

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE PSICROMETRIA

O ar é constituído por uma mistura de gases (nitrogénio, oxigénio, dióxido de carbono, etc.), vapor de água e uma série de contaminantes, como partículas solidas em suspensão e outros gases.

O ar seco existe quando, do ar natural, removem-se todo o vapor de água e os contaminantes. A composição do ar seco é relativamente constante, apesar das pequenas variações em função da localização geográfica e altitude. A composição média percentual é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1- Composição padrão do ar seco [Singh & Heldman, 2001]

Constituinte	Fórmula	Percentagem do volume
Nitrogénio ou Azoto	N_2	78,084000
Oxigénio	O_2	20,947600
Árgon	Ar	0,934000
Dióxido de Carbono	CO_2	0,031400
Néon	Ne	0,001818
Hélio	He	0,000524
Outros gases (metano, dióxido de enxofre, krípton, ozono, hidrogénio e xénon)	CH_4, SO_2, Kr $O_3, H_2 e Xe$	0,000658
Total	—	100,000000

A maior parte dos gases que constituem o ar se encontram muito acima de sua temperatura crítica e não estão sujeitos à condensação em temperaturas acima de $-100\text{ }^\circ\text{C}$, praticamente não introduzimos quaisquer erros ao tratarmos esta parte da mistura como um único gás denominado “**ar seco**”. O ar na troposfera sempre contém uma quantidade variável de vapor de água (a fase gasosa da água), a qual varia no dia-a-dia em função das estações ao longo do ano.

A proporção de vapor d’água em relação ao ar seco é tratada como *humidade*. A mistura de ar seco com o vapor d’água é denominada *ar húmido*. Entre as temperaturas de $-40\text{ }^\circ\text{C}$ a $+65\text{ }^\circ\text{C}$ e sob uma pressão total de até 300 kPa, tanto o ar seco assim como o vapor, bem como sua mistura se comportam aproximadamente como um gás ideal, o que nos permite aplicar-se a equação geral dos gases (*equação de Clapeyron*).

$$PV = nRT$$

Sendo:

P – Pressão do gás

V – Volume do gás

n – numero de moles do gás

R – constante universal dos gases

T – Temperatura absoluta (K)

Como R é constante, se a massa dos gás for constante (e portanto o número de moles n for constante) pode-se dizer que:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = Cte$$

PSICROMETRIA

A palavra originou-se do termo grego “*psychro*” que significa “*frio*” e “*metro*” que significa “*medir*”, indicando um dispositivo para “*medir a refrigeração*”.

Psicrometria é a ciência que estuda o envolvimento das propriedades do ar húmido e do processo (secagem, humidificação, resfriamento, aquecimento) na mudança da temperatura ou do conteúdo de vapor d’água da mistura.

O conhecimento das condições da humidade do ar é de grande importância para muitos sectores da actividade humana, como o dimensionamento de sistemas para acondicionamento térmico, a conservação dos alimentos, os sistemas de refrigeração ou a estimativa de tempo e energia requeridos por processos de secagem, humidificação, resfriamento e armazenamento e processamento de grãos.

Às vezes, o índice de conforto térmico de uma atmosfera depende mais da quantidade de vapor d’água presente no ar do que da temperatura propriamente dita. Desse modo, um aparelho de condicionamento do ar promove maior controle da humidade e apenas pequenas variações no valor da temperatura do ambiente.

Por tudo isso, o estudo detalhado da mistura de ar seco ($N_2 + O_2 + CO_2 +$ outros) e vapor de água passou a ser uma disciplina, denominada psicrometria, que estuda, a partir das determinações de parâmetros específicos, as propriedades da mistura de ar seco e vapor de água ou do ar húmido. A quantidade de vapor de água presente no ar varia de quase zero a aproximadamente 4% em volume.

PROPRIEDADES DO AR HÚMIDO

As propriedades do ar húmido estão relacionadas à temperatura, quantidade de vapor de água, volume ocupado pelo ar e energia nele contida.

