

CAPÍTULO 6: UMIDADE DO AR

6.1 PRESSÃO PARCIAL E A LEI DE DALTON

O ar é uma mistura de gases e, como foi visto em aulas anteriores, o ar se comporta como um gás ideal. Lembrando do conceito de um gás ideal (suas moléculas não ocupam espaço e elas tampouco interagem), não é difícil entender que uma mistura de gases ideais também é um gás ideal. Podemos então utilizar a equação universal dos gases ideais

$$PV = nRT \quad (6.1)$$

para estudar a mistura ideal. Neste caso, P é a pressão total da mistura, V é o volume do recipiente e n é o número de moles, ou seja

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_i + \dots \quad (6.2)$$

onde i é o número do i -ésimo componente da mistura. A razão $f_i = n_i/n$ é chamada de fração molar. Para qualquer componente podemos escrever

$$P_i V = n_i RT \quad (6.3)$$

onde P_i é a chamada pressão parcial do gás considerado na mistura. Comparando as relações acima, temos

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_i + \dots \quad (6.4)$$

A equação 6.4 é a expressão matemática da *Lei de Dalton*: a pressão total de uma mistura de gases ideais é igual à soma das pressões parciais dos gases ideais constituintes. Uma outra forma de escrever esse resultado é, combinando as equações 6.1 e 6.3:

$$\frac{P_i}{P} = \frac{n_i}{n} = f_i \Rightarrow P_i = P \cdot f_i \quad (6.5)$$

Estes resultados são de grande importância na determinação das propriedades das misturas gasosas como o ar atmosférico.

Exemplo 1: Calcular a concentração de um componente do ar

A concentração de CO_2 no ar atmosférico em 1985 foi estimada em 344 ppm. Qual foi a concentração de CO_2 naquele ano em gramas por metro cúbico? (considere $P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Pa}$ e $T = 300 \text{ K}$; a massa molecular de CO_2 é 44 g/mol).

Solução:

Utilizando a equação 6.5, temos, nesse caso:

$$P_{\text{CO}_2} = P \cdot f_{\text{CO}_2}$$

Como $f_{\text{CO}_2} = 344 \text{ ppm}$, ou seja, $344/10^6$ ou $344 \cdot 10^{-6}$, temos

$$P_{\text{CO}_2} = 10^5 \cdot 344 \cdot 10^{-6} = 34,4 \text{ Pa.}$$

Para calcular a concentração em mol/m^3 , reescrevemos a equação 6.3 como

$$\frac{n_{\text{CO}_2}}{V} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{RT} = \frac{34,4}{8,314 \cdot 300} = 1,38 \cdot 10^{-2} \text{ mol m}^{-3}$$

Convertendo esse resultado para g/m^3 obtemos:

$$1,38 \cdot 10^{-2} \text{ mol m}^{-3} \cdot 44 \text{ g mol}^{-1} = 0,61 \text{ g m}^{-3}$$

6.2 COMPOSIÇÃO DO AR

O ar seco é composto de nitrogênio, oxigênio e argônio, além de outros componentes como dióxido de carbono, hidrogênio, hélio, néon e outros. Os primeiros três componentes compõem praticamente a totalidade, como mostra a Tabela 1 com maiores detalhes. Nota-se que estas porcentagens refletem frações molares ou de pressão parcial, conforme visto no item anterior.

Tabela 1 - Composição do ar seco à temperatura de 15°C e pressão de 101325 Pa*

Molécula	Símbolo	Massa molecular (g mol ⁻¹)	n_i / n (%)
Nitrogênio	N ₂	28	78,084 (≈78)
Oxigênio	O ₂	32	20,9476 (≈21)
Argônio	Ar	40	0,934 (≈1)
Dióxido de Carbono	CO ₂	44	0,0314
Néon	Ne	20,2	0,001818
Metano	CH ₄	16	0,0002
Hélio	He	4	0,000524
Criptônio	Kr	83,8	0,000114
Hidrogênio	H ₂	2	0,00005
Xenônio	Xe	131,3	0,0000087

* Fonte: CRC Handbook of Chemistry and Physics, David R. Lide, Editor-in-Chief, 1997 Edition

Além desses componentes, o ar atmosférico sempre contém quantidade variável de vapor d'água conforme a temperatura, região, estação, etc. Esse vapor, resultante da evaporação das águas dos mares, rios e lagos, sobretudo pela ação do calor solar, mistura-se com o ar atmosférico e passa a fazer parte de sua composição. Devem-se ao vapor de água diversos fenômenos relevantes na vida de animais e plantas, como a chuva, neve, etc.

