

2 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

2.1. Definição de gás

Um gás é definido como um fluido cujas condições de temperatura e pressão são superiores às do ponto crítico, não podendo haver duas fases presentes em um processo, e em pressões mais baixas, ele é chamado de vapor superaquecido. Se sua equação de estado obedecer às leis de Boyle e Charles, podem ser considerados gases perfeitos.

Assim, o ar e o hidrogênio são substâncias que podem ser consideradas sob certas condições como gases perfeitos; o vapor de água e a amônia são considerados como vapores, e o dióxido de carbono é tratado como gás; mas sob alta pressão, pode ser tratado como um vapor.

2.2. Gás perfeito

É um gás que a temperatura e pressão normais (273,15 K e 0,101325 MPa) um mol desse gás ocupa um volume de 22,414 litros. Também se pode dizer que em um gás perfeito, sua massa específica apresenta valores baixos em torno de 1kg/m^3 até $0,16\text{kg/m}^3$, e a distância entre as moléculas é tão grande que a interação entre as mesmas é desprezível, tendo um sistema composto por partículas independentes. Esse sistema de partículas independentes se chama gás perfeito (Van Wylen, 2003).

2.2.1. Considerações sobre misturas de gases perfeitos

Se considerarmos que um gás é constituído por uma mistura de N componentes, e cada um deles é considerado por uma substância pura, a massa total (m_{tot}) e o número total (n_{tot}) de moles são dados por:

$$m_{tot} = m_1 + m_2 + \dots + m_N = \sum m_i \quad (1)$$

$$n_{tot} = n_1 + n_2 + \dots + n_N = \sum n_i \quad (2)$$

Uma mistura é descrita por meio das frações em massa chamadas concentrações ou por meio das frações molares de cada componente:

$$c_i = \frac{m_i}{m_{tot}} \quad (3)$$

$$\chi_i = \frac{n_i}{n_{tot}} \quad (4)$$

As frações em massa e as frações molares podem ser relacionadas através da massa molecular, M_i , que está relacionada com o somatório das massas individuais de cada um dos componentes m_i , ($m_i = n_i M_i$).

Para a fração mássica, tem-se:

$$c_i = \frac{m_i}{m_{tot}} = \frac{n_i M_i}{\sum n_j M_j} = \frac{n_i M_i / n_{tot}}{\sum n_j M_j / n_{tot}} = \frac{\chi_i M_i}{\sum \chi_j M_j} \quad (5)$$

Para a fração molar, tem-se:

$$\chi_i = \frac{n_i}{n_{tot}} = \frac{m_i M_i}{\sum m_j M_j} = \frac{m_i / (M_i \cdot m_{tot})}{\sum m_j / (M_j \cdot m_{tot})} = \frac{c_i / M_i}{\sum c_j / M_j} \quad (6)$$

Finalmente, a massa molecular de uma mistura pode ser escrita da seguinte maneira:

$$M_{mist} = \frac{m_{tot}}{n_{tot}} = \frac{\sum n_i M_i}{n_{tot}} = \sum \chi_i M_i \quad (7)$$

2.3. Umidade

Umidade é o vapor da água no ar, ou em outros gases. O vapor da água é a forma gasosa da água, normalmente transparente, e constitui aproximadamente de um por cento (1%) a três por cento do ar ao nosso redor (Scott, 1996).

É importante fazer menção que o ar, devido à separação intermolecular, tem a capacidade de absorver vapor de água. E esta capacidade, dependerá, principalmente, da temperatura; conseqüentemente, o ar aquecido pode reter maior quantidade de vapor de água.

Quando a certa temperatura, o ar absorve vapor de água ao máximo de sua capacidade, diz-se que ele está saturado. Portanto, a umidade relativa do ar, expressa quão saturado está o ar pelo vapor de água.

2.3.1. Definições e parâmetros de umidade

As seguintes definições estão tomadas na Guia para a Medição da Umidade (Scott M, 1996).

A utilização de certos parâmetros dependerá da área de aplicação. Por exemplo: se o interesse é conhecer e evitar a condensação do vapor de água, o parâmetro adequado é o ponto de orvalho; por outro lado, se o interesse é conhecer a quantidade de vapor de água, seja em uma oficina de impressão litográfica, ou em uma sala de armazenamento ou em uma estação de meteorologia, o parâmetro utilizado será o conteúdo de umidade. Se o interesse é a saturação, utiliza-se a umidade relativa.

2.3.1.1. Pressão de vapor da água (e):

A pressão de vapor da água é a componente da pressão total contribuída pelo vapor de água. A unidade da pressão de vapor no Sistema Internacional é o pascal (Pa).

2.3.1.2. Umidade absoluta

Umidade absoluta é a massa de vapor de água presente na unidade de volume de ar úmido, a certa temperatura e pressão. A unidade da umidade absoluta no Sistema Internacional é grama de água por metro cúbico de ar (gm^{-3}).

Quando a razão é entre a massa de vapor de água e a massa do ar seco, chama-se *razão de mistura ou conteúdo de umidade*, as unidades utilizadas são: gramas/quilogramas.

Cabe mencionar que os engenheiros químicos preferem utilizar para este conceito a chamada “umidade absoluta volumétrica”; e em meteorologia o termo preferido é “concentração de vapor”.

Outros termos também são utilizados para denotar a umidade absoluta, tais como: densidade de vapor, concentração de massa e conteúdo volumétrico de umidade.

2.3.1.3.**Fração molar (χ_i):**

Fração molar é a razão do número de moles de um componente ao número total de moles presente.

