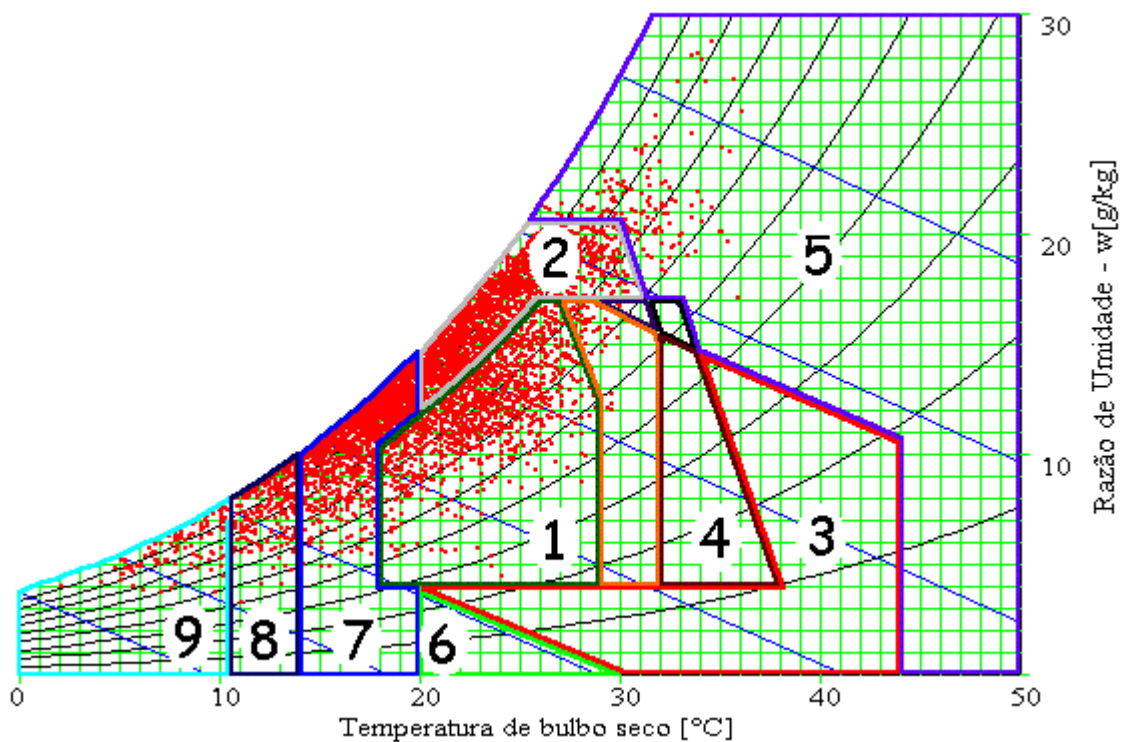


Refrigeração e Ar-Condicionado

Parte IV

Psicrometria

Prof. Luiz Carlos Martinelli Jr. - DeTEC.



SUMÁRIO

PSICROMETRIA.....	3
AR.....	3
<i>Ar seco</i>	3
LEI DE DALTON.....	4
PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DO AR ÚMIDO.....	4
Temperatura de Bulbo Seco (t_{BS}).....	5
Temperatura de Bulbo Úmido (t_{BU}).....	5
Temperatura de Orvalho (t_0).....	6
Pressão de Vapor (P_V).....	6
Pressão de Vapor Saturado (P_{VS}).....	7
Razão de Umidade (x).....	7
Umidade Relativa (ϕ).....	8
Grau de Saturação (μ).....	8
Volume Específico (v).....	8
Entalpia para o Ar Úmido (h).....	8
Pressão Atmosférica.....	9
DIAGRAMA PSICROMÉTRICO.....	10
Diagrama de Carrier.....	11
Diagrama de Mollier.....	11
DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AR.....	14
PROCESSOS PSICROMÉTRICOS.....	16
Mistura Adiabática de duas quantidades de Ar Úmido.....	16
Aquecimento Sensível ou Aquecimento Seco.....	17
Resfriamento sem Desumidificação ou Resfriamento Seco.....	18
Resfriamento com Desumidificação.....	20
Fator de Bypass.....	22
Fator de Calor Sensível (R).....	23
Resfriamento e Umidificação.....	25
Aquecimento e Umidificação.....	26
MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE UMIDADE EM GASES	30
1. INTRODUÇÃO.....	30
2. O QUE É A UMIDADE?.....	30
3. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE UMIDADE	31
<i>Princípios de Operação de Vários Higrômetros</i>	31
Higrômetros Mecânicos.....	31
Psicrômetros de bulbos seco e úmido.....	31
Medidores por Impedância Elétrica (Capacitivos ou Resistivos).....	31
Sensores Capacitivos.....	32
Sensores Resistivos.....	32
Sensores de Ponto de Orvalho por Impedância.....	32
Higrômetros por Condensação.....	32
Higrômetros de Cloreto de Lítio Saturado.....	33
Eletrolítico (pentóxido fosforoso).....	33
Higrômetros Espectroscópicos.....	33
Outros Métodos.....	33
Acústico.....	33
Expansão Adiabática.....	34
Gravimétrico.....	34
Fibra Óptica.....	34
Piezoelétrico (oscilador de quartzo).....	34
Ponte Pneumática.....	34
Condutibilidade Térmica.....	34
Zircônia.....	34
4. VANTAGENS E LIMITAÇÕES	36
Higrômetros Mecânicos.....	36
Psicrômetros de bulbos seco e úmido.....	36

Medidores por Impedância Elétrica (Capacitivos ou Resistivos).....	36
Higrômetros por Condensação.....	37
Higrômetros de Cloreto de Lítio Saturado.....	37
Eletrolítico (pentóxido fosforoso).....	37
Higrômetros Espectroscópicos.....	38
Medidores de Umidade por Mudança de Cor.....	38
5. SELEÇÃO DE UM TIPO DE HIGRÔMETRO.....	38
6. CALIBRAÇÃO DE HIGRÔMETROS.....	39
7. REFERÊNCIAS.....	39
EQUAÇÕES PSICROMÉTRICAS.....	39
<i>Notação Utilizada.....</i>	<i>39</i>
ASAE.....	40
<i>A – Linha de Saturação, P_{vs} em função de T.....</i>	<i>40</i>
<i>B – Linha de Saturação, T em função de P_{vs}.....</i>	<i>40</i>
<i>C – Calor Latente de Sublimação na Saturação.....</i>	<i>40</i>
<i>D – Calor Latente de Vaporização na Saturação.....</i>	<i>40</i>
<i>E – Linha de Bulbo Úmido.....</i>	<i>41</i>
<i>F – Razão de Umidade.....</i>	<i>41</i>
<i>G – Volume Específico.....</i>	<i>41</i>
<i>H – Entalpia.....</i>	<i>41</i>
<i>I – Umidade Relativa.....</i>	<i>41</i>
ALBRIGHT.....	41
<i>A – Pressão de Saturação do Vapor.....</i>	<i>41</i>
<i>B – Umidade Relativa.....</i>	<i>43</i>
<i>C – Razão de Umidade.....</i>	<i>43</i>
<i>D – Volume Específico.....</i>	<i>43</i>
<i>E – Entalpia.....</i>	<i>43</i>
<i>F – Temperatura de Orvalho.....</i>	<i>43</i>
<i>G – Temperatura de Bulbo Úmido.....</i>	<i>43</i>
BIBLIOGRAFIA.....	43

Psicrometria

O estudo detalhado da mistura ar seco – vapor d'água é de tal importância que constitui uma ciência à parte, a *Psicrometria*, dotada de todo um vocabulário próprio.

A *Psicrometria* é definida como “o ramo da física relacionado com a medida ou determinação das condições do ar atmosférico, particularmente com respeito à mistura ar seco – vapor d'água”, ou ainda, “aquela parte da ciência que está de certa forma intimamente preocupada com as propriedades termodinâmicas do ar úmido, dando atenção especial às necessidades ambientais, humanas e tecnológicas.

O conhecimento das condições de umidade e temperatura do ar é de grande importância. Além do conforto térmico, que depende mais da quantidade de vapor presente no ar do que propriamente da temperatura, também em muitos outros ramos da atividade humana. A conservação de produtos como frutas, hortaliças, ovos e carnes, em câmaras frigoríficas depende da manutenção da umidade relativa adequada no ambiente. Por exemplo, a perda de peso depende da umidade do ar na câmara de estocagem, se a umidade é baixa, a perda de peso é elevada e vice-versa.

Ar

Pelas suas dimensões e pelos processos físico-químicos e biológicos que se desenvolveram, o planeta Terra possui, hoje, uma camada gasosa que o envolve (ar atmosférico). Essa massa gasosa constitui a atmosfera da Terra e é essencial às formas de vida que nela se encontram.

O ar atmosférico é constituído de uma mistura de gases, assim como de vapor d'água, e uma mistura de contaminantes (fumaça, poeira e outros poluentes gasosos ou não) presentes normalmente em locais distantes de fontes poluidoras.

Ar seco

Por definição, ar seco (dry air) é a mistura dos gases que constituem o ar atmosférico com exclusão do vapor d'água, i.e., quando todo o vapor d'água e os contaminantes são removidos do ar atmosférico. Extensivas medições têm mostrado que a composição do ar seco é relativamente constante, tendo pequenas variações na quantidade dos componentes com o tempo, localização geográfica e altitude. A composição percentual, em volume ou número de moles por 100 moles do ar seco, é dada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do ar seco ao nível do mar:

Componente	Fórmula	% em volume	Massa molecular (kg/kg-mol)
Nitrogênio	N ₂	78,084	28,016
Oxigênio	O ₂	20,9476	32,000
Argônio	Ar	0,934	39,948
Dióxido de carbono	CO ₂	0,0314	44,010
Neônio	Ne	0,001818	20,183
Hélio	He	0,000524	4,0026
Metano	CH ₄	0,00015	16,03188
Dióxido de Enxofre	SO ₂	0 a 0,0001	64,064
Hidrogênio	H ₂	0,00005	2,01594
Criptônio	Kr	0,0002	93,80
Ozônio	O ₃	0,0002	48,000
Xenônio	Xe	0,0002	131,3

Fonte: ASHRAE Fundamentals, 1997, pág. 6.1

A massa molecular aparente do ar seco é 28,9645 kg/kg-mol e a do vapor d'água é de 18,01528 kg/kg-mol, ambas na escala do carbono 12, ASHRAE (1997). A constante dos gases para o ar seco, baseada na escala do carbono 12 é:

$$R_a = \frac{8314,41}{28,9645} = 287,055 \left(\frac{J}{kg.K} \right)$$

A mistura ar seco – vapor d’água é denominada de ar úmido (moist air) ou de mistura binária (binary mixture) de ar seco e vapor d’água. A quantidade de vapor d’água presente na mistura pode variar de zero até um valor correspondente à condição de saturação. Isso corresponde à quantidade máxima de vapor d’água que o ar pode suportar em determinada condição de temperatura.

Definindo:

AR SATURADO é uma mistura de ar seco e de vapor d’água saturado. Mais precisamente é o vapor d’água que é saturado e não o ar.

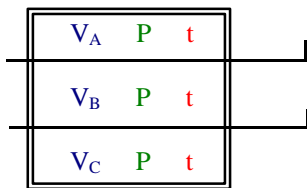
AR NÃO SATURADO é uma mistura de ar seco e vapor d’água superaquecido.

Lei de Dalton

“A pressão total de uma mistura de gases é igual a soma das pressões parciais de cada componente na mesma temperatura da mistura”.

Define-se pressão parcial de cada componente como a pressão que ele exerceria se ocupasse sozinho o volume da mistura, na temperatura da mistura.

Ilustração da Lei de Dalton



$$\begin{aligned} V_A + V_B + V_C &= V \\ \left\{ \begin{aligned} P_A \cdot V &= R \cdot T_A \\ P_B \cdot V &= R \cdot T_B \\ P_C \cdot V &= R \cdot T_C \end{aligned} \right. \\ P_A \cdot V &= P \cdot V_A \\ P_B \cdot V &= P \cdot V_B \\ P_C \cdot V &= P \cdot V_C \\ (P_A + P_B + P_C) \cdot V &= P \cdot (V_A + V_B + V_C) = P \cdot V \\ P &= P_A + P_B + P_C \end{aligned}$$

P_A, P_B, P_C são respectivamente as pressões parciais dos gases A, B e C.

Para o caso do ar úmido, teremos:

$$\begin{aligned} P &= \text{pressão atmosférica} \\ P &= P_A + P_v \\ P_A &= \text{pressão parcial do ar seco} \\ P_v &= \text{pressão parcial do vapor d’água} \end{aligned}$$

Propriedades Termodinâmicas do Ar Úmido

Diversas propriedades termodinâmicas fundamentais estão associadas com as propriedades do ar úmido de maneiras diferentes.

Três propriedades estão associadas com a temperatura:

- a) Temperatura do bulbo seco (t_{BS});

- b) Temperatura termodinâmica do bulbo úmido (t_{BU});
- c) Temperatura do ponto de orvalho (t_0).

Algumas propriedades termodinâmicas caracterizam a quantidade de vapor d'água presente no ar úmido:

- d) Pressão de vapor (P_v);
- e) Razão de umidade (x);
- f) Umidade relativa (ϕ);
- g) Grau de saturação (μ).

Outras propriedades de fundamental importância, relacionadas com o volume ocupado pelo ar e com a energia do ar, respectivamente, são:

- h) O volume específico (v) e
- i) A entalpia (h).

A **entalpia** e o **volume específico** são propriedades da mistura ar seco – vapor d'água, mas, por conveniência, são expressas com base em uma unidade de massa de ar seco.

Apresenta-se, a seguir, uma breve descrição de cada propriedade.

Temperatura de Bulbo Seco (t_{BS})

É a temperatura indicada por um termômetro comum, não exposto a radiação. É a verdadeira temperatura do ar úmido. É freqüentemente denominada apenas *temperatura do ar*.

Temperatura de Bulbo Úmido (t_{BU})

É a temperatura indicada por um termômetro cujo bulbo foi previamente envolto por algodão úmido, tão logo seja atingido o equilíbrio térmico. Nesse tipo de termômetro, a mistura ar seco - vapor d'água sofre um processo de resfriamento adiabático, pela evaporação da água do algodão no ar, mantendo-se a pressão constante.

Para se fazer a leitura desse tipo de temperatura, se faz necessário um psicrômetro, Figura 1. O psicrômetro consta de dois termômetros, um deles envolto por um tecido constantemente umedecido (termômetro de bulbo úmido) e outro, ao lado, simplesmente em equilíbrio térmico com o ar úmido (termômetro de bulbo seco). O termômetro de bulbo úmido recebe sobre si um fluxo de ar constante com uma velocidade de aproximadamente 3 (m/s), por meio de um sistema de ventilação. Assim, a umidade é evaporada retirando energia do bulbo úmido e, conseqüentemente, baixando a temperatura até um estado de equilíbrio.

