

UMIDADE DO AR

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

$$PV = nRT \quad (1)$$

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

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_i + \dots \quad (2)$$

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

$$P_i V = n_i RT \quad (3)$$

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

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_i + \dots \quad (4)$$

A equação 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 1 e 3:

$$\frac{P_i}{P} = \frac{n_i}{n} = f_i \Rightarrow P_i = P \cdot f_i \quad (5)$$

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 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 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:

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

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 10⁵ Pa e temperatura de 298 K.

Solução:

Reescrevendo a equação 1 temos

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT} = \frac{10^5}{8,314.298} = 40,36 \text{ mol m}^{-3}$$

Para o ar seco:

Nitrogênio:	40,36 x 78% = 31,5 mol m ⁻³ x 28 g mol ⁻¹ =	881,5 g m ⁻³
Oxigênio:	40,36 x 21% = 8,48 mol m ⁻³ x 32 g mol ⁻¹ =	271,2 g m ⁻³
Argônio:	40,36 x 1% = 0,404 mol m ⁻³ x 40 g mol ⁻¹ =	16,1 g m ⁻³

Total ar seco: 1168,8 g m⁻³ = 1,17 kg m⁻³

Para o ar úmido (4% água):

Nitrogênio:	40,36 x 74,9% = 30,2 mol m ⁻³ x 28 g mol ⁻¹ =	846,2 g m ⁻³
Oxigênio:	40,36 x 20,2% = 8,14 mol m ⁻³ x 32 g mol ⁻¹ =	260,4 g m ⁻³
Argônio:	40,36 x 0,96% = 0,387 mol m ⁻³ x 40 g mol ⁻¹ =	15,5 g m ⁻³
Água :	40,36 x 4% = 1,61 mol m ⁻³ x 18 g mol ⁻¹ =	29,1 g m ⁻³

Total ar úmido: 1151,2 g m⁻³ = 1,15 kg m⁻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 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

$$e_a = P_{H_2O} = P.0,04 = 10^5.0,04 = 4000 \text{ Pa}$$

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*:

$$e_s = A. \exp^{\frac{17,3t}{237,3+t}} \text{ ou } e_s = A.10^{\frac{7,5t}{237,3+t}} \quad (6)$$

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 (°C). A figura 1 mostra graficamente a pressão de vapor em função da temperatura.

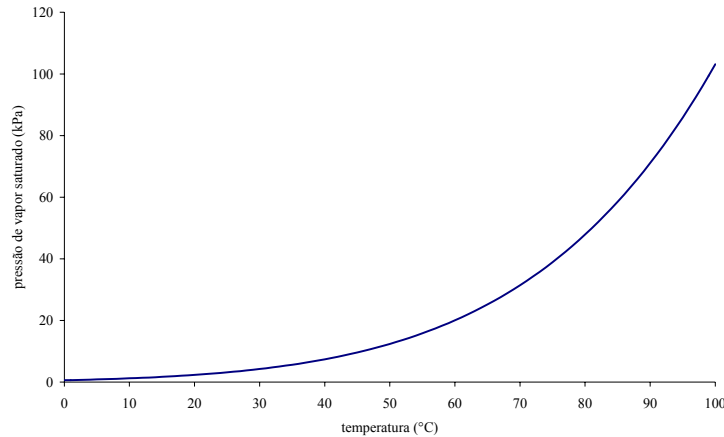


Figura 1 - Representação gráfica da equação de Tetens para o cálculo da pressão de vapor saturado (e_s) em função da temperatura no intervalo 0-100 °C

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, 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

$$t = \frac{237,3 \ln \frac{e_s}{A}}{17,3 - \ln \frac{e_s}{A}} \tag{7}$$

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.

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 taxa 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 da data pode ser encontrado a pressão de vapor atual do ar (e_a) através da equação do *Psicrômetro*, determinada termodinamicamente.