Propriedades relacionadas à temperatura:

- Temperatura de bulbo seco
- Temperatura de bulbo húmido (molhado)
- Temperatura do ponto de orvalho

Propriedades relacionadas à humidade (massa de vapor de água):

- Pressão de vapor
- Razão da mistura
- Humidade específica
- Humidade absoluta
- Humidade relativa
- Grau de saturação

Propriedades relacionadas ao volume ocupado e à energia:

- Volume específico
- Entalpia

Temperaturas de bulbo seco (t) e de bulbo húmido (t_m)

A temperatura do bulbo seco do ar é a temperatura medida com um termómetro comum. Caso o termo temperatura seja usado sem uma especificação, o leitor deve entendê-lo como sendo temperatura de bulbo seco.

Outra medida importante de temperatura (ex.: no processo de secagem de grãos), é a temperatura de bulbo húmido. Para obtê-la, cobre-se o bulbo de um termómetro comum, cujas características devem ser semelhantes às do termómetro de bulbo seco, com um tecido de algodão embebido de água destilada. O bulbo molhado deve ser ventilado, com o ar que se quer conhecer, a uma velocidade de 5 m/s. Uma observação deve ser feita em relação às temperaturas psicrométrica e termodinâmica de bulbo húmido: *a temperatura psicrométrica de bulbo húmido é a temperatura do ar indicada pelo termómetro de bulbo molhado, como descrito anteriormente, já a temperatura termodinâmica de bulbo húmido é aquela de equilíbrio, alcançada quando o ar húmido sofre um processo de resfriamento adiabático, devido à evaporação da água no ar, até atingir a temperatura da água, mantendo-se a pressão constante. Na prática estas duas temperaturas são iguais.*

O conhecimento das temperaturas de bulbo seco e de bulbo húmido, expressas em °C e determinadas por meio de psicrómetros, permite, com o uso de tabelas, a determinação rápida da humidade relativa do ar.

Temperatura do ponto de orvalho (t_{po})

É a temperatura em que o ar húmido se torna saturado, ou seja, quando o vapor de água começa a condensar-se, por um processo de resfriamento, mantendo constantes a pressão e a razão da mistura.

Pressão de vapor (P_v)

O vapor de água, como os gases componentes da atmosfera, exerce pressão em todas as direcções, pressão esta que depende da concentração de vapor. A quantidade de vapor que pode existir em determinada atmosfera é limitada para cada valor da temperatura. Temperaturas mais elevadas permitem a existência de maior quantidade de vapor do que em um ambiente com temperaturas baixas. Quando o ar contém o máximo de vapor de água permissível para determinada temperatura, diz-se que o ar se encontra saturado e a pressão de vapor nessa mistura é dita máxima ou de saturação, sendo representada por (P_{vs}). Se a quantidade de vapor não for suficiente para o saturar, sua pressão é chamada parcial de vapor e é representada por P_v .

Razão de mistura (w)

É definida como a razão entre a massa de vapor de água e a massa do ar seco em um dado volume da mistura. É expressa em kg de vapor/kg de ar seco.

Humidade relativa (Hr)

A humidade relativa do ar é a razão entre a pressão parcial do vapor (P_v) exercida pelas moléculas de água presentes no ar e a pressão de saturação (P_{vs}), na mesma temperatura, sendo normalmente expressa em percentagem.

$$Hr = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100$$

Humidade absoluta (Ha)

É a relação entre a massa de vapor de água e o volume ocupado pelo ar húmido.

Humidade específica (He)

É a relação entre a massa do vapor de água e a massa do ar húmido.

Grau de saturação

É a relação entre a razão de mistura actual e a razão de mistura do ar em condição de saturação, à mesma temperatura e pressão.

Volume específico (v_e)

É definido como o volume por unidade de massa de ar seco e expresso em m^3 por kg de ar seco (m^3/kg). A potência requerida pelo ventilador, em um sistema de secagem, é afectada pelo volume específico do ar.

Entalpia (h)

A entalpia de uma mistura ar seco + vapor de água é a energia contida no ar húmido por unidade de massa de ar seco, para temperaturas superiores a uma determinada temperatura de referência (0°C). A entalpia, que é expressa em kcal ou kJ por kg de ar seco, é muito importante para o dimensionamento de aquecedores e sistema de secagem e composição do custo operacional dos diferentes sistemas.

