

**CAPÍTULO 3****PRINCÍPIOS BÁSICOS DE PSICROMETRIA**

Roberto Precci Lopes  
 Juarez de Sousa e Silva  
 Ricardo Caetano Rezende

**1. INTRODUÇÃO**

O ar é constituído por uma mistura de gases (nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, etc.), vapor de água e uma série de contaminantes, como partículas sólidas em suspensão e outros gases.

O ar seco existe quando, do ar natural, removem-se todo o vapor de água e os contaminantes. A composição do ar seco é relativamente constante, apesar das pequenas variações em função da localização geográfica e altitude. A composição média percentual é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1- Composição aproximada do ar seco

| <b>Componente</b>  | <b>Fórmula</b>  | <b>Conteúdo (% por volume)</b> |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|
| Nitrogênio         | N <sub>2</sub>  | 78,084                         |
| Oxigênio           | O <sub>2</sub>  | 20,948                         |
| Argônio            | Ar              | 0,934                          |
| Dióxido de carbono | CO <sub>2</sub> | 0,033                          |
| Outros             | -               | 0,001                          |

O conhecimento das condições de umidade do ar é de grande importância para muitos setores da atividade humana. A conservação de produtos, como frutas, legumes, ovos e outros, em sistemas de refrigeração depende em grande parte de uma mistura apropriada (ar seco/vapor de água). A secagem, o armazenamento e o processamento de grãos são igualmente limitados pelas condições do ar atmosférico.

Às vezes, o índice de conforto térmico de uma atmosfera depende mais da quantidade de vapor d'água presente no ar do que da temperatura propriamente dita. Desse modo, um aparelho de condicionamento do ar promove maior controle da umidade e apenas pequenas variações no valor da temperatura do ambiente. Por tudo isso, o estudo detalhado da mistura de ar seco (N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>+ outros) e vapor de água passou a ser uma disciplina, denominada psicrometria, que estuda, a partir das determinações de parâmetros específicos, as propriedades da mistura de ar seco e vapor de água ou do ar úmido.

Particularmente, nos estudos das etapas de pré-processamento de grãos, a mistura ar seco e vapor de água é um fator restritivo para a execução das operações de secagem, armazenamento e aeração, como será visto mais adiante. A

quantidade de vapor de água presente no ar ambiente varia de quase zero a aproximadamente 4% em volume.

## 2. PROPRIEDADES DO AR ÚMIDO

As propriedades do ar úmido estão relacionadas à temperatura, quantidade de vapor de água, volume ocupado pelo ar e energia nele contida.

Propriedades relacionadas à temperatura:

- temperatura do bulbo seco;
- temperatura do bulbo molhado; e
- temperatura do ponto de orvalho.

Propriedades relacionadas à umidade (massa de vapor d'água):

- pressão de vapor;
- razão de mistura;
- umidade específica;
- umidade absoluta;
- umidade relativa; e
- grau de saturação.

Propriedades relacionadas ao volume ocupado e à energia:

- volume específico; e
- entalpia.

### 2.1. Temperaturas de bulbo seco (t) e de bulbo molhado ( $t_m$ )

A temperatura do bulbo seco (t) do ar é a temperatura medida com um termômetro comum. Caso o termo temperatura seja usado sem uma especificação, o leitor deve entendê-lo como sendo a temperatura de bulbo seco.

Outra medida importante de temperatura, quando se fala de secagem de grãos, é a temperatura de bulbo molhado ( $t_m$ ). Para obtê-la, cobre-se o bulbo de um termômetro comum, cujas características devem ser semelhantes às do termômetro de bulbo seco, com um tecido de algodão embebido em água destilada. O bulbo molhado deve ser ventilado, com o ar que se quer conhecer, a uma velocidade mínima de 5m/s. Uma observação deve ser feita em relação às temperaturas psicrométrica e termodinâmica de bulbo molhado: a temperatura psicrométrica de bulbo molhado ( $t_m$ ) é a temperatura do ar indicada pelo termômetro de bulbo molhado, como descrito anteriormente; já a temperatura termodinâmica de bulbo molhado é aquela de equilíbrio, alcançada quando o ar úmido sofre um processo de resfriamento adiabático, devido à evaporação da água no ar, até atingir a temperatura da água, mantendo-se a pressão constante. Na prática, estas temperaturas são consideradas iguais.

O conhecimento das temperaturas de bulbo seco e de bulbo molhado, expressas em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) e determinadas por meio de psicrômetros, permite, com o uso de tabelas, a determinação rápida da umidade relativa do ar.

**2.2. Temperatura do ponto de orvalho ( $t_{po}$ )**

É a temperatura em que o ar úmido se torna saturado, ou seja, quando o vapor d'água começa a condensar-se, por um processo de resfriamento, mantendo constantes a pressão e a razão de mistura.

**2.3. Pressão de vapor ( $p_v$ )**

O vapor d'água, como os gases componentes da atmosfera, exerce pressão em todas as direções, pressão esta que depende da concentração do vapor.

A quantidade de vapor que pode existir em determinada atmosfera é limitada para cada valor de temperatura. Temperaturas mais elevadas permitem a existência de maior quantidade de vapor do que em um ambiente com temperaturas mais baixas. Quando o ar contém o máximo de vapor d'água permissível para determinada temperatura, diz-se que o ar se encontra saturado e a pressão de vapor nessa circunstância é dita máxima ou de saturação, sendo representada por ( $p_{vs}$ ). Se a quantidade de vapor não é suficiente para saturar o ar, sua pressão é chamada de pressão parcial de vapor e é representada por ( $p_v$ ).

**2.4. Razão de mistura ( $w$ )**

É definida como a razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco em dado volume da mistura. É expressa em kg de vapor/kg de ar seco.

**2.5. Umidade relativa (UR)**

A umidade relativa (UR) do ar é a razão entre a pressão parcial de vapor ( $p_v$ ) exercida pelas moléculas de água presentes no ar e a pressão de saturação ( $p_{vs}$ ), na mesma temperatura, sendo normalmente expressa em porcentagem (equação 1).

$$UR\% = (p_v/p_{vs}) 100 \quad \text{eq. 1}$$

**2.6. Umidade absoluta ( $U_a$ )**

É a relação entre a massa de vapor d'água e o volume ocupado pelo ar úmido.

**2.7. Umidade específica ( $U_e$ )**

É a relação entre a massa de vapor d'água e a massa do ar úmido.

**2.8. Grau de saturação**

É a relação entre a razão de mistura atual e a razão de mistura do ar em condição de saturação, à mesma temperatura e pressão.

**2.9. Volume específico ( $v_e$ )**

É definido como o volume por unidade de massa de ar seco e expresso em  $m^3$  por kg de ar seco ( $m^3/kg$ ). A potência requerida pelo ventilador, em um sistema de secagem, é afetada pelo volume específico do ar.

**2.10. Entalpia ( $h$ )**

A entalpia ( $h$ ) de uma mistura ar seco-vapor d'água é a energia contida no ar úmido, por unidade de massa de ar seco, para temperaturas superiores a uma

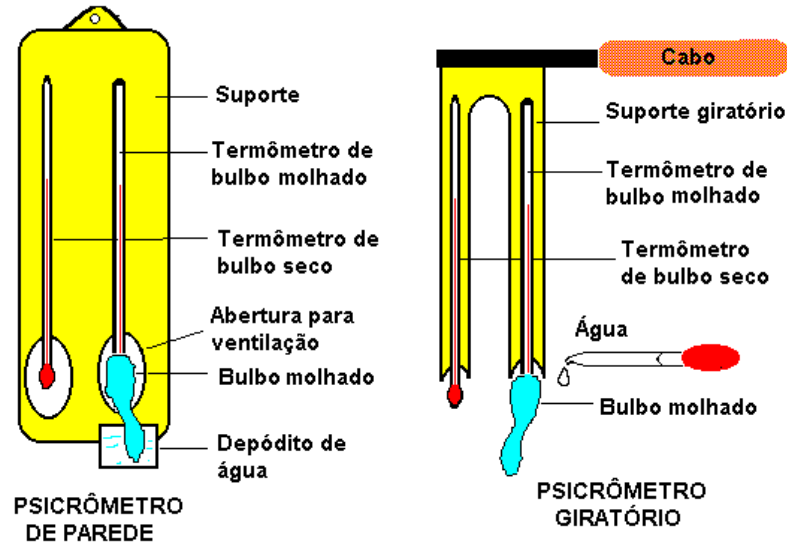
determinada temperatura de referência ( $0^{\circ}\text{C}$ ). Como somente a diferença de entalpia representa interesse prático em processamento de produtos agrícolas, o valor escolhido para a temperatura de referência torna-se irrelevante. A entalpia, que é expressa em kcal ou kJ por kg de ar seco, é muito importante para o dimensionamento de aquecedores e sistema de secagem e composição do custo operacional dos diferentes sistemas.

