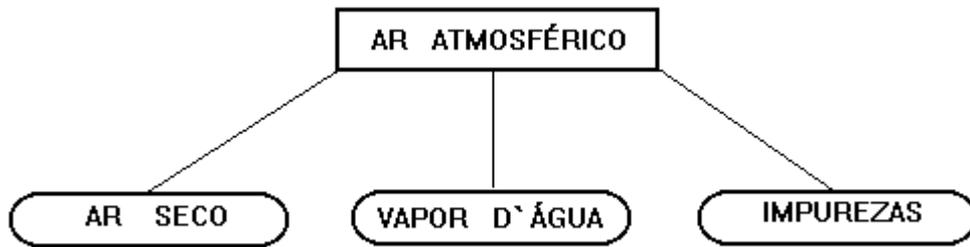


## 2 PROPRIEDADES DO AR ATMOSFÉRICO

O ar atmosférico (fig. 3) pode ser considerado uma mistura de ar seco, vapor d'água e impurezas.

FIGURA 3 - AR ATMOSFÉRICO



Considera-se o ar seco quando todo vapor d'água e contaminantes são removidos do ar atmosférico. As quantidades relativas aos diversos constituintes do ar seco estão apresentadas na (tab. 2).

TABELA 2 - COMPONENTES DO AR SECO

Componentes	% volume	% peso
Nitrogênio	78,09	75,52
Oxigênio	20,95	23,15
Argônio	0,93	1,28
Dióxido de carbono	0,03	0,04
Neônio, Hidrogênio, Hélio, Criptônio, Ozônio, etc.	traços leves	

Embora a composição do ar seco permaneça relativamente constante a quantidade de vapor d'água no ar atmosférico varia consideravelmente por ser condensável a pressões e temperaturas usuais, razão pela qual, as quantidades de ar úmido devem ser expressas de tal maneira que as quantidades relativas de vapor d'água e ar seco sejam sempre indicadas.

Assim as propriedades específicas do ar úmido serão geralmente referidas à unidade de peso do ar seco.

A temperatura e a pressão barométrica do ar atmosférico variam muito com as condições do tempo, localização geográfica e principalmente com a altitude.

O ar atmosférico padrão é útil como referência em aplicações de condicionamento de ar para estimativa de suas propriedades em várias altitudes.

Para efeitos do estudo dos processos normalmente encontrados no campo

da psicrometria, o ar úmido é formado pela mistura de dois gases: o vapor d'água e o ar seco. Esta aproximação é válida em ampla faixa de temperatura, considerando que as condições ambientes estão bastante longe das propriedades críticas dos componentes do ar seco.

As constantes importantes para o ar padrão (temperatura de 21,1°C e uma pressão barométrica de 101,325 kPa) e a água no SI são:

- aceleração da gravidade normal,  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ ;
- constante de gás para o ar,  $R = 287 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ;
- densidade do ar ao nível do mar,  $\rho_{\text{ar}} = 1,201 \text{ kg/m}^3$ ;
- calor específico à pressão constante do ar,  $c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ;
- calor específico a volume constante do ar,  $c_v = 0,717 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ;
- densidade da água,  $\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ;
- calor específico da água líquida,  $c_{\text{al}} = 4,19 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ;
- calor latente de vaporização da água líquida,  $c_{\text{lv}} = 2,4535 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$ .

As propriedades do ar úmido são normalmente apresentadas na forma de tabelas termodinâmicas ou cartas psicrométricas, mas para o desenvolvimento de rotinas computacionais as equações a seguir são muito úteis.

## 2.1 PRESSÃO DO VAPOR DE ÁGUA NO AR ÚMIDO

A pressão exercida pelo ar úmido obedece praticamente à lei da mistura de gases perfeitos, que é dada por:

$$p = p_a + p_v \quad (2)$$

onde

- $p$  pressão total da mistura
- $p_a$  pressão parcial do ar seco
- $p_v$  pressão parcial do vapor d'água na mistura