MEDIÇÃO DA HUMIDADE DO AR

Para medir a humidade do ar são usados instrumentos denominados higrómetros. Os mais comuns são:

- a) **Higrómetros de condensação** – baseiam-se na determinação do ponto de orvalho.
- b) **Higrómetros de absorção** – usados em laboratórios. Nesses equipamentos, a determinação é feita passando-se, através de uma substância higroscópica, um volume conhecido do ar cujas propriedades se deseja determinar. O resultado é obtido pela variação do peso devido à humidade absorvida.

- c) **Higrômetros elétricos** – baseiam-se na variação da resistência eléctrica de um fino filme de um condutor electrolítico contendo um sal higroscópico, em função da humidade.
- d) **Higrómetro óptico** – por meio da intensidade de luz reflectida, mede a espessura de um filme higroscópico, o qual varia com a humidade.
- e) **Higrómetro de difusão** – constam de uma câmara fechada, tendo uma placa porosa numa das paredes. O ar no interior da câmara é continuamente submetido à acção de um agente dessecador ou humedecedor. A difusão do ar através da placa porosa produz mudança na pressão interna da câmara, que é medida por um manómetro. No ponto de equilíbrio, o valor da mudança de pressão depende da pressão de vapor do ar exterior e da temperatura da câmara.
- f) **Psicrómetros** – constam de dois termómetros semelhantes, um dos quais tem o bulbo recoberto por tecido de algodão humedecido em água destilada. A evaporação da água sobre o bulbo humedecido causa a queda de temperatura deste e é dependente do estado higrométrico do ar. O termómetro de bulbo seco indica a temperatura do ar. A diferença de temperatura entre os dois termómetros dá a indicação da humidade, bem como de outras propriedades do ar, bastando utilizar os dados obtidos para dar entradas em tabelas, gráficos ou formulas. Os psicrómetros podem ser de ventilação natural (psicrómetros comuns) ou de ventilação forçada. O mais comum é o psicrómetro giratório.
- g) **Higrômetros de fio de cabelo** – o cabelo humano livre de gorduras tem a propriedade de aumentar em comprimento e absorver humidade e de diminuir em comprimento quando a perde. Essa variação é convenientemente ampliada e transmitida a um ponteiro, sobre um mostrador, que indicará directamente a humidade relativa do ar.

Tratando-se o ponteiro por uma pena contendo reservatório de tinta e o mostrador por um cilindro movido por um mecanismo de relojoaria, tem-se o higrómetro registrador ou higrógrafo.

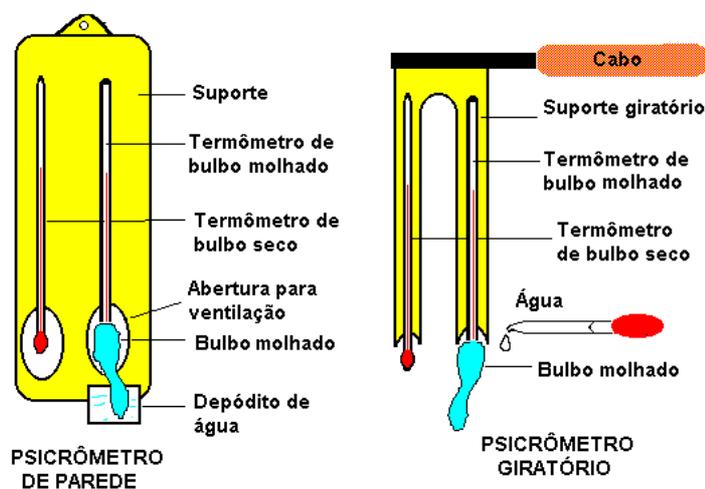


Figura 1 – Psicrómetros de parede e giratório.

HUMIDADE RELATIVA

Um higrómetro de fio de cabelo ou um higrógrafo fornecem directamente a leitura da humidade relativa do ar. Isto não acontece quando se usa um psicrómetro ou um higrómetro de condensação, pois, nesse caso, a humidade relativa só será conhecida após operações usando esses dados em fórmulas, tabelas ou gráficos psicrométricos.