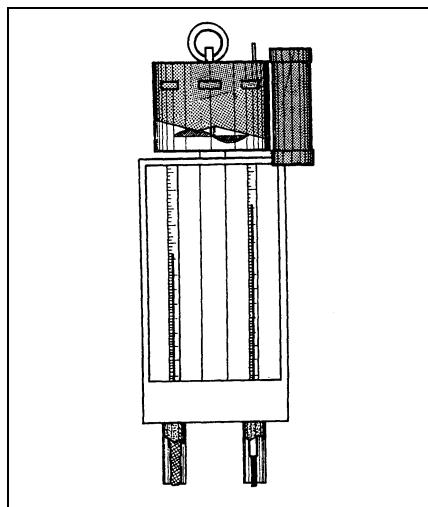


Figura 1 – Psicrômetro de Aspiração

Entende-se por estado de equilíbrio a situação em que o fluxo de energia do ar para o bulbo do termômetro é igual à energia necessária para a evaporação da umidade.

Temperatura de Orvalho (t_0)

É a temperatura no qual o vapor se condensa ou solidifica quando é resfriado a pressão constante e conteúdo de umidade constante. O diagrama T-S para o vapor d'água ilustra esta definição, Figura 2.

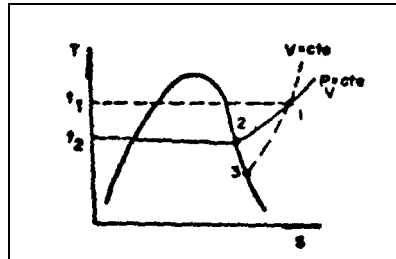


Figura 2 – Diagrama T-S para o ar

- 1) Suponha-se que a temperatura da mistura gasosa e a pressão parcial do vapor na mistura sejam tais que o vapor esteja inicialmente superaquecido no **Estado 1**.

É interessante lembrar que $\left(P_v = \frac{xP}{x + 0,622} \right)$;

- 2) Se a mistura for resfriada com pressão total (P) constante e com conteúdo de umidade x constante a pressão parcial do vapor (R) será mantida constante e o ponto 2 será alcançado tendo início a condensação.

PONTO 1 - condições do vapor

PONTO 2 - ponto de orvalho

PONTO 3 - observe que se o resfriamento for feito a volume constante, haverá condensação numa temperatura inferior a temperatura de orvalho.

Pressão de Vapor (P_v)

A pressão de vapor (P_v) é a pressão parcial exercida pelas moléculas de vapor d'água presentes no ar úmido.

Em uma condição de equilíbrio, i.e., quando a situação em que o fluxo de energia do ar para o bulbo do termômetro é igual à energia necessária para a evaporação da umidade, a partir de um balanço de energia, pode-se escrever a seguinte equação:

$$P_v = P_{V_{SBU}} - a_1 \cdot P \cdot (t - t_{BU})$$

onde:

- P_v ⇒ pressão parcial do vapor d'água
- $P_{V_{SBU}}$ ⇒ pressão de saturação do vapor d'água na temperatura de bulbo úmido
- a_1 ⇒ constante psicrométrica
- P ⇒ pressão barométrica local
- t ⇒ temperatura de bulbo seco
- t_{BU} ⇒ temperatura de bulbo úmido

A constante psicrométrica a_1 depende da temperatura, geometria do bulbo do termômetro e velocidade do ar. Valores para a mesma foram determinados empiricamente, com os seguintes resultados:

- $a_1 = 0,000662 \text{ (1/}^\circ\text{C)}$ → para psicrômetros com sistema de movimentação de ar (aspiração), tipo ASSMANN, sendo a velocidade do ar maior que 3(m/s).
- $a_1 = 0,000800 \text{ (1/}^\circ\text{C)}$ → para psicrômetros sem sistema de movimentação de ar (aspiração), instalado num abrigo meteorológico, onde a velocidade do ar é em torno de 1 (m/s).
- $a_1 = 0,00120 \text{ (1/}^\circ\text{C)}$ → para psicrômetros não ventilados, i.e., ar sem movimento (em repouso).

Pressão de Vapor Saturado (P_{VS})

Ocorre quando o ar está totalmente saturado de vapor d'água. Para o seu cálculo, tomando como base a temperatura de bulbo úmido (em Kelvin), tem-se:

$$P_{VSBU} = e^{\left(\frac{C_8}{T_b} + C_9 + C_{10}T_b + C_{11}T_b^2 + C_{12}T_b^3 + C_{13}\ln(T_b) \right)}$$

onde:

C_8	-5800,22006
C_9	1,3914993
C_{10}	-0,04864024
C_{11}	4,17648E-05
C_{12}	-1,4452E-08
C_{13}	6,5459673

são constantes da equação, que é válida de 0 a 200 °C, segundo 1997 ASHRAE Fundamentals [1].

O diagrama T-S para o vapor d'água ilustra esta definição, Figura 3.

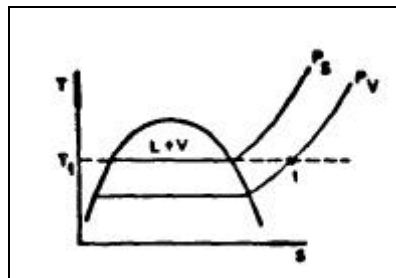


Figura 3 – Diagrama T-S para o ar

O vapor d'água na sala se encontra na **Condição 1**

t_1 = temperatura seca da sala

P_V = pressão parcial do vapor d'água

P_{VS} = pressão de saturação do vapor d'água na temperatura t_1 .

Razão de Umidade (x)

É definida como a razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco em um dado volume da mistura.

$$x = \frac{m_V}{m_A}$$

$$P = P_A + P_V \quad \text{isolando:} \quad P_A = P - P_V$$

$$\text{mas: } P_A \cdot V = m_A \cdot R_A \cdot t$$

$$\text{assim: } \frac{P_A}{P_V} = \frac{m_A R_A}{m_V R_V}$$

$$\frac{m_V}{m_A} = \frac{P_V R_A}{P_A R_V} = x$$

$$x = \frac{R_A}{R_V} \cdot \frac{P_V}{P_A} = 0,622 \frac{P_V}{P_A}$$

$$x = \frac{0,622 \cdot P_V}{P - P_V}$$

Observe que P é a pressão atmosférica e P_V é a pressão parcial do vapor.

Umidade Relativa (φ)

É definida como sendo a relação entre a pressão parcial do vapor d'água na mistura (P_V) e a pressão de saturação correspondente à temperatura de bulbo seco da mistura (P_{VS}).

$$j = \frac{P_V}{P_{VS}} \cdot 100(\%)$$

Grau de Saturação (μ)

Grau de Saturação (μ), é a relação entre a razão de umidade atual da mistura (x) e a razão de umidade do ar na condição de saturação (x_S) à mesma temperatura e pressão atmosférica.

$$m = \frac{x}{x_S}$$

Volume Específico (v)

O volume específico do ar úmido (v) é definido como o volume ocupado pela mistura ar seco – vapor d'água por unidade de massa de ar seco.

A massa específica do ar úmido não é igual ao recíproco do seu volume específico. A massa específica do ar úmido é a razão entre a massa total da mistura e o volume ocupado por ela.

Entalpia para o Ar Úmido (h)

A entalpia da mistura ar seco – vapor d'água (h) é a energia do ar úmido por unidade de massa de ar seco, acima de uma temperatura de referência (visto que somente diferenças de entalpia são de interesse prático em engenharia, o valor escolhido para a temperatura de referência torna-se irrelevante).

A entalpia do ar úmido é a soma da entalpia de seus componentes.

$$H = m_A \cdot h_A + m_V \cdot h_V$$

A entalpia específica é sempre referida a massa de ar seco.

$$h = \frac{H}{m_A} = h_A + x h_V$$

$$\text{para o ar} \quad \Rightarrow h_A = C_{p_A} \cdot t = 0,24 \cdot t \quad t \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\text{para o vapor} \quad \Rightarrow h_V = R_o + C_{p_V} \cdot t = 595 + 0,45 \cdot t \quad t \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \phi \leq 1$$

$$h = 0,24t + (595 + 0,46t)x \quad \begin{cases} t \text{ (}^\circ\text{C)} \\ h \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg de ar seco}} \right) \\ j \leq 1 \end{cases}$$

Tabela 2 - Volume Específico e Calor Específico para o ar seco e o vapor d'água

	AR SECO	VAPOR D'ÁGUA
Volume Específico V	$v_A = \frac{R_A t}{P_A}$ $v_A = \text{volume específico do ar} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$ $t = \text{temperatura seca} [\text{K}]$ $P_A = \text{pressão do ar seco} \left[\frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \right]$ $R_A = \text{constante do ar} = 29,27 \left[\frac{\text{kgf.m}}{\text{kg K}} \right]$	$v_V = \frac{R_V t}{P_V}$ $v_V = \text{volume específico do vapor} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$ $t = \text{temperatura seca} [\text{K}]$ $P_V = \text{pressão do vapor} \left[\frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \right]$ $R_V = \text{constante do vapor} = 47,1 \left[\frac{\text{kgf.m}}{\text{kg K}} \right]$
Calor Específico a pressão constante C_p	<p>Com $P = 760 \text{ mmHg}$</p> $C_{pA} = 0,238 \frac{\text{kcal}}{\text{kgK}} \text{ para } t = -90^\circ\text{C}$ $C_{pA} = 0,244 \frac{\text{kcal}}{\text{kgK}} \text{ para } t = -60^\circ\text{C}$ <p>Para fins práticos:</p> $C_{pA} = 0,24 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$	<p>no campo de aplicação de ar condicionado:</p> $C_{pV} = 0,46 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$

Pressão Atmosférica

A temperatura e a pressão barométrica do ar atmosférico varia consideravelmente tanto com a altitude como com as condições climáticas e geográficas do local. A atmosfera padrão é uma referência para estimar as propriedades do ar úmido a várias altitudes. Ao nível do mar, a temperatura e a pressão padrão é de 15°C e $101,325\text{kPa}$, respectivamente[7].

Assume-se que a temperatura decresce linearmente com o aumento da altitude por toda a troposfera (baixa atmosfera) e é constante em distâncias menores da estratosfera. A baixa atmosfera é assumida como ar seco, portando-se como um gás perfeito. A gravidade é também assumida constante e com um valor padrão de $9.80665(\text{m}^2/\text{s})$.

A pressão atmosférica é calculada pela equação:

$$P = 101,325 \left(1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} Z \right)^{5,2559} \quad (\text{kPa})$$

A tabela resume estas propriedades para altitudes de até 10.000m .

Altitude (m)	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Pressão (kgf/cm ²)
-500	18,2	107,478	1,096
0	15,0	101,325	1,034
500	11,8	95,461	0,974
1000	8,5	89,875	0,917
1500	5,2	84,556	0,862
2000	2,0	79,495	0,811
2500	-1,2	74,682	0,762
3000	-4,5	70,108	0,715
4000	-11,0	61,640	0,629
5000	-17,5	54,020	0,551
6000	-24,0	47,181	0,481
7000	-30,5	41,061	0,419
8000	-37,0	35,600	0,363
9000	-43,5	30,742	0,314
10000	-50,0	36,436	0,372

$$1 \text{ (kPa)} = 1,02 \cdot 10^{-2} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

Diagrama Psicrométrico

As propriedades termodinâmicas da mistura ar seco – vapor d’água que constituem o ar atmosférico podem ser convenientemente apresentadas em forma de diagramas, denominados Diagramas Psicrométricos (Cartas Psicrométricas). Estes são construídos para determinada pressão atmosférica, embora, às vezes, hajam curvas de correção disponível para outras pressões.

Há diferentes diagramas psicrométricos em uso. Os gráficos diferem com respeito à pressão barométrica, faixa de temperaturas, número de propriedades incluídas, escolha das coordenadas e temperatura de referência para a entalpia. O mais usado nas Américas é o *Diagrama de Carrier* (Figura 4), aquele em que a razão de umidade e/ou a pressão de vapor (que é uma das coordenadas) são traçadas “versus” temperatura de bulbo seco juntamente com uma outra coordenada oblíqua, a entalpia. Na Europa, entretanto, tem sido usado o *Diagrama de Mollier* (Figura 5), com a razão de umidade e entalpia como coordenadas.

Diagrama de Carrier

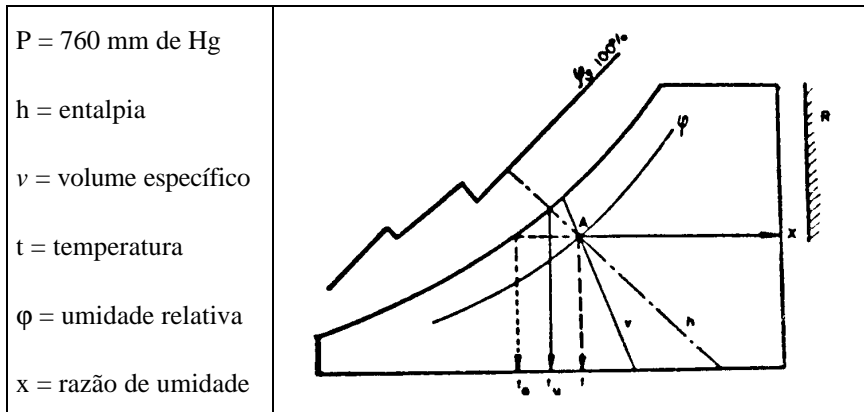
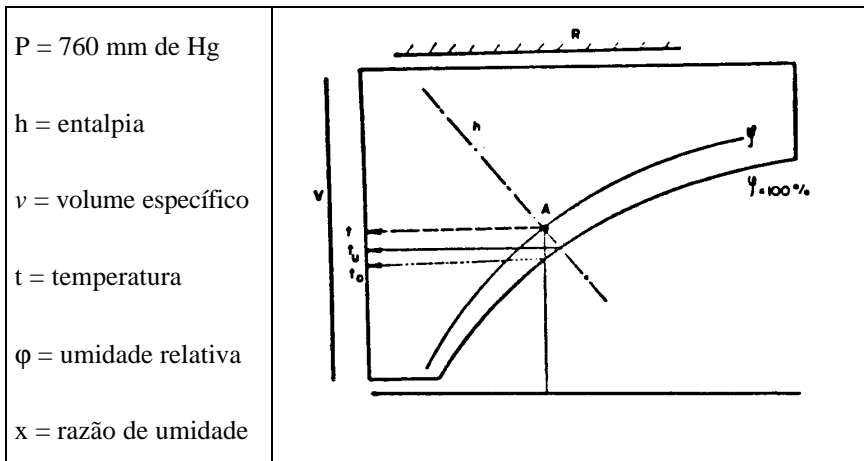