2.3.1.4.**Umidade relativa (ϕ):**

A umidade relativa ϕ é definida como a relação entre a fração molar x_v de vapor no ar úmido e a fração molar χ_{sv} de vapor de água no ar úmido saturado na mesma pressão e temperatura (Chapman, 1992).

$$\phi = \frac{\chi_v}{\chi_{sv}} \quad (8)$$

Existe outra forma de expressar a definição da umidade relativa baseado no fato que o vapor é considerado como um gás perfeito: razão da pressão de vapor real e a pressão de vapor de saturação, sobre uma superfície plana de água líquida na mesma temperatura e pressão, expressa em porcentagens (Scott, 1996).

$$\phi(\%) = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad (9)$$

Onde, e é a pressão de vapor atual, e e_s é a pressão de vapor de saturação.

2.3.1.5.**Temperatura de ponto de orvalho**

A temperatura de ponto de orvalho é a temperatura na qual o orvalho ou condensação se forma como consequência do resfriamento de um gás. Nessa temperatura, o ar saturado está em equilíbrio com a água e sua unidade é expressa em °C.

2.3.1.6.**Partes por milhão por volume (ppm_v , $ppm(v)$):**

Partes por milhão por volume é o volume de vapor de água por volume total de gás, definido para o modelo de um gás perfeito.

2.3.1.7.

Partes por milhão por peso ou massa (ppm_w , $ppm(w)$):

Partes por milhão por peso ou massa expressa a quantidade (massa) do vapor de água relativa ao total de gás seco.

2.4.

Métodos para medição da umidade

2.4.1.

Padrões de umidade

A existência de vários tipos de parâmetros para expressar a presença de umidade no ar ou em materiais se deve principalmente ao fato de ser muito difícil achar um material inerte às moléculas de água, e conseqüentemente, ter um único método físico para sua determinação. Entre as interações das moléculas da água com os materiais, podem-se citar:

- As moléculas de água alteram o comprimento de materiais orgânicos, alteram a condutividade e o peso de materiais higroscópicos e absorventes químicos; e, em geral, mudam a impedância de qualquer material.
- As moléculas de água absorvem radiação infravermelha e radiação ultravioleta; alteram a cor de produtos químicos, e as condutividades térmicas de gases, líquidos e sólidos.

Para cada um desses fenômenos, têm sido desenvolvidos diferentes métodos de medição da umidade e, portanto, diferentes higrômetros (instrumento para medir a umidade).

Conseqüentemente, existem vários métodos para medição da umidade; os mais importantes serão descritos a seguir, tomando como base, o organograma hierárquico do NBS para a propagação de unidades de umidade.

De acordo com o NBS (National Bureau of Standards, EE.UU.), na hierarquia dos padrões de umidade, apresentam-se duas alternativas para a propagação das unidades de umidade (Hasegawa, 1986); ambas se originam a partir dos padrões nacionais para as unidades básicas (Fig. 1).

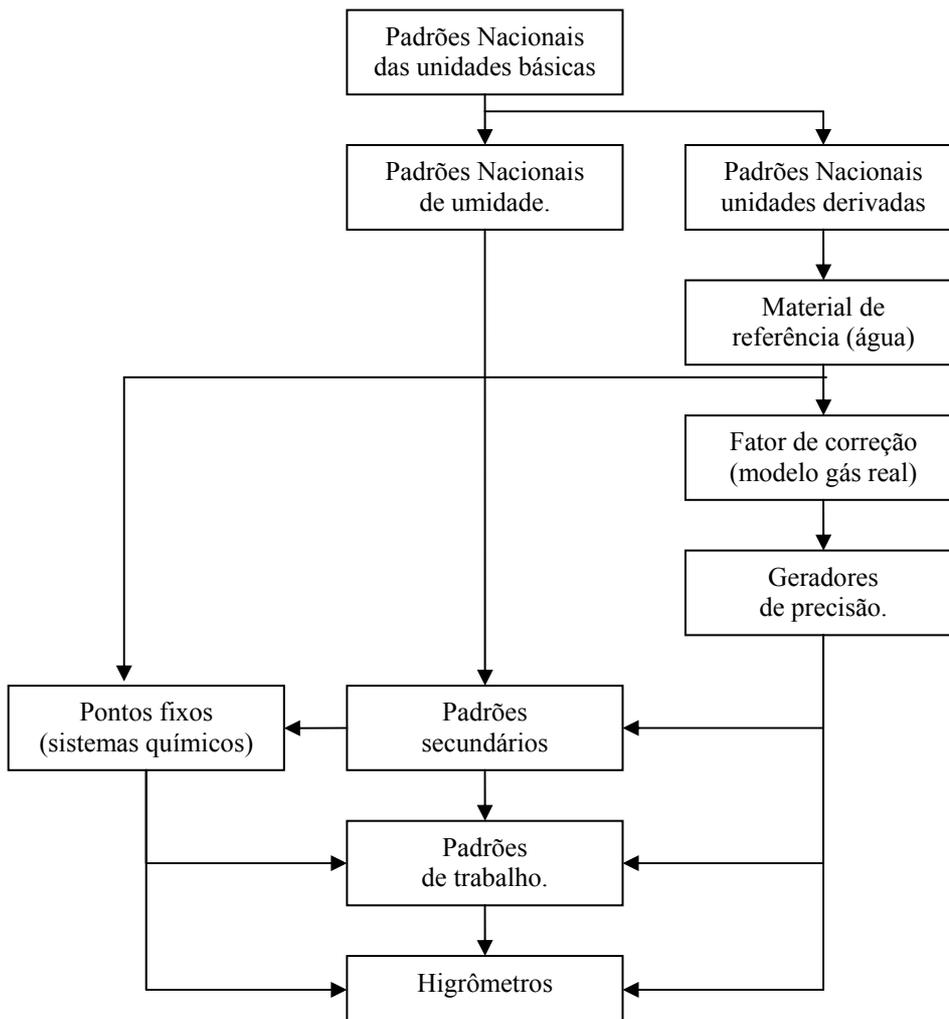


Figura 1. Hierarquia dos padrões de umidade no NBS (Hasegawa, 1986).

