

PSICROMETRIA

A psicrometria é o estudo das propriedades termodinâmicas de misturas de ar seco e de vapor de água e da sua utilização para analisar os processos que envolvem ar húmido. Analisaremos separadamente as propriedades do ar seco e do vapor de água e, posteriormente, abordaremos as propriedades do ar húmido e os processos de condicionamento do ar húmido.

LEI DOS GASES IDEAIS

Nas pressões e temperaturas normalmente encontradas em pós-colheita, o ar seco contendo vapor de água comporta-se praticamente como um gás ideal. Num gás ideal a pressão absoluta (p , Pa), o volume específico (V' , $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) e a temperatura absoluta (T_A , K) estão relacionadas pela expressão:

$$pV' = RT_A$$

em que R é a constante dos gases ideais ($\text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Considerando que a concentração mássica do gás (ρ , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) é o inverso do volume específico ($\rho = 1/V'$), a expressão pode ser escrita da seguinte forma:

$$p = \rho RT_A$$

Numa base molar a expressão assume a forma:

$$pV = nR_0T_A$$

em que V é o volume de n moles (m^3) e R_0 é a constante universal dos gases ideais, independente da natureza do gás ($R_0 = M \times R$) que assume o valor $R_0 = 8314,41 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

PROPRIEDADES DO AR SECO

O ar seco é uma mistura de gases onde predominam o azoto (N_2) e o oxigénio (O_2). A composição do ar seco é ligeiramente variável com a localização geográfica. Por essa

razão utiliza-se normalmente no estudo do ar seco, uma mistura de composição fixa, designada por ar padrão (Quadro 1).

Quadro 1. Composição ar padrão (Singh & Heldman, 2001).

Constituinte	Percentagem do volume
Azoto (N ₂)	78,084000
Oxigénio (O ₂)	20,947600
Árgon (Ar)	0,934000
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,031400
Neon (Ne)	0,001818
Hélio (He)	0,000524
Outros gases (metano, dióxido de enxofre, hidrogénio, kripton e xenon)	0,000658
Total	100,000000

Massa e constante dos gases

O ar padrão seco tem uma massa molecular de 28,9645. A constante dos gases do ar seco é:

$$R_a = \frac{8314,41}{28,9645} = 287,055 \quad m^3 \cdot Pa \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$$

Volume específico do ar seco

O volume específico é o volume ocupado por uma unidade de massa (m³.kg⁻¹). O volume específico do ar seco pode ser derivado da lei dos gases ideais e é dado pela equação:

$$V'_a = \frac{R_a T_A}{p_a}$$

Calor específico do ar seco

Calor específico a pressão constante (c_p) é a quantidade de calor que é necessário fornecer a uma unidade de massa para aumentar a temperatura em 1 °C a pressão constante. O calor específico do ar seco à pressão de 1 atm (101,325 kPa), num intervalo

de temperaturas entre -40 e 60 °C varia entre 0,997 e 1,022 kJ.kg⁻¹.K⁻¹. Entre 0 e 30 °C o valor aproximado de c_p é 1,005 kJ.kg⁻¹.K⁻¹. Um valor de $c_p = 1,01$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹ ou mesmo $c_p = 1,0$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹ pode ser utilizado na maior parte dos cálculos para temperatura entre -10 e 100 °C.

Quadro 2. Calor específico do ar seco (Singh & Heldman, 2001).

Temperatura (°C)	Calor específico do ar seco (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
-20	1,005
0	1,011
10	1,010
20	1,012
30	1,013

Entalpia do ar seco

A entalpia (H) é uma propriedade termodinâmica definida como a soma da energia interna de um sistema (U) e do produto entre a pressão (p) e o volume (V) do sistema:

$$H = U + pV$$

A entalpia é por vezes designada como “conteúdo calórico”, embora esta terminologia seja inadequada sob o ponto de vista termodinâmico.

A entalpia tem de ser definida em relação a um ponto de referência. Em psicrometria, a pressão de referência é a pressão atmosférica (101,325 kPa) e a temperatura de referência é 0 °C. A entalpia calcula-se multiplicando o calor específico do ar seco pela diferença entre a temperatura do ar e a temperatura de referência (0 °C).

$$H_a = c_p (T_a - T_0)$$

Como a temperatura de referência é 0 °C e c_p do ar seco é aproximadamente igual a 1, a entalpia do ar seco é sensivelmente equivalente à temperatura do ar (em °C).

$$H_a = 1,005T_a$$

Temperatura do bolbo seco

A temperatura do bolbo seco (T) é a temperatura do ar medida com um termómetro ordinário, designada assim para se distinguir da temperatura do termómetro de bolbo húmido.