### 3. MEDIÇÃO DA UMIDADE DO AR

Para medir a umidade relativa do ar são usados instrumentos denominados higrômetros. Os mais comuns são:

- a) **Higrômetros de condensação:** baseiam-se na determinação do ponto de orvalho.
- b) **Higrômetros de absorção:** usados em laboratório. Nesses equipamentos, a determinação é feita passando-se, através de uma substância higroscópica, um volume conhecido do ar cujas propriedades se deseja determinar. O resultado é obtido pela variação do peso devido à umidade absorvida.
- c) **Higrômetros elétricos:** baseiam-se na variação da resistência elétrica de um fino filme de um condutor eletrolítico contendo um sal higroscópico, em função da umidade.
- d) **Higrômetro ótico:** por meio da intensidade de luz refletida, mede a espessura de um filme higroscópico, a qual varia com a umidade.
- e) **Higrômetros de difusão:** constam de uma câmara fechada, tendo uma placa porosa numa das paredes. O ar no interior da câmara é continuamente submetido à ação de um agente dessecador ou umedecedor. A difusão do ar através da placa porosa produz mudança na pressão interna da câmara, que é medida por um manômetro. No ponto de equilíbrio, o valor da mudança de pressão depende da pressão de vapor do ar exterior e da temperatura da câmara.
- f) **Psicrômetros:** constam de dois termômetros semelhantes, um dos quais tem o bulbo recoberto por tecido de algodão umedecido em água destilada (Figura 1). A evaporação da água sobre o bulbo umedecido causa abaixamento na temperatura deste e é dependente do estado higrométrico do ar. O termômetro de bulbo seco indica a temperatura do ar. A diferença de temperatura entre os dois termômetros dá indicação da umidade, bem como de outras propriedades do ar, bastando utilizar os dados obtidos para dar entradas em tabelas, gráficos ou fórmulas. Os psicrômetros podem ser de ventilação natural (psicrômetros comuns) ou de ventilação forçada. O mais comum é o psicrômetro giratório.
- g) **Higrômetros de fio de cabelo:** o cabelo humano livre de gorduras tem a propriedade de aumentar em comprimento ao absorver umidade e de diminuir em comprimento quando a perde. Essa variação é convenientemente ampliada e transmitida a um ponteiro, sobre um mostrador, que indicará diretamente a umidade relativa do ar.

Trocando-se o ponteiro por uma pena contendo reservatório de tinta e o mostrador por um cilindro rotativo movido por um mecanismo de relojoaria, tem-se o higrômetro registrador ou higrógrafo.



**Figura 1 – Psicômetros de parede e giratório.**

#### 4. UMIDADE RELATIVA

Um higrômetro de fio de cabelo ou um higrógrafo fornecem diretamente a leitura da umidade relativa do ar. Isto não acontece quando se usa um psicômetro ou um higrômetro de condensação, pois, nesse caso, a umidade relativa só será conhecida após operações usando esses dados em fórmulas, tabelas ou gráficos psicrométricos.

##### 4.1. Determinação analítica

Conhecendo-se a temperatura do ponto de orvalho e a temperatura do ar, a umidade relativa pode ser determinada pela equação 2:

$$UR = \exp \{5417 \cdot [(1 / T) - (1/T_{po})]\} \quad \text{eq. 2}$$

em que

UR = umidade relativa do ar, decimal;

T = temperatura do ar, K; e

T<sub>po</sub> = temperatura do ponto de orvalho, K.

Quando se usa um psicômetro, a determinação da umidade relativa pode ser feita pela equação 3:

$$UR = p_v / p_{vs}, \quad \text{eq. 3}$$

Sendo

$$p_v = p_{vsm} - [A \cdot P \cdot (t - t_m)] \quad \text{eq. 4}$$

em que

$p_v$  = pressão de vapor d'água no ar, mmHg;

$p_{vsm}$  = pressão máxima de vapor à temperatura de bulbo molhado, mmHg;

$A$  = constante psicrométrica,  $6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$P$  = pressão atmosférica local, mmHg;

$t$  = temperatura do ar,  $^\circ\text{C}$ ; e

$t_m$  = temperatura de bulbo molhado,  $^\circ\text{C}$ .

As constantes psicrométricas adotadas são  $6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , para o psicrômetro com ventilação (aspirado), e  $8,0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , para o psicrômetro sem movimentação de ar.

A pressão de vapor saturado no ar à temperatura de bulbo seco ( $p_{vs}$ ) pode ser determinada pela equação 5:

$$p_{vs} = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5t}{237,3+t}} \quad \text{eq. 5}$$

em que

$p_{vs}$  = pressão de vapor saturado, mbar; e

$t$  = temperatura do ar,  $^\circ\text{C}$ .

Obs.: 760 mmHg = 1013,25 mbar.

A pressão máxima do vapor à temperatura de bulbo molhado ( $p_{vsm}$ ) pode ser expressa pela equação 6:

$$p_{vsm} = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5t_m}{237,3+t_m}} \quad \text{eq. 6}$$

em que

$p_{vsm}$  = pressão máxima do vapor, mbar; e

$t_m$  = temperatura do bulbo molhado,  $^\circ\text{C}$ .

Exemplo:

As leituras de temperatura de bulbo seco e de bulbo molhado, dadas por um psicrômetro de aspiração, foram, respectivamente, de  $27^\circ\text{C}$  e  $18^\circ\text{C}$ . Determine a umidade relativa do ar utilizando a equação 3.

*Solução*

Determinação da pressão de vapor saturado à temperatura de bulbo molhado (equação 6):

$$p_{vsm} = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5 \times 18}{237,3+18}} = 20,6 \text{ mbar ou } 15,5 \text{ mmHg}$$

Determinação da pressão de vapor d'água no ar (equação 4):

$$p_v = 15,5 - [6,7 \times 10^{-4} \cdot 760 \cdot (27 - 18)]$$

$$p_v = 10,9 \text{ mmHg.}$$

Determinação da pressão de vapor saturado à temperatura de bulbo seco (equação 5):

$$p_{vs} = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5 \times 27}{237,3 + 27}} = 35,7 \text{ mbar ou } 26,8 \text{ mmHg}$$

Portanto, a umidade relativa do ar será (equação 3):

$$UR = \frac{10,9}{26,8} = 0,40$$

## 5. TABELAS E GRÁFICOS PSICROMÉTRICOS

Além das equações psicrométricas específicas e dos programas computacionais que incluem essas equações para o cálculo das propriedades do ar, as tabelas e os gráficos psicrométricos foram criados para facilitar a determinação das propriedades do ar. Mesmo com a disponibilidade de computadores, os gráficos e as tabelas são bastante utilizados, principalmente quando se necessita de determinações rápidas em locais onde o computador não está disponível.

A Tabela 2 é usada na determinação aproximada da umidade relativa do ar e apresenta entrada dupla. Nela encontram-se a temperatura de bulbo molhado ( $t_m$ ), na primeira coluna, e a depressão psicrométrica (diferença entre as temperaturas do termômetro de bulbo seco e termômetro de bulbo molhado ( $t - t_m$ ), na primeira linha. Os diversos valores da umidade relativa constituem o corpo da tabela.

Tabela 2 - Valores de umidade relativa para valores conhecidos de t e t<sub>m</sub>