A primeira alternativa conduz diretamente ao padrão primário de umidade; a seguir, do padrão primário até geradores de precisão e padrões secundários, para finalmente, propagar o parâmetro aos padrões de trabalho e instrumentos de controle.

A segunda alternativa conduz para o padrão nacional de unidades derivadas, como a pressão, que é utilizada para medir a pressão de vapor da água sobre pontos fixos, e para caracterizar substâncias de água pura. E, com o fator de correção para o comportamento do vapor de água e a mistura de gases, a água é utilizada como material de referência em geradores de precisão com o propósito de produzir níveis conhecidos de umidade que servirão para calibrar padrões secundários e padrões de trabalho.

Para fins do presente trabalho se fará uma descrição dos métodos de medição da umidade nos gases.

2.4.1.1. Método gravimétrico

O método gravimétrico é um procedimento fundamental na determinação da quantidade de vapor de água no ar úmido.

No higrômetro, a massa de vapor da água, ao se misturar com um volume de gás, é absorvido por um desumidificador químico, sendo posteriormente pesado. O volume de gás seco é medido diretamente. Com essas medições, têm-se as quantidades fundamentais para produzir uma medida absoluta da umidade. O parâmetro é a razão de mistura, que é igual à massa de água por massa de ar seco (*gramas* de vapor de água / *quilogramas* de ar seco).

O método gravimétrico apresenta a maior exatidão e melhor repetitividade na determinação da umidade absoluta; embora seja um método caro e que demanda maior quantidade de tempo e alta qualificação técnica, os resultados são valores médios no tempo; na prática, utiliza-se conjuntamente com um gerador de umidade na produção de gás com umidade constante.

O método do higrômetro gravimétrico é utilizado em trabalhos de pesquisa ou em calibrações fundamentais. Este método é utilizado em laboratórios primários, como o NIST (National Institute of Standards and Technology) nos Estados Unidos de América do Norte, NPL (National Physical Laboratory) no Reino Unido e MIJ (Metrology Institute of Japan) no Japão. As incertezas para a razão de mistura estão em torno de 0,1% até 0,2%; as incertezas para a temperatura do ponto de orvalho estão em torno de 0,04°C no intervalo -35°C até +50°C (Visscher, 2000).

2.4.1.2. Geradores de umidade de precisão

Estes higrômetros são preferidos para um trabalho menos elaborado de calibração. A literatura mostra que este método pode chegar a apresentar uma exatidão comparável ao método gravimétrico, conseqüentemente, pode ser considerado como um padrão primário.

Hasegawa (Hasegawa, 1996) apresenta três métodos práticos para produzir uma atmosfera de umidade conhecida: o método de dois fluxos, o método de duas temperaturas e o método de duas pressões.

No primeiro método, uma câmara de teste é alimentada por dois fluxos de ar, um de ar seco e o segundo, com ar saturado com água a uma temperatura conhecida. A umidade resultante pode ser calculada a partir das duas taxas de fluxo.

No método de duas temperaturas, utiliza-se ar saturado com vapor de água a uma temperatura bem conhecida; posteriormente, o ar é aquecido a uma temperatura maior.

No método de duas pressões, o ar é saturado com vapor de água a uma pressão elevada, logo é expandido isotermicamente a uma pressão mais baixa, normalmente, a pressão atmosférica.

Os geradores de umidade de precisão não são transportáveis, e as intercomparações são feitas utilizando padrões de alta exatidão como os padrões ponto de orvalho de espelho.

2.4.1.3. Higrômetro de condensação ponto de orvalho

A pressão de vapor de saturação no ar aumenta com a temperatura (ver seção pressão de vapor de saturação), significando que o ar pode ser resfriado a uma temperatura e ficar saturado com vapor de água. Se este procedimento é realizado a uma pressão constante e umidade específica, a verdadeira temperatura de ponto de orvalho é obtida.

Na prática, uma amostra de gás é usualmente colocada sobre um espelho metálico resfriado termoeletricamente. O espelho é resfriado até se detectar orvalho ou neve através de métodos ópticos.

Uma das vantagens deste método é sua natureza fundamental e seu amplo intervalo de temperaturas de orvalho, como, por exemplo, pontos de orvalho para 90°C em condições de temperatura ambiente que podem ser medidos. Uma de suas desvantagens é a suscetibilidade do espelho de sofrer contaminação, especialmente, de sais solúveis.

Os padrões de transferência ponto de orvalho têm uma exatidão com valor em torno de 0,03°C até 0,05°C no intervalo de temperatura de ponto de orvalho -20°C até +40°C.

2.4.2. Métodos de medição de umidade em gases industriais

2.4.2.1. Higrômetros mecânicos

Embora estes higrômetros sejam muito antigos, ainda se utilizam amplamente nas aplicações de ar condicionado.

O princípio de funcionamento se baseia na elongação com a umidade relativa de cabelos humanos, têxteis ou fibras plásticas. O efeito pode ser amplificado mecanicamente para mover uma caneta ou um registrador analógico.

A incerteza de um higrômetro de fio de cabelo, na faixa de 35 % a 95 % de umidade relativa, está, na melhor das hipóteses, em torno de 2 % rh (pontos percentuais de umidade relativa) até 3 % rh (pontos percentuais da umidade relativa). Em geral não se espera uma incerteza melhor que 5 % rh (pontos percentuais de umidade relativa).

No caso do cabelo, deve-se tomar em consideração que estará em uma condição diferente da calibração. O cabelo exhibe uma curva úmida e uma curva seca; a transição toma lugar um pouco abaixo dos 35% de umidade relativa.

2.4.2.2. Psicrômetro bulbo úmido e bulbo seco

Este tipo de higrômetro consiste de dois sensores de temperatura onde ar úmido é aspirado. Um sensor é envolvido por um meio poroso (mecha de algodão) que é mantido úmido pela ação de capilaridade a partir de um reservatório de água.