Em condições normais, o teor de água (em estado de vapor) na atmosfera varia de praticamente 0 a 5%, em função dos elementos constituintes da atmosfera. O conteúdo de vapor d'água é maior no equador do que nos pólos e diminui com a altitude tornando-se quase desprezível acima de 10.000 m.

Exemplo 2: Calcular a composição do ar com teor de água de 4%

Considerando apenas os componentes principais do ar: nitrogênio (78%), oxigênio (21%) e argônio (1%), calcular a composição do ar com teor de água de 4%

Solução:

Se a água vem a ocupar 4%, então a soma dos demais componentes representará 100-4=96%. Mantendo a proporção 78-21-1 teremos:

Nitrogênio:	78 x 0,96 =	74,88%
Oxigênio:	21 x 0,96 =	20,16%
Argônio:	1 x 0,96 =	0,96%
Água:		4,00%
TOTAL:		100,0%

Exemplo 3: Calcular a densidade do ar seco e do ar com teor de água de 4%

Considerando apenas os componentes principais do ar: nitrogênio (78%), oxigênio (21%) e argônio (1%), calcular a densidade do ar seco e do ar com teor de água de 4% à pressão de 10^5 Pa e temperatura de 298 K.

Solução:

Reescrevendo a equação 6.1 temos

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT} = \frac{10^5}{8,314 \cdot 298} = 40,36 \text{ mol m}^{-3}$$

Para o ar seco:

Nitrogênio:	$40,36 \times 78\% = 31,5 \text{ mol m}^{-3} \times 28 \text{ g mol}^{-1} =$	$881,5 \text{ g m}^{-3}$
Oxigênio:	$40,36 \times 21\% = 8,48 \text{ mol m}^{-3} \times 32 \text{ g mol}^{-1} =$	$271,2 \text{ g m}^{-3}$
Argônio:	$40,36 \times 1\% = 0,404 \text{ mol m}^{-3} \times 40 \text{ g mol}^{-1} =$	$16,1 \text{ g m}^{-3}$
Total ar seco:		$1168,8 \text{ g m}^{-3} = 1,17 \text{ kg m}^{-3}$

Para o ar úmido (4% água):

Nitrogênio:	$40,36 \times 74,9\% = 30,2 \text{ mol m}^{-3} \times 28 \text{ g mol}^{-1} =$	$846,2 \text{ g m}^{-3}$
Oxigênio:	$40,36 \times 20,2\% = 8,14 \text{ mol m}^{-3} \times 32 \text{ g mol}^{-1} =$	$260,4 \text{ g m}^{-3}$
Argônio:	$40,36 \times 0,96\% = 0,387 \text{ mol m}^{-3} \times 40 \text{ g mol}^{-1} =$	$15,5 \text{ g m}^{-3}$
Água :	$40,36 \times 4\% = 1,61 \text{ mol m}^{-3} \times 18 \text{ g mol}^{-1} =$	$29,1 \text{ g m}^{-3}$
Total ar úmido:		$1151,2 \text{ g m}^{-3} = 1,15 \text{ kg m}^{-3}$

6.3 PRESSÃO DE VAPOR

No item anterior foi visto que o ar, em condições atmosféricas normais, contém um certo teor de água. Pela Lei de Dalton (equação 6.5) existirá portanto uma pressão parcial desse vapor de água. Essa pressão é de grande importância para muitos fenômenos ligados à meteorologia e agronomia pois, em conjunto com outros fatores como temperatura, vento etc., determina a taxa de evaporação da água líquida. Pela sua importância, a pressão de vapor recebe um símbolo próprio, e_a . Aplicando a Lei de Dalton aos dados do exemplo 3 acima (ar com 4% de umidade), calculamos por exemplo que