Diagrama de Mollier



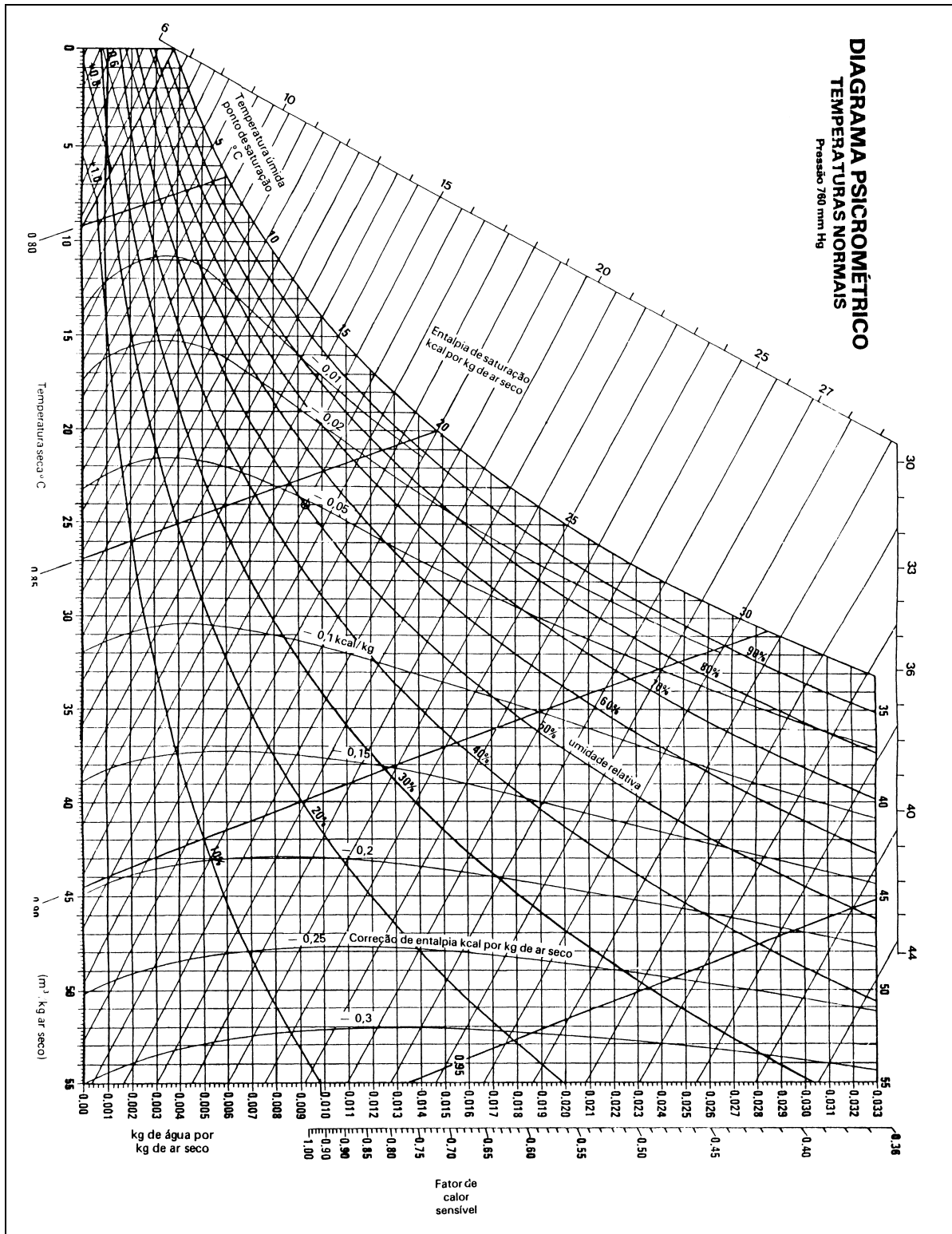


Figura 4 – Carta Psicrométrica Carrier

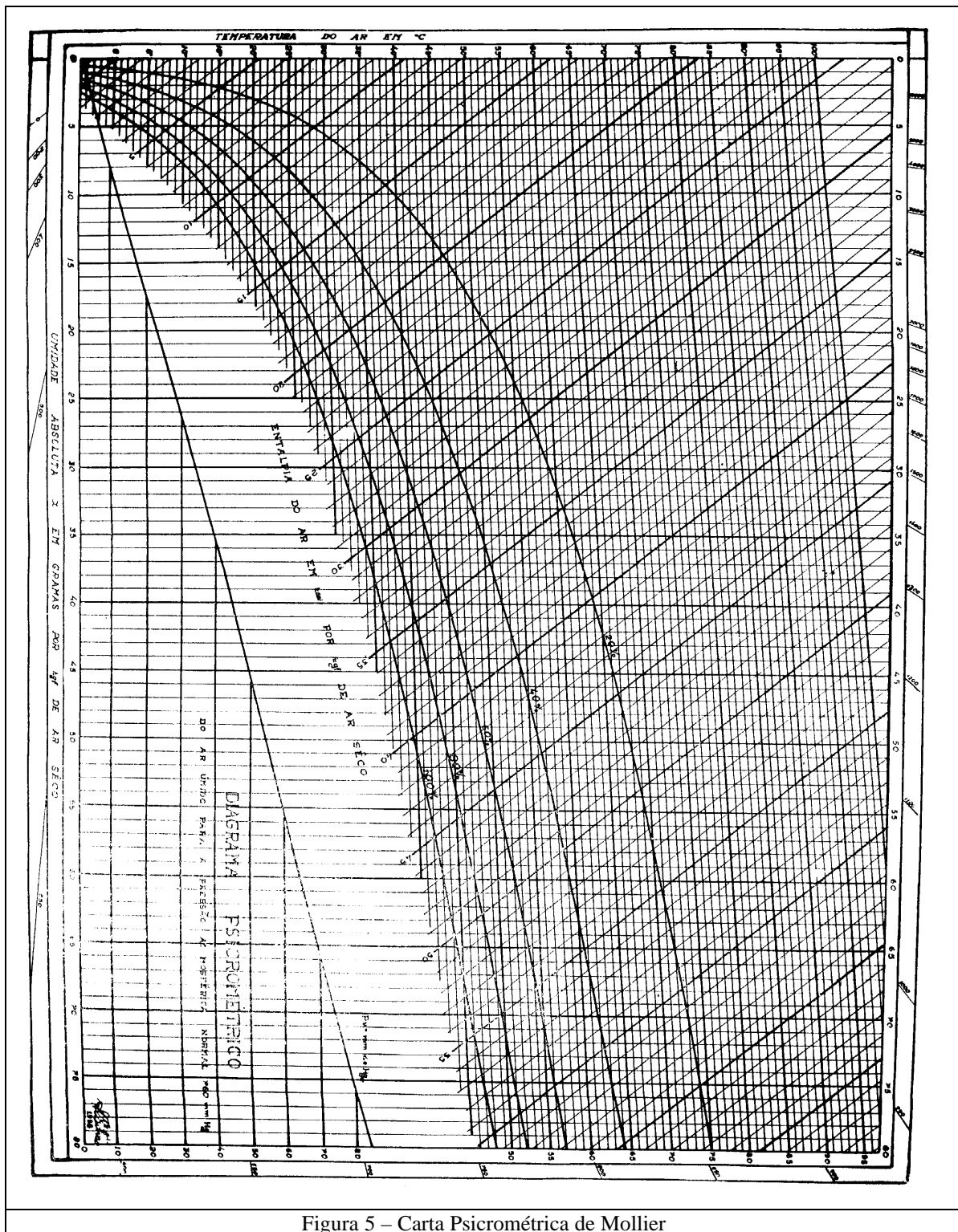


Figura 5 – Carta Psicrométrica de Mollier

Na Figura 6 são mostradas, de forma esquemática, as linhas que representam as propriedades termodinâmicas do ar úmido no diagrama psicrométrico.

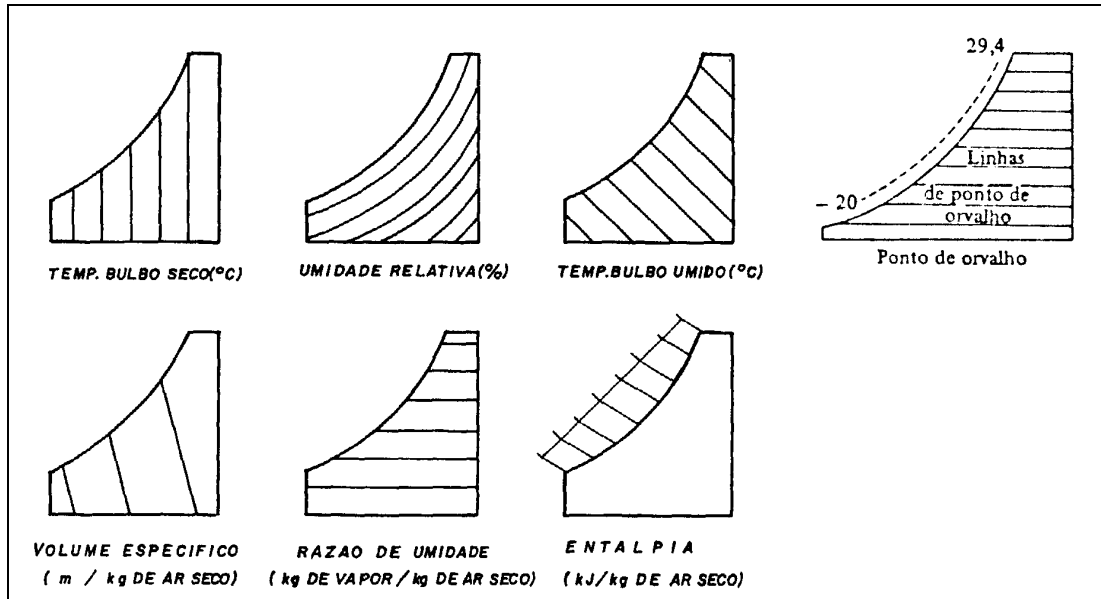


Figura 6 – Diagramas representando as linhas das propriedades do ar

Determinação das Propriedades do Ar

Supondo-se, para efeito de exemplo, que as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido de um determinado ambiente, 25°C e 21°C respectivamente, tenham sido determinadas por meio de um psicrômetro, pode-se obter de uma carta psicrométrica as principais propriedades do ar úmido.

Seja a carta psicrométrica mostrada na Figura 4, Carta Psicrométrica de Carrier, tendo as duas temperaturas acha-se o ponto de interseção das linhas, Figura 7. Seguindo a metodologia de leitura da carta psicrométrica, Figura 6, obtém-se os seguintes valores para as mesmas:

Ponto de Estado	t_{BS} (°C)	t_{BU} (°C)	t_0 (°C)	ϕ (%)	v (m ³ /kg)	x (kg/kg ar)	h (lccal/kg)
Valores	25	21	19,1	70	0,86	0,014	18,8

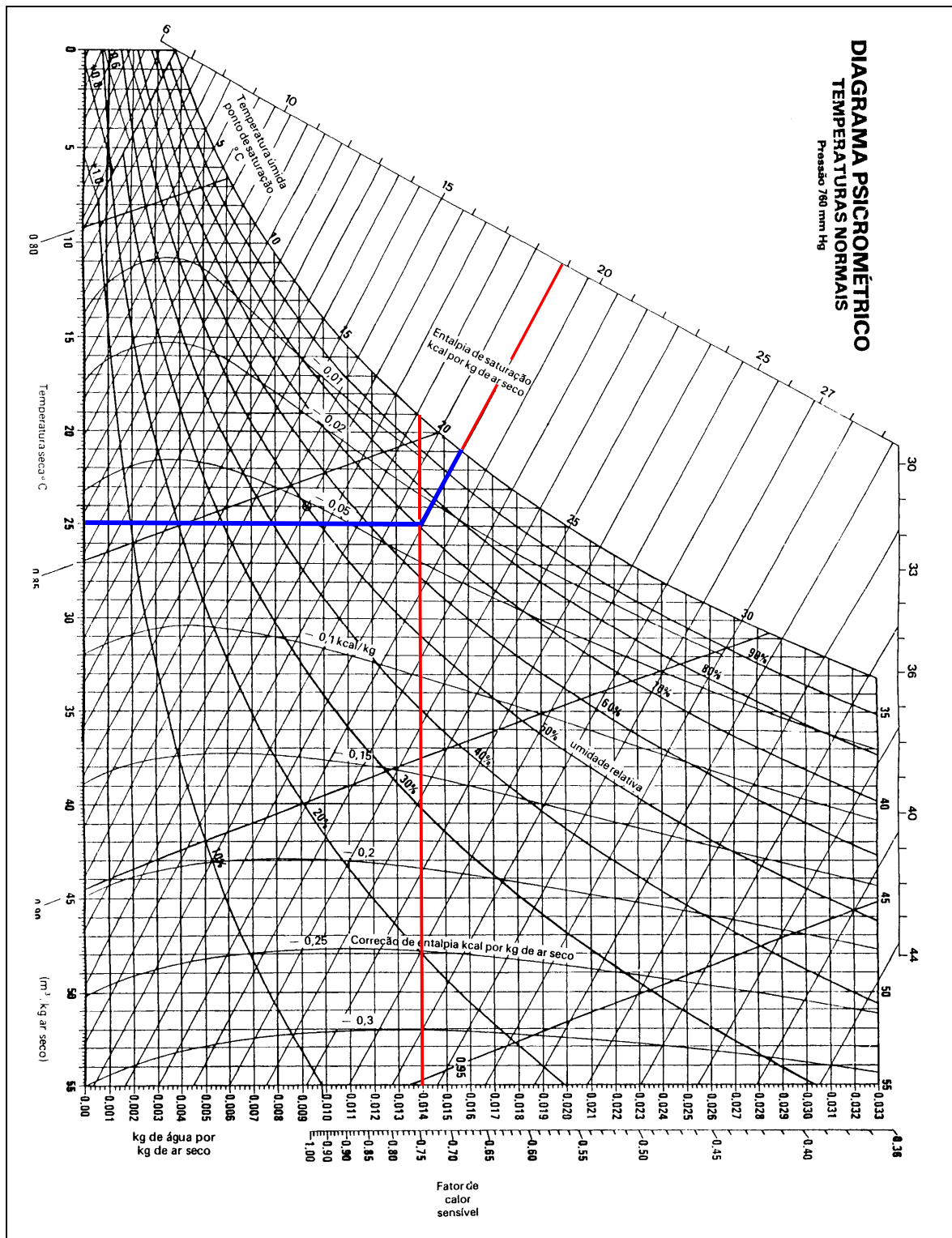


Figura 7 – Propriedades do Ar Úmido em uma condição específica

Processos Psicrométricos

São 06 os processos psicrométricos, a saber:

1. Mistura Adiabática de duas quantidades de Ar Úmido;
2. Aquecimento Sensível (Aquecimento Seco);
3. Resfriamento sem Desumidificação (Resfriamento Seco);
4. Resfriamento com Desumidificação;
5. Resfriamento e Umidificação;
6. Aquecimento e Umidificação.

Mistura Adiabática de duas quantidades de Ar Úmido

A mistura de duas correntes de ar é um processo muito comum em ar condicionado. É muitas vezes utilizado para se obter o ar nas características aceitáveis para um ambiente, i.e., mistura-se uma parte do ar interno (retorno do ambiente), com uma parte de ar externo (higienização). Como o ar interno, de retorno, normalmente está mais próximo das características desejadas para o ambiente, a mistura possibilita uma economia de energia.

A Figura 8 mostra a mistura de \dot{m}_A de ar no estado **A** com \dot{m}_B de ar no estado **B**. A mistura resultante encontra-se no estado **C**, mostrado na Carta Psicrométrica na Figura 9.

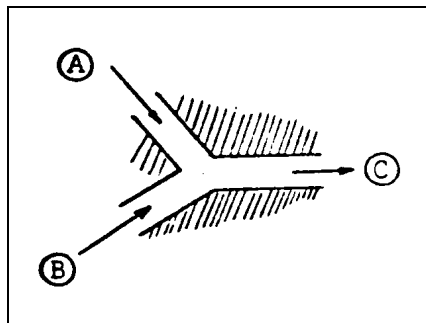


Figura 8 – Mistura de correntes de ar

Sendo:

$\dot{m}_A, \dot{m}_B, \dot{m}_C$ = massa de ar seco respectivamente em A, B, C (kg/s).

x_A, x_B, x_C = razão de umidade em A, B, C (kg/kg).

h_A, h_B, h_C = entalpia específica respectivamente de A, B, C (kcal/kg).