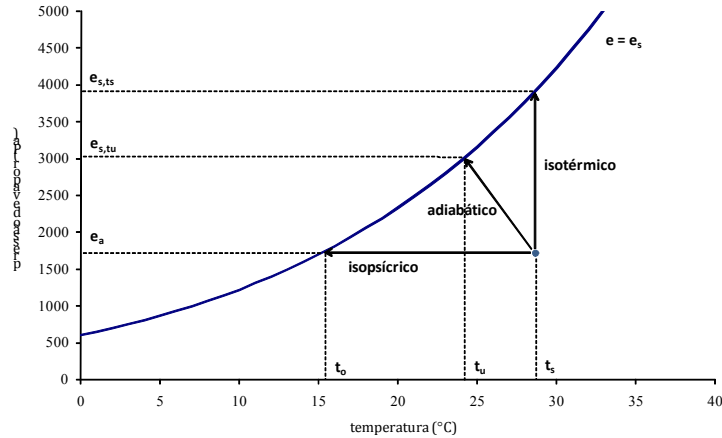


Figura 2 - Representação gráfica da saturação do ar com água por processo isotérmico, adiabático e isopsicrico, mostrando as temperaturas do ponto de orvalho (t_o), do bulbo úmido (t_u) e do bulbo seco (t_s), bem como as correspondentes pressões de vapor e_s , $e_{s,tu}$ e $e_{s,ts}$.

Para entender o funcionamento do psicrômetro com mais detalhe, observemos a Figura 2. Nessa figura verificam-se três caminhos padrão para se saturar o ar com água. A primeira, a saturação isotérmica, eleva a umidade do ar a uma temperatura fixa pela elevação do número de mol de água n_{H_2O} . O calor (latente) envolvido nesse processo (Q_L) será:

$$Q_L = \Delta n_{H_2O} L_v = \frac{\Delta e V}{RT} L_v \quad (8)$$

A saturação isopsicrico é o processo na qual a pressão de vapor se mantém constante, com redução de temperatura. A saturação do ar será atingida na temperatura do ponto de orvalho (t_o), sendo o resfriamento do ar um processo exotérmico cujo calor (sensível) Q_s é dado por

$$Q_s = n_{ar} c_p \Delta T = \frac{P_{ar} V}{RT} c_p \Delta T \quad (9)$$

O terceiro processo de saturação do ar é o que ocorre no bulbo úmido do psicrômetro: o ar é saturado com água num processo rápido que não permite a

troca de energia na forma de calor, portanto o processo é adiabático. Sendo assim, enquanto a pressão de vapor do ar aumenta, sua temperatura diminui, até chegar na saturação numa temperatura chamada *temperatura do bulbo úmido* (t_u). Sendo adiabático, $Q_L = -Q_s$, e

$$\frac{\Delta e V}{RT} L_v = \frac{P_{atm} V}{RT} c_p \Delta T \quad (10)$$

$$\Delta e = e_{s,tu} - e_a = P_{atm} \frac{c_p}{L_v} \Delta T \quad (11)$$

ou

$$e_a = e_{s,tu} - \gamma P_{atm} (t_s - t_u) \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{c_p}{L_v} = \frac{29,1 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}}{44,1 \cdot 10^3 \text{ J mol}^{-1}} = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1} \quad (13)$$

Nessa equação, $e_{s,tu}$ 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 calculado na equação (13) é o valor para um psicrômetro com ventilação forçada, onde verificam-se as condições adiabáticas e há uma constante troca do ar ao redor do bulbo. No caso de um psicrômetro sem ventilação forçada utiliza-se geralmente um valor levemente maior, $\gamma = 8,0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

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

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

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:

$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$ 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}):

$$UA = \frac{e_a}{RT} M_{H_2O} \quad (14)$$

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

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

$$UR = \frac{e_a}{e_s} \quad (15)$$

O déficit de vapor é calculado como

$$\Delta e = e_s - e_a \quad (16)$$

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 3 representa Δe graficamente.