A água se evapora da mecha úmida a uma taxa que está relacionada com umidade do ar. A evaporação da água provoca o resfriamento do sensor de bulbo úmido. A temperatura registrada pelos termômetros bulbo seco e bulbo úmido, permite-nos calcular a umidade do ar.

Em concordância com o Guia de Medição da Umidade (NPL, 1996), é recomendável a utilização de um psicrômetro aspirado.

2.4.2.3. Sais

A lei de Raoult estabelece que a pressão de vapor de um componente de uma mistura é proporcional à concentração do componente e à pressão de vapor do

componente puro. Aplicando-se à medição de umidade tem-se que uma amostra do gás na condição *a* está em equilíbrio com uma solução saturada de LiCl a uma maior temperatura *b*, que também estará em equilíbrio com água destilada a uma menor temperatura *c*. Este procedimento é bem semelhante ao princípio do higrômetro tipo ponto de orvalho.

A aplicação deste princípio conduz a um sensor simples e efetivo: uma luva de tela sobre uma bobina que tem um enrolamento de dois elétrodos inertes é revestida com uma solução diluída de cloreto de lítio. Enquanto a bobina é aquecida por uma corrente alternada, sua resistência aumenta pronunciadamente. No ponto onde a superfície começa a secar de dentro para fora, o aquecimento pára, e o sensor começa a resfriar, absorvendo vapor de água, etc., até que uma temperatura do equilíbrio é atingida. (Visser, 2000). A temperatura de equilíbrio dependerá dos diferentes sais utilizados como padrão na calibração de outros higrômetros de monitoração. Entre as sais existentes no mercado têm-se (Tabela 1):

Tabela 1. Alguns sais existentes no mercado e suas respectivas temperaturas de equilíbrio.

Sal	Temperatura (°C)			
	10	20	30	40
LiCl	11,3	11,3	11,3	11,2
MgCl ₂	33,5	33,1	32,4	31,6
Mg(NO ₃) ₂	57,4	54,4	51,4	48,4
NaCl	75,7	75,5	75,1	74,7
KCl	86,8	85,1	83,6	82,3
K ₂ SO ₄	98,2	97,6	97,0	96,4

2.4.2.4.

Componentes eletrônicos absorvedores de umidade

Nesta categoria de sensores de umidade se encontram os chamados sensores capacitivos e resistivos.

Geralmente o sensor é fabricado com um material higroscópico, os quais mudam suas propriedades elétricas quando absorvem moléculas de vapor de água. As mudanças na umidade são relacionadas através da mudança da capacitância ou resistência elétrica. Usualmente os sensores capacitivos medem umidade e temperatura, e não são

danificados pela condensação, apresentando uma linearidade a baixos conteúdos de umidade e são muito utilizados na medição de umidade relativa.

Os sensores resistivos têm uma boa resposta na medição de umidade relativa, apresentam uma linearidade com valores altos de umidade, e geralmente não toleram a condensação.

Existe um tipo especial de sensor de impedância capacitiva que responde muito bem a pressão parcial de vapor de água, a parte dielétrica é feita de óxido de alumínio ou uma base polimérica como elemento ativo (Scott, 1996).

2.5. Psicrometria

Psicrometria é a ciência que estuda as propriedades termodinâmicas do ar atmosférico e seu vapor de água associado, utilizando essas propriedades para analisar as condições e processos que envolvem o ar úmido.

O ar úmido é uma mistura de ar seco e vapor de água. No ar atmosférico, o conteúdo de vapor de água varia de zero até 3% da massa, e o ar seco é composto de uma mistura de gases.

A evaporação da água, principalmente dos oceanos em acoplamento com a ação do vento, produz e transporta vapor de água através da atmosfera.

O incremento na pressão ou a redução da temperatura produzirá a condensação do vapor da água, dando lugar à formação de nuvens e formando gotas de água que cairão para a terra em forma de chuva, neve ou granizo.

Essas mudanças de fase são de grande importância em muitos processos de produção que vão de semicondutores até a fabricação de cigarros, assim como, em processos biológicos.

2.5.1.1. Composição do ar atmosférico seco:

O ar seco é uma mistura homogênea não condensável de cinco componentes principais em associação com pequenas quantidades de outros elementos (Jones, 1980). A composição do ar atmosférico pode variar com a altitude e com o número de poluentes presentes em certa localidade (Van Wylen, 2003).

Os componentes do ar atmosférico seco em condições normais de pressão e temperatura são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Componentes do ar atmosférico.

Gás	Proporção (%)	Massa molecular
Nitrogênio	78,03	28,02
Oxigênio	20,99	32,00
Dióxido de carbono	0,03	44,00
Hidrogênio	0,01	2,02
Argônio	0,94	39,91

Dos dados da Tabela 2 pode-se calcular a massa molecular média do ar atmosférico seco como a somatória dos produtos entre a massa molecular e a proporção de cada elemento que o constitui, e dizer:

$$M_{ar} = 28,02 \times 0,7803 + 32 \times 0,2009 + 44 \times 0,0003 + 2,02 \times 0,0001 + 39,91 \times 0,0094$$

$$M_{ar} = 28,97$$

Além disso, sabendo-se que uma molécula de vapor de água é composta de dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio, a massa molecular média do vapor de água, pode ser calculada da mesma forma:

$$\begin{aligned} M_{vap_agua} &= 2 \times 1,01 + 1 \times 16 \\ M_{vap_agua} &= 18,02 \end{aligned} \quad (10)$$

2.5.1.2.

Características termodinâmicas do ar seco e do vapor de água:

Uma aproximação útil na psicrometria é o estudo do ar seco e do vapor de água como uma mistura de duas substâncias gasosas puras. Este estudo é feito através da lei dos gases perfeitos com o propósito de estabelecer equações que expressem as propriedades físicas tanto do ar quanto da água em uma forma simples.