As equações fundamentais a serem aplicadas no processo são:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Pela Continuidade} \left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_A + \dot{m}_B = \dot{m}_C \\ \dot{m}_A x_A + \dot{m}_B x_B = \dot{m}_C x_C \end{array} \right. \\ \text{Pela Conservação da Energia:} \\ \dot{m}_A h_A + \dot{m}_B h_B = \dot{m}_C h_C \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B} = \frac{x_C - x_B}{x_A - x_C} = \frac{h_C - h_B}{h_A - h_C}$$

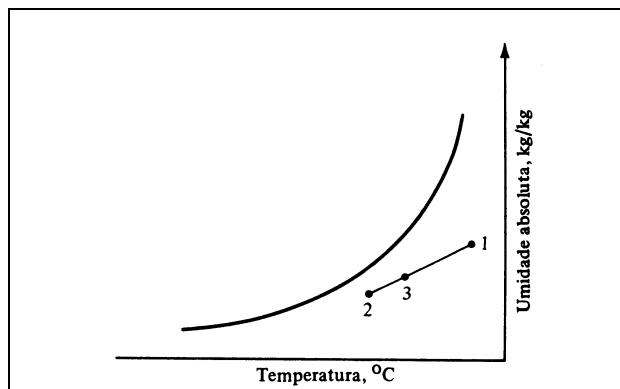


Figura 9 – No Diagrama, a mistura de correntes de ar.

Observa-se que a entalpia final é a média ponderada das entalpias das correntes que se misturam, o mesmo ocorrendo com a razão de umidade (umidade absoluta final) em relação às umidades absolutas das correntes de ar que se misturam. Uma aproximação freqüentemente utilizada é a de que a temperatura resultante é a média ponderada das temperaturas das correntes de entrada.

Sendo adotada esta aproximação, é possível localizar o estado final da corrente de ar na carta psicrométrica sobre o segmento que une os pontos representativos dos estados das correntes de entrada.

Aquecimento Sensível ou Aquecimento Seco

Quando se fornece energia ao ar, a temperatura aumenta, mas a razão de umidade permanece constante, pois não há aumento nem diminuição na quantidade de massa da mistura (ar seco-vapor d'água). Assim, o processo de aquecimento sensível (aumento de temperatura somente) é representado no gráfico por linhas horizontais, paralelas à abscissa, a partir do ponto de estado em que se encontra o ar, Figura 10.

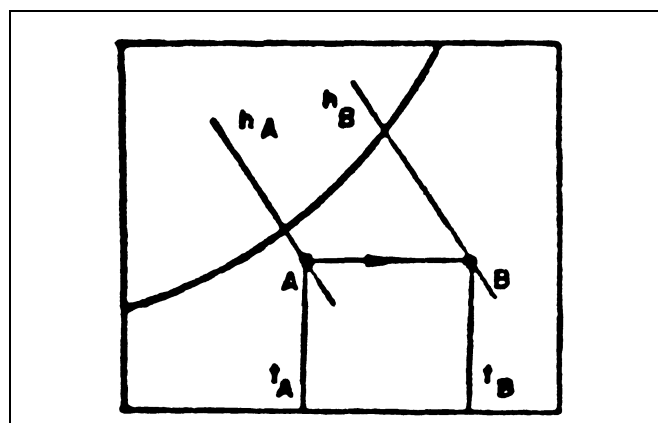


Figura 10 – No Diagrama, o processo de aquecimento seco.

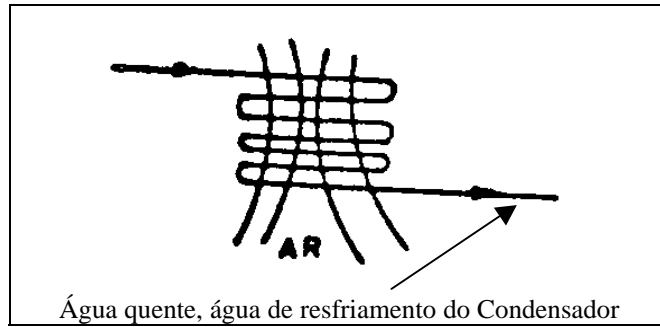


Figura 11 – Esquema básico do processo.

O calor entregue ao ar para que o processo ocorra pode ser calculado pelas seguintes expressões:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot [0,24 \cdot (t_B - t_A) + 0,46 \cdot x \cdot (t_B - t_A)]$$

$$\dot{Q} = 0,24 \cdot \dot{m} \cdot (t_B - t_A)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_B - h_A)$$

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot 0,29 \cdot (t_B - t_A)$$

$$q \rightarrow \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg de ar umido}} \right]$$

$$\text{onde: } \dot{m} \rightarrow \left[\frac{\text{kg de ar umido}}{\text{h}} \right]$$

$$\dot{v} \rightarrow \left[\frac{\text{m}^3 \text{ de ar standard}}{\text{h}} \right]$$

Por “ar standard” entende-se o ar seco a uma pressão de 760 mmHg a uma temperatura de 21,1°C. Nestas condições:

$$v = 0,833 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{ donde } \frac{0,24}{0,833} = 0,29$$

Resfriamento sem Desumidificação ou Resfriamento Seco

A Figura 12, abaixo, demonstra o processo de resfriamento seco na carta psicrométrica.

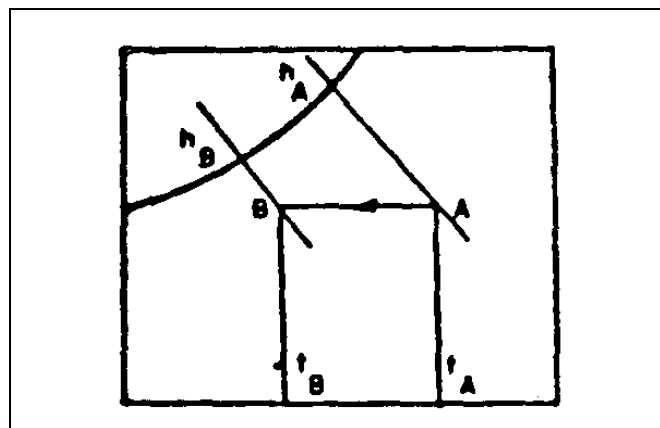


Figura 12 – No Diagrama, o processo de resfriamento seco.

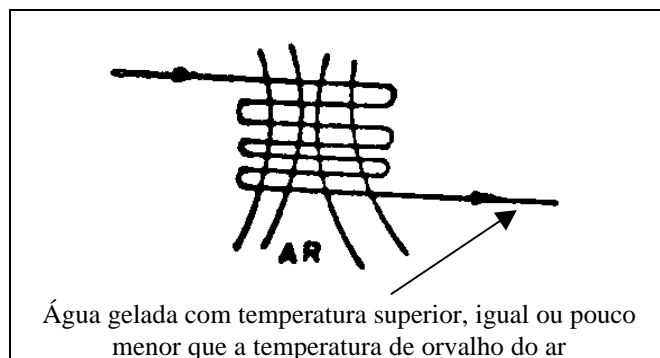


Figura 13 – Esquema básico do processo.

O calor retirado do ar pelo processo pode ser calculado pelas mesmas expressões dadas no caso anterior.

Na Figura 14, o ar com propriedades termodinâmicas no ponto de estado definido por $t_{BS}=25^{\circ}\text{C}$ e $t_{BU}=20^{\circ}\text{C}$ sofre, um processo de aquecimento até a temperatura de 46°C . Em outro processo, o ar do ponto [1] sofre resfriamento até a temperatura de 20°C .

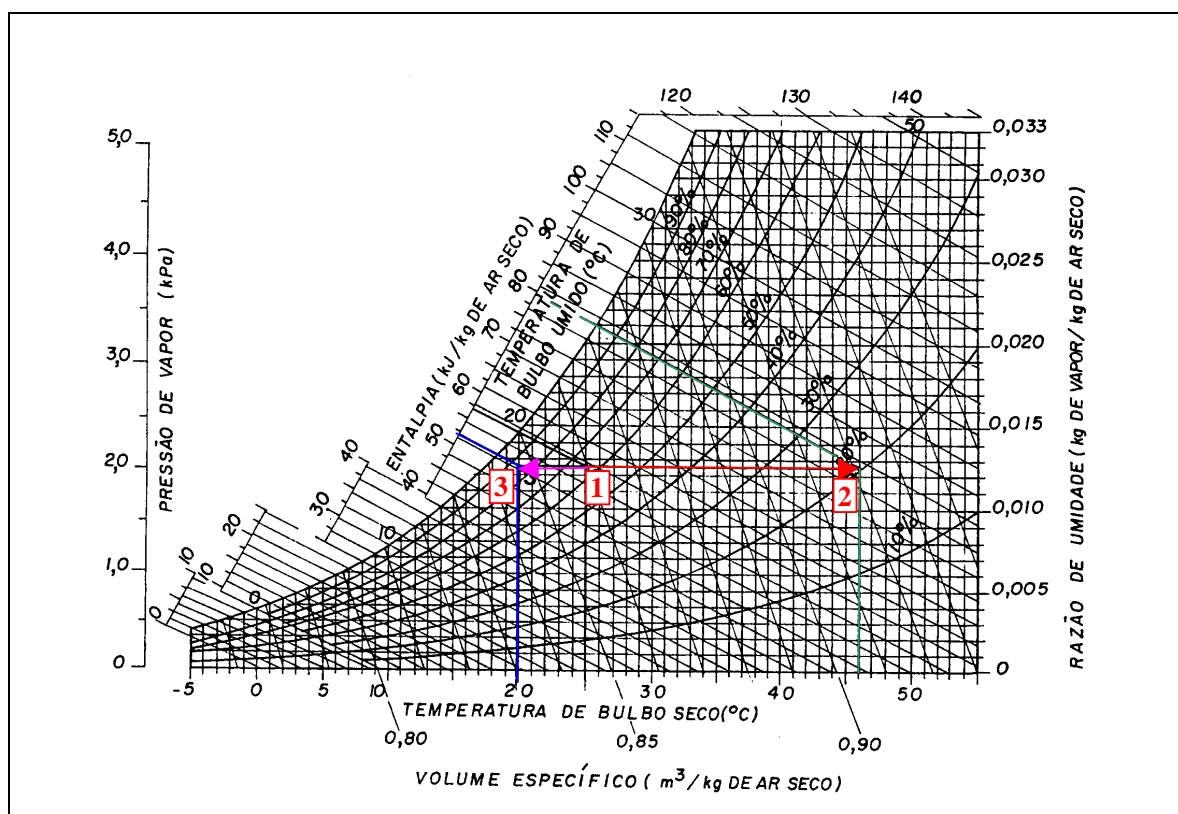


Figura 14 – No Diagrama, o processo de aquecimento seco.

Na estão os valores das propriedades do ar no final dos processos de aquecimento e resfriamento assinalados na Figura 14, acima.

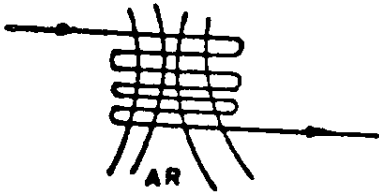
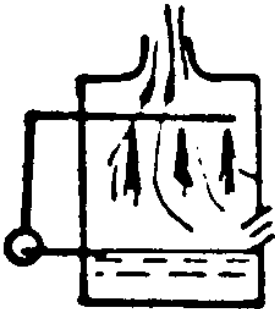
Tabela 4 – Propriedades termodinâmicas do ar nos processos de aquecimento e resfriamento seco

Propriedade	Aquecimento Seco		Resfriamento Seco	
	Ponto de Estado		Ponto de Estado	
	1	2	1	3
t_{BS} (°C)	25,0	46,0	25,0	20,0
t_{BU} (°C)	20,0	26,0	20,0	18,6
ϕ (%)	65,0	20,0	62,0	87,0
P_V (kPa)	2,1	2,1	2,1	2,1
x (kg/kg)	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127
h (kcal/kg)	57,5	80,0	57,5	52,5
v (m ³ /kg)	0,860	0,922	0,860	0,847
t_0 (°C)	17,7	17,7	17,7	17,7

Resfriamento com Desumidificação

No resfriamento do ar, quando se atinge a curva de umidade relativa máxima ($\phi = 100\%$), tem-se o ponto de orvalho. O resfriamento desse ar moverá o ponto de estado sobre a linha de saturação, ocorrendo condensação de parte do vapor d'água presente no ar. Conseqüentemente, a razão de umidade diminuirá.

Tabela 5 – Exemplos de processos de resfriamento com desumidificação

	<p>Água com temperatura inferior ao ponto de orvalho do ar</p>
	<p>Água pulverizada com temperatura inferior ao ponto de orvalho do ar</p>

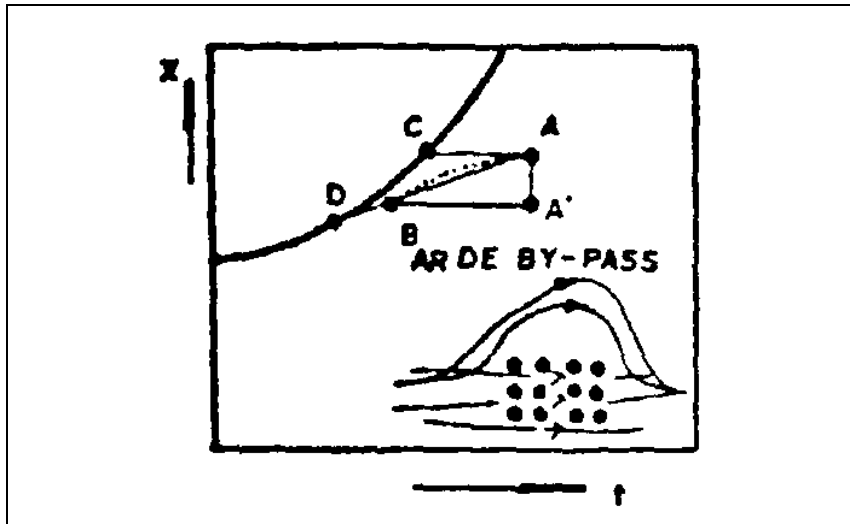


Figura 15 – No Diagrama, o processo de resfriamento com desumidificação.

onde:

t_D = temperatura média da superfície do trocador de calor.

Supondo que somente uma parte do ar tem contato com a serpentina (superfície fria) e que esta parte segue a trajetória **ACD** (Figura 15) adquirindo a temperatura média t_{BSD} da serpentina, no trecho **CD** ocorre a desumidificação. O restante do ar, seguindo um raciocínio simplificado, não entra em contato com a serpentina e, portanto, não sofre transformação alguma. Na saída da serpentina têm-se, então, uma mistura do ar na condição **D** e do ar na condição **A**, sendo esta mistura representada pelo ponto **B**.

A fração de ar que não troca calor com a serpentina é chamada de “ar de bypass”.