Para o ar saturado podem ser utilizadas as tabelas de dados psicrométricos, para a determinação da pressão de vapor d'água e quando o ar não estiver saturado, a expressão a seguir, pode ser usada para o seu cálculo:

$$p_v = p_{vs} - p A (t_{bs} - t_{bu}) \quad (3)$$

onde

- $p_v$  pressão de vapor d'água na mistura, Pa
- $p_{vs}$  pressão de saturação do vapor d'água (quando  $\phi = 100\%$ ), Pa
- $p$  pressão barométrica, Pa
- $A$  constante para psicrômetro giratório e  $t_{bu} > 0^\circ\text{C}$ ,  $6,66 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- $t_{bs}$  temperatura de bulbo seco,  $^\circ\text{C}$
- $t_{bu}$  temperatura de bulbo úmido,  $^\circ\text{C}$

## 2.2 UMIDADE ESPECÍFICA

A umidade específica é dada por:

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (4)$$

onde

$w$  umidade específica, kg vapor/kg ar seco

$m_v$  massa de vapor d'água, kg vapor

$m_a$  massa de ar seco, kg ar seco

Verifica-se que as quantidades de vapor d'água que se pode adicionar à mistura são pequenas, sendo a umidade específica geralmente expressa em g de vapor/ kg ar seco.

Aplicando a lei geral dos gases perfeitos, a umidade específica pode ser apresentada em termos da pressão barométrica,  $p$  e da pressão parcial de vapor,  $p_v$  através da seguinte equação:

$$w = 0,62198 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (5)$$

### 2.3 UMIDADE RELATIVA

É a relação entre a pressão parcial de vapor d'água na mistura,  $p_v$  a uma determinada temperatura e a pressão parcial que o vapor d'água teria,  $p_s$  se a mistura estivesse saturada à mesma temperatura e pressão total da mistura.

$$\phi = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (6)$$

Naturalmente, a umidade relativa varia entre 0 e 1 e, por isso, é hábito fornecer o valor de  $\phi$  em porcentagem. Assim  $\phi = 0$  está reservado para o ar seco, enquanto que  $\phi = 100\%$  indica que o ar úmido está saturado.

Nos processos psicrométricos geralmente o fluxo de ar seco é mantido constante, enquanto que o vapor d'água é adicionado ou retirado do ar úmido. Assim, o fluxo mássico de ar seco, se conserva através da instalação ou equipamento operando em regime, enquanto que o fluxo mássico de ar úmido pode ou não se conservar, dependendo se houver ou não variação do conteúdo de umidade do ar. Assim as propriedades volume específico, entalpia específica e calor específico são representadas com base no ar seco.

### 2.4 VOLUME ESPECÍFICO

O volume específico é dado por:

$$v = \frac{V}{m_a} \quad (7)$$

onde

$v$  volume específico,  $m^3/kg$  ar seco  
 $V$  volume da mistura,  $m^3$

## 2.5 ENTALPIA ESPECÍFICA

A entalpia específica da mistura é dada pela contribuição isolada da entalpia do ar seco e do vapor d'água, dada a hipótese de validade de gases perfeitos. Assim:

$$h = h_a + w h_v \quad (8)$$

onde

$h$  entalpia específica,  $kJ/kg$  ar seco  
 $h_a$  entalpia do ar seco,  $kJ/kg$  ar seco  
 $h_v$  entalpia do vapor d'água,  $kJ/kg$  ar seco  
 $w$  umidade específica,  $kg/kg$  ar seco

Uma equação aproximada para a entalpia específica é dada por:

$$h = T + w (2501 + 1,805 T) \quad (9)$$

onde

$T$  temperatura de bulbo seco,  $^{\circ}C$

## 2.6 CALOR ESPECÍFICO

O calor específico referido à massa de ar seco é dado pela por: combinação dos calores específicos do ar seco,  $c_{pa}$  e o calor específico do vapor d'água,  $c_{pv}$ , de acordo com a expressão:

$$c_p = c_{pa} + w c_{pv} \quad (10)$$

onde

$c_p$  calor específico,  $kJ/kg$  ar seco  $^{\circ}C$   
 $c_{pa}$  calor específico do ar seco,  $kJ/kg$   $^{\circ}C$   
 $c_{pv}$  calor específico do vapor d'água,  $kJ/kg$   $^{\circ}C$

## 2.7 TEMPERATURA DE BULBO SECO

É a temperatura medida por um termômetro sensível, limpo, seco, protegido contra irradiações, não sendo afetado pelo vapor d'água do ar.

## 2.8 TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO

É a temperatura do ar indicada por termômetro comum, exposto a uma corrente de ar cujo bulbo esteja coberto por um tecido poroso umedecido.

Para o ar saturado as temperaturas de bulbo seco e úmido são coincidentes.

