Sabendo-se que o volume da câmara é de  $12\text{m}^3$  e que a temperatura do ar é de  $12\text{m}^3$

e que a temperatura do ar é de  $13^{\circ}\text{C}$ , determine a quantidade de vapor d'água que deve ser adicionada no ar para se elevar a umidade de 70 para 90%.

- 4.11.** Durante o período noturno, um sistema de aquecimento está sendo utilizado em uma casa de vegetação . Quando o ar passa por um conjunto de resistências elétricas a temperatura aumenta de 18 para  $25^{\circ}\text{C}$ . Sabendo-se que a temperatura de bulbo úmido é de  $16^{\circ}\text{C}$  (obtida a partir de um psicrômetro aspirado) e que a pressão interna é de 950hPa, determine a variação da entalpia específica do ar.
- 4.12.** Num abrigo meteorológico, um psicrômetro de aspiração indicou as temperaturas de  $21^{\circ}\text{C}$  e  $25^{\circ}\text{C}$ . Sabendo-se que, em razão da emissão de ondas longas, a temperatura da folha de um tomateiro é de  $23^{\circ}\text{C}$ , responda:
- Houve deposição de água livre sobre a folha, e portanto, condições favoráveis para a proliferação de doenças fúngicas?
  - Qual a umidade relativa da fina camada de ar que envolve a folha?
- 4.13.** Um secador que opera com uma taxa de ventilação de 2kg de ar/segundo está sendo utilizado para a secagem de 15000 kg de soja, cuja umidade inicial é de 18% em base seca. Determine o tempo requerido para a secagem do produto, de forma que a umidade final seja de 13%, também em base seca. Determine ainda a variação da entalpia específica do ar, no processo de secagem. Sabe-se que:
- O ar entra no secador a  $20^{\circ}\text{C}$  e  $f=65\%$
  - O ar que sai do secador tem temperatura de  $45^{\circ}\text{C}$  e  $f=85\%$
  - A pressão atmosférica do local é de 930 hPa.

### 3.2. Método tabular

Com o objetivo de facilitar a obtenção de cada termo que caracterize a umidade do ar pode-se elaborar tabelas de dupla entrada, permitindo a determinação imediata do elemento procurado, as quais são confeccionadas a partir das equações vistas anteriormente. Cada tabela se refere a uma determinada pressão atmosférica, denominada pressão de referência.

O Quadro 1 fornece umidade relativa do ar para um psicrômetro não-aspirado, tornando-se como base a pressão de referência de 1000 hPa, que é aproximadamente a pressão dominante ao nível do mar.

Quadro 1. Umidade relativa, em %, para psicômetros não-aspirados (pressão atmosférica de 1000 Pa).

TEMPERATURA DE BULBO UMIDO (°C)	DEPRESSÃO PSICOMÉTRICA (t - t <sub>u</sub> ) °C										
	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
10	100	94	87	82	78	71	66	61	57	53	49
12	100	94	88	83	78	73	68	64	60	56	52
14	100	94	89	84	79	75	70	66	62	58	55
16	100	95	90	85	80	76	72	68	64	60	57
18	100	95	90	86	81	77	73	70	66	63	59
20	100	95	91	87	82	78	75	71	68	64	61
22	100	96	91	87	83	79	76	72	69	65	63
24	100	96	92	88	84	80	77	74	70	67	65
26	100	96	92	88	85	81	78	75	72	69	66
28	100	96	92	89	85	82	79	76	73	70	67
30	100	96	93	89	86	83	80	77	74	71	68
32	100	96	93	90	86	83	80	77	75	72	69
34	100	97	93	90	87	84	81	78	75	73	70
36	100	97	93	90	87	84	82	79	76	74	71
38	100	97	94	91	88	85	82	79	77	74	72
40	100	97	94	91	88	85	83	80	78	75	73

TEMPERATURA DE BULBO UMIDO (°C)	DEPRESSÃO PSICOMÉTRICA (t - t <sub>u</sub> ) °C										
	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10
10	49	45	41	38	34	31	28	26	23	21	18
12	52	48	45	41	38	35	33	30	27	25	23
14	55	51	48	45	42	39	36	34	31	29	27
16	57	54	51	48	46	42	39	37	35	32	30
18	59	56	53	50	47	45	42	40	38	35	33
20	61	58	55	53	50	47	45	43	40	38	36
22	63	60	57	55	52	50	47	45	43	41	39
24	65	62	59	56	54	52	49	47	45	43	41
26	66	63	61	58	56	53	51	49	47	45	43
28	67	65	62	60	57	55	53	51	49	47	45
30	68	66	63	61	59	57	54	52	50	49	47
32	69	67	65	62	60	59	56	54	52	50	48
34	70	68	66	63	61	59	57	55	53	51	50
36	71	69	67	64	62	60	58	56	54	53	51
38	72	70	68	66	63	61	59	57	56	54	52
40	73	71	68	66	64	62	60	58	57	55	53

### 3.3. Método gráfico

O gráfico psicrométrico pode ser empregado para se obter os termos que quantificam a umidade atmosférica, permitindo verificar, também, como esses termos estão relacionados entre si.