O calor retirado pela serpentina nesse processo pode ser calculado da seguinte forma:

$$q_{tot} = q_s + q_l$$

$$q_s = \dot{m}(h_A - h_E) = 0,24\dot{m}(t_A - t_E) \text{ pois } t_A = t_{A'}$$

$$q_l = \dot{m}(h_A - h_{A'}) = 0,595\dot{m}(x_A - x_{A'})$$

$$0,595 = \text{calor latente de vaporização da água em } \left[\frac{\text{kcal}}{\text{gr de vapor}} \right]$$

$$q_{tot} = \dot{m}(h_A - h_E)$$

onde:

$$q_{tot} = \text{calor total } \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right]$$

$$q_s = \text{calor sensível } \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right]$$

$$q_l = \text{calor latente } \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right]$$

$$\dot{m} = \left[\frac{\text{kg de ar umido}}{\text{h}} \right]$$

$$x = \left[\frac{\text{gramas de vapor}}{\text{kg de ar seco}} \right]$$

$$h = \text{entalpia específica } \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg de ar seco}} \right]$$

Fator de Bypass

O Fator de bypass é definido como a relação entre a massa de “ar de bypass” e a massa total de ar que passa pelo trocador de calor, Figura 15.

Este fator depende do n.º de filas, velocidade frontal do ar, etc. O mesmo pode ser demonstrado na Tabela 6 e Tabela 7, abaixo.

Tabela 6 – Fatores de bypass de serpentinas de resfriamento.

Número de Filas	Velocidade Frontal (m/s)			
	1,5	2,0	2,5	3,0
	Fatores de bypass			
1	0,61	0,63	0,65	0,67
2	0,38	0,40	0,42	0,43
3	0,23	0,25	0,27	0,29
4	0,14	0,16	0,18	0,20
5	0,09	0,10	0,11	0,12
6	0,05	0,06	0,07	0,08
7	0,03	0,04	0,05	0,06
8	0,02	0,02	0,03	0,04

- Diâmetro exterior do tubo = 16 mm
- 315 aletas onduladas por metro linear
- relação superfície externa/interna = 12,3

fonte: [2] tabela 16.5, pág. 610

Tabela 7 - Fatores de bypass de serpentinas de resfriamento.

Número de Filas	Velocidade Frontal (m/s)			
	1,5	2,0	2,5	3,0
	Fatores de bypass			
1	0,48	0,52	0,56	0,59
2	0,23	0,27	0,31	0,35
3	0,11	0,14	0,18	0,20
4	0,05	0,07	0,10	0,12
5	0,03	0,04	0,06	0,07
6	0,01	0,02	0,03	0,04

- Diâmetro exterior do tubo = 16 mm
- 552 aletas onduladas por metro linear
- relação superfície externa/interna = 21,5

fonte: [2] tabela 16.5, pág. 610

Fator de Calor Sensível (R)

O Fator de Calor Sensível (R) é definido pela relação entre o calor sensível e o calor total:

$$R = \frac{q_S}{q_{tot}} = \frac{h_{A'} - h_B}{h_A - h_B}$$

onde:

- Ponto **A** - representa as propriedades do ar de bypass
- Ponto **D** - representa as propriedades do ar desumidificado, com $\phi=100\%$, em contato direto com a serpentina de resfriamento
- Ponto **B** - representa as propriedades do ar resultante da mistura de **A** com **D**, ar que sai da serpentina de resfriamento
- Ponto **A'** - representa as propriedades do ar no ponto **B** ao ser aquecido, i.e., ao receber apenas calor sensível
- h_A é a entalpia do ponto **A**
- $h_{A'}$ é a entalpia do ponto **A'**
- h_B é a entalpia do ponto **B**

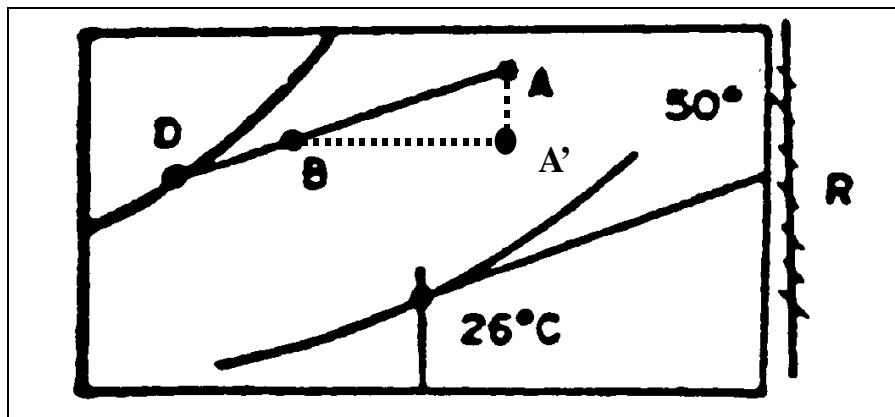


Figura 16 - Fator de Calor Sensível

O Fator de Calor Sensível é particularmente importante para os cálculos de condicionamento do ar e para a seleção dos equipamentos necessários. O significado físico deste fator será demonstrado de forma mais clara pelo seguinte exemplo.

Exemplo:

Para manter um ambiente a 26°C e com 50% de umidade relativa é necessário retirar do mesmo 20.000(kcal/h) de calor sensível e 10.000(kcal/h) de calor latente. A temperatura de bulbo seco do ar insuflado no ambiente é fixado arbitrariamente em 20, 15 e 10°C. Determinar a vazão de ar necessária nos três casos.

Solução:

Podemos chamar t_A a temperatura ambiente, igual a 26°C, e t_1 a temperatura do ar insuflado neste ambiente. Consideremos, para início do cálculo, $t_1 = 20^\circ\text{C}$.

A vazão necessária para absorver um calor sensível de 20.000(kcal/h) pode ser determinado por:

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{Q}}{c_p(t_A - t_I)} = \frac{20.000}{0,24(26 - 20)} = 13.887,5 \left(\frac{kg}{h} \right)$$

Ao mesmo tempo, para que essa vazão possa neutralizar o calor latente do ambiente, é necessário que sua umidade específica seja suficientemente inferior à do ambiente, que é igual a 10,5g de vapor por kg de ar seco.

$$x_{ambiente} = 10,5 \left(\frac{g_{vapor}}{kg_{ar}} \right)$$

Supondo o calor latente de evaporação da água igual a 0,6(kg/gr), verificamos que um calor latente de 10.000(kcal/h) corresponde a $\frac{10.000}{0,6} = 16.666$ gramas de água que devem ser retirados do ambiente.

Chamando $\Delta x \left(\frac{g_{vapor}}{kg_{ar}} \right)$ a diferença de umidade específica entre o ar ambiente e o ar insuflado, deve-se observar:

$$\Delta x = \frac{16.666}{13.887,5} = 1,2 \left(\frac{g_{vapor}}{kg_{ar}} \right)$$

Sobre a Carta Psicrométrica (Figura 17), o ponto que representa o ar insuflado será pois o indicado pela letra C.

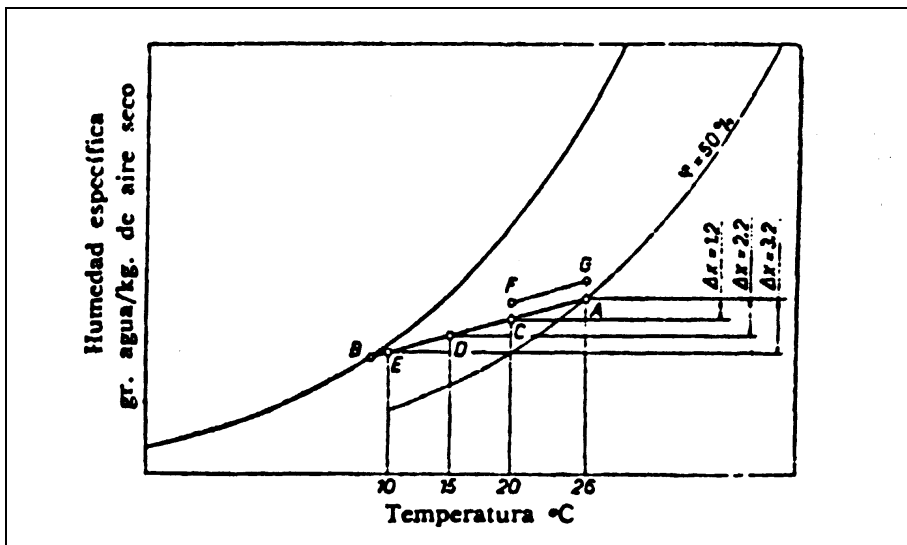


Figura 17 - Fator de Calor Sensível

Repetindo o procedimento indicado para as temperaturas do ar insuflado a 15 e 10°C, obtêm-se os valores da Tabela 8 para cada uma das diferentes grandezas.

Tabela 8 – Propriedades do ar insuflado

t_i (°C) temperatura ar insuflado	$t_A - t_i$ (°C)	\dot{m} (kg/h)	Δx $\left(\frac{g_{\text{agua}}}{kg_{\text{ar}}} \right)$	Ponto no Diagrama
20	6	13.887,5	1,2	C
15	11	7.575,7	2,2	D
10	16	5.208,3	3,2	E

Da tabela, pode-se observar que:

1. Existe um número infinito de condições de ar de insuflamento que neutralizam o calor sensível e o calor latente do ambiente;
2. Todos os pontos representativos das diferentes condições capazes de neutralizar simultaneamente as cargas sensíveis e latentes, e somente eles, se encontram sobre um segmento de reta (**AB**, da Figura 17) que passa pelo ponto indicativo das condições do ambiente.
3. A inclinação do dito segmento de reta é correspondente ao valor do Fator de Calor Sensível ($R = \frac{q_s}{q_{tot}}$) o qual é uma característica do ambiente considerado e definido como Fator Térmico do Ambiente.
4. A vazão de ar será mínima se esse ar é introduzido nas condições do ponto B, interseção da linha de saturação com a reta de inclinação R que passa por A.
5. Se o ar é insuflado, por exemplo, na quantidade que corresponderia ao ponto C, mas na condição F, resultaria um ponto G, com propriedades diferentes do ponto A, desejado.

Resfriamento e Umidificação

A adição de umidade do ar sem que se acrescente energia faz com que o ponto de estado se mova sobre uma linha de entalpia constante (transformação isoentálpica). A transformação ocorre praticamente com temperatura de bulbo úmido constante.

A Figura 18 demonstra um método de se realizar essa transformação. Em A uma vazão de ar não saturado é insuflado em uma cortina de água gelada, saindo mais frio e com a mesma energia (entalpia) inicial.

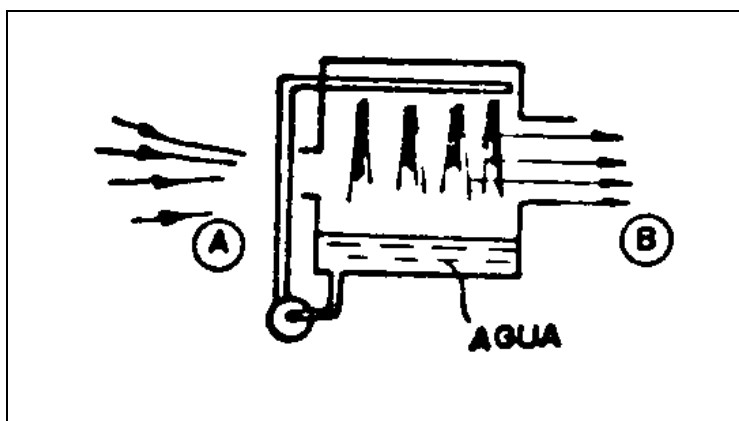


Figura 18 – Exemplo de Processo de Resfriamento e Umidificação

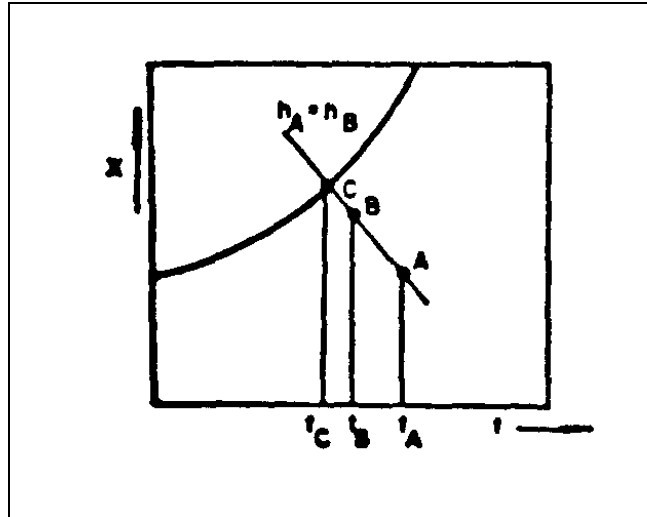


Figura 19 – Processo de Resfriamento e Umidificação

Define-se Eficiência de Saturação a relação:

$$E_S = \frac{(t_A - t_B)}{(t_A - t_C)} \cdot 100$$

onde:

t_A – temperatura de bulbo seco do ar na entrada do processo

t_B – temperatura de bulbo seco do ar na saída do processo

t_C – temperatura de bulbo úmido do ar na entrada, a qual coincidiria com a temperatura de bulbo seco da saída se o ar saturasse completamente

Na prática, se o condicionador é suficientemente grande/potente e possui um mínimo de duas linhas de pulverização, a eficiência da saturação pode alcançar e até superar 92%.

Este processo foi um dos primeiros a ser empregados nas instalações de ar condicionado e é ainda empregado nas indústrias têxteis e, em geral, naquelas que necessitam para seus ciclos de produção uma massa de ar com umidade relativa elevada.

Aquecimento e Umidificação

O ar pode ser aquecido e umidificado simultaneamente se o fizermos passar por um condicionador que contenha uma tubulação que pulverize água quente ou simplesmente mediante uma injeção direta de vapor, Figura 20.

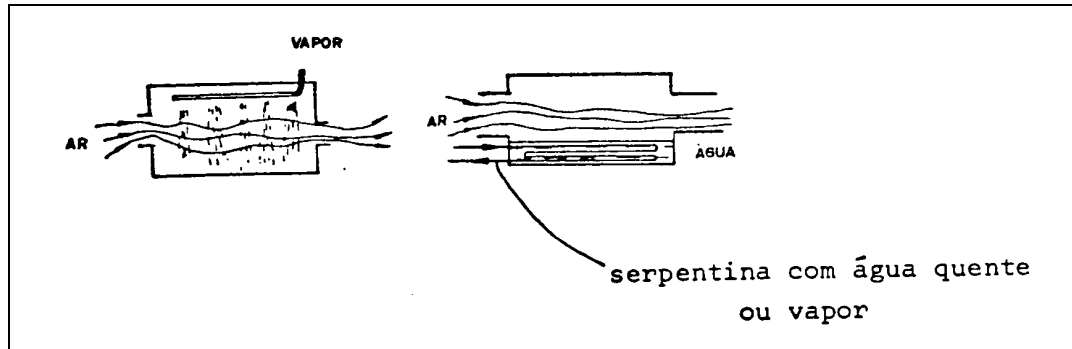


Figura 20 – Exemplo de Processo de Aquecimento e Umidificação

Esse processo é caracterizado por um aumento da entalpia e da razão de umidade do ar tratado. Mas a temperatura de bulbo seco final pode ser menor, maior ou igual a temperatura inicial, em função das temperaturas, o começo do tratamento, do ar e da água e de suas respectivas vazões.