| Temp.<br>t <sub>m</sub><br>°C | DEPRESSÃO PSICROMÉTRICA (T - T <sub>m</sub> ) |     |     |     |     |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                               | 5,2   | 5,4 | 5,6 | 5,8 | 6,0 | 6,2 | 6,4 | 6,6 | 6,8 | 7,0       | 7,2 | 7,4 | 7,6 | 7,8 | 8,0 | 8,2 | 8,4 | 8,6 | 8,8 | 9,0 |
| 10                            | 47  | 46  | 44  | 43  | 41  | 40  | 39  | 37  | 36  | 35        | 33  | 32  | 31  | 30  | 29  | 28  | 26  | 25  | 24  | 23  |
| 11                            | 49  | 47  | 46  | 45  | 43  | 42  | 41  | 40  | 38  | 37        | 35  | 34  | 33  | 32  | 31  | 30  | 29  | 28  | 27  | 26  |
| 12                            | 50  | 49  | 48  | 46  | 45  | 44  | 42  | 41  | 40  | 38        | 37  | 36  | 35  | 34  | 33  | 32  | 31  | 30  | 29  | 28  |
| 13                            | 52  | 51  | 49  | 48  | 46  | 45  | 44  | 43  | 41  | 40        | 39  | 38  | 37  | 36  | 35  | 34  | 33  | 32  | 31  | 30  |
| 14                            | 53  | 52  | 51  | 49  | 48  | 47  | 45  | 44  | 43  | 42        | 41  | 40  | 39  | 37  | 36  | 35  | 34  | 33  | 32  | 31  |
| 15                            | 55  | 53  | 52  | 51  | 49  | 48  | 47  | 46  | 45  | 43        | 42  | 41  | 40  | 39  | 38  | 37  | 36  | 35  | 34  | 33  |
| 16                            | 56  | 54  | 53  | 52  | 51  | 50  | 48  | 47  | 46  | 45        | 44  | 43  | 42  | 41  | 40  | 39  | 38  | 37  | 36  | 35  |
| 17                            | 57  | 56  | 54  | 53  | 52  | 51  | 50  | 48  | 47  | 46        | 45  | 44  | 43  | 42  | 41  | 40  | 39  | 38  | 37  | 36  |
| 18                            | 58  | 57  | 56  | 54  | 53  | 52  | 51  | 50  | 49  | 48        | 46  | 45  | 44  | 43  | 42  | 41  | 41  | 40  | 39  | 38  |
| 19                            | 59  | 58  | 57  | 55  | 54  | 53  | 52  | 51  | 50  | 50        | 48  | 47  | 46  | 45  | 44  | 43  | 42  | 41  | 40  | 39  |
| 20                            | 60  | 59  | 58  | 56  | 55  | 54  | 53  | 52  | 51  | 50        | 49  | 48  | 47  | 46  | 45  | 44  | 43  | 42  | 41  | 40  |
| 21                            | 61  | 60  | 59  | 57  | 56  | 55  | 54  | 53  | 52  | <b>51</b> | 50  | 49  | 48  | 47  | 46  | 45  | 44  | 43  | 43  | 42  |
| 22                            | 62  | 61  | 59  | 58  | 57  | 56  | 55  | 54  | 53  | 52        | 51  | 50  | 49  | 48  | 47  | 46  | 45  | 45  | 44  | 43  |
| 23                            | 63  | 61  | 60  | 59  | 58  | 57  | 56  | 55  | 54  | 53        | 52  | 51  | 50  | 49  | 48  | 47  | 47  | 46  | 45  | 44  |
| 24                            | 63  | 62  | 61  | 60  | 59  | 58  | 57  | 56  | 55  | 54        | 53  | 52  | 51  | 50  | 49  | 49  | 48  | 47  | 46  | 45  |
| 25                            | 64  | 63  | 62  | 61  | 60  | 59  | 58  | 57  | 56  | 55        | 54  | 53  | 52  | 51  | 50  | 50  | 49  | 48  | 47  | 46  |
| 26                            | 65  | 64  | 63  | 62  | 61  | 60  | 59  | 58  | 57  | 56        | 55  | 54  | 53  | 52  | 51  | 50  | 49  | 49  | 48  | 47  |
| 27                            | 65  | 64  | 63  | 62  | 61  | 60  | 59  | 58  | 57  | 56        | 56  | 55  | 54  | 53  | 52  | 51  | 50  | 49  | 49  | 48  |
| 28                            | 66  | 65  | 64  | 63  | 62  | 61  | 60  | 59  | 58  | 57        | 56  | 55  | 55  | 54  | 53  | 52  | 51  | 50  | 50  | 49  |
| 29                            | 67  | 66  | 65  | 64  | 63  | 62  | 61  | 60  | 59  | 58        | 57  | 56  | 55  | 54  | 54  | 53  | 52  | 51  | 50  | 50  |
| 30                            | 67  | 66  | 65  | 64  | 63  | 62  | 61  | 60  | 60  | 59        | 58  | 57  | 56  | 55  | 54  | 54  | 53  | 52  | 51  | 50  |
| 31                            | 68  | 67  | 66  | 65  | 64  | 63  | 62  | 61  | 60  | 60        | 58  | 58  | 57  | 56  | 55  | 54  | 53  | 53  | 52  | 51  |
| 32                            | 68  | 67  | 66  | 65  | 64  | 64  | 63  | 62  | 61  | 60        | 59  | 58  | 57  | 57  | 56  | 55  | 54  | 53  | 53  | 52  |
| 33                            | 69  | 68  | 67  | 66  | 65  | 64  | 63  | 62  | 61  | 61        | 60  | 59  | 58  | 57  | 56  | 56  | 55  | 54  | 53  | 53  |
| 34                            | 69  | 68  | 67  | 66  | 66  | 65  | 64  | 63  | 62  | 61        | 60  | 59  | 59  | 58  | 57  | 56  | 55  | 55  | 54  | 53  |
| 35                            | 70  | 69  | 68  | 67  | 66  | 65  | 64  | 63  | 63  | 62        | 61  | 60  | 59  | 58  | 58  | 57  | 56  | 55  | 55  | 54  |
| 37                            | 70  | 69  | 68  | 67  | 66  | 66  | 65  | 64  | 63  | 62        | 61  | 60  | 60  | 59  | 58  | 58  | 56  | 56  | 55  | 54  |
| 39                            | 71  | 70  | 69  | 68  | 67  | 67  | 66  | 65  | 64  | 63        | 62  | 61  | 61  | 60  | 59  | 59  | 58  | 57  | 57  | 55  |



### 5.1 Exemplo de aplicação da Tabela 2.

Determinar a umidade relativa do ar sabendo-se que um psicrômetro indica  $t = 26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $t_m = 20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Procura-se o valor de  $20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  na coluna correspondente ao termômetro de bulbo molhado ( $t_m$ ) e, daí, segue-se horizontalmente até a coluna cuja depressão psicrométrica ( $t - t_m$ ) seja igual a  $5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , isto é, ( $26,0\text{ }^{\circ}\text{C} - 20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Quando os valores de  $t$  e ( $t - t_m$ ) não estão expressos na tabela, é preciso fazer uma interpolação, a qual pode ser feita indistintamente nas colunas ou nas linhas. Somente após conhecer os valores intermediários das colunas ou das linhas, é possível calcular a umidade relativa.

Fazendo a interpolação nas colunas, tem-se: coluna ( $t - t_m$ ) =  $5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ : para  $t_m = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  o valor de UR = 58% e para  $t_m = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$  o valor de UR = 59%. Assim, para uma variação de  $1\text{ }^{\circ}\text{C} = (21\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C})$ , a UR varia em 1% (Tabela 2).

Para uma variação de  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C} = 20,3\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a UR vai variar em 0,3. Desse modo, pode-se dizer que na coluna ( $t - t_m$ ) =  $5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para  $t_m = 20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , corresponderá uma UR = 58,3% (Tabela 2).

Coluna ( $t - t_m$ ) =  $5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ : para  $t_m = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o valor de UR = 56%, e para  $t_m = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o valor de UR = 57%. Observa-se aqui, também, que para uma variação de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  a UR variou em 1% e, conseqüentemente, para a variação de  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C} = (20,3\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C})$  a UR variará em 0,3%. O valor da UR para  $t_m = 20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  e ( $t - t_m$ ) =  $5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  será de 56,3% (Tabela 2).

Para conhecer a UR nas condições propostas, basta interpolar os valores encontrados na linha correspondente a  $t_m = 20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para ( $t - t_m$ ) =  $5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o valor de UR = 58,3%, e para ( $t - t_m$ ) =  $5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  o valor da UR é de 56,3%. Assim, para uma variação de  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  em ( $t - t_m$ ) = ( $5,8\text{ }^{\circ}\text{C} - 5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), a UR variou em 2%. Para uma variação de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  em ( $t - t_m$ ) = ( $5,7\text{ }^{\circ}\text{C} - 5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), a UR variará em 1%.

Assim, nas condições propostas, a UR é 57,3, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Determinação da umidade relativa (%) em função da temperatura de bulbo molhado e da depressão psicrométrica

| $t_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | $t - t_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) |      |      |
|------------------------------|----------------------------------|------|------|
|                              | 5,6                              | 5,7  | 5,8  |
| 20,0                         | 58,0                             | 57,0 | 56,0 |
| 20,3                         | 58,3                             | 57,3 | 56,3 |
| 21,0                         | 59,0                             | 58,0 | 57,0 |

### 5.2. Gráfico psicrométrico

Antes de abordar o uso do gráfico psicrométrico, é necessário compreender como ele é constituído.

A Figura 2 mostra um gráfico psicrométrico à pressão constante de 760 mm de Hg (1.013 mbar), que poderá ser usado em outras condições, desde que sejam feitas as devidas correções. O eixo das abcissas expressa as temperaturas do termômetro de bulbo seco em  $^{\circ}\text{C}$ .

Do lado direito da figura, correspondendo ao eixo das ordenadas, encontra-se a razão de mistura, expressa em gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco, e do lado esquerdo encontra-se a pressão de vapor em milibares e mm de mercúrio (Hg).

As linhas curvas entre os três parâmetros descritos correspondem às linhas de umidade relativa. A mais extrema é a linha UR = 100%, ou linha do vapor saturante ou de saturação, sobre a qual se lêem as temperaturas do termômetro de bulbo molhado e do ponto de orvalho. Acima da curva UR = 100%, encontram-se segmentos de retas, onde se lê a entalpia, ou seja, a quantidade de calor envolvida nas mudanças de estado. A entalpia está expressa em kcal/kg de ar seco.

Começando a leitura pelo eixo das temperaturas de bulbo seco ( $t_{bs}$ ), encontram-se, inclinadas para a esquerda em aproximadamente  $65^\circ$ , as linhas de volume específico do ar seco, que indicam o número de metros cúbicos de ar necessário por quilograma de ar seco.