Determinação Analítica

Conhecendo-se a temperatura do ponto de orvalho e a temperatura do ar, a humidade relativa pode ser determinada pela seguinte equação:

$$Hr = \exp \left\{ 5417 \times \left[\left(\frac{1}{T} \right) - \left(\frac{1}{T_o} \right) \right] \right\}$$

Onde: Hr – Humidade relativa, decimal

T e T_o – Temperatura do ar e do ponto de orvalho, respectivamente, em K

Quando se usa um psicrómetro, a determinação da humidade relativa pode ser feita pela expressão a seguir:

$$Hr = \frac{P_v}{P_{vs}}$$

Sendo $P_v = P_{vsm} - [A \cdot P \cdot (t - t_m)]$

Em que P_v – pressão de vapor de água no ar, em mmHg

P_{vsm} – pressão máxima de vapor à temperatura de bulbo húmido (molhado), em mmHg

A – constante psicrométrica, $6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

P – pressão atmosférica local, em mmHg

Temperatura do ar, em $^\circ\text{C}$

t_m – temperatura do bulbo húmido, em $^\circ\text{C}$

As constantes psicrométricas adoptadas são $6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, para o psicrómetro com ventilação (aspirado), e $8,0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, para o psicrómetro sem movimentação do ar.

A pressão de vapor saturado no ar à temperatura de bulbo seco (P_{vs}) pode ser determinada pela seguinte equação:

$$P_{vs} = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5t}{237,3+t}}$$

Em que P_{vs} – pressão de vapor saturado, em mbar t – temperatura do ar, em $^\circ\text{C}$

Observação: 760 mmHg = 1013,25 mbar

A expressão máxima do vapor à temperatura de bulbo húmido (P_{vsm}) pode ser expressa por:

$$P_{vsm} = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5t_m}{237,3+t_m}}$$

Em que P_{vsm} – pressão máxima do vapor, em mbar t_m – temperatura do bulbo húmido, em °C

TABELAS E GRÁFICOS PSICROMÉTRICOS

Além das equações psicrométricas específicas e dos programas computacionais que incluem essas equações para o cálculo das propriedades do ar, as tabelas e os gráficos psicrométricos foram criados para facilitar a determinação das propriedades do ar. Mesmo com a disponibilidade de computadores, os gráficos e as tabelas são bastante utilizados, principalmente quando se necessita de determinações rápidas em locais onde o computador não está disponível.

A Tabela 2 é usada na determinação aproximada da humidade relativa do ar e apresenta entrada dupla. Nesta tabela encontram-se a temperatura de bulbo húmido (t_m), na primeira coluna, e a depressão psicrométrica (diferença entre as temperaturas do termómetro de bulbo seco e termómetro de bulbo húmido ($t - t_m$)), na primeira linha. Os diversos valores da humidade constituem o corpo da tabela.

Tabela 2 – Valores da humidade relativa para valores conhecidos de t e t_m

Temp. t_m °C	DEPRESSÃO PSICROMÉTRICA (T - T_m)																			
	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,6	8,8	9,0
10	47	46	44	43	41	40	39	37	36	35	33	32	31	30	29	28	26	25	24	23
11	49	47	46	45	43	42	41	40	38	37	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26
12	50	49	48	46	45	44	42	41	40	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28
13	52	51	49	48	46	45	44	43	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30
14	53	52	51	49	48	47	45	44	43	42	41	40	39	37	36	35	34	33	32	31
15	55	53	52	51	49	48	47	46	45	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33
16	56	54	53	52	51	50	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35
17	57	56	54	53	52	51	50	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36
18	58	57	56	54	53	52	51	50	49	48	46	45	44	43	42	41	41	40	39	38
19	59	58	57	55	54	53	52	51	50	50	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39
20	60	59	58	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40
21	61	60	59	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	43	42
22	62	61	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	45	44	43
23	63	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	47	46	45	44
24	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	49	48	47	46	45
25	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	50	49	48	47	46
26	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	49	48	47
27	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	56	55	54	53	52	51	50	49	49	48
28	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	55	54	53	52	51	50	50	49
29	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	54	53	52	51	50	50
30	67	66	65	64	63	62	61	60	60	59	58	57	56	55	54	54	53	52	51	50
31	68	67	66	65	64	63	62	61	60	60	58	58	57	56	55	54	53	53	52	51
32	68	67	66	65	64	64	63	62	61	60	59	58	57	57	56	55	54	53	53	52
33	69	68	67	66	65	64	63	62	61	61	60	59	58	57	56	56	55	54	53	53
34	69	68	67	66	66	65	64	63	62	61	60	59	59	58	57	56	55	55	54	53
35	70	69	68	57	56	65	64	63	63	62	61	60	59	58	58	57	56	55	55	54
37	70	69	68	67	66	66	65	64	63	62	61	60	60	59	58	58	56	56	55	54
39	71	70	69	68	67	67	66	65	64	63	62	61	61	60	59	59	58	57	57	55