$$e_a = P_{H_2O} = P \cdot 0,04 = 10^5 \cdot 0,04 = 4000 \text{ Pa}$$

A água contida no ar pode se tornar líquida num processo chamado *condensação*. A condensação ocorre geralmente no caso de um esfriamento do ar. Exemplos são a condensação sobre vidros, o orvalho que se forma de madrugada nas folhas de plantas e a própria formação de nuvens. Esses fenômenos ocorrem quando a pressão de vapor do ar (e_a) se torna superior à pressão de vapor saturado (e_s), que é função de sua temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a sua pressão de vapor saturado, ou seja, mais água o ar pode conter. Uma fórmula empírica para se calcular e_s , é a equação de Tetens:

$$e_s = A \cdot \exp^{\frac{17,3t}{237,3+t}} \text{ ou } e_s = A \cdot 10^{\frac{7,5t}{237,3+t}} \quad (6.6)$$

O parâmetro A equivale a 610,8 Pa (para resultados em Pa), 0,6108 kPa (para resultados em kPa) ou 4,58 mmHg (para resultados em mmHg). A temperatura t , ao contrário da maioria das equações na Física, é dada em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$). A figura 6.1 mostra graficamente a pressão de vapor em função da temperatura.

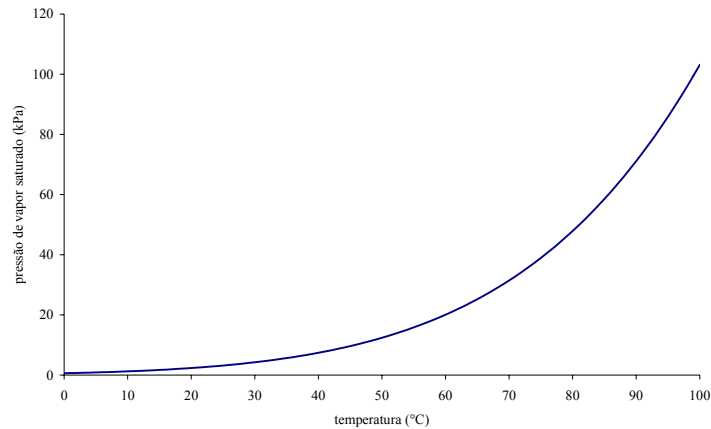


Figura 6.1 - Representação gráfica da equação de Tetens para o cálculo da pressão de vapor saturado (e_s) em função da temperatura no intervalo 0-100 °C

Exemplo 4: Calcular a pressão de vapor saturado utilizando a equação de Tetens.

Calcular a pressão de vapor saturado para as temperaturas de 10 °C, 20 °C, 30 °C e 100 °C.

Solução:

Substituindo o valor da temperatura na equação de Tetens (equação 6, obtemos o valor da pressão de vapor saturado:

$$e_{s,10} = 610,8 \cdot \exp\left(\frac{17,3 \cdot 10}{237,3 + 10}\right) = 1229,5 \text{ Pa} = 1,23 \text{ kPa}$$

$$e_{s,20} = 610,8 \cdot \exp\left(\frac{17,3 \cdot 20}{237,3 + 20}\right) = 2343,7 \text{ Pa} = 2,34 \text{ kPa}$$

$$e_{s,30} = 610,8 \cdot \exp\left(\frac{17,3 \cdot 30}{237,3 + 30}\right) = 4257,4 \text{ Pa} = 4,26 \text{ kPa}$$

$$e_{s,100} = 610,8 \cdot \exp\left(\frac{17,3 \cdot 100}{237,3 + 100}\right) = 103.129 \text{ Pa} = 103 \text{ kPa}$$

Observe que os valores da pressão de vapor saturado para temperaturas ambientes estão na ordem de 1 a 5 kPa; cada kPa corresponde a 1% da pressão atmosférica padrão e concluímos, portanto, que a pressão de vapor saturado representa, a temperaturas ambientais comuns, em torno de 1 a 5% da pressão total. Observando a

pressão de vapor saturado de 100 °C, verifica-se que esta é praticamente igual à pressão atmosférica padrão. Isso faz com que a água, a essa temperatura, entra em ebulição, isto é, bolhas de vapor conseguem formar-se dentro do próprio líquido, uma vez que sua pressão é igual ou levemente maior que a do ar.

Exemplo 5: Qual é a temperatura de ebulição da água em Piracicaba?

Piracicaba encontra-se a uma altitude de quase 600 m, onde a pressão do ar é, em média, 94 kPa, isto é, 94% da pressão padrão ao nível do mar. A que temperatura a água entra em ebulição em Piracicaba?