A) Se a vazão de água pulverizada é grande em comparação com a vazão de ar

O ar sai quase saturado e com temperatura próxima a da água. Na Figura 21 estão representados os diversos casos possíveis.

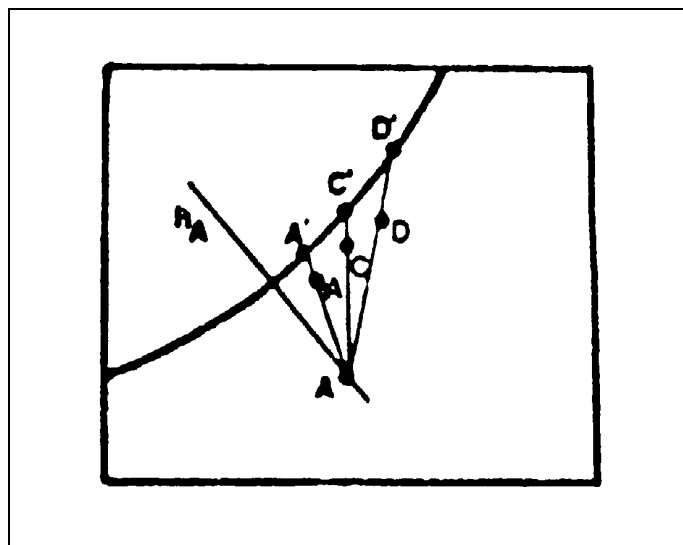


Figura 21 – Processo de Aquecimento e Umidificação

- **AB** representa a transformação sofrida pelo ar no caso da temperatura da água pulverizada ser inferior à temperatura de bulbo seco do ar na entrada.
- **AC** e **AD** representam transformações análogas, onde a temperatura da água pulverizada se encontra, na mesma temperatura de bulbo seco do ar de entrada (AC) e acima desta última (AD).

Como no caso do processo de resfriamento e umidificação (resfriamento adiabático), o ar sairá saturado do condicionador. A capacidade de saturação do ar pode ser expressada da mesma forma que a Eficiência de Saturação.

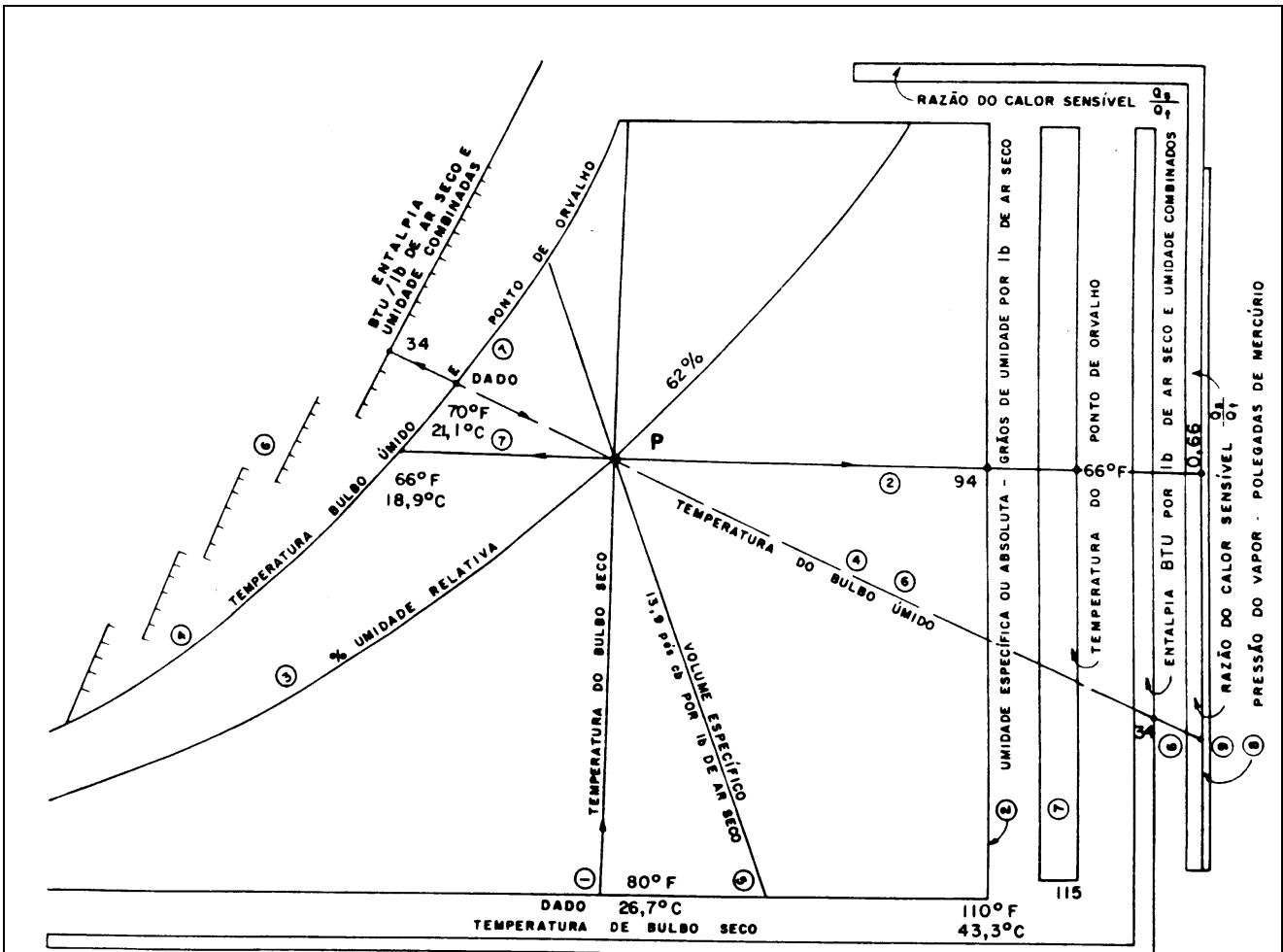
B) Se a quantidade da água pulverizada é relativamente pequena em comparação com a vazão de ar insuflado

A água se esfriará notavelmente em contato com o ar e o processo ocorrerá como representado na Figura 21, pelos pontos **B'**, **C'** e **D'**. Observe-se que o ar resultante não estará saturado, estando com uma umidade relativa próxima dos 90%, dependendo das condições colocadas anteriormente (temperatura água, vazão água, ...).

O processo pode ser também efetuado por uma injeção direta de vapor no ar insuflado, fazendo este último passar sobre uma superfície de água, que é mantida quente por meio de serpentinas por onde circulam vapor de água a temperaturas elevadas ou por meio de resistências elétricas.

Nesse caso, o ponto representativo do ar no diagrama pode ser calculado fazendo-se um balanço de entalpias e razões de umidades.

RESUMO



Indicação quanto ao modo de utilizar a carta psicrométrica da Trane Company.

Consideremos a carta psicrométrica da *Trane Company*

Conhecidas duas grandezas, podem-se, pela carta, achar todas as demais. Na carta encontram-se as seguintes escalas:

- linha de temperatura de bulbo seco; (1)
- linha de umidade específica (grãos de umidade por lb de ar seco); (2)
- linha de umidade relativa (%); (3)
- linha de temperatura de bulbo úmido; (4)
- linha de volume específico (pés cúbicos por lb de ar seco); (5)
- escalas de entalpias (Btu/lb de ar seco e umidade combinadas); (6)
- escala de temperatura do ponto de orvalho; (7)
- escala de pressão de vapor; (8)
- escala de razão entre calor sensível e calor total Q_s/Q_t . (9)

Métodos de Medição de Umidade em Gases¹

1. Introdução

A presença ou ausência de vapor d'água no ar ou em outros gases influencia uma ampla faixa de processos físicos, químicos e biológicos. Desse modo, as medições de umidade são importantes para diversos processos industriais, e para alguns deles são parâmetros críticos que influenciam os custos do processo, a qualidade do produto, a saúde e a segurança.

Existem inúmeras técnicas conhecidas para a medição da umidade. O assunto é também complicado pela confusa variedade de modos de se expressar a umidade. Analogamente ao que ocorre em outros campos da metrologia, a utilização de uma forma consistente e harmonizada de se expressar a medição de umidade tem se tornado cada vez mais importante, do mesmo modo que é necessário um entendimento comum das definições e dos termos utilizados na higrometria.

A umidade é uma quantidade relativamente difícil de ser medida na prática, e a exatidão atingível normalmente não é tão boa quanto as possíveis de serem obtidas em outras áreas da metrologia. Por exemplo, a massa de um objeto pode ser determinada pela pesagem em um laboratório comum dentro de uma parte em 100.000. Analogamente, a pressão atmosférica pode ser freqüentemente medida dentro de 5 partes em 10.000.

A umidade, entretanto, pode ser normalmente medida apenas dentro de 3 partes em 100, ou seja, com uma incerteza no resultado de $\pm 3\%$.

Para se realizar uma medição confiável, em um determinado nível de exatidão, é necessário utilizar uma técnica segura e apropriada. Para isto, necessitamos definir precisamente o objetivo da medição, selecionar um método adequado de medição validado por uma calibração confiável, realizar a medição corretamente sem introduzir erros e, finalmente, interpretar com bom senso o resultado da medição.

2. O que é a Umidade?

A palavra umidade significa a presença de vapor d'água no ar ou em outro gás. O vapor d'água é o estado gasoso da água, e pode ser imaginado como algo similar a qualquer outro tipo de gás. É normalmente transparente, e participa com aproximadamente um centésimo (ou um por cento) no ar ao nosso redor.

A umidade surge na prática porque, do mesmo modo que a água quente emite o vapor característico, a água fria, incluindo-se o gelo, também exala vapor d'água. Onde quer que haja água ou gelo, existe um processo de evaporação, ou seu oposto, a condensação. A intensidade com que isto ocorre depende de uma série de fatores, dos quais o mais importante é a temperatura. De modo análogo, outros líquidos ou materiais sólidos, a maioria dos quais possui alguma água incorporada, também desprendem, ou às vezes absorvem, vapor d'água. É evidente que o vapor d'água também pode ser encontrado em locais onde não existe nenhum líquido ou sólido nas vizinhanças, a exemplo do que ocorre nas camadas remotas da atmosfera terrestre.

O ar possui uma determinada capacidade de absorver o vapor d'água. Como dito anteriormente, esta capacidade depende principalmente da temperatura. Em geral, quanto mais quente o ar, mais vapor d'água ele pode absorver.

Em uma determinada temperatura, o ar que contiver a sua máxima capacidade de absorção de vapor é dito estar saturado. A umidade relativa de uma amostra de ar expressa o seu nível de saturação de vapor d'água. Uma variedade de outros parâmetros (absolutos) são utilizados para expressar a quantidade de vapor presente no ar, independentemente da temperatura ou do nível de saturação.

¹ MERCOFRIO 98 – Feira e Congresso de Ar Cond., Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul
Cláudia dos Santos - claudias@ipt.br - Kazuto Kawakita - kawakita@ipt.br
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - Laboratório de Vazão
São Paulo - SP - Brasil

3. Métodos de Medição de Umidade

Os diferentes parâmetros e unidades utilizadas na medição de umidade são todas interrelacionadas, algumas das quais como funções da temperatura e pressão, e também do teor de umidade contido no gás. Isto significa que existe frequentemente uma opção de escolha para o parâmetro a se medir. A umidade relativa, em particular, pode ser medida diretamente utilizando alguns tipos de instrumentos disponíveis comercialmente.

Entretanto, a mesma pode ser derivada indiretamente, por exemplo, a partir de medições de temperatura e de ponto de orvalho.

Princípios de Operação de Vários Higrômetros

A umidade influencia uma ampla gama de processos físicos, químicos e biológicos. Em decorrência deste fato, existem diversos tipos de efeitos relacionados com a umidade que podem ser explorados para a indicação das mudanças de umidade. A descrição de alguns dos métodos mais importantes para a medição da umidade em gases são fornecidos a seguir.

Higrômetros Mecânicos

Os higrômetros mecânicos exploram as propriedades de expansão e de contração de materiais orgânicos conforme as variações de umidade. O elemento sensor pode ser confeccionado a partir do cabelo humano, catgut (material utilizado em cordas de violino, raquetes de tênis, etc.; obtido através da torção de intestinos de ovelhas e outros animais), tecidos e plásticos.

Psicrômetros de bulbos seco e úmido

Um psicrômetro de bulbos seco e úmido é constituído de um par de sensores de temperatura sobre os quais o ar é forçado a escoar. Um dos sensores é inserido em um meio poroso (uma mecha ou tecido), o qual é mantido úmido pela ação de capilaridade a partir de um reservatório de água.

A água se evapora da mecha a uma taxa específica e dependente da umidade do ar, sendo que este processo de evaporação faz com que o sensor seja resfriado. As temperaturas dos sensores, denominadas de temperaturas de bulbo seco e úmido são utilizadas no cálculo da umidade do ar. A umidade, nesse caso, pode ser determinada tanto através de programas de cálculo quanto através de tabelas como as da BS 4833: 1986 (1992) Hygrometric tables for use in the testing and operation of environmental enclosures. Alguns tipos de psicrômetros são equipados com uma eletrônica que calcula automaticamente a umidade a partir das medições de temperatura de tal modo a que a umidade relativa ou o ponto de orvalho possam ser lidos diretamente no display do instrumento.

Para que o princípio no qual se baseia a operação deste tipo de medidor de umidade seja plenamente utilizado, é recomendável que o mesmo possua incorporado um pequeno ventilador para promover a aspiração do ar, a uma determinada velocidade, sobre os sensores úmido e seco. Outras formas de medidores, a exemplo do psicrômetro não-aspirado de Mason, ou mesmo o psicrômetro manual giratório (conhecido também por reco-reco), são menos eficazes na utilização do princípio descrito e, desse modo, estão mais propensos a fornecer medições errôneas da umidade.

Medidores por Impedância Elétrica (Capacitivos ou Resistivos)

O sensor utilizado neste tipo de medidor é fabricado a partir de um material higroscópico, cujas propriedades elétricas se alteram na medida em que o mesmo absorve as moléculas de água. As mudanças na umidade são medidas em termos de alterações na capacitância ou resistência elétrica do sensor, ou mesmo na combinação das duas. A maioria dos sensores de impedância modernos utilizam a tecnologia de filmes finos. Os higrômetros elétricos são normalmente portáteis e compactos, sendo que a forma mais usual deste instrumento é composta de uma pequena sonda ligada por meio de um cabo, ou mesmo conectada diretamente ao corpo principal do medidor.

Existem atualmente disponíveis sondas de perfil especial para aplicações particulares. Estas sondas são normalmente equipadas com uma espécie de filtro para protegê-las de contaminações, apesar de que esta proteção pode prejudicar o tempo de resposta do sensor. Os higrômetros de impedância são normalmente equipados também com um sensor de temperatura. As leituras são fornecidas diretamente em um display, algumas vezes com a possibilidade de escolha do parâmetro desejado (P.e. umidade relativa ou ponto de orvalho), e podendo inclusive dispor de uma saída na forma de um sinal elétrico proporcional.