### 5.2.1. Uso do gráfico

Conhecendo a temperatura do ponto de orvalho e a temperatura de bulbo seco ou temperatura do ar, para obter a umidade relativa, traça-se, a partir do ponto de orvalho lido sobre a linha de umidade relativa igual a 100%, a paralela à linha das temperaturas de bulbo seco. A seguir, levanta-se uma perpendicular ao eixo das temperaturas de bulbo seco, a qual corresponde à temperatura do ar. O cruzamento das linhas traçadas determina no gráfico um ponto denominado “**ponto de estado**”, a partir do qual podem-se conhecer as outras propriedades do ar:

- a) **Umidade relativa:** como as linhas curvas indicam a UR, basta observar qual linha coincide com o ponto de estado. Caso não haja coincidência, faz-se a interpolação visual.
- b) **Razão de mistura:** a partir do ponto de estado traça-se, para a direita, uma paralela ao eixo das temperaturas do termômetro de bulbo seco e lê-se, na escala, o número de gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco.
- c) **Pressão de vapor:** a partir do ponto de estado traça-se, para a esquerda até às escalas de pressão de vapor, uma paralela ao eixo das temperaturas do termômetro de bulbo seco, fazendo a leitura em milibares ou milímetros de mercúrio.
- d) **Entalpia:** a partir do ponto de estado, traça-se uma linha paralela às linhas que partem da escala da entalpia, onde se lê o número de quilocalorias por quilograma de ar seco.
- e) **Volume específico do ar seco:** o ponto de estado determina o valor do volume específico do ar seco. Quando ele não coincide com uma das linhas traçadas no gráfico, é feita uma interpolação visual, determinando o número de metros cúbicos de ar por quilograma de ar seco.

As Figuras 3 e 4 ilustram, como um exemplo, como é possível determinar os diferentes valores das propriedades psicrométricas do ar úmido, conhecendo-se os

valores de duas outras propriedades não alinhadas.

**Exemplo:** determine as propriedades termodinâmicas do ar úmido (temperatura de bulbo seco,  $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e a temperatura de bulbo molhado,  $t_m = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), como indicado na Figura 3.

**Solução:** para determinar o ponto de estado, levanta-se a perpendicular ao eixo das temperaturas de bulbo seco, a partir do valor da temperatura do ar. A seguir, partindo da temperatura  $t_m$ , obtida na curva de saturação, traça-se a paralela às linhas de entalpia. O cruzamento das duas linhas determina o ponto de estado. Os demais parâmetros são encontrados como descrito anteriormente.

- umidade relativa = 50%;
- volume específico =  $0,863\text{ m}^3/\text{kg}$  de ar seco;
- razão de mistura = 10,0 gramas de vapor/kg de ar seco;
- pressão de vapor = 15,0 mbar; e
- entalpia = 16,5 kcal/kg de ar seco.