Solução:

A questão se resume em determinar para qual temperatura a pressão de vapor saturado de água equivale a 94 kPa. Invertendo a equação de Tetens obtemos

$$t = \frac{237,3 \ln \frac{e_s}{A}}{17,3 - \ln \frac{e_s}{A}} \quad (6.7)$$

Nessa equação, fazendo $e_s = 94 \text{ kPa}$ e $A = 0,6108 \text{ kPa}$, obtemos $t = 97,5 \text{ °C}$. Essa é a temperatura de ebulição da água à pressão atmosférica de 94 kPa, como em Piracicaba.

6.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AR

Higrômetro

Algumas substâncias com capacidade de absorver a umidade atmosférica servem como elemento básico para a construção de higrômetros. Entre elas estão o cabelo humano e sais de lítio. No higrômetro construído com cabelo humano, uma mecha de cabelos é colocada entre um ponto fixo e outro móvel e, segundo a umidade a que está submetida, ela varia de comprimento, arrastando o ponto móvel. Esse movimento é transmitido a um ponteiro que se desloca sobre uma escala, na qual estão os valores da umidade relativa. Outro tipo de higrômetro é o que se baseia na variação de condutividade de sais de lítio, os quais apresentam uma resistência variável de acordo com a água absorvida. Um amperímetro com sua escala devidamente calibrada fornece os valores de umidade do ar.

Psicrômetro

Outra maneira de medir a umidade relativa é calcular a velocidade de evaporação da água. Para isso, dois termômetros de mercúrio idênticos são expostos ao ar: um traz o bulbo descoberto (“bulbo seco”); outro tem o bulbo coberto por gaze umedecida (“bulbo úmido”), os quais recebem a denominação de Psicrômetro.

A temperatura do bulbo úmido (t_u) é, pelo arranjo, inferior a do seco (t_s), porque a água evaporada da gaze resfria o bulbo. Quanto menor a umidade do ar, tanto maior é o resfriamento da gaze. A diferença de leitura entre os dois termômetros ($t_s - t_u$) é também chamada de *depressão psicrométrica*. A partir dela pode ser encontrado a pressão de vapor atual do ar (e_a) através da *equação do Psicrômetro*, determinada termodinamicamente:

$$e_a = e_{s,u} - \gamma P_{atm} (t_s - t_u) \quad (6.8)$$

Nessa equação, $e_{s,u}$ é a pressão de vapor à temperatura do bulbo úmido, P_{atm} é a pressão atmosférica e γ é a *constante psicrométrica*. O valor de γ depende da geometria e da ventilação do psicrômetro. Normalmente utiliza-se

$$\gamma = 6,67 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1} \text{ para psicrômetros com ventilação forçada}$$

$$\gamma = 8,0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1} \text{ para psicrômetros sem ventilação forçada}$$

Exemplo 6: Qual é a pressão de vapor do ar em função da leitura de um psicrômetro?

Observa-se, num psicrômetro sem ventilação forçada, uma temperatura do bulbo seco de 28,2 °C e uma temperatura do bulbo úmido de 21,6 °C. A pressão atmosférica é de 0,94.10⁵ Pa. Calcular a pressão de vapor.

Solução:

Utilizamos a equação do psicrômetro (equação 6.8) para resolver a questão. Calculamos $e_{s,u}$ pela equação de Tetens (equação 6.6), com $t = t_u = 21,6$ °C, resultando em $e_{s,u} = 2588$ Pa. Então:

$$e_a = 2588 - 8,0 \cdot 10^{-4} \cdot 0,94 \cdot 10^5 (28,2 - 21,6) = 2091 \text{ Pa}$$

6.5 UMIDADE ABSOLUTA

A umidade absoluta do ar (UA, kg m⁻³ ou g m⁻³) é definida como a razão entre a massa de vapor de água e o volume do ar. A partir da pressão de vapor atual, ela pode ser calculada utilizando-se a equação universal dos gases:

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT} \text{ ou, para a pressão parcial do vapor:}$$

$$\frac{n_{H_2O}}{V} = \frac{e_a}{RT} \text{ (mol m}^{-3}\text{)}$$

Para transformar esse resultado em g m⁻³, multiplicamos o resultado pela massa molecular da água (M_{H_2O}):

$$UA = \frac{e_a}{RT} M_{H_2O} \quad (6.9)$$

$$0,835 \text{ mol m}^{-3} \times 18 \text{ g mol}^{-1} = 15,0 \text{ gramas de água por m}^3 \text{ de ar.}$$

6.6 UMIDADE RELATIVA E DÉFICIT DE VAPOR

Dois parâmetros importantes para a caracterização do ar são a umidade relativa (UR) e o déficit de vapor ou déficit de saturação (Δe). A umidade relativa é definida como

$$UR = \frac{e_a}{e_s} \quad (6.10)$$

O déficit de vapor é calculado como

$$\Delta e = e_s - e_a \quad (6.11)$$

e pode ser expresso em Pa, kPa, atm, ou outras unidades de pressão, dependendo da unidade escolhida para e_s e e_a . A Figura 6.2 representa Δe graficamente.

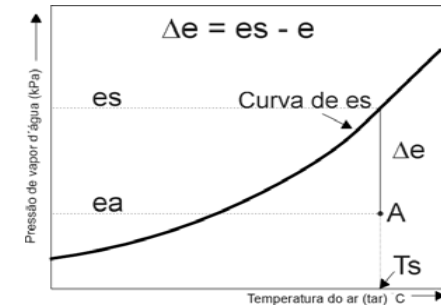


Figura 6.2 - Representação gráfica do déficit de vapor ou déficit de saturação.

A umidade relativa é de grande importância meteorológica e agrônômica, pois determina entre outros fatores a taxa de evaporação da água. Assim, para o homem, considera-se que a faixa de umidade relativa de 40 a 70% proporciona conforto máximo. Acima de 70%, a umidade relativa é alta, o que se reflete na dificuldade de a água evaporar: o ambiente fica "abafado". Abaixo de 40%, a evaporação ocorre com muita facilidade, refletindo em problemas respiratórios, garganta e nariz secos, etc. Para as plantas, da mesma forma que para o homem, uma umidade relativa baixa resulta em altas taxas de transpiração; conseqüentemente, a planta deve extrair a água do solo a taxas maiores.

A importância do déficit de vapor está no fato de este parâmetro descrever qual a capacidade de absorção de água do ar.

Exemplo 7: Calcular a umidade relativa e o déficit de vapor

Qual é a umidade relativa e o déficit de vapor nas condições atmosféricas do exemplo 6?

Solução:

No exemplo 6 já foi calculado a pressão de vapor atual $e_a = 2091$ Pa. Calculamos e_s pela equação de Tetens (equação 6.6), com $t = 28,2$ °C, resultando em $e_s = 3838$ Pa. Portanto:

$$\text{Equação 6.10: } UR = \frac{e_a}{e_s} = \frac{2091}{3838} = 0,545 \text{ ou } 54,5\%$$

$$\text{Equação 6.11: } D = e_s - e_a = 3838 - 2091 = 1747 \text{ Pa}$$

Exemplo 8: Calcular a umidade absoluta do ar

Qual é a umidade absoluta (quantos gramas de água cada m^3 de ar contém) nas condições atmosféricas descritas no exemplo 6? Quantos gramas de água seriam necessários para levá-lo a saturação?

Solução:

Utilizando a equação 6.9, obtemos

$$UA = \frac{e_a}{RT} M_{H_2O} = \frac{2091}{8,314 \cdot 301,3} \times 18 = 15,0 \text{ gramas de água por } m^3 \text{ de ar.}$$

Para calcular quantos gramas de água seriam necessários para levar esse ar a saturação, calculamos a umidade absoluta do ar saturado:

$$UA = \frac{e_s}{RT} M_{H_2O} = \frac{3838}{8,314 \cdot 301,3} \times 18 = 27,6 \text{ gramas de água por } m^3 \text{ de ar.}$$

Para saturar o ar, devemos elevar seu teor de água de 15,0 a 27,6 $g\ m^{-3}$, acrescentando portanto 12,6 $g\ m^{-3}$.