Gráfico Psicrométrico

Antes de abordar o uso do gráfico psicrométrico, é necessário compreender como ele é constituído. A Figura 2 mostra um gráfico psicrométrico à pressão constante de 760 mmHg (1013 mbar), que poderá ser usado em outras condições, desde que sejam feitas as devidas correções. O eixo das abcissas expressa as temperaturas do termómetro de bulbo em °C.

Do lado direito da figura, correspondendo ao eixo das ordenadas, encontra-se a razão de mistura, expressa em gramas de vapor de água por quilograma de ar seco, e do lado esquerdo encontra-se a pressão de vapor em milibares e mm de mercúrio (Hg).

As linhas curvas entre os três parâmetros descritos às linhas correspondem às linhas de humidade relativa. A mais extrema é a linha $H_r = 100\%$, ou linha de vapor saturante ou de saturação, sobre a qual se leem as temperaturas do termómetro de bulbo húmido e do ponto de orvalho. Acima da curva $H_r = 100\%$, encontram-se segmentos de rectas, onde se lê a entalpia, ou seja, a quantidade de calor envolvida nas mudanças de estado. A entalpia está expressa em kcal/kg de ar seco.

Começando a leitura pelo eixo das temperaturas de bulbo seco (t_{bs}), encontram-se, inclinadas para a esquerda em aproximadamente 65° , as linhas de volume específico do ar seco, que indicam o número de metros cúbicos de ar necessário por quilograma de ar seco.

Uso do gráfico

Conhecendo a temperatura do ponto de orvalho e a temperatura de bulbo seco ou temperatura do ar, para obter a humidade relativa, traça-se a partir do ponto de orvalho lido sobre a linha de humidade relativa a 100%, a paralela à linha das temperaturas de bulbo seco. A seguir, levanta-se uma perpendicular ao eixo das temperaturas de bulbo seco, a qual corresponde à temperatura do ar. O cruzamento das linhas traçadas determina no gráfico um ponto denominado "*ponto de estado*", a partir do qual podem-se conhecer as outras propriedades do ar:

- a) **Humidade relativa** – como as linhas curvas indicam a humidade relativa, basta observar qual linha coincide com o ponto de estado. Caso não haja coincidência, faz-se um interpolação visual.
- b) **Razão de mistura** – a partir do ponto de estado traça-se, para a direita, uma paralela ao eixo das temperaturas do termómetro de bulbo seco e lê-se, na escala, o número de gramas de vapor de água por quilograma de ar seco.
- c) **Pressão de vapor** – a partir do ponto de estado traça-se, para a esquerda até às escalas de pressão de vapor, uma paralela ao eixo das temperaturas do termómetro de bulbo seco, fazendo a leitura em milibares ou milímetros de mercúrio.
- d) **Entalpia** – a partir do ponto de estado, traça-se uma linha paralela às linhas que partem da escala da entalpia, onde se lê o número de quilocalorias por quilograma de ar seco.

- e) **Volume específico do ar seco** – o ponto de estado determina o valor do volume específico do ar seco. Quando ele não coincide com uma das linhas traçadas no gráfico, é feita uma interpolação visual, determinando o número de metros cúbicos de ar por quilograma de ar seco

As Figuras 3 e 4 ilustram, como um exemplo, como é possível determinar os diferentes valores das propriedades psicrométricas do ar húmido, conhecendo-se os valores de duas outras propriedades não alinhadas.

Exemplo:

Determine as propriedades termodinâmicas do ar húmido (temperatura de bulbo seco, $t = 25$ °C, e a temperatura de bulbo húmido, $t_m = 18$ °C), como indica a Figura 3.