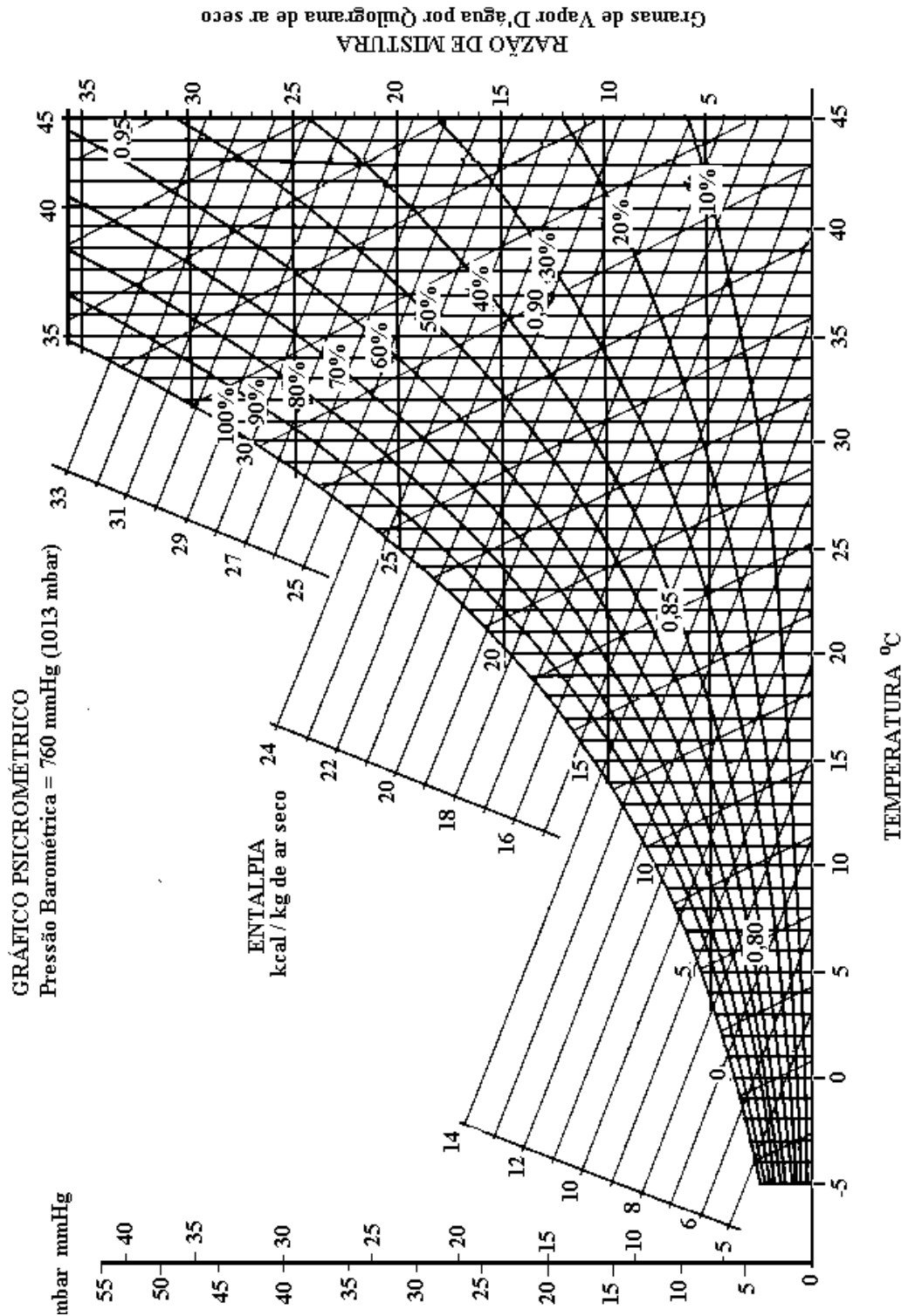


Figura 2 – Gráfico psicrométrico

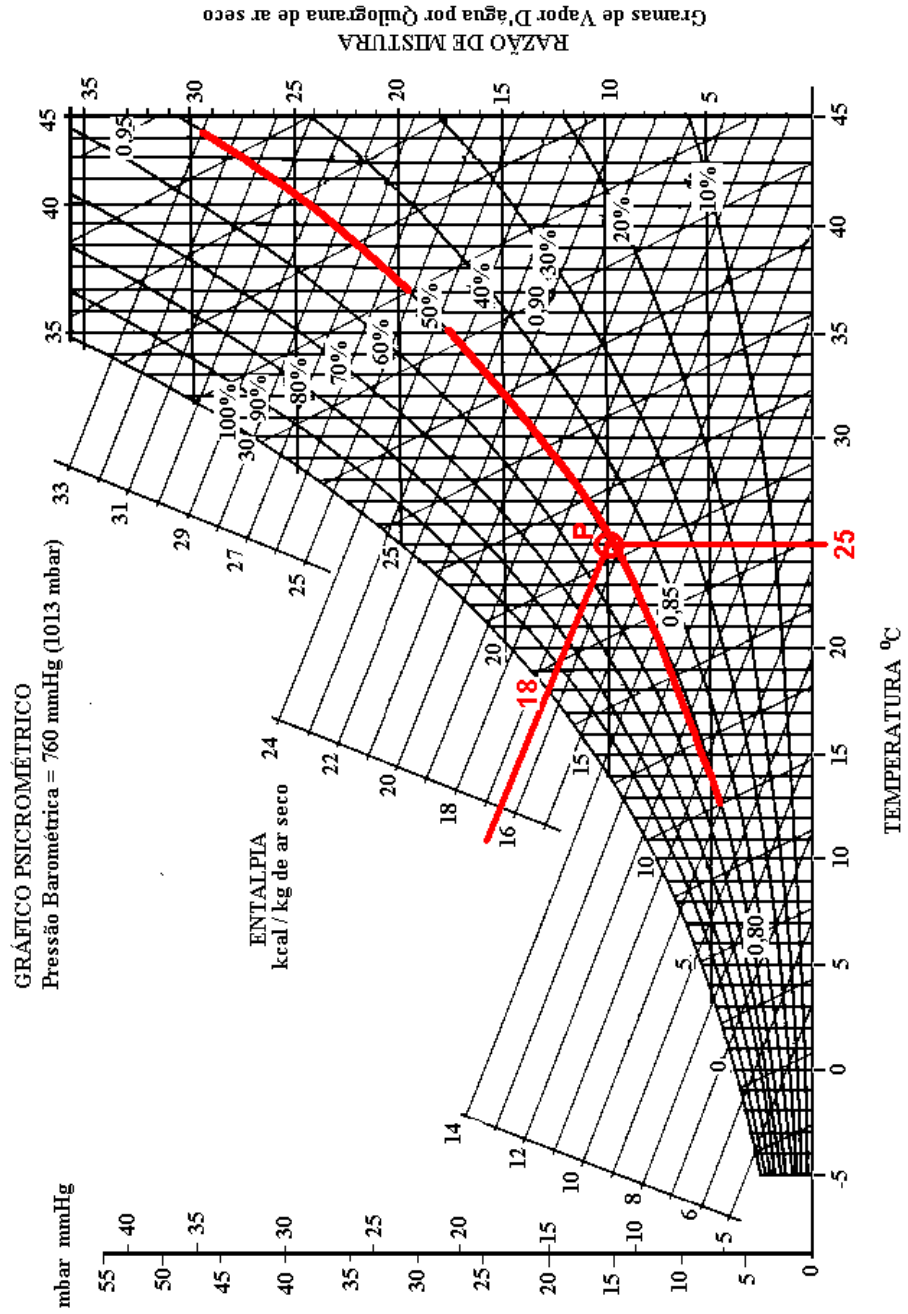


Figura 3 – Determinação do ponto de estado a partir de  $t$  e  $t_m$ .

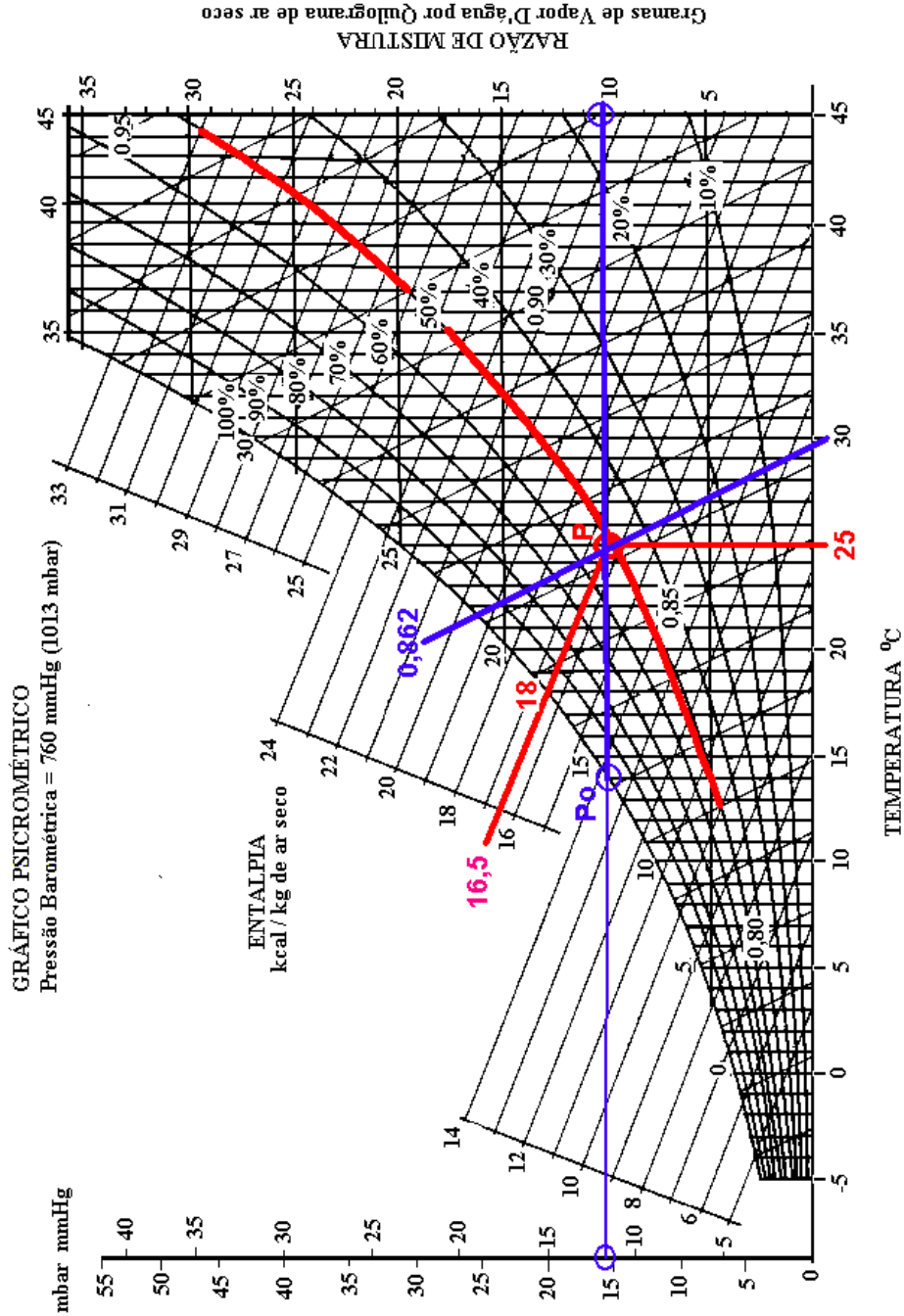


Figura 4 – Determinação das propriedades do ar a partir do ponto de estado.

Conhecendo-se o ponto de orvalho  $p_o$  e a temperatura do ar  $t$ , para obter a umidade relativa, traça-se, a partir do ponto de orvalho ar lido sobre a linha de saturação ou de umidade relativa 100%, uma paralela à linha das temperaturas de bulbo seco ou abcissa. A seguir, levanta-se uma perpendicular ao eixo das temperaturas de bulbo seco, a qual deve corresponder à temperatura do ar  $t$ . O cruzamento das linhas traçadas determina no gráfico o ponto de estado P, a partir do qual determinam-se as outras propriedades, de modo semelhante ao da Figura 3.

**Exemplo:** que características apresentam uma massa de ar cuja temperatura de bulbo seco é  $27\text{ }^\circ\text{C}$  e a temperatura do ponto de orvalho ( $p_o$ )  $13\text{ }^\circ\text{C}$ ?

### **Solução**

Pela Figura 5 e pelo procedimento semelhante ao da Figura 4, serão determinadas as seguintes propriedades do ar:

- umidade relativa = 42%;
- volume específico =  $0,867\text{ m}^3/\text{kg}$  de ar seco;
- razão de mistura = 9,0 gramas de vapor/kg de ar seco;
- pressão de vapor = 14,0 mbar ou 11,0 mmHg;
- entalpia = 16,5 kcal/kg de ar seco; e
- temperatura de bulbo molhado =  $18,3\text{ }^\circ\text{C}$ .

O ponto de estado pode ser determinado por meio de dois parâmetros quaisquer, desde que não sejam interdependentes.

## **6. OPERAÇÕES QUE MODIFICAM O AR**

Como dito anteriormente, nos diversos ramos das áreas de pré-processamento, transformação e conservação de alimentos, a utilização do ar na sua forma natural ou modificada é bastante comum. Por exemplo, na operação de secagem deve-se, muitas vezes, aquecer o ar para que ele tenha o seu potencial de absorção de água aumentado, para acelerar o processo. Na conservação de perecíveis são utilizadas câmaras especiais com recirculação do ar a baixas temperaturas (frigo-conservação), para que o produto possa ser transportado e adquirir maior vida-de-prateleira, durante a comercialização, sem se deteriorar. Em outras operações, deve-se, com frequência, modificar outras propriedades, como a quantidade de vapor de água.

O processo de secagem de grãos em camada profunda pode ser representado em um gráfico psicrométrico, como mostrado na Figura 6. Assim que o ar move através do aquecedor (ponto de estado 1 para o ponto de estado 2), sua temperatura e sua entalpia aumentam, e, ao atravessar a camada de grãos (ponto de estado 2 para o ponto de estado 3), a umidade relativa e a razão de mistura aumentam, a temperatura de bulbo seco diminui e a entalpia permanece constante.