As soluções das equações podem ser utilizadas para construir tabelas de dados psicrométricos ou gráficos psicrométricos, úteis no estudo das condições do ar atmosférico em função de variáveis termodinâmicas, tais como a temperatura e a pressão.

Um tratamento simplificado do ar seco e do vapor da água é abordado separadamente pela lei das pressões parciais de Dalton, a qual será nosso ponto de referência no presente trabalho.

2.5.1.3.

Lei de Dalton das pressões parciais

Se uma mistura de gases perfeitos ocupa um volume conhecido a uma temperatura de referência, a pressão total exercida pela mistura é igual à soma das pressões dos constituintes, onde ao início, cada constituinte é considerado na mesma temperatura e no mesmo volume.

Considerando que os constituintes obedecem à lei dos gases perfeitos, a lei de Dalton é mais conveniente expressá-la da seguinte maneira:

- A pressão exercida por cada gás em uma mistura de gases é independente da presença dos outros gases.
- A pressão total exercida pela mistura de gases é igual à soma das pressões parciais (pressão de cada gás constituinte).

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (11)$$

2.5.1.4.

A equação de Clausius-Clapeyron e a pressão de saturação

Os cálculos de propriedades termodinâmicas como a entalpia ou a entropia, em função das outras propriedades mensuráveis, podem ser agrupados em duas categorias: a primeira é composta pelas avaliações das diferenças entre as propriedades de duas fases diferentes e a segunda categoria é composta pelos cálculos das variações de propriedades em uma fase simples e homogênea. No presente trabalho, interessa-nos aquelas onde as fases são distintas, ou seja: as fases são compostas por líquido e vapor.

Segundo (Van Waylen, 2003) a equação de Clapeyron é:

$$\frac{de_v}{dT} = \frac{s_l - s_v}{V_l - V_v} \quad (12)$$

onde e_v é a pressão de vapor, S_i é a entropia do líquido ou vapor, V_i o volume do líquido ou vapor e T é a temperatura.

E nos casos onde a temperatura da fase de vapor é baixa, pode-se fazer uma simplificação à equação de Clapeyron. A pressão de saturação é muito pequena e o volume específico do vapor é muito maior que o volume específico do líquido. Além

disso, a pressão é suficientemente baixa para que o modelo de gás perfeito se torne adequado para descrever o comportamento da fase de vapor; com base nessas restrições, a equação de Clapeyron é expressa por:

$$\frac{de_v}{dT} = \left(\frac{L}{R_v} \right) \frac{e_v}{T^2} \quad (13)$$

Considerando que a entalpia de evaporação L é função linear da temperatura (McPherson, 2002), nos temos para o vapor de água:

$$L = (2502,5 - 2386,0 \cdot T) \times 1000 \text{ (J/kg)} \quad (14)$$

onde a temperatura é expressa em °C.

A solução da Eq.(13) será expressa por:

$$\ln\left(\frac{e_f}{e_i}\right) = \left(\frac{1}{R_v}\right) \left(2502,5 \times \frac{T_f - T_i}{T_f T_i} + 2386,0 \times \ln\left(\frac{T_i}{T_f}\right) \right) \quad (15)$$

Existem várias equações simplificadas da Eq.(15), entre elas (NPL,1996).

$$e = 611,2 \times \exp\left(\frac{17,62 \times T}{243,12 + T}\right) \text{ (Pa)} \quad (16)$$

Para a água, no intervalo de temperatura que vai de -45°C até +60°C, a equação fornece valores com uma incerteza menor que $\pm 0,6\%$ do valor calculado com um nível de confiança do 95,45 %.

No caso do gelo, a equação é:

$$e = 611,2 \times \exp\left(\frac{22,46 \times T}{272,62 + T}\right) \text{ (Pa)} \quad (17)$$

Para o intervalo de temperatura que vai de -65°C até +0,01°C, os valores calculados pela equação têm uma incerteza menor que $\pm 1,0\%$ do valor calculado com um nível de confiança do 95,45 %.

2.5.1.5.

Base física da medição da umidade

Uma questão que deve ser resolvida, antes de iniciar nosso processo de construção das equações psicrométricas, é sobre como expressar melhor a quantidade vapor de água contido em um fluxo de ar.

É preferível fazer as análises sobre a base da massa (kg) que do volume (m^3), pois variações na pressão e temperatura fazem mudar o volume do ar durante seu transporte através dos sistemas de ventilação. Em contraste, o fluxo de massa permanece constante ao longo de um simples percurso do ar.

A adição de vapor de água ao fluxo de ar através do processo evaporativo, ou sua remoção por condensação, resulta em um fluxo de massa constante (Hemp, 1982), onde as moléculas de vapor no ar úmido coexistem com as de ar seco, ocupando o mesmo volume, sem a existência de reações químicas. Portanto, somente a concentração de vapor de água muda durante a evaporação e a condensação, e o fluxo de massa do ar permanece constante.

2.5.1.5.1. Conteúdo de umidade do ar

Supondo que há um recipiente fechado de volume V (m^3), que contem 1kg de ar seco a uma pressão P_a (Pascal) e temperatura T (Kelvin). E, ao injetar X kg de vapor de água na mesma temperatura no recipiente, a pressão será:

$$P = P_a + e \quad (18)$$

Onde, e é a pressão parcial exercida pelo vapor de água. Tanto o ar seco quanto o vapor de água estão à mesma temperatura T e ocupam o mesmo volume V .

Para determinar a massa de vapor de água, conhecendo-se as pressões inicial e final (P_a e P) escreve-se:

para X kg de vapor de água:

$$e \times V = X \times R_v \times T \quad (19)$$

e para 1 kg de ar seco:

$$P_a \times V = 1 \times R_a \times T \quad (20)$$

onde R_v é a constante de gás para o vapor de água e R_a é a constante de gás para o ar seco.