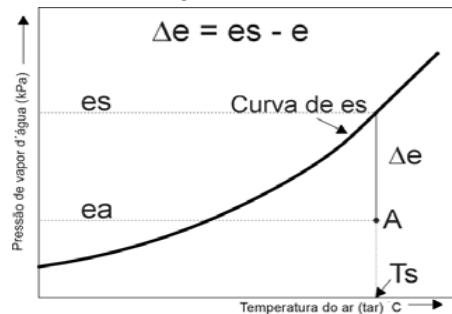


Figura 3 - Representação gráfica do déficit de vapor ou déficit de saturação.

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 $e_a = 2091 \text{ Pa}$. Calculamos e_s pela equação de Tetens (equação 6), com $t = 28,2 \text{ }^\circ\text{C}$, resultando em $e_s = 3838 \text{ Pa}$. Portanto:

$$\text{Equação 8: } UR = \frac{e_a}{e_s} = \frac{2091}{3838} = 0,545 \text{ ou } 54,5\%$$

$$\text{Equação 9: } D = e_s - e_a = 3838 - 2091 = 1747 \text{ Pa}$$

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 14, obtemos

$$UA = \frac{e_a}{RT} M_{H_2O} = \frac{2091}{8,314.301,3} \times 18 = 15,0 \text{ gramas de água por m}^3 \text{ de ar.}$$

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

$$UA = \frac{e_s}{RT} M_{H_2O} = \frac{3838}{8,314.301,3} \times 18 = 27,6 \text{ gramas de água por m}^3 \text{ de ar.}$$

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} .

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:

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

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 4 representa, graficamente, a temperatura do ponto de orvalho.

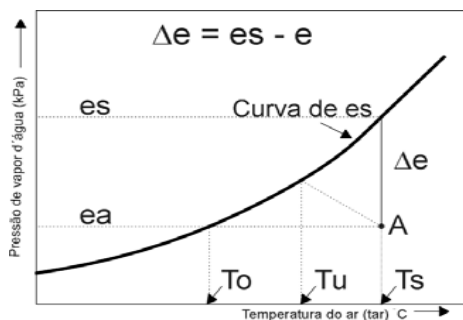


Figura 4 - Representação gráfica da temperatura do ponto de orvalho.

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 17 com o valor de e_a obtido no exemplo 6 temos:

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

ENTALPIA DO AR

A *Entalpia do ar* é uma grandeza importante na caracterização do ar, pois expressa sua Desconsiderando alterações na energia química e nuclear do ar, a variação da entalpia do ar se deve a variações na sua energia sensível (“temperatura”) e na sua energia latente (“vapor”). Assim

$$dH = \underbrace{n_{ar} \bar{c}_p}_{\text{sensível}} dT + \underbrace{dn_{\text{água}} \bar{L}_v}_{\text{latente}} \quad [18]$$

onde n_{ar} (mol) e $n_{\text{água}}$ (mol) representam o número de mol de ar e água, respectivamente, \bar{c}_p (kJ mol⁻¹ K⁻¹) é o calor específico isobárico molar do ar e \bar{L}_v (kJ mol⁻¹) é o calor latente de evaporação molar da água. A equação 18 equivale a

$$dH = n_{ar} M_{ar} c_p dT + dn_{\text{água}} M_{\text{água}} L_v \quad [19]$$

onde M_{ar} (kg mol⁻¹) e $M_{\text{água}}$ (kg mol⁻¹) são as massas moleculares do ar e da água, respectivamente, c_p (kJ kg⁻¹ K⁻¹) é o calor específico isobárico do ar e L_v (kJ kg⁻¹) é o calor latente de evaporação da água.