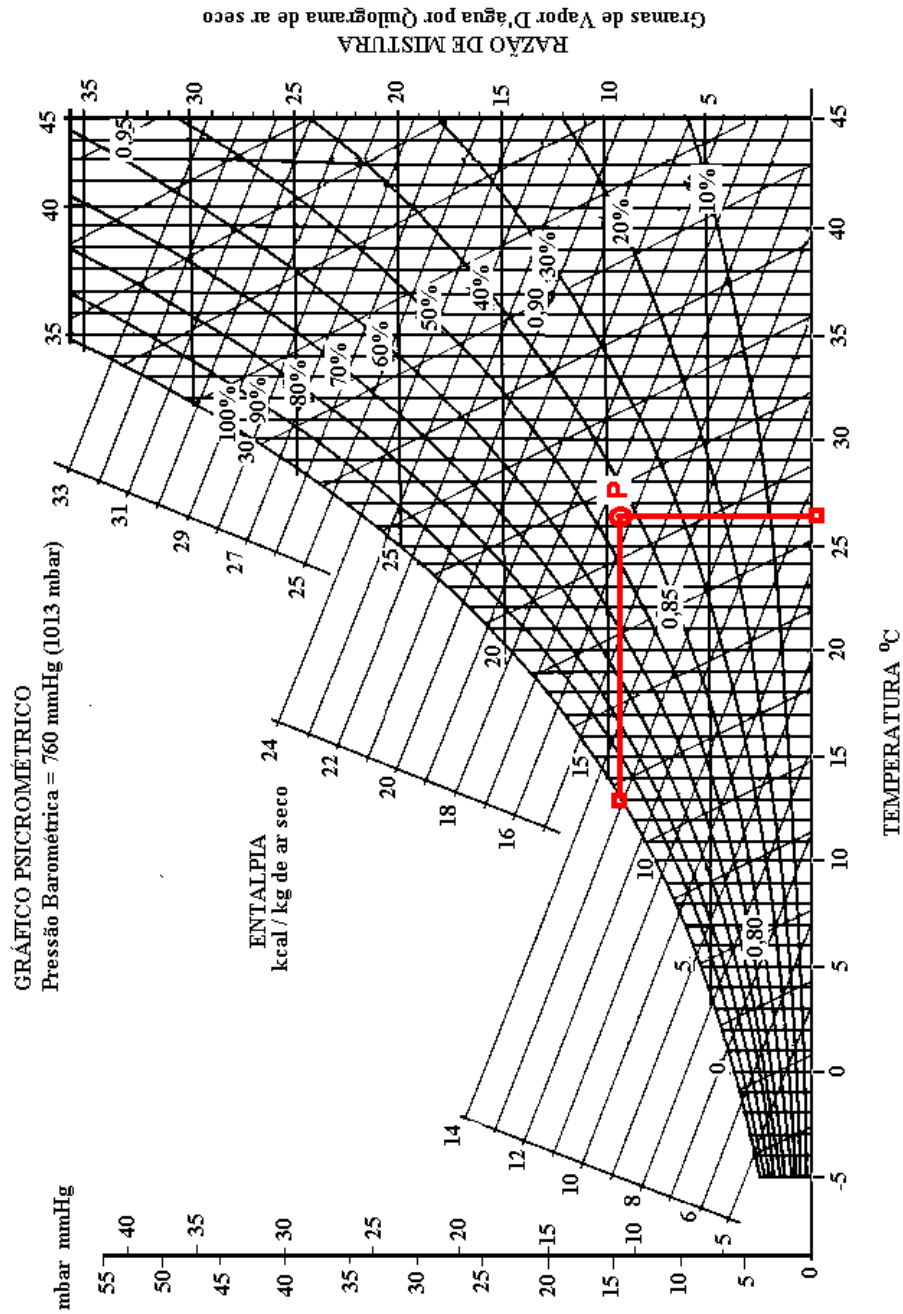


Figura 5 - Determinação do ponto de estado a partir da temperatura do ponto de orvalho ( $t_{p0}$ ) e da temperatura do ar ( $t$ ).



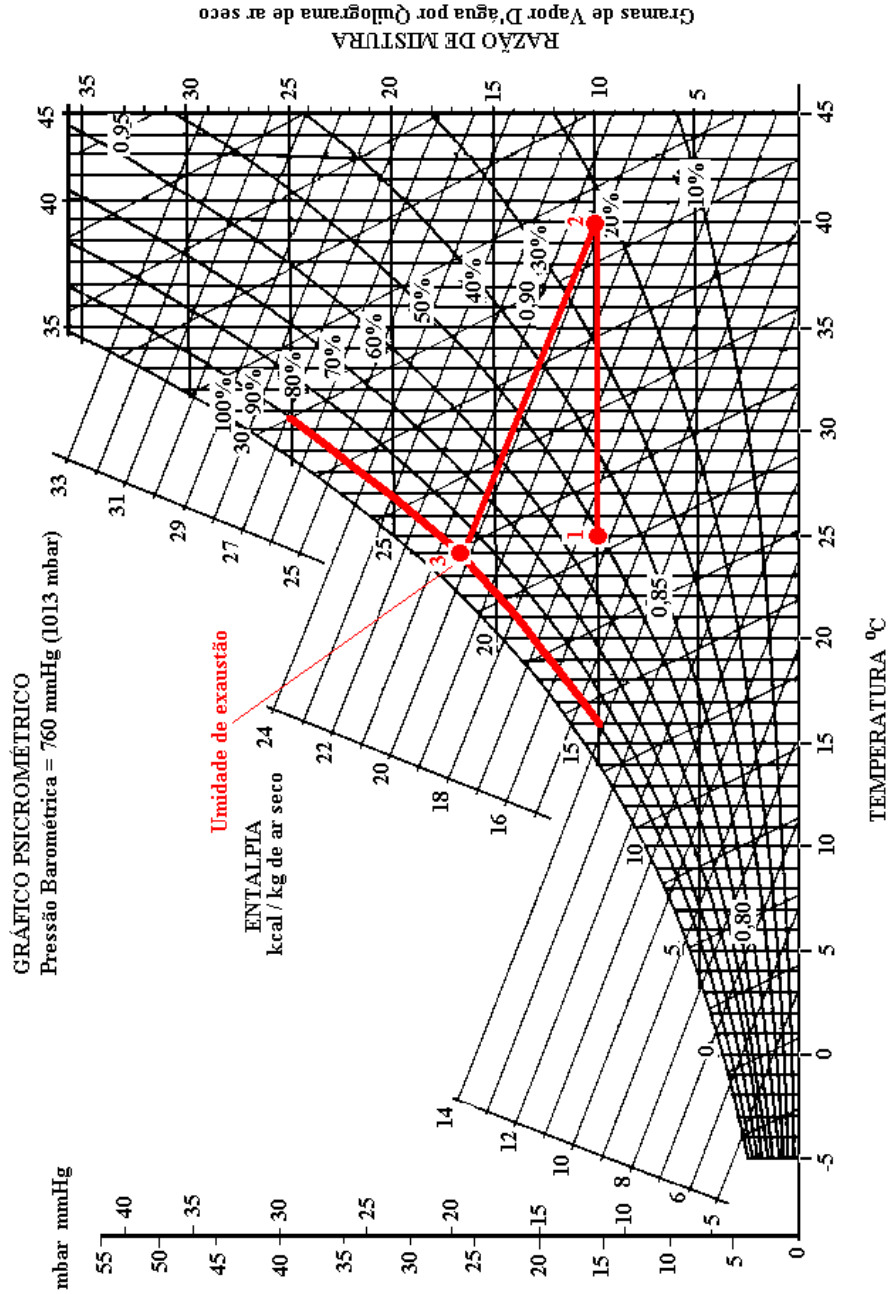


Figura 6 – Modificação do ar durante o processo de secagem em camada profunda.

### 6.1. Aquecimento e resfriamento do ar

Ao fornecer calor “seco” ao ar, a temperatura deste aumenta, enquanto a razão de mistura permanece constante, porque não há aumento nem redução na quantidade de vapor presente. Aquecido o ar, o ponto de estado move-se horizontalmente para a direita, conforme Figura 7, onde o ar com UR =50% e  $t_1 = 23\text{ }^\circ\text{C}$  foi aquecido para  $t_2 = 34\text{ }^\circ\text{C}$ . O ponto de estado deslocou-se horizontalmente para a direita e a umidade relativa caiu para 26%. A entalpia variou de 15 para 18 kcal por quilo de ar seco. Isto significa que foram necessárias 3,0 kcal para elevar a temperatura do ar de 23 para 34  $^\circ\text{C}$ , por quilograma de ar seco.

No resfriamento, o ponto de estado move-se horizontalmente para a esquerda. Quando a curva de saturação (UR = 100%) é atingida, tem-se o ponto de orvalho. Continuando o resfriamento, o ponto de estado move-se sobre a linha de saturação, indicando que o vapor d'água está condensando.