Qualquer ponto marcado sobre o gráfico representa uma condição característica de temperatura e umidade em um determinado local e determinado tempo, associado a uma pressão de referência, sendo chamado de ponto de

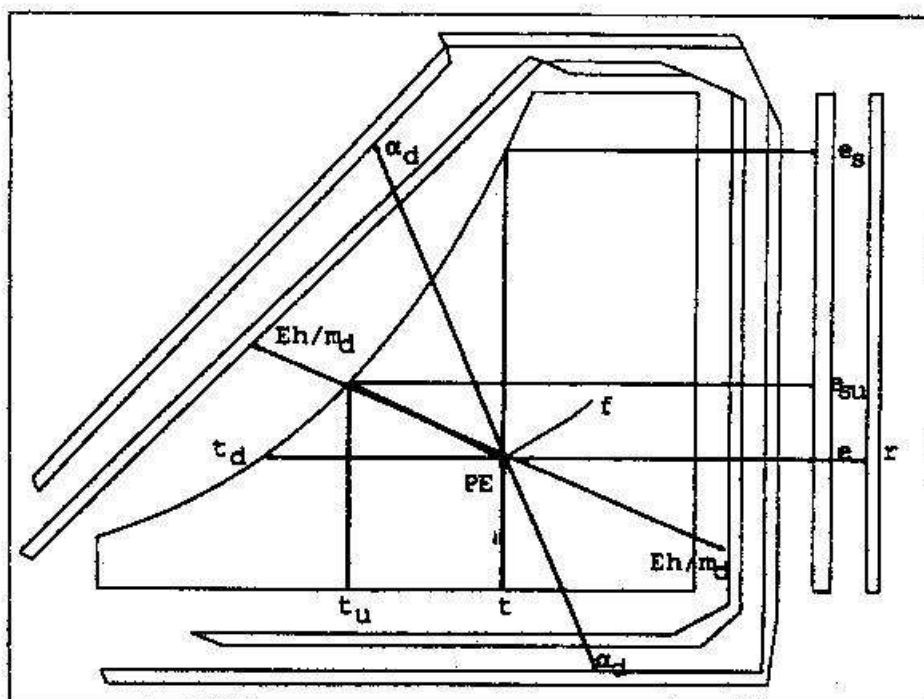


*estado*. A pressão de referência normalmente utilizada na elaboração do gráfico é pressão de 1013,25 hPa.

O ponto de estado pode ser localizado utilizando-se dois termos quaisquer, desde que a representação dos mesmos não seja paralela, como acontece com a pressão de vapor e razão de mistura, por exemplo.

### 3.3.1. Estrutura do gráfico psicrométrico

A Figura 5 representa a estrutura do gráfico psicrométrico, onde pode ser visto, de forma resumida, os diversos termos que o constituem, o que facilita bastante a sua compreensão.



#### LEGENDA

- e = pressão parcial exercida pelo vapor d'água
- es = pressão de saturação do vapor d'água
- esu = pressão de saturação do vapor d'água à temperatura do bulbo úmido
- t = temperatura do ar (bulbo seco)
- tu = temperatura do bulbo úmido
- r = razão de mistura
- td = temperatura do ponto de orvalho
- f = unidade relativa do ar
- $\alpha_d$  = volume específico do ar seco
- $Eh/m_d$  = entalpia específica

Figura 5. Estrutura do gráfico psicrométrico

### 3.3.2. Exemplo de aplicação

Como exemplo de aplicação, iremos utilizar as Figuras 6 e 7 para estudar todos os termos empregados no estudo da psicrometria.