PROPRIEDADES DO VAPOR DE ÁGUA

Massa e constante dos gases

A água tem uma massa molecular de 18,01534. A constante dos gases do vapor de água é:

$$R_v = \frac{8314,41}{18,01534} = 461,52 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Volume específico do vapor de água

A temperatura inferiores a 66 °C o vapor de água segue aproximadamente a lei dos gases ideais. O volume específico do vapor de água é:

$$V'_v = \frac{R_v T_A}{P_v}$$

Calor específico do vapor de água

O calor específico do vapor de água varia pouco entre -71 e 124 °C, podendo-se considerar o valor $c_p = 1,88 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. No âmbito deste trabalho consideraremos o valor $c_p = 1,86 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (ver quadro).

Entalpia do vapor de água

A entalpia do vapor de água é dada pela expressão:

$$H_v = 2501,4 + 1,86(T_a - T_0)$$

sendo 2501,4 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ o valor do calor latente de vaporização a 0,01 °C e 1,86 o calor específico do vapor de água.

Na realidade, o calor latente de vaporização (L_v) da água varia com a temperatura, pelo que se encontram diferentes valores nas equações utilizadas por diferentes autores. O

calor latente de vaporização da água, expresso em kJ.kg^{-1} pode ser calculado no intervalo de temperaturas entre 0 e 200 °C com uma precisão de cerca de 0,02% pela fórmula empírica de Regnault:

$$L_v = 2538,2 + 2,91T$$

Quadro 3. Propriedades do vapor de água saturado (Perry et al., 1998).

Temperatura (K)	Volume específico ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$)	Entalpia (kJ.kg^{-1})	Calor específico ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
0	206,3	2502	1,854
275	181,7	2505	1,855
280	130,4	2514	1,858
285	99,4	2523	1,861
290	69,7	2532	1,864

PROPRIEDADES DO AR HÚMIDO

O ar húmido é considerado uma mistura de dois componentes: ar seco e vapor de água. No ar húmido o vapor de água comporta-se como um gás perfeito. Embora a mistura de ar seco e água não siga rigorosamente a lei dos gases ideais, esta permanece um boa aproximação do comportamento do ar húmido a pressões inferiores a 3 atm. Na realidade, o ar contém ainda outras substâncias em solução ou suspensão, como sejam poeiras, microorganismos, CO e outros poluentes.

A pressão do ar húmido (pressão barométrica) é, de acordo com a lei de Gibbs-Dalton, a soma das pressões parciais exercidas pelo ar seco e pelo vapor de água contido na atmosfera.

$$p_B = p_a + p_v$$

As relações psicrométricas são representadas graficamente em diagramas. Existem vários tipos de diagramas psicrométricos, mas neste trabalho seguiremos o diagrama de Carrier.

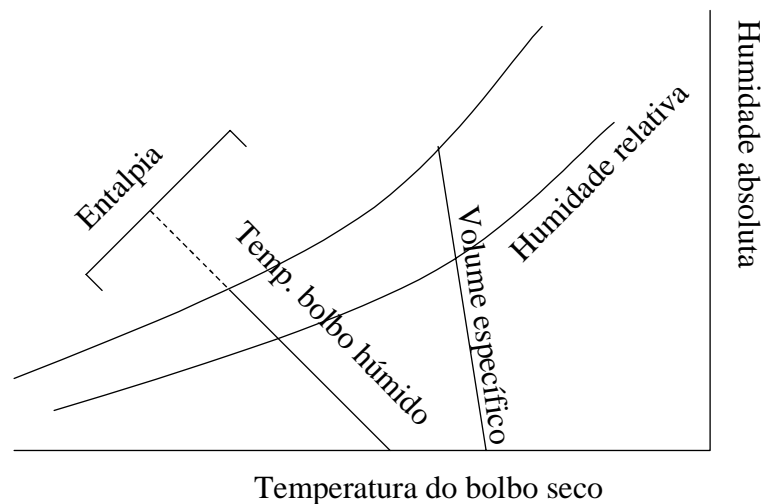


Figura 1. Representação esquemática do diagrama psicrométrico de Carrier.

Variáveis psicrométricas

No diagrama psicrométrico estão representadas as seguinte variáveis, características do ar húmido:

- Temperatura do bolbo seco
- Temperatura do bolbo húmido
- Temperatura do ponto de orvalho
- Humidade absoluta ou pressão parcial
- Humidade relativa
- Entalpia
- Volume específico

Termómetro de bolbo seco. A temperatura do bolbo seco (T) é a temperatura do ar medida com um termómetro ordinário, e não é influenciada pela humidade relativa do ar.