Para o ar não saturado  $t_u < t_s$ . Isto é devido à vaporização da água do tecido que envolve o bulbo, que se processa por absorção de calor.

O aparelho utilizado para medir a temperatura de bulbo úmido é denominado de psicrômetro, que também fornece a temperatura de bulbo seco.

## 2.9 TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO

É a temperatura em que a mistura está saturada e começa o vapor d'água a se condensar.

Alternativamente para temperaturas entre 0 e 70°C, a temperatura de ponto de orvalho pode ser calculada pela seguinte equação:

$$t_o = -35,957 - 1,8726\alpha + 1,6893\alpha^2 \quad (11)$$

onde,  $\alpha = \ln(p_v)$

## 2.10 CALOR SENSÍVEL

É o calor fornecido ou removido do ar úmido que altera sua temperatura de bulbo seco que é calculado por:

$$Q_s = \dot{m} c_p \Delta t \quad (12)$$

onde

$Q_s$  calor sensível, W

$\dot{m}$  vazão mássica de ar

$c_p$  calor específico à pressão constante do ar seco, kJ/kg °C

$\Delta t$  variação na temperatura de bulbo seco, °C

## 2.11 CALOR LATENTE

É a quantidade de calor que altera a quantidade de vapor d'água do ar úmido sem alterar sua temperatura de bulbo seco que é calculado por:

$$Q_L = \dot{m} c_{lv} \Delta w \quad (13)$$

onde

$Q_L$  calor latente, W

$\dot{m}$  vazão mássica de ar

$c_{lv}$  calor latente de vaporização da água, kJ/kg vapor

$\Delta w$  variação na umidade específica, g/kg ar seco

## 2.12 CALOR TOTAL

O calor total,  $Q_T$  é a soma do calor sensível e latente fornecido ou retirado de uma certa massa de ar em um determinado processo que é calculado por:

$$Q_T = Q_s + Q_L \quad (14)$$

ou pode-se usar a variação de entalpias:

$$Q_T = \dot{m} \Delta h \quad (15)$$

onde

$\Delta h$  variação na entalpia, kJ/kg ar seco

Em projetos de sistemas de climatização, as quantidades de ar,  $V_i$  são expressas diretamente em  $m^3/h$  ou  $l/s$  e as fórmulas são utilizadas para o ar padrão, como segue:

$$Q_s = 1,2 V_i \Delta t \quad (16)$$

$$Q_L = 2,95 V_i \Delta w \quad (17)$$

## 2.13 FATOR DE CALOR SENSÍVEL

O fator de calor sensível, FCS é a relação entre o calor sensível e o calor total, onde o calor total é a soma do calor sensível com o calor latente.

$$FCS = \frac{Q_s}{Q_s + Q_L} \quad (18)$$

onde

$Q_s$  calor sensível

$Q_L$  calor latente

## 2.14 VARIAÇÃO DA PRESSÃO BAROMÉTRICA COM A ALTITUDE

A pressão barométrica ao nível do mar, chamada de pressão normal, vale 101,325 kPa. Para outras altitudes, a pressão local,  $p_L$  varia de acordo com a seguinte expressão (ASHRAE, 1996):

$$p_L = 101,325 \left(1 - 2,25569 \times 10^{-5} L\right)^{5,2561} \quad (19)$$

onde

$L$  altitude, m

A (eq. 19) vale para altitudes ente  $-500$  e  $11000$  m.

A densidade para a altitude  $L$ ,  $\rho_L$  pode ser calculada através da expressão:

$$\rho_L = \rho \frac{p_L}{p} \quad (20)$$

onde

$\rho$  densidade ao nível do mar, 1,201 kg/m<sup>3</sup>

$p$  pressão atmosférica ao nível do mar, 101,325 kPa

## 2.15 EXEMPLOS ILUSTRATIVOS

**EXEMPLO 2.15.1** - Determinar a pressão de vapor de saturação em ar úmido e a pressão do ar seco a 24°C e uma pressão barométrica de 101325 Pa e de 92600 Pa.

**EXEMPLO 2.15.2** - Calcular a pressão do vapor d'água, umidade relativa, a umidade específica, o volume específico, a entalpia específica e a temperatura de ponto de orvalho para uma amostra de ar úmido no estado de 24°C de bulbo seco e 17°C de bulbo úmido e pressão barométrica de 101325 Pa.