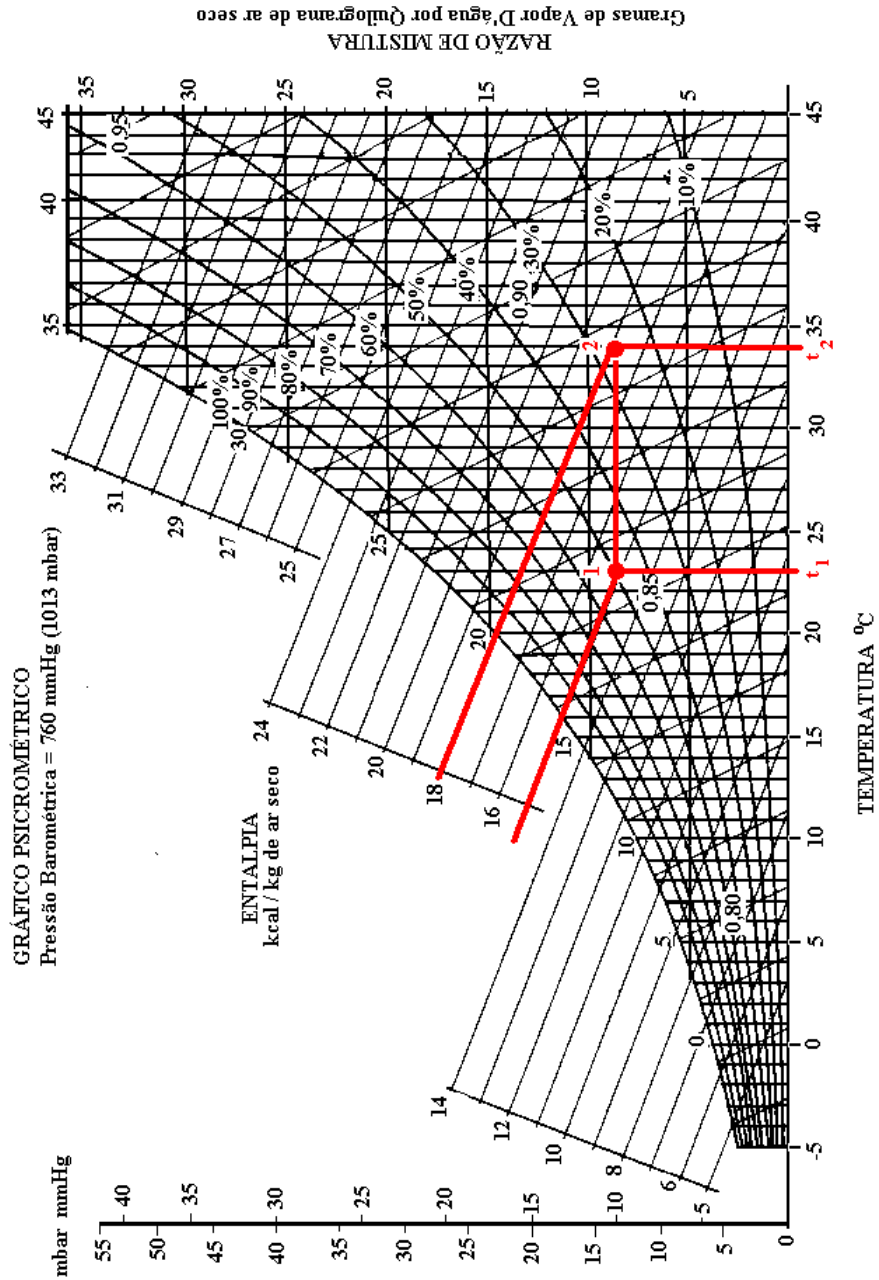
A Figura 8 mostra o resfriamento para 8  $^\circ\text{C}$  de uma massa de ar que inicialmente apresentava 23  $^\circ\text{C}$  e UR =50%. O ponto de estado desloca-se horizontalmente para a esquerda até atingir UR=100%, onde o ponto de orvalho é 12  $^\circ\text{C}$ . A partir desse ponto, desloca-se sobre a curva de saturação até atingir 8  $^\circ\text{C}$ , mantendo a UR= 100%. Isto significa a condensação de dois gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco, correspondendo a uma mudança na razão de mistura de 8,5 para 6,5 gramas por quilograma de ar seco.

A entalpia variou de 15 para 10 kcal por quilograma de ar seco. A diferença entre esses valores indica a necessidade de 5,0 kcal de refrigeração por quilograma de ar seco, para que este passe de  $t_1 = 23\text{ }^\circ\text{C}$  para  $t_2 = 8\text{ }^\circ\text{C}$ .

### 6.2. Secagem e umedecimento

A adição ou retirada de umidade do ar, sem adicionar ou retirar calor, leva o ponto de estado a se deslocar sobre uma linha de entalpia constante. No caso de adição de umidade, o ponto de estado desloca-se para cima e para esquerda, e, mediante a retirada de umidade, este ponto desloca-se para baixo e para a direita. A Figura 9 mostra que, em condições iniciais de 25 $^\circ\text{C}$  e razão de mistura de 9,0 gramas de vapor por quilograma de ar seco (ponto 1), o ar perderá 4,0 gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco, quando o ponto de estado se deslocar sobre a linha de uma mesma entalpia até atingir a temperatura de 35  $^\circ\text{C}$  (ponto 2).

Novamente, partindo-se das condições iniciais (ponto 1), quando se acrescentam 3,0 gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco, o ponto de estado desloca-se para o ponto 3 à temperatura de 18  $^\circ\text{C}$ . Nota-se que a entalpia permanece constante a 16,0 kcal por quilograma de ar seco.



**Figura 7 – Deslocamento do ponto de estado devido ao aquecimento da massa de ar.**

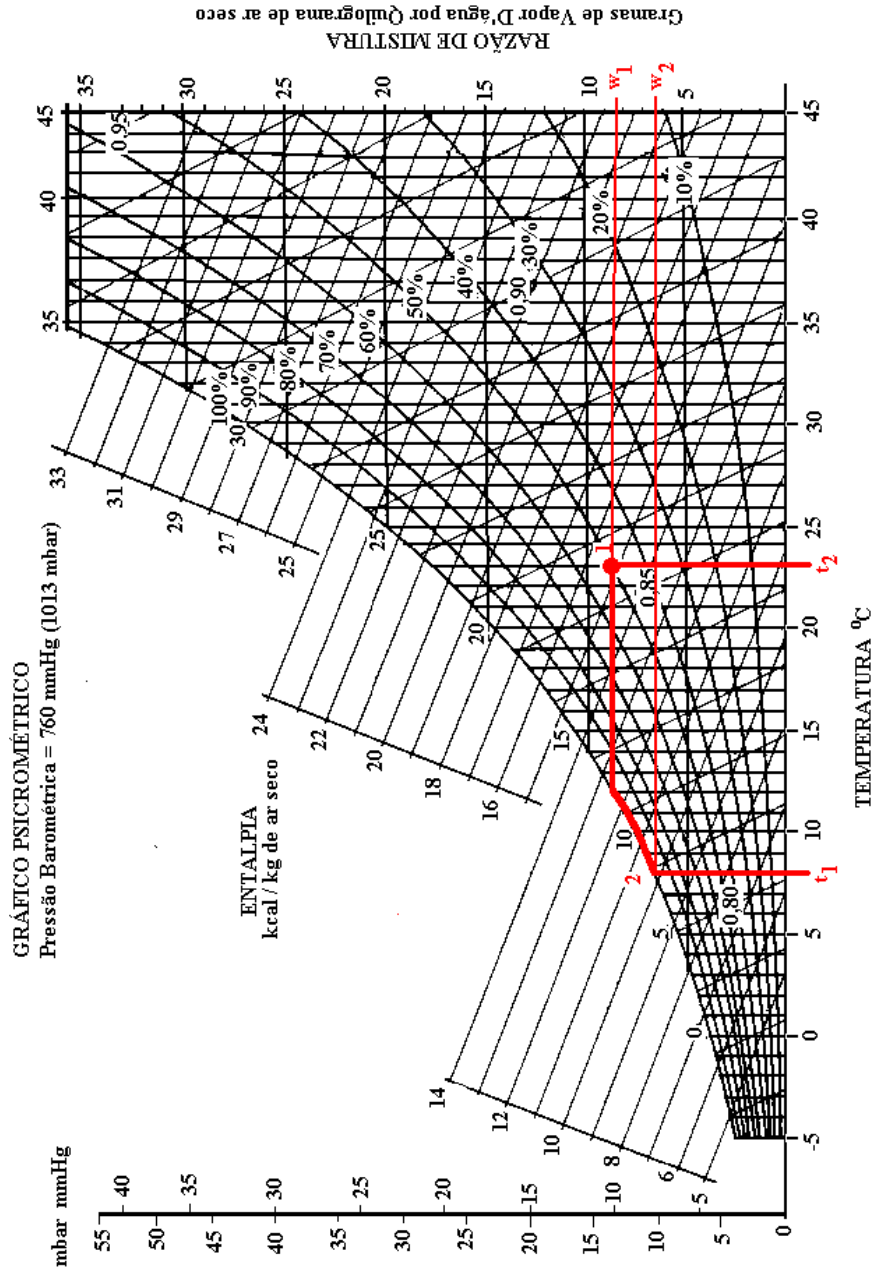


Figura 8 – Deslocamento do ponto de estado devido ao resfriamento da massa de ar.