Solução:

Para determinar o ponto de estado, levanta-se a perpendicular ao eixo das temperaturas de bulbo seco, a partir do valor da temperatura do ar. A seguir, partindo da temperatura t_m , obtida na curva de saturação, traça-se a paralela às linhas de entalpia. O cruzamento das duas linhas determina o ponto de estado. Os demais parâmetros são encontrados como descrito anteriormente.

- Humidade relativa = 50%
- Volume específico = $0,863 \text{ m}^3/\text{kg}$ de ar seco
- Razão da mistura = 10,0 gramas de vapor/kg de ar seco
- Pressão de vapor = 15,0 mbar
- Entalpia = 16,5 kcal/kg de ar seco

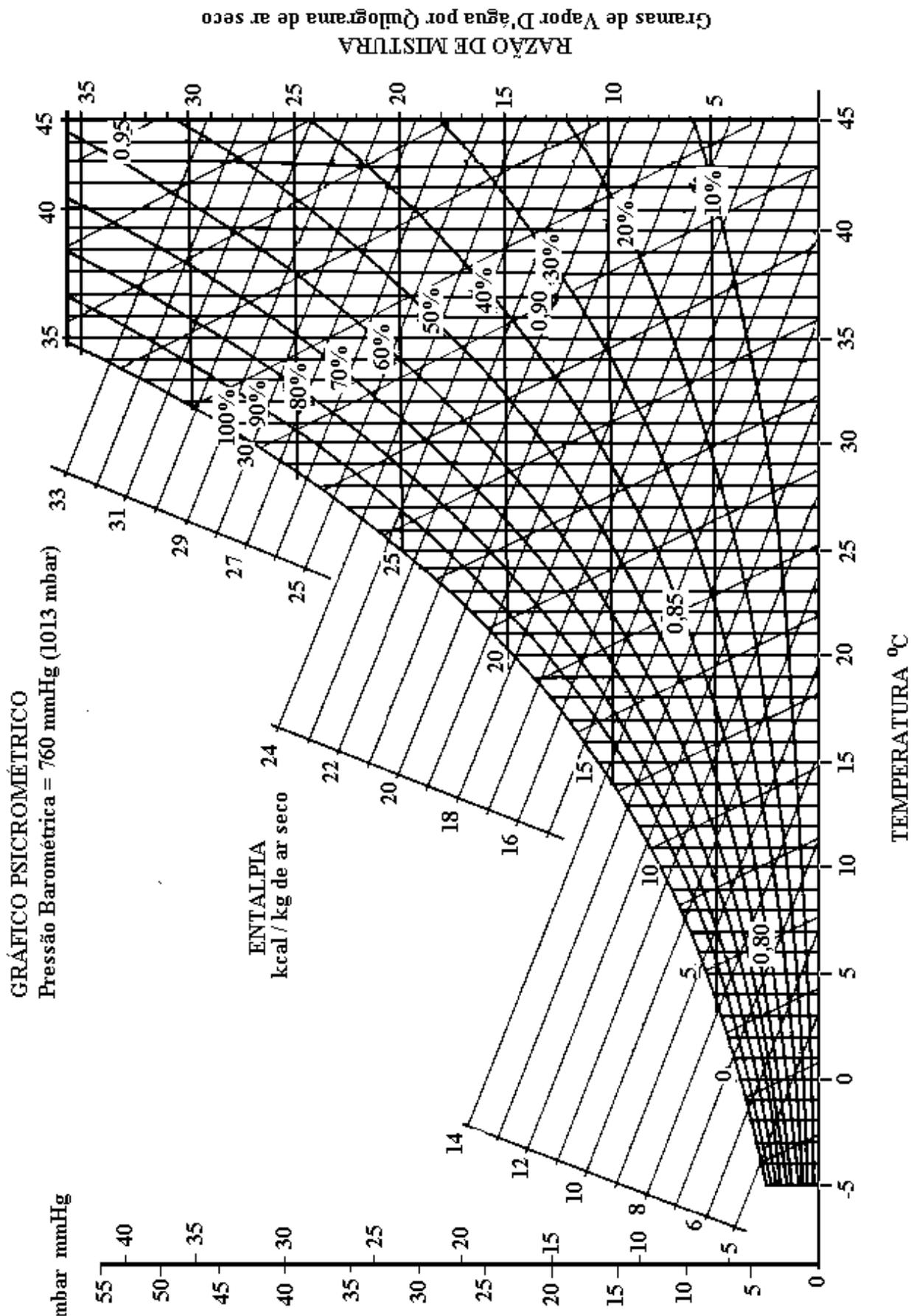


Figura 2 – Gráfico psicrométrico

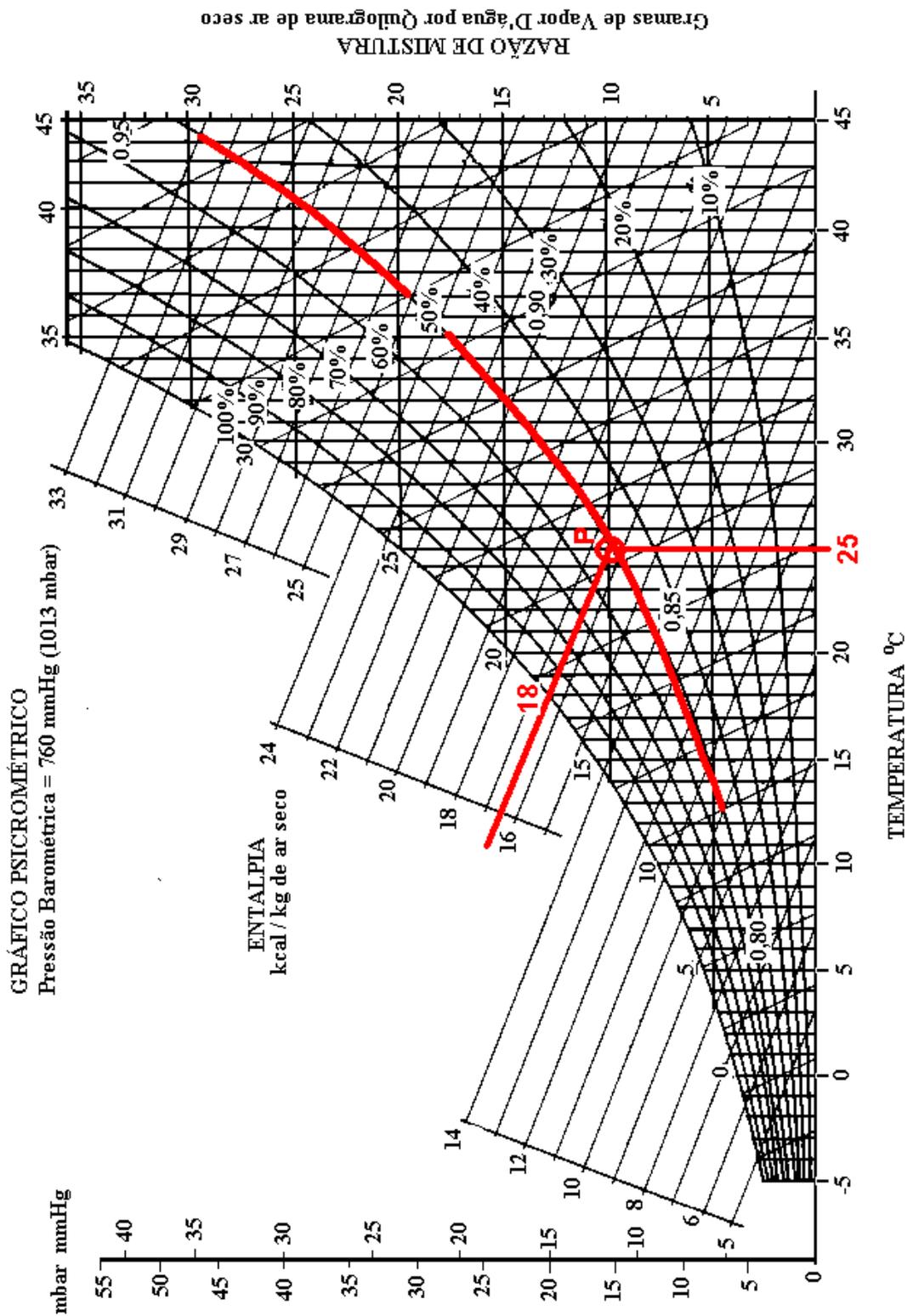


Figura 3 – determinação do ponto de estado a partir de t e t_m

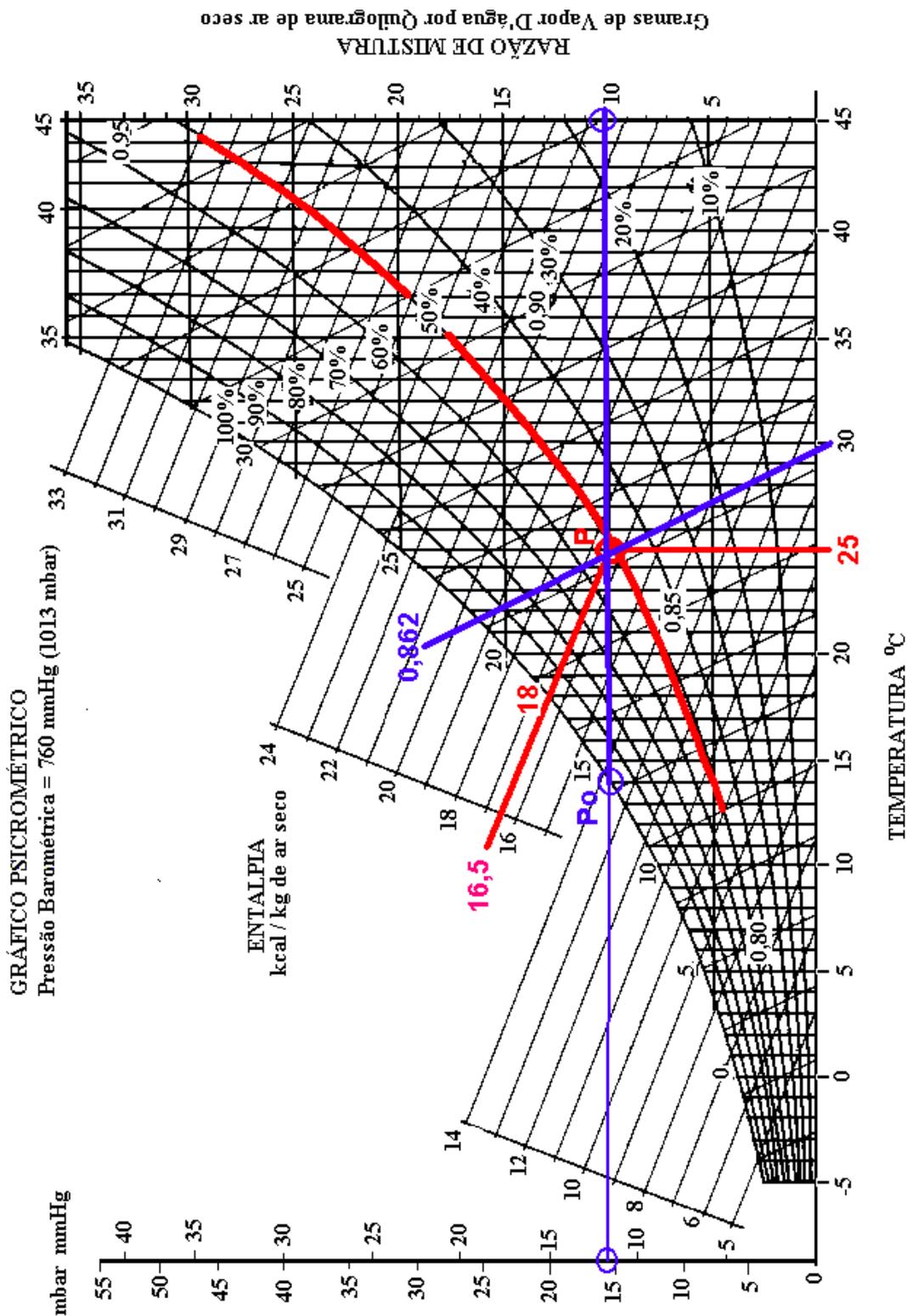


Figura 4 – Determinação das propriedades do ar a partir do ponto de estado