6.7 TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO

No exemplo 8 acima vimos que podemos levar o ar à saturação acrescentando água. Uma outra forma de se obter um ar saturado com água e reduzir a sua temperatura. Reduzindo a temperatura, mantendo o teor de água constante, aumentamos a umidade relativa, pois reduzimos a pressão de vapor saturado. Numa determinada temperatura, chamada a *temperatura do ponto de orvalho* (t_o), a pressão de vapor torna-se igual à pressão de vapor saturado àquela temperatura e, portanto, a umidade relativa será de 100%. Dessa forma, $e_{s,t_o} = e_a$ e, em analogia à equação 6.7:

$$t_o = \frac{237,3 \ln \frac{e_a}{A}}{17,3 - \ln \frac{e_a}{A}} \text{ ou } t_o = \frac{237,3 \log \frac{e_a}{A}}{7,5 - \log \frac{e_a}{A}} \quad (6.12)$$

A temperatura de orvalho é um indicador das condições atmosféricas. Uma temperatura de orvalho próxima à temperatura atual indica uma alta umidade relativa. Em relação à previsão de geadas, uma temperatura de orvalho acima de 0 °C normalmente indica a ausência de ocorrência de geadas, pois é nessa temperatura que, durante um resfriamento noturno, a água começa a condensar, liberando sua energia latente e aquecendo o ar. Além disso, a formação de neblina nessas condições, se ocorrer, protege a superfície do solo e das plantas da perda de energia radiativa.

A Figura 6.3 representa, graficamente, a temperatura do ponto de orvalho.

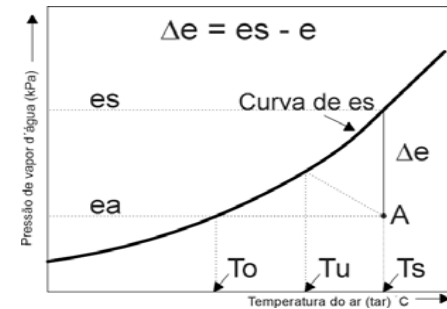


Figura 6.3 - Representação gráfica da temperatura do ponto de orvalho.

Exemplo 9: Calcular a temperatura do ponto de orvalho

Calcular a temperatura do ponto de orvalho nas condições atmosféricas descritas no exemplo 6.

Solução:

Utilizando a equação 6.12 com o valor de e_a obtido no exemplo 6 temos:

$$t_o = \frac{237,3 \ln \frac{2091}{611}}{17,3 - \ln \frac{2091}{611}} = 18,2 \text{ °C}$$

6.8 COMPORTAMENTO DIÁRIO DA UMIDADE DO AR

Em condições meteorológicas estáveis, o teor de água na atmosfera e, portanto, a pressão de vapor permanece aproximadamente constante ao longo de um dia. Ao mesmo tempo, a temperatura apresenta um ciclo diário, apresentando um máximo no início da tarde e um mínimo na madrugada. Sendo assim, a pressão de vapor saturado, função da temperatura, apresenta um máximo e mínimo nos mesmos horários que a temperatura. A umidade relativa, razão entre pressão de vapor atual e saturado, conseqüentemente tem seu mínimo quando a temperatura é máxima, e vice-versa. Esses fatos podem ser verificados na Figura 6.4, que mostra a pressão de vapor, temperatura, pressão de vapor saturado, e umidade relativa do ar ao longo do dia 2 de setembro de 1999, um dia muito seco em Piracicaba. Observe que a umidade relativa, no período da tarde, está próxima a 20%. Durante a noite, devido à diminuição da temperatura, a umidade relativa aumenta até valores próximos de 80%.

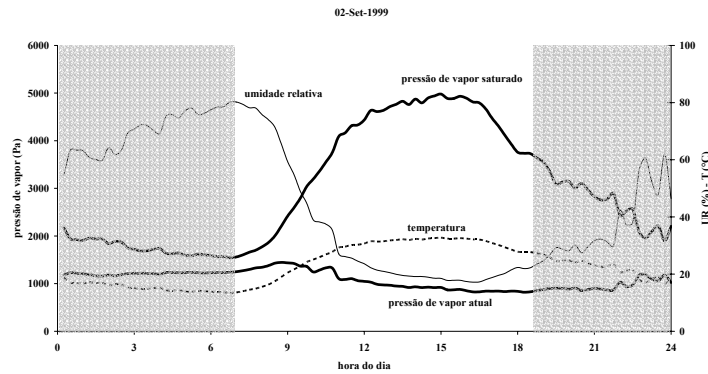


Figura 6.4 - Pressão de vapor, temperatura, pressão de vapor saturado, e umidade relativa do ar ao longo do dia 2 de setembro de 1999, em período seco, em Piracicaba.