Fazendo a razão entre as Eq.(19) e (20), tem-se o conteúdo de umidade no recipiente fechado, em kg por kg de ar seco, através da avaliação da pressão de vapor de água e , como a diferença entre a pressão final (P) e a pressão inicial (P_a):

$$X = \frac{R_a}{R_v} \left(\frac{e}{p - e} \right) \text{ (kg/kg de ar seco)} \quad (21)$$

2.5.1.5.2.

Pressão de vapor de saturação

Se nós continuamos adicionando vapor de água no recipiente fechado, a pressão parcial do vapor de água e a pressão total aumentarão até certo limite.

A pressão parcial da fração do ar seco P_a permanecerá constante, e ao seguir adicionando mais vapor de água, mantendo a temperatura constante, o excesso de vapor de água se condensará e será coletado como água líquida nas paredes do recipiente.

Portanto, quando o sistema não aceita mais vapor de água, diz-se que o ar se encontra saturado.

A pressão de vapor, e_s , exercida pelo vapor de água nas condições de saturação dependerá principalmente da temperatura de saturação e não da presença de outros gases. E a expressão matemática em função da temperatura de saturação (T_s) é (Scott, 1996):

$$e_s = 611,2 \times \exp\left(\frac{17,62 \times T_s}{243,12 + T_s}\right) \text{ (Pa)} \quad (22)$$

2.5.1.5.3.

Calor específico e constante de gás do ar não saturado.

Considerando as Eq.(19) e (20), ao se somar, tem-se:

$$P \times V = (R_a + X \cdot R_v) \times T \quad (23)$$

E considerando $(1 + X)$ kg da mistura ar-vapor de água como um gás perfeito, tendo uma constante de gás equivalente R_m , tem-se:

$$P \times V = (1 + X) R_m \times T \quad (24)$$

Portanto, a constante do gás equivalente é:

$$R_m = \frac{R_a + X \times R_v}{1 + X} \quad (25)$$

De maneira semelhante, o calor específico equivalente do ar úmido não saturado a pressão constante é:

$$C_{pm} = \frac{C_{pa} + X \times C_{pv}}{1 + X} \text{ (J/kg)} \quad (26)$$

Onde, C_{pa} é o calor específico do ar seco a pressão constante e tem valor de 1005 J/kgK e C_{pv} é o calor específico do vapor de água a pressão constante e tem valor de 1884 J/kgK.

E para o calor específico do ar úmido a volume constante, a expressão é:

$$C_{vm} = \frac{C_{va} + X \times C_{vv}}{1 + X} \text{ (J/kg)} \quad (27)$$

Onde C_{va} é o calor específico do ar seco a volume constante que tem valor de 718 J/kgK e C_{vv} é calor específico do vapor de água a volume constante e tem valor de 1422 J/kgK.

2.5.1.5.4.

Volume específico e densidade específica do ar não saturado

O volume específico real do ar úmido não saturado, V_m , pode ser calculado a partir da lei dos gases perfeitos, aplicada a 1,00 kg da mistura ar seco – vapor de água, e sua expressão é:

$$V_m = \frac{(R_a + X \times R_v)}{(1 + X)} \times \left(\frac{T}{P}\right) \text{ (m}^3\text{/kg de ar seco)} \quad (28)$$

Onde T está em graus Kelvin, e P em pascal.

A densidade específica real do ar úmido, ρ_m , é o recíproco do volume específico real, portanto:

$$\rho_m = \left(\frac{1 + X}{R_a + X \times R_v}\right) \times \left(\frac{P}{T}\right) \text{ (kg de ar úmido/m}^3\text{)} \quad (29)$$

2.5.1.5.5.

Cálculo da umidade relativa e da saturação percentual

A umidade relativa é utilizada para expressar o grau de saturação de um espaço, seja aberto ou fechado; foi definida como a razão entre a pressão de vapor real e a pressão de vapor de saturação sobre uma superfície plana de água líquida a mesma temperatura e pressão:

$$\phi(\%) = \frac{e}{e_{s,bs}} \times 100 \quad (30)$$

Onde e_{sd} é a pressão de vapor de saturação na temperatura do ar (bulbo seco).

Esta definição indica que a umidade relativa é a razão da pressão de vapor prevalente naquela condição existente e a que existiria se o espaço estivesse saturado na mesma temperatura.

De maneira semelhante, o conceito saturação percentual, ph , é definido como:

$$ph = \frac{X}{X_{s,bs}} \times 100 \quad (31)$$

$$ph = \left(\frac{e}{p - e} \right) \cdot \left(\frac{p - e_{s,bs}}{e_{s,bs}} \right) \times 100 \quad (32)$$

Onde $X_{s,bs}$ é o conteúdo de umidade (kg / kg de ar seco) que deveria existir se o espaço estivesse saturado na mesma temperatura do bulbo seco.

2.6. O higrômetro bulbo úmido e bulbo seco

Um higrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco compõem-se de um par de termômetros, onde um deles, chamado bulbo úmido, é recoberto por uma mecha úmida, e o segundo termômetro, chamado bulbo seco, não é recoberto por material nenhum. Este tipo de higrômetro é comumente chamado psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco.

Quando o higrômetro entra em contato com o ar, o termômetro bulbo seco registrará a temperatura do ar incidente, e o termômetro bulbo úmido registrará uma temperatura mais baixa devido ao efeito de resfriamento causado pela evaporação da água. Conhecendo as temperaturas dos termômetros bulbo úmido e bulbo seco, conjuntamente com o valor da pressão barométrica, é possível calcular a umidade e outras quantidades psicrométricas de interesse.