Temperatura do ponto de orvalho (T_{po}). Temperatura em que a pressão parcial de vapor de água é igual à pressão de vapor saturante. Mede-se com um higrómetro de ponto de orvalho. A temperatura do ponto de orvalho pode ser calculada através das expressões:

$$T_{po} = \frac{27,952 \times \log\left(\frac{p_v}{613,34}\right)}{1 - 0,1025 \times \log\left(\frac{p_v}{613,34}\right)} \text{ se } T_{po} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{po} = \frac{31,685 \times \log\left(\frac{p_v}{613,34}\right)}{1 - 0,1311 \times \log\left(\frac{p_v}{613,34}\right)} \text{ se } T_{po} > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Termómetro de bolbo húmido (T_m). É a temperatura mais baixa que pode atingir o ar húmido quando é arrefecido apenas devido à evaporação de água. A temperatura do bolbo molhado é geralmente inferior à temperatura do termómetro de bolbo seco, excepto quando o ar está saturado; neste caso as duas temperaturas são iguais.

$$T_m \leq T$$

Quanto mais seco estiver o ar, maior é a diferença entre T_m e T .

A relação entre as pressões parciais e as temperaturas das misturas de ar seco e vapor de água é dada pela equação:

$$p_v = p_{wb} - \frac{(p_B - p_{wb})(T_a - T_v)}{1555,56 - 0,722T_v}$$

A temperatura do bolbo molhado mede-se com um termómetro cujo bolbo está coberto de por uma mecha saturada de água pela qual passa uma corrente de ar para favorecer a evaporação da água.

Humidade absoluta

A humidade absoluta (W) de uma amostra de ar húmido é a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco dessa amostra.

$$W = \frac{m_v}{m_a}$$

ou, seja, a razão entre as frações molares de vapor de água e de ar seco $\frac{x_v}{x_a}$, a multiplicar

pela razão das massas moleculares:

$$W = \left(\frac{18,01534}{28,9645} \right) \frac{x_v}{x_a} = 0,622 \frac{x_v}{x_a}$$

ou ainda

$$W = 0,622 \frac{P_v}{P_a}$$

como $P_a = P_B - P_v$

$$W = 0,622 \frac{P_v}{P_B - P_v}$$

normalmente expressa em kg de água por kg de ar seco.

O vapor de água no ar comporta-se como um gás perfeito exercendo uma pressão parcial proporcional à humidade absoluta. A pressão parcial de vapor relaciona-se com a humidade absoluta a seguinte forma:

$$P_v = \frac{W \cdot 101,325}{0,622}$$

A humidade absoluta mede-se pelo método gravimétrico de absorção ou com um higrómetro de condensação.

Humidade relativa

A humidade relativa (ϕ) é a razão entre a fracção molar de vapor de água contido no ar e a fracção molar de vapor numa amostra de ar saturado à mesma temperatura e pressão.

$$\phi = \frac{x_v}{x_s} \times 100$$

$$\phi = \frac{P_v}{P_s} \times 100$$

Na gama de temperaturas e de humidades normalmente encontradas em pós-colheita, a humidade relativa pode ser calculada a partir da seguinte fórmula empírica, aplicável a $-7\text{ °C} \leq T \leq 60\text{ °C}$ e $30\% \leq \phi \leq 70\%$.

$$\phi = \left(1 - 3 \frac{T - T_m}{T + 18} \right) \times 100$$

A humidade relativa pode ser medida com higrómetros (de cabelo, de cinta higroscópica, de algodão), ou com psicrómetros.

Volume específico

É o volume ocupado pela mistura de ar seco e de vapor de água contida em 1 kg de ar seco à pressão de 1 atm (101,325 kPa). O volume específico ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) do ar húmido é dado pela relação:

$$V' = \frac{V}{1 + W}$$

$$V' = (0,082T_a + 22,4) \left(\frac{1}{29} + \frac{W}{18} \right)$$

Entalpia

Como o ar húmido é uma mistura de ar seco e de vapor de água, o calor específico da mistura é a soma dos calores específicos dos componentes da mistura. Sempre que as transformações tenham lugar a pressão constante, a quantidade de calor que é necessário fornecer ao ar húmido para elevar a sua temperatura a pressão constante é igual à entalpia específica do ar. Admitindo que a entalpia é nula à temperatura de 0 °C , para o ar à temperatura T , temos:

$$H = H_a + WH_v$$

Se considerarmos que $H_a = c_{pa} \cdot T$ e que $H_v = L_v + c_{pv} \cdot T$, temos:

$$H = c_{pa} \cdot T + W(L_v + c_{pv} \cdot T)$$

Estas expressões mostram que a entalpia do ar húmido é composta pelos seguintes termos:

Entalpia = entalpia do ar seco +
entalpia de evaporação à temperatura do ponto de orvalho +

entalpia adicionada ao vapor de água após a evaporação. Se existirem gotículas de água em suspensão no ar, é ainda necessário adicionar o termo que reflecte a entalpia da água à temperatura do ponto de orvalho (massa de água x 4,186 x T).

A entalpia do ar húmido pode ser calculada através destas expressões, utilizando valores do calor latente de vaporização da água e dos calores específicos a pressão constante do ar seco e do vapor de água. As diferenças que ocorrem entre as equações utilizadas por diversos autores derivam da utilização de diferentes valores para o calor latente de vaporização e para os calores específicos, uma vez que estes variam com a temperatura. Utilizaremos a expressão:

$$H = 1,01T + W(2463 + 1,88T)$$

em que $1,01 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ é o calor específico do ar seco, 2463 kJ.kg^{-1} o calor latente de vaporização da água e $1,88 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ o calor específico do vapor de água a pressão constante. A expressão $H = 1,01T + W(2501,3 + 1,86T)$ é também utilizada.

No diagrama psicrométrico refere-se a entalpia do ar saturado. Para determinar a entalpia do ar húmido, com uma humidade relativa inferior a 100% é necessário subtrair o factor de correcção, normalmente pequeno, representado nas linhas curvas que sobrem a partir do eixo da temperatura do bolbo seco.

PROCESSOS DE CONDICIONAMENTO DO AR Os processos de condicionamento do ar são:

- Arrefecimento sensível apenas
- Aquecimento sensível apenas
- Arrefecimento e humedificação
- Aquecimento e humedificação
- Humedificação apenas (aumento calor latente)
- Desumidificação apenas (diminuição do calor latente)
- Arrefecimento e desumidificação
- Aquecimento e desumidificação

Variação do calor sensível

O aquecimento sensível ou arrefecimento sensível ocorre quando a temperatura do ar (bolbo seco) aumenta ou diminui sem que haja variação da humidade absoluta. No diagrama psicrométrico o aquecimento e o arrefecimento sensível são representados por deslocações horizontais.

Variação do calor latente

A humidade absoluta do ar pode variar sem que haja variação da temperatura do termómetro de bolbo seco. Em caso de humidificação do ar sem variação do calor sensível, o calor absorvido é utilizado para evaporar mais água. Como o calor latente de vaporização da água é elevado (2496 kJ.kg^{-1}), o ar tem de absorver calor que é utilizado para evaporar mais água, aumentando a humidade absoluta sem que haja variações de temperatura.

Variação simultânea do calor sensível e do calor latente

Nos seguintes processos ocorrem variações simultâneas da temperatura (calor sensível) e da humidade absoluta (calor latente):

- Arrefecimento com humidificação. Designa-se este processo por saturação adiabática (entalpia constante), pois não há trocas de calor por condução ou por radiação.
- Arrefecimento e desumidificação. É o percurso inverso da saturação adiabática. Ocorre em situações de desumidificação química, por exemplo com sílica gel. Aquecimento e humidificação
- Aquecimento e desumidificação

OPERAÇÕES ELEMENTARES NO TRATAMENTO DO AR

Aquecimento

O ar pode ser aquecido de 2 formas:

1. Por fornecimento de calor sensível através de um aquecedor “seco”, como sejam resistências eléctricas ou radiadores de aquecimento por água quente. Neste caso o aquecimento tem lugar sem variação da concentração de vapor de água. A quantidade de calor a fornecer por unidade de massa (m_a) de ar seco é

$$Q = m_a(H_f - H_i)$$
2. Através da mistura do ar mais frio com ar húmido a uma temperatura superior à do ar inicial. Neste caso a humidade absoluta do ar inicial varia, sendo a T e W finais correspondentes à média ponderada da T e da W dos ares que se misturaram.