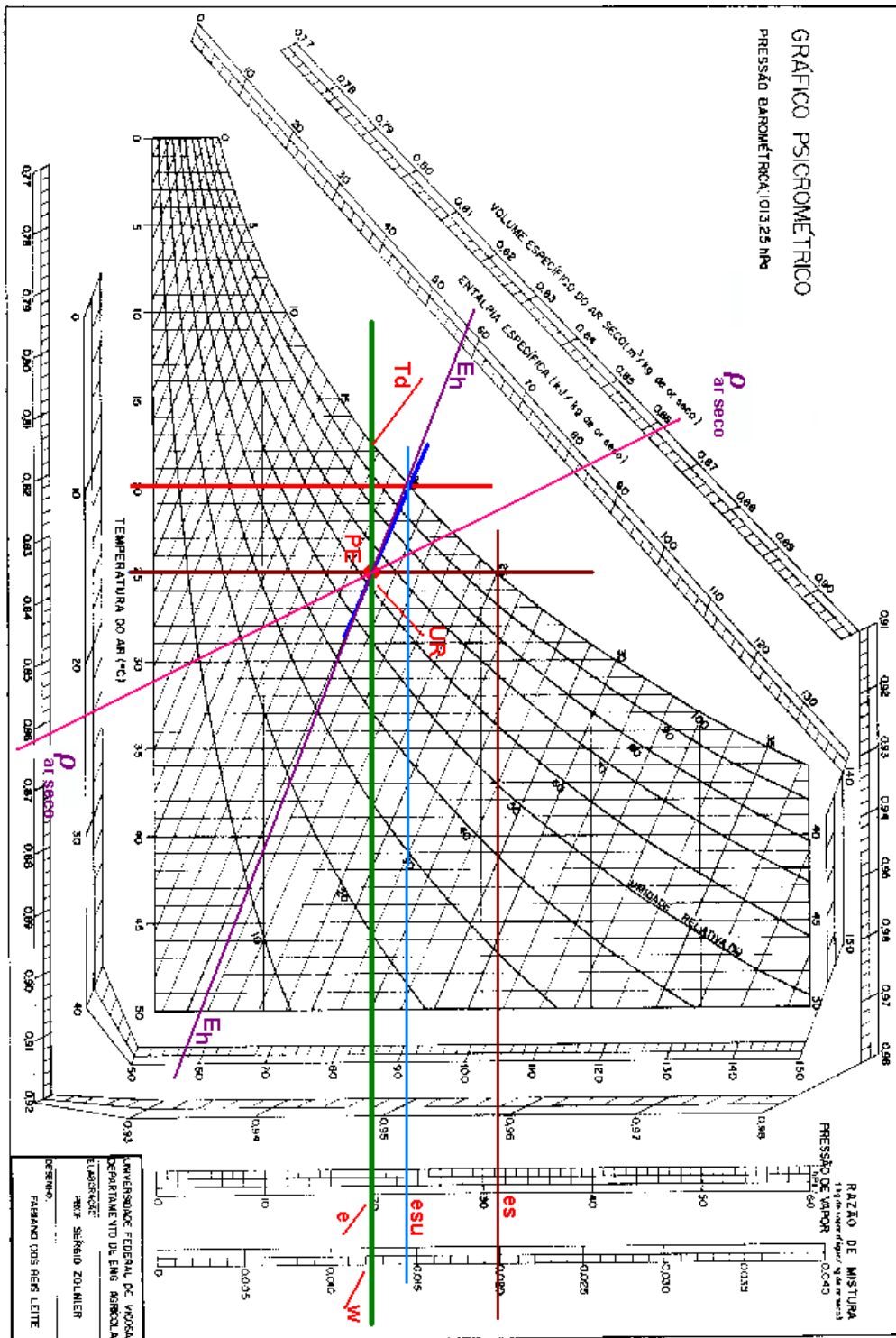


Figura 6. Exemplo de aplicação do gráfico psicrométrico.