Dividindo ambos os lados da equação acima por $n_{ar} M_{ar}$ temos

$$\frac{dH}{n_{ar} M_{ar}} = dh = c_p dT + \frac{M_{\text{água}} L_v}{n_{ar} M_{ar}} dn_{\text{água}} \quad [20]$$

onde h (kJ kg⁻¹) é a entalpia específica. Pela equação universal dos gases ideais combinada com a Lei de Dalton verifica-se que:

$$n_{ar} = \frac{P_{atm} V}{RT} \quad [21]$$

e

$$dn_{\text{água}} = \frac{V de}{RT} \quad [22]$$

onde e (Pa) é a pressão parcial de vapor.

A combinação das equações [20], [21] e [22] resulta em

$$dh = c_p dT + \frac{M_{\text{água}} L_v}{P_{\text{atm}} M_{\text{ar}}} de \quad [23]$$

$M_{\text{água}}$ e M_{ar} são constantes, equivalendo respectivamente 0,02897 e 0,018015 kg mol⁻¹. Considerando o ar como um gás ideal diatômico, o valor de c_p também é uma constante e vale $7R/2 = 29,1 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, equivalendo a 1,004 kJ kg⁻¹ K⁻¹, de forma que a equação [23] pode ser escrita como

$$dh = 1,004 dT + 0,622 \frac{L_v}{P_{\text{atm}}} de \quad [24]$$

Considerando L_v e P_{atm} constantes ao longo de um processo em consideração, podemos portanto escrever

$$\Delta h = 1,004 \Delta T + 0,622 \frac{L_v}{P_{\text{atm}}} \Delta e \quad [25]$$

Δh descreve uma variação da entalpia. Devemos escolher um estado de referência onde consideramos $h = 0$. É comum escolher o ar seco a 0 °C como referência. Fazendo isso, utilizando $L_v = 2,45 \cdot 10^3 \text{ kJ kg}^{-1}$, e supondo condições atmosféricas padrão ($P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Pa}$) podemos então calcular a entalpia do ar como

$$\tilde{h} = 1,004t + 0,0152e = 1,004t + 0,0152 \frac{UR}{100\%} e_s \quad [t_{\text{ref}}=0 \text{ °C}; P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Pa}] \quad [26]$$

onde \tilde{h} (kJ kg⁻¹) é a entalpia específica em relação à referência escolhida, t (°C) é a temperatura, e (Pa) é a pressão de vapor, e_s (Pa) é a pressão de vapor saturado e UR (%) é a umidade relativa.

A pressão de vapor saturado de água é descrita pela equação de Tetens:

$$e_s = 611 \cdot 10^{7,5t/(t+237,3)} \quad [27]$$

Substituindo equação [27] na equação [26] obtemos finalmente:

$$\tilde{h} = 1,004t + 0,0152e = 1,004t + 0,0929 UR \cdot 10^{7,5t/(t+237,3)} \quad [t_{\text{ref}}=0 \text{ °C}; P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Pa}] \quad [28]$$

Algumas tabelas e figuras se baseiam na referência de 0 °F em vez de 0 °C. Nesse caso, deve-se somar o fator $1,004 \cdot 32,5/9 = 17,85$ à equação acima:

$$\tilde{h} = 17,85 + 1,004t + 0,0929 UR \cdot 10^{7,5t/(t+237,3)} \quad [t_{\text{ref}}=0 \text{ °F}; P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Pa}] \quad [29]$$

Para a pressão atmosférica de $0,94 \cdot 10^5 \text{ atm}$, as equações acima se tornam:

$$\tilde{h} = 1,004t + 0,0991 UR \cdot 10^{7,5t/(t+237,3)} \quad [t_{\text{ref}}=0 \text{ °C}; P_{\text{atm}} = 0,94 \cdot 10^5 \text{ Pa}] \quad [30]$$

e

$$\tilde{h} = 17,85 + 1,004t + 0,0991 UR \cdot 10^{7,5t/(t+237,3)} \quad [t_{\text{ref}}=0 \text{ °F}; P_{\text{atm}} = 0,94 \cdot 10^5 \text{ Pa}] \quad [31]$$

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 5, 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%.