Arrefecimento

No arrefecimento do ar húmido devemos considerar 2 casos:

1. a temperatura do evaporador é superior à temperatura do ponto de orvalho do ar que entra no evaporador. Neste caso, a diferença entre as pressões parciais de vapor da água na superfície fria e no ar é positiva ($p_{s_{evaporador}} > p_{v_{ar}}$) e a superfície do evaporador permanece seca. O arrefecimento ocorre sem condensação de vapor.
2. a temperatura do evaporador é inferior à temperatura do ponto de orvalho do ar que entra no evaporador. Neste caso a pressão parcial do vapor de água saturado na superfície fria é inferior à pressão parcial de vapor do ar ($p_{s_{evaporador}} < p_{v_{ar}}$) e a diferença é negativa. O arrefecimento produz-se por condensação do vapor de água. No final do arrefecimento a humidade absoluta do ar é inferior ao valor inicial ($W_f < W_i$).

Humidificação

Humidificação é a transferência de vapor de água para o ar atmosférico. Nesta transferência estão envolvidos fenómenos de transferência de massa e de calor. O ar é humidificado por meio de pulverizadores ou nebulizadores que reduzem a água a pequenos gotículas que aumentam a superfície de contacto entre a água e o ar e favorecem a evaporação.

A evolução do ar faz-se segundo uma linha recta oblíqua (humidificação adiabática do ar) correspondendo a entalpia constante.

A energia latente requerida num processo de humidificação pode ser calculada através da relação:

$$q = H_{fv} \dot{m}_{H_2O}$$

em que q é o calor latente adicionado (W), H_{fv} é a entalpia de vaporização da água (J.kg⁻¹) e \dot{m}_{H_2O} é a taxa de vaporização da água (kg.s⁻¹).

As trocas térmicas entre o ar e água ocorrem de acordo com a seguinte relação:

$$\dot{m}_a W dH = \dot{m}_{H_2O} W dT$$

em que m é o caudal mássico do ar e da água, dH é a variação da entalpia do ar durante a transformação e dT é a variação da temperatura da água durante a transformação. A equação mostra que o calor perdido pelo ar é igual ao calor ganho pela água.

Os nebulizadores pulverizam água em excesso, sendo o excesso recolhido e bombeado novamente para os pulverizadores.

Lista de símbolos

c_{pa}	Calor específico do ar seco	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
c_{pw}	Calor específico do vapor de água	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
H	Entalpia do ar húmido	kJ.kg^{-1}
H_a	Entalpia do ar seco	kJ.kg^{-1}
H_v	Entalpia do vapor de água saturado	kJ.kg^{-1}
L_v	Calor latente de vaporização	KJ.kg^{-1}
p	Pressão	kPa
p_a	Pressão parcial do ar seco	kPa
p_B	Pressão barométrica ou pressão total do ar húmido	kPa
p_v	Pressão parcial de vapor de água	kPa
p_{vw}	Pressão parcial de vapor de água à temperatura do ponto de orvalho	kPa
p_s	Pressão de saturação	kPa
ϕ	Humidade relativa	%
Q	Calor	J
q	Taxa de transferência de calor	kW
R	Constante do gases	$\text{m}^3.\text{Pa}^{-1}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
R_a	Constante dos gases do ar seco	$\text{m}^3.\text{Pa}^{-1}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
R_0	Constante universal dos gases	$\text{m}^3.\text{Pa}^{-1}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
R_v	Constante dos gases para o vapor de água	$\text{m}^3.\text{Pa}^{-1}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
T_A	Temperatura absoluta	K
T_a	Temperatura do ar (bolbo seco)	$^{\circ}\text{C}$
T_0	Temperatura de referência	$^{\circ}\text{C}$
T_m	Temperatura do bolbo húmido	$^{\circ}\text{C}$
T_{po}	Temperatura do ponto de orvalho	$^{\circ}\text{C}$
V	Volume	m^3
V'_a	Volume específico do ar seco	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$
V'_v	Volume específico do vapor de água	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$
W	Humidade absoluta	$\text{kg água} . \text{kg}^{-1} \text{ ar seco}$
x_a	Fracção molar para o ar seco	
x_v	Fracção molar para o vapor de água	
ρ	Concentração mássica do gás	kg.m^{-3}

Bibliografia

- ASHRAE. 1997. Psychrometrics. In. ASHRAE Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta, pp. 6.1-6.17.
- Perry, R. H., Green, D. W. & Maloney, J. O 1998. Perry's chemical engineers' handbook. Seventh Edition. McGraw-Hill, New York.
- Rapin, P. J. & Jacquard, P. 1997. Instalaciones frigoríficas. Tomo 1. Elementos de física aplicados a la teoría de las instalaciones frigoríficas. Marcombo, Barcelona.
- Singh, R. P. & Heldman, D. R. 2001. Introduction to food engineering. Third edition. Academic Press, San Diego.