Sensores Capacitivos

Respondem mais efetivamente à umidade relativa do que ao ponto de orvalho, apresentando uma melhor linearidade em baixas umidades relativas. Em geral os sensores capacitivos não sofrem danos pela condensação (100% de umidade relativa), contudo, se isto ocorrer, a calibração pode apresentar um desvio.

Sensores Resistivos

Analogamente aos sensores capacitivos, respondem mais efetivamente à umidade relativa do que ao ponto de orvalho. Por outro lado, apresentam uma melhor linearidade em umidades elevadas. A maioria dos sensores resistivos não toleram a condensação sobre o elemento sensor. Entretanto, alguns modelos possuem dispositivos de proteção que evitam a condensação, por exemplo através de um aquecimento automático do sensor.

Um tipo específico de sensor resistivo é por vezes referido como “Eletrolítico” devido ao uso de um polieletrólito como elemento higroscópico do sensor. Entretanto, este sensor não deveria ser confundido com os sensores eletrolíticos que utilizam a eletrólise como mecanismo sensor.

Sensores de Ponto de Orvalho por Impedância

São um caso especial dos higrômetros de impedância, utilizados mais para a medição em unidades absolutas do que em termos da umidade relativa. Seguindo um princípio geral similar, o sensor pode ser composto de óxido de alumínio ou de outros metais, ou mesmo uma base de silicone para o elemento ativo. Este tipo de sensor responde à pressão parcial do vapor. Normalmente, o sinal é convertido em outras unidades absolutas, resultando em valores apresentados pelo instrumento em termos de ponto de orvalho ou ppmv (parte por milhão em volume). Estes medidores podem apresentar uma ampla faixa de medição, incluindo-se gases muito secos.

Higrômetros por Condensação

A temperatura de ponto de orvalho pode ser medida através do resfriamento gradual de uma amostra do gás até que ocorra a condensação do vapor d’água, e observando a temperatura em que isto ocorre.

Em um higrômetro de ponto de orvalho óptico, a condensação do vapor d’água no forma de orvalho ou gelo é induzida a ocorrer sobre a superfície de um pequeno espelho dentro do instrumento. O início da condensação é detectado opticamente pela ocorrência de alterações no modo em que o espelho reflete ou espalha um feixe de luz incidido sobre o mesmo. A leitura pode ser registrada no instante da condensação, ou o espelho pode ser mantido àquela temperatura possibilitando que uma série de leituras seja obtida. Os projetos e concepções utilizados variam, alguns apresentando o sensor incorporado em uma espécie de sonda, e outros fazendo a amostragem do ar através de um tubo. Enquanto que as sondas podem ser razoavelmente compactas, o corpo principal do medidor é relativamente grande e não portátil. As leituras são apresentadas na forma de temperatura de ponto de orvalho, possuindo também uma saída eletrônica do sinal.

Outros sensores de ponto de orvalho não-ópticos detectam a condensação eletricamente, ou através de outros métodos tal como a mudança na frequência de ressonância de um cristal de quartzo.

Higrômetros de Cloreto de Lítio Saturado

O elemento sensor, que é um sal higroscópico, absorve o vapor d'água do ar. Uma tensão elétrica é aplicada através do sal e uma corrente proporcional atravessa o mesmo de acordo com a quantidade de vapor d'água que foi absorvida. No mesmo instante, a corrente elétrica também aquece o sal. Ao final, é alcançado um balanço entre a absorção e o aquecimento. A temperatura em que este equilíbrio ocorre é, então, relacionada com a pressão de vapor d'água. O instrumento é normalmente disponível na forma de uma sonda, com as leituras apresentadas na forma de ponto de orvalho.

Eletrolítico (pentóxido fosforoso)

O sensor consiste de um filme de um poderoso secante, pentóxido fosforoso (P₂O₅), que absorve fortemente o vapor d'água contido no gás ao seu redor. Uma tensão elétrica é aplicada através do P₂O₅, o que provoca a eletrólise, dissociando a água em seus constituintes - hidrogênio e oxigênio. A corrente que flui neste processo é relacionada, através da Lei de Faraday, à quantidade de água eletrolisada. Assim, o valor da corrente é utilizado como indicador da umidade do gás que está sendo medido. Estes sensores são adequados à medição de umidades bastante baixas, embora eles exijam que a vazão do gás seja estável e determinada. Este instrumento mede a concentração de água por unidade de volume, com as leituras apresentadas em uma das unidades absolutas, tais como partes por milhão por volume ou pressão de vapor. Eles são normalmente mais utilizados na configuração de amostragem do gás por meio de um tubo, do que na forma de uma sonda.

Higrômetros Espectroscópicos

Em geral, uma técnica espectroscópica é aquela onde a composição de uma mistura de gás é determinada através da análise do modo como as substâncias absorvem ou emitem luz de comprimentos de onda e frequências particulares. Toda substância química possui uma banda de frequências característica, e ela pode estar nas faixas do ultravioleta ou do infravermelho do espectro. A técnica espectroscópica pode ser uma alternativa útil se for necessária a medição das concentrações de outras substâncias, além da do vapor d'água.

A técnica espectroscópica utilizada tanto para as umidades altas quanto para as moderadas é baseada na absorção infravermelha. A água absorve a radiação infravermelha em vários comprimentos de onda na faixa de 1mm a 10mm. A intensidade da radiação transmitida é mediada em um destes comprimentos de onda e comparada com aquela obtida para um comprimento de onda de referência, utilizando uma fotocélula para detecção. A quantidade desta radiação absorvida pelo gás é proporcional à concentração espacial (ou pressão parcial) do vapor d'água.

As técnicas espectroscópicas podem ser também utilizadas para a medição de concentrações extremamente baixas de vapor d'água, da ordem de algumas partes por bilhão (ppb). Existem várias versões desta tecnologia sofisticada, incluindo-se a APIMS (atmospheric pressure ionisation mass spectrometry), a FT-IR (Fourier-transform infrared spectroscopy), e a TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy). Medidores de Umidade por Mudança de Cor Existem indicadores de umidade que indicam as mudanças de umidade através de alterações na cor de uma tira de papel ou de outro material. O material sensor é impregnado com cloreto de cobalto, e a mudança de cor ocorre como resultado de uma reação química da umidade com esta substância química. Outras técnicas de medição baseadas na alteração de cor envolvem o bombeamento de gás através de uma pequena garrafa recheada com cristais que mudam de cor de acordo com a umidade do gás.

Outros Métodos

Obviamente, a relação apresentada está longe de ser completa. Outros métodos e princípios que têm seus usos em aplicações particulares incluem:

Acústico

A alteração da velocidade de transmissão do som no ar (ou em outros materiais) pode ser um indicador da umidade.

Expansão Adiabática

O efeito do resfriamento do ar em uma expansão produz uma névoa se a temperatura de ponto de orvalho for alcançada.

Gravimétrico

Baseia-se na pesagem da umidade absorvida por um material. Lyman-alpha. A absorção e emissão de luz ultravioleta pelo ar é um indicativo da pressão parcial do vapor d'água.

Fibra Óptica

A perda ou reflexão da luz pelas camadas da fibra indicam alterações na umidade. Índice de Refração Óptica. A velocidade da luz no ar depende de sua composição, incluindo o vapor d'água.

Piezoelétrico (oscilador de quartzo)

A frequência de ressonância de um cristal de quartzo indica a massa de água que ele absorveu do ar.

Ponte Pneumática

A pressão do vapor d'água é determinada a partir da mudança na pressão global quando a pressão de vapor é removida.

Condutibilidade Térmica

A perda de calor a partir de um fio quente é afetada pelo vapor d'água e pelos demais gases constituintes.

Variação Térmica.

Calor de adsorção ou deadsorção da água a partir de um secante.

Zircônia

O vapor d'água é detectado pela medição do teor de oxigênio no gás, e comparando-o com uma quantidade de referência de oxigênio.

Alguns dos métodos apresentados anteriormente também se aplicam à medição de umidade em sólidos e líquidos.

A Tabela 1 apresenta simplificada uma visão geral das características dos principais tipos de higrômetros. Na mesma, são fornecidas indicações gerais das propriedades dos diferentes métodos. As notas entre colchetes fornecem informações adicionais, ou características que nem sempre são disponíveis. Evidentemente, os fabricantes de instrumentos ou os fornecedores deveriam ser consultados no caso da necessidade de detalhes específicos, principalmente porque as tecnologias estão em contínuo desenvolvimento. São fornecidas igualmente as incertezas para os diferentes tipos de instrumentos. Em casos excepcionais, os instrumentos podem apresentar um desempenho por vezes melhor do que os indicados aqui. Em outros casos, contrariamente, eles podem se comportar de uma maneira inferior do que a pior estimativa apresentada na tabela, devido às circunstâncias particulares de cada aplicação.

Tabela 1. Resumo de algumas características dos principais princípios de medição de umidade.

Tipo de Sensor	Umidade absoluta ou relativa	Faixas típicas de operação (faixas ampliadas entre parênteses)		Unidades típicas de indicação	Tolerância à contaminação ⁽²⁾ (após a limpeza entre parênteses)	Configuração, tipo de amostragem	Melhor incerteza típica de amostragem ⁽³⁾ (±)
		Umidade	Temperatura ⁽¹⁾				
Mecânico	R	20% a 80% UR	Próxima à temperatura ambiente	%UR	***	Totalmente imerso	5 – 15%UR
Psicrômetro aspirado de bulbos seco e úmido	R	5% a 100% UR	0°C a 100°C (também utilizável além desses limites)	%UR (calculada a partir das temperaturas lidas)	* (**)	Totalmente imerso (ou por amostragem)	2 – 5%UR
Resistivo	R	5% a 95% UR (até 99% UR)	-30°C a +60°C (-50°C a 200°C)	%UR	**	Sonda (ou totalmente imerso)	2 – 3%UR
Capacitivo	R	5% a 100% UR (até próximo de 0% UR)	-30°C a +60°C (-40°C a 200°C)	%UR	**	Sonda (ou totalmente imerso)	2 – 3%UR
Ponto de Orvalho – por impedância	A	Ponto de orvalho de -85°C (ou inferior) a +60°C	Até +60°C Evitando-se a saturação	Ponto de orvalho, pressão de vapor	**	Sonda	2 – 5°C
Ponto de Orvalho – por condensação	A	Ponto de orvalho abaixo de -85°C a +100°C	-85°C a +100°C (equipamento à temperatura ambiente)	Ponto de orvalho	* (**)	Amostragem de gás (ou sonda)	0,2 – 1,0°C
Ponto de Orvalho – por Cloreto de Lítio	A	Ponto de orvalho de -45°C a +60°C Sempre o gás acima de 11%UR e não saturado	-20°C a +60°C (alguns operam de -40°C a +100°C)	Ponto de orvalho	*	Sonda	2 – 4°C
Eletrolítico – Pentóxido Fosforoso	A	Menos que 1ppm _v a 1000ppm _v	Próxima à temperatura ambiente	ppm _v ou pressão de vapor	*	Amostragem de gás	3 – 10% da leitura
Espectroscópico	A	Faixa extremamente ampla, dependendo do tipo	Faixa bastante ampla (equipamento à temperatura ambiente)	ppm _v (e outros)	***	Amostra de gás (amostragem na linha de visão em alta umidade)	3 – 10% da leitura em altas umidades, muito maior em baixas umidades
Varição de cor	R	20%UR a 80%UR	Próxima à temperatura ambiente	%UR	**	Cartão de teste em papel (ou gás bombeado em garrafa de vidro)	10 – 20%UR

(1) Quando as faixas de temperatura são fornecidas, elas se referem às faixas de operação para a medição de umidade, e não às faixas de operação de algum tipo de sensor de temperatura eventualmente incorporado ao medidor.

(2) A tolerância geral de contaminação é indicada através de asterísticos: [* * *] para uma boa tolerância, [* *] para uma média e [*] para uma tolerância pobre.

(3) As incertezas indicativas assumem uma calibração rastreada e não incluem qualquer contribuição que poderia advir de uma utilização inadequada do medidor. As incertezas são fornecidas a um nível de confiança de aproximadamente 95% (i.e. um fator de abrangência $k = 2$).

4. Vantagens e Limitações

A seguir estão listadas algumas das vantagens e desvantagens de cada um dos principais métodos de medição de umidade apresentados.

Higrômetros Mecânicos

São adequados à medição das condições normalmente presentes dentro de laboratórios e ambientes fechados em geral.

- + Alguns modelos não necessitam de alimentação ou baterias.
- + Os termohigrógrafos permitem o registro permanente em carta.
- + Podem ser relativamente mais baratos.
- Apresentam uma resposta lenta a mudanças na umidade.
- Podem sofrer de histerese.
- Podem se descalibrar devido a vibrações e movimentações.

Psicrômetros de bulbos seco e úmido

Indicados para ambientes com espaço relativamente grande e umidades médias e elevadas.

- + São normalmente simples, baratos, confiáveis e robustos.
- + Podem apresentar uma boa estabilidade.
- + Atendem uma ampla faixa de umidades.
- + Toleram altas temperaturas, e até mesmo a condensação.
- Exige alguma habilidade para o seu uso e manutenção.
- Resultados podem exigir cálculos, exceto nos automáticos.
- A medição requer uma amostra relativamente grande de ar.
- A amostra será umidificada pela água evaporada.
- Impurezas no ar ou na água podem contaminar a mecha, exigindo limpezas e trocas regulares.
- As medições podem ser complicadas abaixo de cerca de 10°C, pela dúvida entre a presença de água ou de gelo sobre a mecha quando a temperatura da mesma cai abaixo de 0°C.
- Os psicrômetros do tipo manual giratório e os não-aspirados são mais propensos a medições errôneas da umidade.

Medidores por Impedância Elétrica (Capacitivos ou Resistivos)

Os sensores resistivos e capacitivos são utilizados para uma variedade de aplicações, normalmente em condições ambiente, incluindo-se a utilização para o controle de sistemas de ar condicionado e outros processos. Alguns tipos podem ser utilizados em condições mais extremas. Os medidores de ponto de orvalho são distintos de outros neste grupo, uma vez que eles cobrem níveis de umidade muito mais baixos, fornecendo leituras em valores absolutos, e são utilizados no controle e monitoração de gases relativamente secos.

No geral, os sensores por impedância elétrica são:

- + Normalmente, fáceis de utilizar.
- + Disponíveis com memória integral para armazenamento de dados.
- Podem apresentar desvios na calibração se utilizados a altas temperaturas (acima de 40°C) e/ou em altas umidades (o desempenho pode variar).
- Podem sofrer desvios e histereses.
- Podem ser danificados por agentes químicos agressivos.

Sensores capacitivos, em particular,

+ Normalmente toleram a condensação, embora a calibração possa desviar.

Sensores resistivos, em particular,

- Podem ser inutilizados pela condensação, embora alguns modelos possuam o sensor protegido.

Sensores de ponto de orvalho por impedância, em particular,

+ Normalmente, toleram a condensação, embora a calibração possa desviar.

+ Podem apresentar uma ampla faixa de medição.

- Podem ter um ajuste lento em baixas umidades absolutas.

- Apresentam alguma tendência ao desvio.

Higrômetros por Condensação

Os higrômetros ópticos de ponto de orvalho são freqüentemente utilizados como padrões de referência em calibrações, em uma ampla faixa umidades.

+ Podem proporcionar medições com baixa incerteza.

+ Geralmente apresentam bom desempenho a longo termo.