No funcionamento do higrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco, se os bulbos são expostos em um túnel de vento, a temperatura indicada pelo bulbo úmido diminuirá com maior rapidez até atingir o equilíbrio, devido à maior eficiência na remoção do ar saturado nas vizinhanças do bulbo úmido. A velocidade mínima do ar que resulta na verdadeira temperatura do bulbo úmido é função da dimensão e da forma do bulbo úmido (Incropera, 2003).

Existem dois tipos de higrômetros tipo bulbo úmido e bulbo seco: o primeiro é o chamado giratório que é composto por dois termômetros de mercúrio e é girado

manualmente; o segundo tipo é o chamado higrômetro aspirado, onde um ventilador é utilizado para remover o ar saturado das vizinhanças do bulbo úmido.

Segundo (Scott, 1996) o psicrômetro tipo bulbo úmido-bulbo seco é utilizado em grandes espaços, e apresenta incertezas na faixa de $\pm 2\%$ rh até $\pm 5\%$ rh. Em geral tem as seguintes características:

- São higrômetros relativamente simples, econômicos, confiáveis e robustos.
- Podem ter uma boa estabilidade.
- Apresentam uma ampla faixa de detecção da umidade.
- Toleram altas temperaturas e condensação.
- Requer-se bom treinamento para sua adequada utilização e manutenção.
- O conteúdo de umidade no ar deve ser calculado a partir das leituras de temperatura.
- Requer-se que o ar que atinge os termômetros tenham um valor mínimo em sua velocidade; é recomendado pelo NPL (Scott, 1996) um valor em torno de 3m/s.
- A amostra de ar será umidificada através da evaporação da água contida na mecha úmida do bulbo úmido.
- A água utilizada para molhar o bulbo úmido deve ser destilada.
- A medição da umidade pode ser complexa em amostras de ar com temperaturas em torno de 10°C ou menor valor.
- Os psicrômetros não aspirados ou os tipos rotatórios podem apresentar elevadas incertezas em comparação com os psicrômetros tipo aspirado.

2.6.1. Teoria do termômetro tipo bulbo úmido

A temperatura do bulbo úmido é o parâmetro mais importante nas avaliações climáticas de dois propósitos inter-relacionados: a avaliação da capacidade do ar de remover o calor metabólico de pessoas localizadas em um ambiente fechado de trabalho ou lazer (academias, túneis de minério, escritórios, etc); e a quantificação da umidade do ar nos processos industriais.

2.6.1.1. Balanço de calor no bulbo úmido

Se $(1 + X)$ kg de ar úmido não saturado se aproxima e flui na vizinhança da superfície do bulbo úmido, pode-se estabelecer que o ar que abandona a superfície do bulbo é composto por 1kg de ar seco que permanece inalterado e o vapor de água é incrementado de X kg até X_s kg devido ao fato que o ar se encontra saturado. A escolha de 1,0 kg de ar seco se faz para facilitar os cálculos devido a seu comportamento constante durante o processo, portanto somente a massa de ar úmido muda durante esse processo.

Portanto, uma massa de $(X_s - X)$ de água se evapora da superfície do bulbo úmido por cada quilograma de ar seco que passa através dele (Fig. 2).

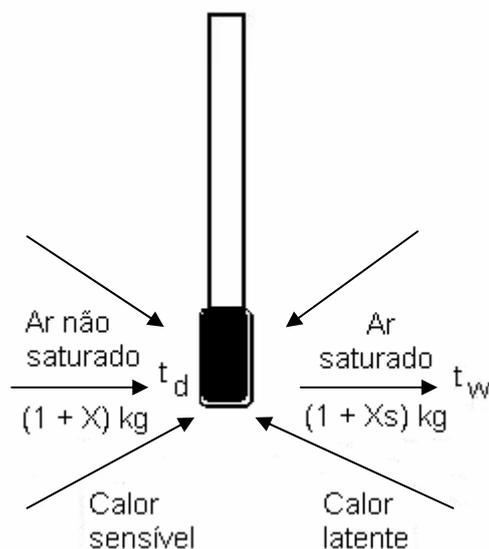


Figura 2. Balanço de calor no bulbo úmido.

Uma explicação do processo de transporte de calor é que quando a água no estado líquido abandona o bulbo úmido, ela se vaporiza. Como a entalpia do vapor é maior do que a do líquido, uma determinada quantidade de calor é transferida do mesmo, resfriando-o. Esta diminuição de energia é refletida por uma redução de temperatura (efeito do resfriamento evaporativo) registrada pelo termômetro do bulbo úmido, cujo valor é menor que o registrado pelo bulbo seco. Conseqüentemente, a maior taxa de evaporação maior depressão do bulbo úmido.

Portanto, devido à diferença entre a temperatura do ar e a superfície úmida, uma transferência de calor sensível ocorrerá por convecção do ar ao bulbo úmido; o equilíbrio dinâmico é estabelecido quando a perda de calor do bulbo úmido é balanceada pelo ganho de calor sensível convectivo, ou seja, a perda de calor latente do bulbo úmido é igual ao ganho de calor sensível pelo bulbo úmido.

O calor latente transferido do bulbo úmido ao ar é igual a $q = L(X_s - X)$, onde L é o calor latente de evaporação (J/kg) evaporado na temperatura do bulbo úmido.

A transferência de calor sensível do ar ao bulbo úmido é igual a $q = \text{massa} \times \text{calor específico} \times \text{mudança na temperatura}$; $q = (1 + X) \times C_{pm} \times (T_{bs} - T_{bu})$.

No equilíbrio dinâmico, tem-se:

$$L \times (X_s - X) = (1 + X) \times C_{pm} \times (T_{bs} - T_{bu}) \quad (33)$$

2.6.1.2.

Determinação do conteúdo de umidade e da pressão de vapor a partir das leituras de um psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco

Se a pressão barométrica P e as temperaturas do bulbo úmido e bulbo seco registradas pelo psicrômetro são conhecidas, a quantidade de vapor de água no ar é determinada a partir dessas variáveis.