A Figura 6.5 mostra os mesmos parâmetros para um dia de verão, em período úmido. A umidade relativa atinge um mínimo de aproximadamente 50%, de tarde, e um máximo de 100%, durante a noite. A ocorrência de saturação do ar durante a noite proporciona condições para a formação de orvalho e/ou neblina. Observe que, de mesma forma que na figura 6.4, a pressão de vapor atual mantém-se aproximadamente constante ao longo do dia.

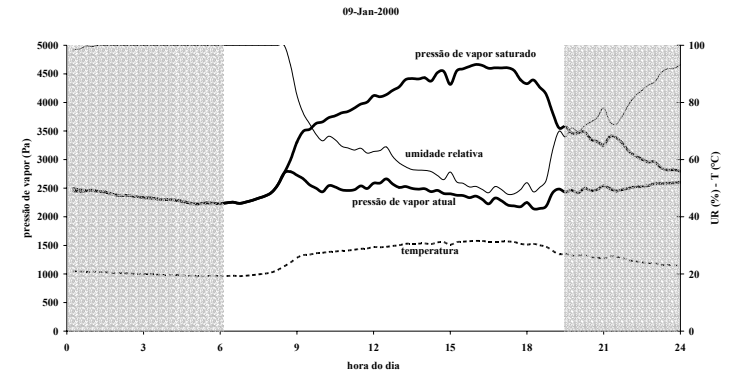


Figura 6.5 - Pressão de vapor, temperatura, pressão de vapor saturado, e umidade relativa do ar ao longo do dia 9 de janeiro de 2000, em período úmido, em Piracicaba.

A Figura 6.6 representa um dia chuvoso. Verifica-se uma umidade relativa próxima a 100% durante o dia todo

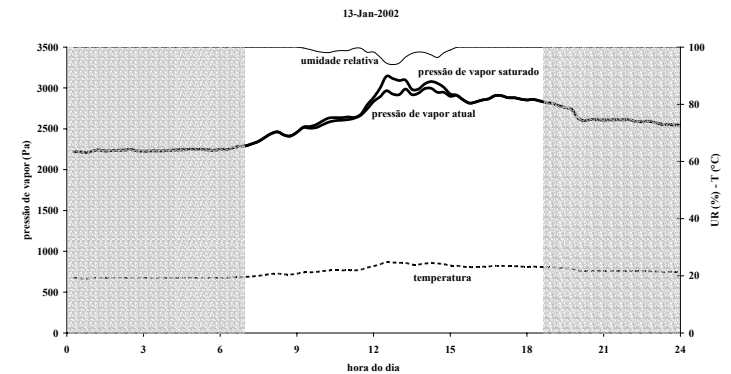


Figura 6.6 - Pressão de vapor, temperatura, pressão de vapor saturado, e umidade relativa do ar ao longo do dia 13 de janeiro de 2002, um dia chuvoso, em Piracicaba.

EXERCÍCIOS

- 6.1 Em determinado momento observa-se, num psicrômetro, uma temperatura do bulbo seco de 28 °C e uma temperatura do bulbo úmido de 22 °C. A pressão atmosférica é de $0,94 \cdot 10^5$ Pa. Calcular a pressão de vapor, a umidade relativa do ar e o déficit de vapor. (R: 2200 Pa; 58,0%; 1593 Pa)
- 6.2 Nas condições da questão anterior, qual volume de água deveria ser evaporado para saturar com vapor de água 1 m^3 de ar? Qual seria o calor envolvido nessa evaporação? (R: 11,5 ml; 28 kJ)
- 6.3 O ar dentro de uma cozinha apresenta os seguintes valores psicrométricos: temperatura do bulbo seco de 28 °C e temperatura do bulbo úmido de 20 °C. A pressão atmosférica é de 10^5 Pa. Encontra-se, nesta cozinha, uma geladeira desligada com um volume interno de 250 l. Liga-se a geladeira e, após algum tempo, a temperatura no seu interior atinge 6 °C. Considerando o interior da geladeira como um sistema fechado, quanta água terá condensado no interior da geladeira? Qual é o calor desse processo de condensação? (R: 1,24 ml; 3,04 kJ)
- 6.4 A pressão de vapor saturado de mercúrio à temperatura de 293 K é 0,16 Pa. A essa temperatura, quantos gramas de mercúrio ($m_{\text{Hg}} = 200,6 \text{ g mol}^{-1}$) são necessários para saturar com vapor de mercúrio 500 m^3 de ar? (R: 6,59 g)
- 6.5 Um reservatório de ar de 100 litros, fechado, encontra-se à temperatura de 300 K e umidade relativa de 10%. Coloca-se dentro do reservatório uma proveta com 100,00 ml de água.
- a) Qual é a pressão de vapor no reservatório à umidade relativa de 10% ? (R: 356 Pa)
- b) Qual será o volume de água na proveta quando a umidade relativa atingir 100%? (R: 97,69 ml)
- c) Considerando que a temperatura se manteve constante, quanto calor foi absorvido pelo reservatório durante o processo de evaporação? (R: 5,63 kJ)