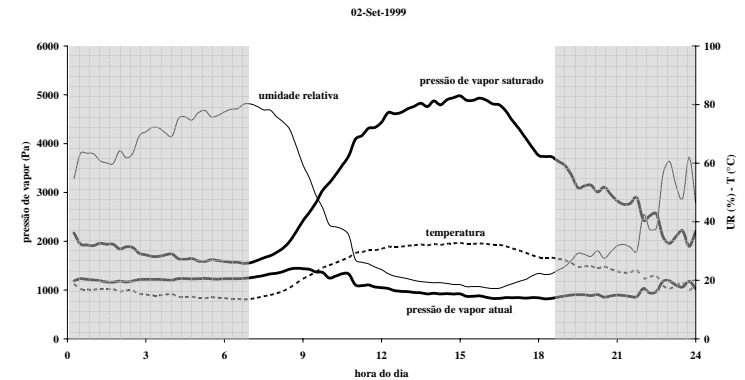


Figura 5 - Pressão de vapor, temperatura, pressão de vapor saturado, e umidade relativa do ar ao longo do dia 2 de setembro de 1999, em período seco, em Piracicaba.

A Figura 6 mostra os mesmos parâmetros para um dia de verão, em período úmido. A umidade relativa atinge um mínimo de aproximadamente 50%, de

Umidade do ar

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 5, a pressão de vapor atual mantém-se aproximadamente constante ao longo do dia.

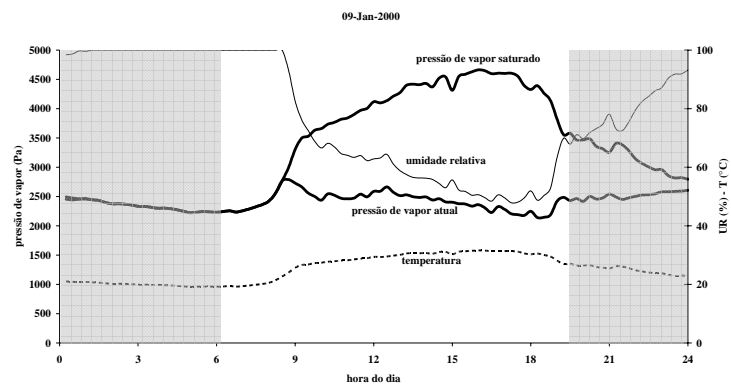


Figura 6 - Pressão de vapor, temperatura, pressão de vapor saturado, e umidade relativa do ar ao longo do dia 9 de janeiro de 2000, em período úmido, em Piracicaba.

A Figura 7 representa um dia chuvoso. Verifica-se uma umidade relativa próxima a 100% durante o dia todo

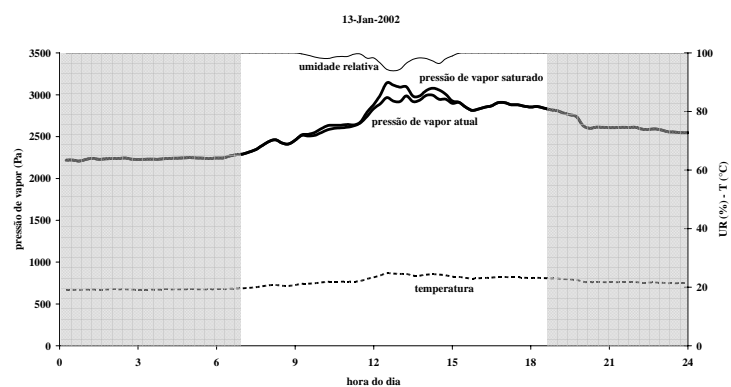


Figura 7 - Pressão de vapor, temperatura, pressão de vapor saturado, e umidade relativa do ar ao longo do dia 13 de janeiro de 2002, um dia chuvoso, em Piracicaba.