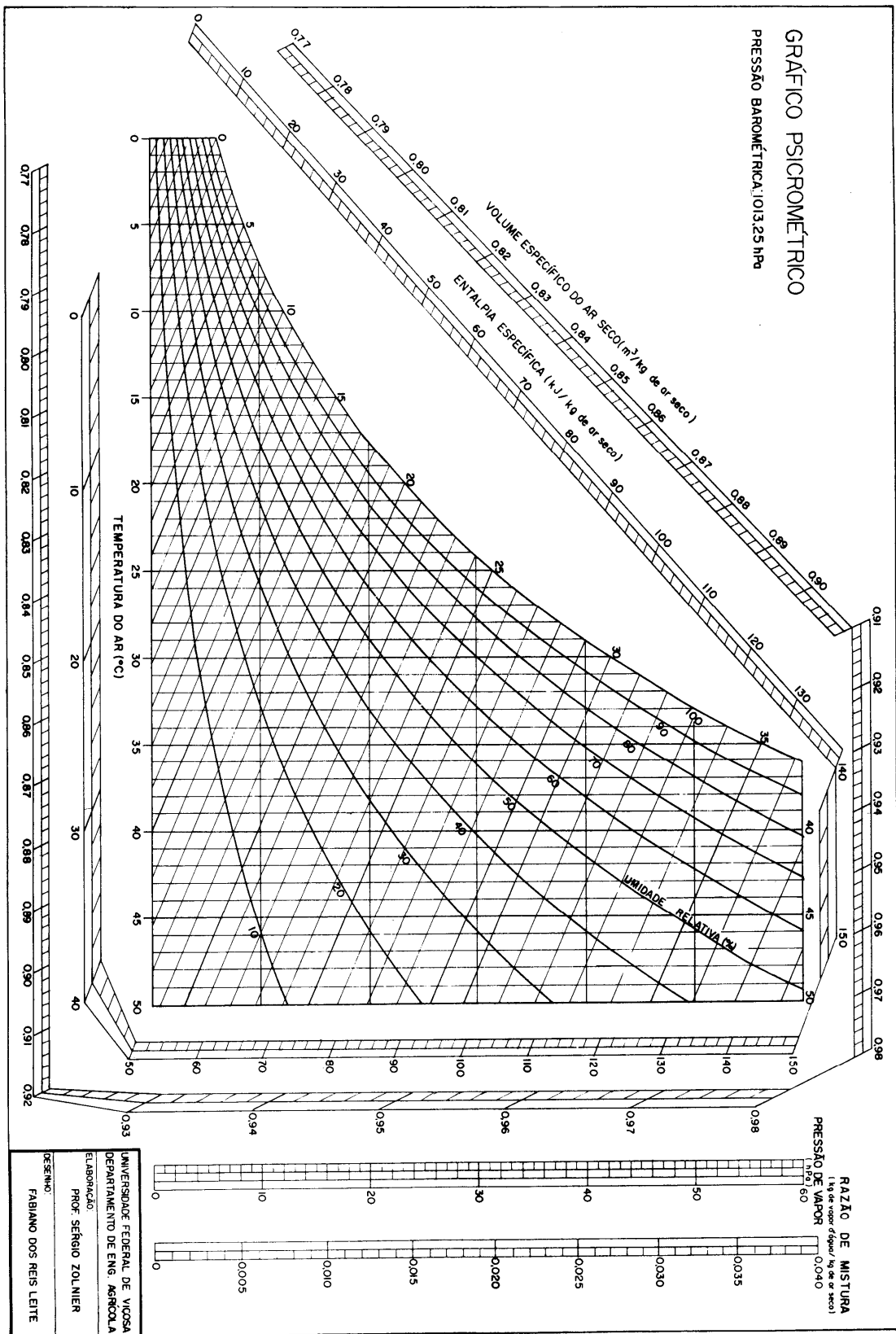


Figura 7. Gráfico para ser utilizado em exemplos de aplicação.

### 3.3.3. Exercícios de aplicação

1. Suponha que você esteja em Viçosa, a 650 m acima do nível do mar, às 6:00h da manhã você acorda (ou nem dormiu), olha para o barômetro posto meteorológico que você montou no quintal de sua casa e ele registra 938 hPa, olha para o psicrômetro, que é aspirado, dentro do seu abrigo meteorológico e ele mostra **Temperatura de bulbo seco = 18°C e Temperatura de bulbo molhado = 18°C.**

À partir do Gráfico Psicrométrico determine:

- a) A pressão do vapor d'água ( $e$ ).
  - b) A pressão de saturação do vapor d'água ( $e_s$ ).
  - c) A pressão de sat. do vapor d'água à temp.do term.de bulbo úmido ( $e_{su}$ ).
  - d) A Umidade Relativa ( $f\%$ ).
  - e) A Temperatura do Ponto de Orvalho ( $T_d$ ).
  - f) A razão de mistura ( $r$ ).
  - g) A Entalpia específica ( $Eh/m_d$ ).
  - h) O volume específico do ar seco ( $\alpha_d$ ).
2. Suponha que agora sejam 14:00 h e o barômetro continue com a mesma leitura, mas o termômetro de bulbo seco mostre 28°C e o de bulbo molhado, 24°C.

À partir do Gráfico Psicrométrico determine os mesmos parâmetros do exercício anterior.