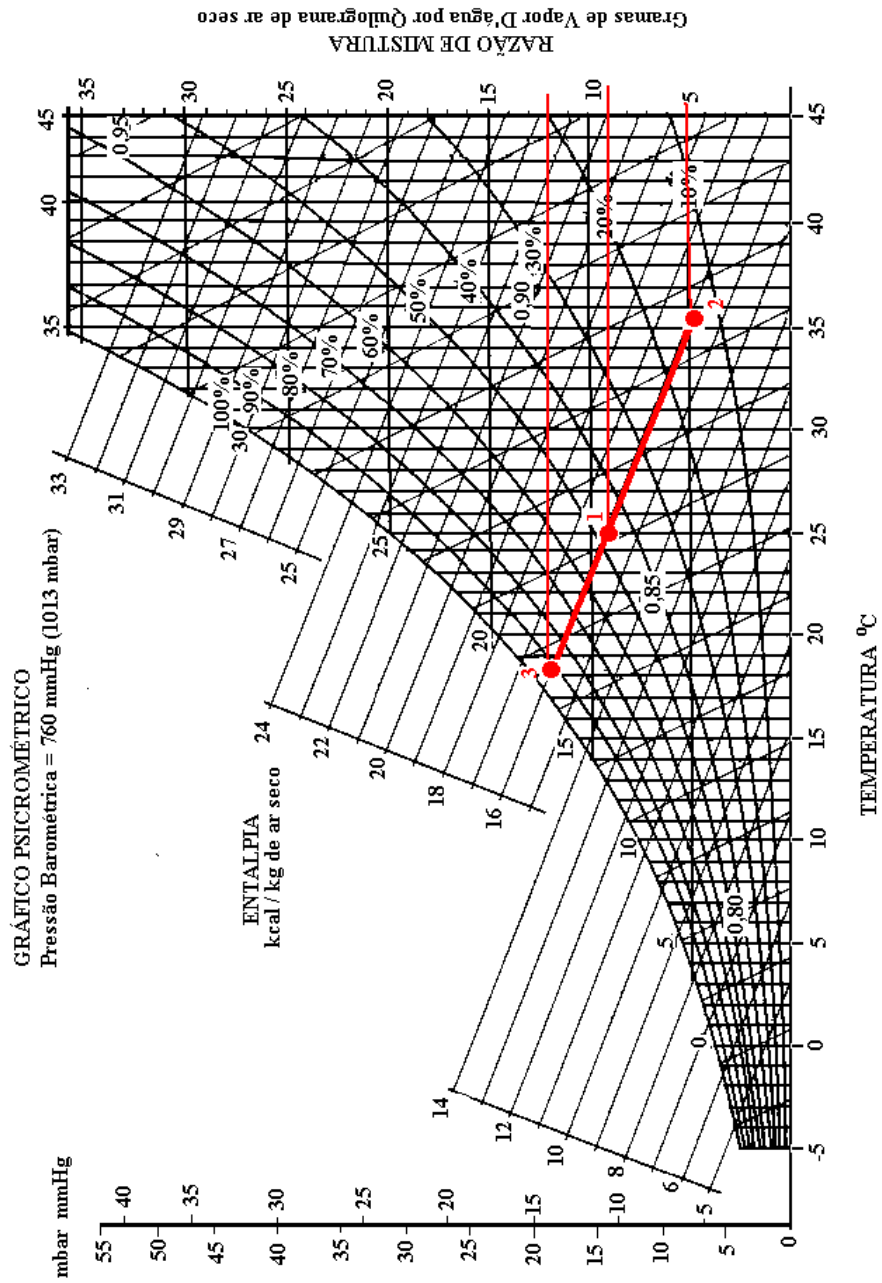


Figura 9 – Operação de secagem e umedecimento da massa de ar.

### 6.3. Mistura de dois fluxos de ar

Em grande número de secadores agrícolas, são misturadas duas massas de ar com diferentes fluxos e propriedades termodinâmicas (Figura 10). As condições finais da mistura resultante podem ser determinadas por meio de gráficos psicrométricos.

Considerando dois fluxos de massa  $\dot{m}_1$  e  $\dot{m}_2$ , temperaturas  $t_1$  e  $t_2$ , razões de misturas  $w_1$  e  $w_2$  e entalpias  $h_1$  e  $h_2$ , a mistura final terá fluxo de massa  $\dot{m}_3$ , temperatura  $t_3$ , razão de mistura  $w_3$  e entalpia  $h_3$ . Os balanços de energia e de massa para esse processo são:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

$$\dot{m}_1 w_1 + \dot{m}_2 w_2 = \dot{m}_3 w_3 \text{ e}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3$$

Substituindo  $\dot{m}_3$ , tem-se

$$\dot{m}_1 (h_3 - h_1) = \dot{m}_2 (h_2 - h_3)$$

$$\dot{m}_1 (w_3 - w_1) = \dot{m}_2 (w_2 - w_3)$$

Portanto

$$\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1}$$

A condição final da mistura dos dois fluxos é encontrada na linha que liga os pontos  $(h_1, w_1)$  e  $(h_2, w_2)$  no gráfico psicrométrico. O ponto  $(h_3, w_3)$  pode ser encontrado algebricamente ou aplicando-se a propriedade dos triângulos semelhantes diretamente no gráfico psicrométrico.

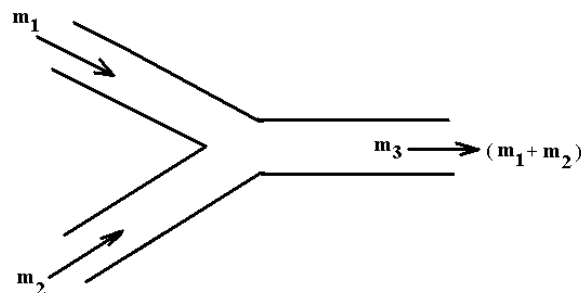


Figura 10 – Mistura de duas massas de ar.

**Exemplo**

Em um secador de fluxo concorrente, 300 m<sup>3</sup>/minuto de ar com temperatura de bulbo seco de 35°C e temperatura de bulbo molhado de 30°C (ar 1), proveniente da seção de resfriamento, são misturados na entrada de uma fornalha com o ar ambiente (ar 2), cuja vazão é de 300 m<sup>3</sup>/minuto, com temperatura de bulbo seco de 20°C e umidade relativa de 80 %. Determine a temperatura de bulbo seco e de bulbo molhado do ar resultante da mistura (ar 3) que a fornalha deverá aquecer.

**Solução**

A partir dos pontos de estados dados pelas condições do ar 1 e do ar 2, tem-se:

Volume úmido do ar 1 ( $v_1$ ): 0,911 m<sup>3</sup>/kg de ar seco

Razão de mistura do ar 1 ( $w_1$ ): 24,7 g de vapor/kg de ar seco

Entalpia do ar 1 ( $h_1$ ): 27,8 kcal/kg de ar seco

Volume úmido do ar 2 ( $v_2$ ): 0,851 m<sup>3</sup>/kg de ar seco

Razão de mistura do ar 2 ( $w_2$ ): 11,8 g de vapor/kg de ar seco

Entalpia do ar 2 ( $h_2$ ): 16,1 kcal/kg de ar seco

Determinação da vazão mássica  $\dot{m}_1$  e  $\dot{m}_2$  :

$$\dot{m}_1 = \frac{Q_1}{v_1} = \frac{300 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}}{0,911 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}} = 329,3 \text{ kg de ar seco/minuto}$$

$$\dot{m}_2 = \frac{Q_2}{v_2} = \frac{300 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}}{0,851 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}} = 352,5 \text{ kg de ar seco/minuto}$$

Substituindo os valores de  $\dot{m}_1$ ,  $\dot{m}_2$ ,  $h_1$  e  $h_2$ ,  $w_1$  e  $w_2$  nas expressões:

$$\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} \quad \text{e} \quad \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1}$$

tem-se o ponto de estado 3, resultante da mistura do ar 1 e do ar 2, caracterizado por:

$h_3 = 21,7$  kcal/kg de ar seco; e

$w_3 = 18$  g de vapor/kg de ar seco.

A partir do ponto de estado 3 podem-se determinar todas as propriedades da mistura, sendo a temperatura do bulbo seco de 27°C e a do bulbo molhado de 24,5°C.

As transformações efetuadas serão consideradas mais detalhadamente em estudos sobre a secagem e armazenagem dos diversos produtos agrícolas.

## 7. LITERATURA CONSULTADA

1. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W. & HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: An AVI Book, 1992. 450p.
2. PEREIRA, J.A.M. & QUEIROZ, D.M. **Psicrometria**. Viçosa: CENTREINAR. 27p.
3. PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 603p.
4. SILVA, J. S.; REZENDE, R. C. **Higrometria IN: Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. 510p.
5. VIANELLO, R. L., ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. 449 p.
6. ZOLNIER, S. **Psicrometria I**. Viçosa: **Engenharia na Agricultura**, Série - Caderno Didático, N°13, 1994. 14p.