+ Possuem uma ampla faixa de medição.

- Estes higrômetros são relativamente caros.

- Normalmente, requerem alguma habilidade para a operação.

- A contaminação do espelho pode ocasionar leituras incorretas.

- O espelho deve ser limpo com água purificada.

- As medidas de temperatura de ponto de orvalho com valor abaixo de 0°C exigem uma interpretação cuidadosa, a fim de verificar se o condensado é gelo ou água.

Higrômetros de Cloreto de Lítio Saturado

Utilizam um método conhecido já há longo tempo e historicamente utilizado para a medição de uma ampla faixa de condições ambientais.

+ Podem ser relativamente baratos.

- Não conseguem medir umidades abaixo de 10% UR.

- Não toleram a condensação.

- Apresentam resposta lenta.

- Sofrem contaminação de materiais higroscópicos ou solventes.

- Exigem alguma habilidade, especialmente para a manutenção.

Eletrolítico (pentóxido fosforoso)

Analogamente, utilizam um método conhecido já a longo tempo e utilizado em ambientes secos.

+ São compatíveis com alguns gases corrosivos.

+ Podem apresentar boa sensibilidade.

- As células de medição possuem uma vida limitada, após a qual elas devem ser regeneradas e recalibradas.

- O controle da vazão do gás amostral é crítico.

- São danificados pela exposição à umidade ambiente, e por vezes a umidades excessivamente baixas (abaixo de 1ppmv).

- Apresentam uma resposta lenta nas umidades mais baixas.

- Hidrocarbonetos, butadeína, amônia e alguns outros contaminantes impedem uma operação adequada.

- Adiciona alguns traços de hidrogênio e oxigênio na amostra de gás, que podem se recombinar, ocasionando erros.

Higrômetros Espectroscópicos

Ampla faixa de utilização, indo desde a medição de umidade de gases em fornos e processos de combustão até a medição de traços de componentes em processos envolvendo gases de alta pureza.

- + Adequado ao uso com quase qualquer tipo de gás, inclusive os corrosivos e reativos.
- + Pode ser utilizado para a medição de concentrações de outras substâncias ao mesmo tempo.
- + Consegue medir a umidade em gases a altas temperaturas.
- + Princípio de medição sem contato.
- + Resposta rápida.
- + Alta sensibilidade.
- Utiliza tecnologia sofisticada.
- É relativamente caro.
- É difícil de calibrar.
- Dióxido de carbono pode interferir na medição da umidade se presente em alta concentração.

O higrômetro espectroscópico por absorção infra-vermelha em particular é utilizado em processos industriais onde o ambiente pode ser sujo, com alto teor de umidade, e em altas temperaturas.

- + Pode ser projetado para utilização em ambientes hostis.

Outros métodos espectroscópicos como o APIMS, o FT-IR e o TDLAS podem ser também utilizados para a medição de concentrações extremamente baixas de vapor d'água, da ordem de algumas partes por bilhão (ppb).

- + Podem medir concentrações bastante baixas de vapor d'água.
- Exige um percurso longo da amostra para uma sensibilidade adequada em níveis baixos de umidade.

Medidores de Umidade por Mudança de Cor

Utilizados principalmente de uma forma visual expositiva como indicadores de umidade montados em paredes.

- + Não necessitam de nenhuma bateria ou alimentação elétrica.
- + Podem ser facilmente observados.
- + São baratos e simples.
- Proporcionam apenas uma indicação grosseira da umidade.
- São difíceis de calibrar.

5. Seleção de um Tipo de Higrômetro

A fim de assegurar a “adequação à finalidade” é necessário, antes de tudo, estabelecer com clareza qual é a finalidade da medição. A realização de uma medição da umidade é realmente necessária? Se sim, qual será o seu uso, negócios ou processo? Para serem úteis, como os resultados deveriam ser expressos? A medição visa atender uma necessidade prática, ou objetiva cumprir uma especificação documentada, e se for este o caso, a especificação é significativa e realística? Uma vez que a necessidade e o objetivo de se realizar a medição estão claros, é importante decidir quais fatores são relevantes para se atingir tal objetivo.

Para isto, o usuário deveria considerar as seguintes questões. Qual a unidade ou a escala de medição a utilizar? O parâmetro de interesse pode ser umidade relativa, ponto de orvalho, ou alguma outra medida de concentração de vapor d'água.

É geralmente melhor selecionar um método de medição que intrinsecamente detecta o parâmetro de interesse. Muitos higrômetros fornecem os resultados em termos de dois ou mais parâmetros de umidade. Isto freqüentemente é útil, mas deveria ser entendido que normalmente somente um parâmetro está sendo medido, e os outros valores são resultantes de conversões numéricas. Devido a isto, o que se espera é que um instrumento possa fornecer uma indicação confiável de apenas um dos parâmetros apresentados.

Além disso, na seleção de um medidor, outros fatores também devem ser considerados a exemplo da faixa de operação, do desempenho, tipo de indicação e sinal de saída, facilidade de utilização, materiais construtivos, etc..

6. Calibração de Higrômetros

Os critérios de desempenho de um instrumento devem ser descritos em termos de uma especificação técnica adequada. Isto determinará os limites dentro dos quais pode se esperar um comportamento condizente do instrumento. Por exemplo, se um medidor possui uma especificação indicando uma incerteza de $\pm 3\%$ da leitura, então o usuário pode de certa forma esperar que, se o instrumento for utilizado corretamente, o valor de umidade que ele indicar estará correto dentro de $\pm 3\%$ da leitura. Entretanto, não podemos confiar neste desempenho a não ser que o mesmo seja verificado através de uma calibração do instrumento. Uma especificação não é a mesma coisa de uma calibração, e também nunca a substitui.

A calibração é um processo de comparação de um instrumento de medição contra um padrão para o mesmo tipo de medição, cuja finalidade é identificar eventuais desvios ou erros sistemáticos nas leituras. O resultado de uma calibração é normalmente resumido em um certificado de calibração, listando quaisquer correções que necessitam ser aplicadas aos valores indicados pelo instrumento, juntamente com a estimativa da incerteza da calibração, e outras informações relevantes.

A rastreabilidade a padrões reconhecidos é a melhor maneira de assegurar a exatidão das medições, e ela proporciona a consistência das medições entre usuários em diferentes épocas e locais. Uma medição rastreável é aquela que pode ser relacionada a padrões de medição apropriados, geralmente nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações..

7. Referências

BS 4833: 1986 (1992), Hygrometric tables for use in the testing and operation of environmental enclosures.

Santos, C. e Kawakita, K., 1992, Introdução a medição e controle da umidade através de higrômetros mecânicos, The Institute for Measurement and Control, 1996, A guide to the measurement of humidity.

Equações Psicrométricas²

O diagrama psicrométrico é meio muito conveniente de se determinar as relações entre a água e o ar, no entanto, algumas vezes é necessário se calcular estas propriedades usando equações. Muitas equações são publicadas visando expressar essas relações. Segue-se um conjunto de equações publicadas pela [ASAE](#) – American Society of Agricultural Engineers e pela [ASHRAE](#) – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Notação Utilizada

h	Entalpia da mistura ar-vapor d'água (J/kg)
h_{FG}	Calor latente de vaporização na saturação (J/kg)
h_{FG1}	Calor latente de vaporização da água a T_{WB} (J/kg)
h_{FG2}	Calor latente de vaporização da água a T_{DP} (J/kg)
h_{IG}	Calor de sublimação do gelo (J/kg)
h_{IG1}	Calor de sublimação do gelo a T_{WB} (J/kg)
h_{IG2}	Calor de sublimação do gelo a T_{DP} (J/kg)
H	Razão de umidade ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar seco}}$)
P_{ATM}	Pressão atmosférica (Pa)
P_{VS}	Pressão de saturação do vapor a T (Pa)
P_{SWB}	Pressão de saturação do vapor a T_{WB} (Pa)

² <http://aeserver.ageng.ndsu.nodak.edu/envr/PsycEqns.htm>

P_V	Pressão do vapor (Pa)
RH	Umidade relativa (decimal)
T	Temperatura de bulbo seco (K)
T_{DP}	Temperatura de orvalho (K)
T_{WB}	Temperatura de bulbo úmido (K)
V_{SA}	Volume específico do ar ($m^3/kg_{ar\ seco}$)
W	Razão de umidade ($kg_{água}/kg_{ar\ seco}$)
W_S	Razão de umidade na saturação ($kg_{água}/kg_{ar\ seco}$)
t^*	Temperatura termodinâmica de bulbo úmido ($^{\circ}C$)
h^*	Entalpia na temperatura de bulbo úmido (kJ/kg)
Ra	Constante do gás para o ar $Ra = 287,055$ (J/kg.K)

As equações seguintes foram publicadas na ASAE Standard Psychrometric Data ASAE D271 (ASAE, St Joseph, MI USA).

ASAE

A – Linha de Saturação, P_{VS} em função de T

$$\ln(P_{VS}) = 31,960 - \left(\frac{6270,3605}{T} \right) - 0,46057 \ln(T) \quad \text{para } (255,38 < T < 273,16)$$

$$\ln\left(\frac{P_{VS}}{R}\right) = \frac{A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4}{(FT - GT^2)} \quad \text{para } (273,16 \leq T \leq 533,16)$$

onde:

$$R = 22\ 105\ 649,25$$

$$A = -27\ 405,526$$

$$B = 97,541\ 3$$

$$C = -0,146\ 244$$

$$D = 0,125\ 58 \cdot 10^{-3}$$

$$E = -0,485\ 02 \cdot 10^{-7}$$

$$F = 4,349\ 3$$

$$G = 0,393\ 81 \cdot 10^{-2}$$

B – Linha de Saturação, T em função de P_{VS}

$$(T - 255,38) = \sum_{i=0}^8 A_i [\ln(0,00145 P_{VS})]^i \quad \text{para } (620,52 < P_{VS} < 4688396,00)$$

onde:

$$A_0 = 19,532\ 2$$

$$A_1 = 16,662\ 6$$

$$A_2 = 1,176\ 78$$

$$A_3 = -0,189\ 693$$

$$A_4 = 0,087\ 453$$

$$A_5 = -0,017\ 405\ 3$$

$$A_6 = 0,002\ 147\ 68$$

$$A_7 = -0,128\ 343 \cdot 10^{-3}$$

$$A_8 = 0,38 \cdot 10^{-5}$$

C – Calor Latente de Sublimação na Saturação

$$h_{IG} = 1839683,144 - 212,56384(T - 255,38) \quad \text{para } (255,38 \leq T \leq 273,16)$$

D – Calor Latente de Vaporização na Saturação

$$h_{FG} = 2502535,259 - 2385,76424(T - 273,16) \quad \text{para } (273,16 \leq T \leq 338,72)$$

$$h_{FG} = \sqrt{7329155978000 - 15995964,08T^2} \quad \text{para } (338,72 \leq T \leq 533,16)$$

E – Linha de Bulbo Úmido

$$P_{SWB} - P_V = B_1(T_{WB} - T)$$

onde:

$$B_1 = \frac{1006,9254(P_{SWB} - P_{TM}) \left(1 + 0,15577 \left[\frac{P_V}{P_{ATM}} \right] \right)}{(0,62194h_{FG1})} \quad \text{para } (255,38 \leq T \leq 533,16)$$

Substitui-se h_{IG1} por h_{FG1} onde $T_{WB} \leq 273,16$.

F – Razão de Umidade

$$H = \frac{0,6219P_V}{(P_{ATM} - P_V)} \quad \text{para } (255,38 \leq T \leq 533,16)$$

$$P_V < P_{ATM}$$

G - Volume Específico

$$V_{SA} = \frac{287T}{(P_{ATM} - P_V)}$$

H – Entalpia

$$h = 1006,9254(T - 273,16) - H[333432,1 + 2030,598(273,16 - T_{DP})] + h_{IG2}H + 1875,6864H(T - T_{DP})$$

para $(255,38 \leq T_{DP} \leq 273,16)$

$$h = 1006,9254(T - 273,16) - 4186,8H(T_{DP} - 273,16) + h_{IG2}H + 1875,6864H(T - T_{DP})$$

para $(273,16 \leq T_{DP} \leq 373,16)$

I – Umidade Relativa

$$RH = \frac{P_V}{P_S}$$

Albright

Albright (Environment Control for Animals and Plants, 1990, ASAE, St Joseph, MI, USA, usou seguintes equações do 1997 ASHRAE Handbook: Fundamentals (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA) e desenvolveu:

A – Pressão de Saturação do Vapor

$$\ln(P_{VS}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7 \ln T$$

onde:

	Para gelo (-100 < T < 0°C)	Para água (0 < T < 200°C)
C ₁	- 5,674 359.10 ⁻³	- 5,800 220 6.10 ³
C ₂	6,392 524 7	1,391 499 3
C ₃	- 9,677 843 0.10 ³	- 4, 864 023 9.10 ⁻²
C ₄	6,221 570 1.10 ⁻⁷	4,176 476 8.10 ⁻⁵
C ₅	2,074 782 5.10 ⁻⁹	- 1,445 209 3.10 ⁻⁸
C ₆	- 9,484 024 0.10 ⁻¹³	0,0
C ₇	4,163 501 9	6,545 967 3

B – Umidade Relativa

$$RH = \frac{P_V}{P_{VS}}$$

C – Razão de Umidade

$$W = \frac{0,62198P_V}{(P_{ATM} - P_V)}$$

$$W_S = \frac{0,62198P_{VS}}{(P_{ATM} - P_{VS})}$$

D – Volume Específico

$$V_{SA} = \frac{RT(1 + 1,6078W)}{P_{ATM}(1 + W)}$$

E – Entalpia

$$h = 1,006t + W(2501 + 1,805t)$$

$$t = T - 273,15$$

F – Temperatura de Orvalho

$$t_{DP} = -60,45 + 7,0322\ln(P_V) + 0,3700(\ln(P_V))^2 \quad \text{para } (-60 < t < 0^\circ C)$$

$$t_{DP} = -35,957 - 1,8726\ln(P_V) + 1,1689(\ln(P_V))^2 \quad \text{para } (0 < t < 70^\circ C)$$

G – Temperatura de Bulbo Úmido

Deve satisfazer as seguintes equações

$$h_S^* = h + h_W^* (W_S^* - W)$$

$$h_S^* = 4,186t^*$$

Bibliografia

1. ASHRAE; “1997 ASHRAE HANDBOOK – Fundamentals”; Capítulo 6 – Psychrometrics.
2. Pizzetti, Carlos; “Acondicionamiento del aire y refrigeracion – teoria y cálculo de las instalaciones”. Editorial Interciencia; Madrid, Espanha, 1970.
3. Mendes, Luiz Magno de Oliveira; “Refrigeração e Ar-Condicionado – Teoria, Prática, Defeitos”; Editora Ediouro, SP, 1994.
4. Creder, Hélio; “Instalações de Ar Condicionado”. 3ª Edição; Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., RJ, 1988
5. Elonka, S.M. e Minich, Q.W.; “Manual de Refrigeração e Ar Condicionado”; Editora McGraw-Hill; 1978; SP
6. Stoecker, W. F. e Jones, J. W.; “Refrigeração e Ar Condicionado”; Editora McGraw-Hill; 1985; SP
7. ASHRAE, “1997 ASHRAE Handbook: Fundamentals”; 1997; Atlanta, GA, USA