- 6.6 Numa manhã observa-se, num psicrômetro, uma temperatura do bulbo seco de 16 °C e uma temperatura do bulbo úmido de 15 °C. A pressão atmosférica é de $0,94 \cdot 10^5$ Pa.
- a) Em condições meteorológicas estáveis, qual será a umidade relativa do ar quando, ao meio-dia do mesmo dia, a temperatura atinge 27 °C? (R: 46%)
- b) Nestas condições, em que altura acima da superfície pode-se esperar a formação de nuvens dado que o gradiente térmico (decréscimo da temperatura com a altura) é de $0,6 \text{ °C}/100 \text{ m}$? (R: 2100 m)
- 6.7 Num final de tarde de inverno observa-se uma temperatura do bulbo seco de 12 °C e uma temperatura do bulbo úmido de 7,5 °C. A pressão atmosférica é de 10^5 Pa. Considerando que, nessas condições, geadas podem ser esperadas se a temperatura do ponto de orvalho for inferior a 0 °C, prever o risco de geada. (R: $t_0 = 1,4 \text{ °C}$; não há risco)
- 6.8 Num secador a ar quente verificam-se as seguintes condições: ar de entrada: $t = 60 \text{ °C}$; UR = 20%; ar de saída: $t = 40 \text{ °C}$; UR = 65%; vazão: 110 m^3 ar por hora. Determinar a quantidade de água retirada do secador por hora. (R: 36,7 litros/hora)
- 6.9 Em uma estufa (200 m^3) pulveriza-se 700 gramas ($=38,9 \text{ mol}$) de água; a condição inicial do ar é $t = 38 \text{ °C}$, UR=45%. Sabendo que o calor específico do ar é $1160 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ e que o calor latente específico de evaporação da água é 2260 kJ kg^{-1} , determinar:
- a) Qual o abaixamento de temperatura previsto? (R: 6,8 °C)
- b) Qual é a umidade relativa final? (R:75%)
- 6.10 Um suíno encontra-se num ambiente onde a temperatura do ar é 25 °C e a umidade relativa é 60%. Sua taxa de respiração está em 15 trocas por minuto (cada troca de ar sendo de 1 litro), totalizando 15 litros por minuto de ar trocado. A temperatura do ar exalado pelo animal é 33 °C e a umidade relativa desse ar é 90%.
- a) Determinar quanta energia o animal troca com o ambiente por minuto na forma de calor sensível (variação de temperatura) pela via respiratória, sabendo que o calor específico isobárico do ar é $1160 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$. (R: 139,2 J)
- b) Determinar quanta energia o animal troca com o ambiente por minuto na forma de calor latente (mudança de fase, evaporação) pela via respiratória, sabendo que o calor latente específico de evaporação da água é 44 kJ mol^{-1} . (R: 693 J)
- c) Considere a seguinte alteração nas condições ambientais em que o suíno se encontra: um aumento da umidade relativa do ar, enquanto a temperatura permanece constante. Considerando ainda que as características do ar exalado pelo animal não mudam. Explique se o suíno vai ter que aumentar

Capítulo 6: Umidade do ar

ou diminuir a taxa de respiração se ele quiser manter constante o total de energia trocada com o ambiente.