Baseados na Eq.(33), e substituindo $(T_{bs} - T_{bu})$ por Δt , se tem:

$$L \times (X_s - X) = (1 + X) \times C_{pm} \times \Delta t \quad (34)$$

Substituindo C_{pm} pela Eq.(26) e separando X , o conteúdo de umidade é:

$$X = \frac{L \times X_s - C_{pa} \times \Delta t}{C_{pv} \times \Delta t + L} \quad \text{kg/kg de ar seco} \quad (35)$$

onde

$$X_s = 0,622 \frac{e_s}{P - e_s} \quad \text{Pa} \quad (36)$$

A pressão de saturação e_s é calculada a partir da Eq.(16), e L é calculada a partir da Eq.(14), e a temperatura comum às duas equações é a temperatura do bulbo úmido.

Portanto, a pressão de vapor real é calculada a partir de:

$$e = \frac{P \times X}{0,622 + X} \quad \text{Pa} \quad (37)$$

onde X é o conteúdo de umidade do ar e P é a pressão barométrica.

2.6.1.3.

Determinação da equação empírica da umidade relativa

Baseado na Eq.(35) e no fato que $C_{pv} \cdot \Delta t$ é bem menor comparado com L , uma equação mais simples para o conteúdo de umidade pode ser rescrita, e a Eq.(35) se converte em:

$$X = X_s - \frac{C_{pa} \times \Delta t}{L} \text{ kg/kg de ar seco} \quad (38)$$

e utilizando a Eq.(38) tanto para X quanto para X_s , tem-se:

$$0,622 \frac{e}{(P - e)} = 0,622 \frac{e_s}{P - e_s} - \frac{C_{pa} \times \Delta t}{L} \quad (39)$$

A pressão de vapor real seria:

$$e = e_s \frac{(P - e)}{(P - e_s)} - \frac{C_{pa} \times \Delta t}{0,622L} \times (P - e) \quad (40)$$

E supondo que a pressão real de vapor e e a pressão de saturação e_s são pequenas em comparação com a pressão barométrica P , a Eq.(40) simplifica a equação de Carrier:

$$e = e_{s, bu} - \frac{C_{pa}}{0,622 \cdot L} \times P \times \Delta t \text{ Pa} \quad (41)$$

ou a chamada psicrométrica:

$$e = e_{s, bu} - A \times P \times (T_{bs} - T_{bu}) \text{ Pa} \quad (42)$$

A é chamada constante psicrométrica. Não obstante, devido à simplificação feita na dedução, ela não é verdadeiramente uma constante. T_{bs} é a temperatura do bulbo seco e T_{bu} é a temperatura do bulbo úmido.

Da Eq.(38), observa-se que a constante psicrométrica não muda linearmente com a temperatura; portanto, converte-se em uma derivação da chamada relação empírica da pressão real de vapor em um psicrômetro.

A literatura mostra (Scott, 1996) que um valor da constante psicrométrica em torno de $0,000666^\circ\text{C}^{-1}$ fornece resultados aceitáveis para fins práticos. Não obstante, a constante psicrométrica pode variar de $0,00064^\circ\text{C}^{-1}$ até $0,000680^\circ\text{C}^{-1}$ segundo o NPL (Scott, 1996).

2.6.1.4.

Variação da temperatura de bulbo úmido com a velocidade

O bulbo úmido do psicrômetro registrará uma redução do valor da temperatura devido ao processo de resfriamento evaporativo já mencionado. A última temperatura atingida pelo bulbo úmido representa a condição de equilíbrio do processo simultâneo de transferência de massa e calor (Moreira, 1999) entre a mecha úmida e o ar aspirado.

A chamada temperatura de equilíbrio é comumente chamada temperatura do bulbo úmido. A temperatura do segundo termômetro chamada temperatura do bulbo seco é a temperatura do ar que é aspirado ao túnel do psicrômetro.

Teoricamente, é conhecido que ocorre uma saturação adiabática do fluxo de ar escoando sobre uma superfície de água, quando este não permite uma troca de calor com o meio ambiente. A temperatura de bulbo úmido é uma aproximação prática da temperatura de saturação adiabática.

A utilidade da análise do psicrômetro de saturação adiabática se baseia no fato que existe somente uma temperatura (T^*) que resolve a equação para um estado termodinâmico do ar a pressão constante, ou seja:

$$h + (\omega^* - \omega) \cdot h_L^* = h^* \quad (43)$$

onde h é a entalpia específica do ar seco (em kJ/kg); w é a razão de umidade do ar que incide sobre o bulbo úmido (em kg de água por kg de ar seco) a uma temperatura T ; w^* é a razão de umidade em kg de água por kg de ar seco; h_L^* é a entalpia específica da água líquida e h^* é a entalpia específica (em kJ/kg) do ar que abandona o psicrômetro a uma temperatura T^* . A temperatura T^* é chamada temperatura de saturação adiabática do ar. A temperatura de bulbo úmido é aproximadamente igual a ela para uma mistura ar e vapor d'água.

Segundo Moreira (1999) o erro cometido ao utilizar a temperatura do bulbo úmido como a temperatura de saturação adiabática é:

$$\delta T \approx 0,05 \left(\frac{T - T^+}{1 + P_v^+} \right) \quad (44)$$

Onde T^+ é a temperatura do bulbo úmido, T é a temperatura do bulbo seco, e P_v^+ é a pressão barométrica na temperatura de saturação do bulbo úmido, proporcionando valores em torno de 0,4°C (Moreira, 1999).

O bulbo úmido é o resultado de um processo de transferência de calor e massa, sendo função da velocidade do ar. A temperatura de saturação adiabática é uma função de estado termodinâmico. No presente trabalho, será avaliada a resposta do bulbo úmido para diferentes velocidades do ar.