Rev. 05

Sistemas Térmicos, Refrigeração e Climatização

Prof. Carlos Catunda // Prof. Thiago Macedo

PARTE - 1/2

Material disponível em:

http://www.cefet-rj.br/index.php/demec-downloads

Ementa

1. Introdução e Aplicações de Sistemas Térmicos para Refrigeração
2. Mistura de gases perfeitos (Considerações Gerais)
3. Psicrometria e aplicações
4. Sistemas e equipamentos de refrigeração e Bombas de Calor
5. Aplicação da Refrigeração e do Ar Condicionado.

Objetivos Gerais / Objetivos Específicos

1. Compreender os princípios de funcionamento de sistemas de refrigeração.
   - ❑ Identificar e descrever os componentes e acessórios;
   - ❑ Compreender o funcionamento de cada um dos componentes e acessórios;

2. Desenvolver capacidade de selecionar e aplicar esses equipamentos em projetos de instalações. Aprender noções de projeto destes equipamentos.
   - ❑ Avaliar o funcionamento e o desempenho de sistemas de refrigeração multi-pressão;
   - ❑ Compreender o funcionamento dos sistemas de controle e automação, bem como as estratégias de controle, utilizados nestes sistemas;
   - ❑ Conhecer as regras de segurança especiais aplicáveis a estes sistemas com utilização de distintos fluidos refrigerantes;

Sumário

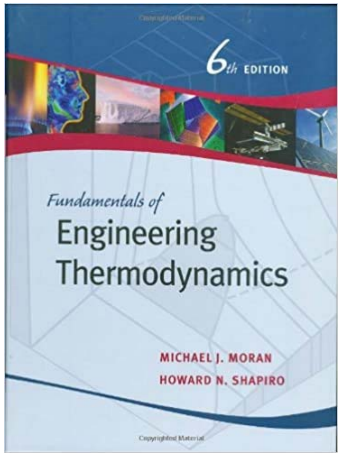
1. Introdução e Aplicações de Sistemas Térmicos para Refrigeração
2. Mistura de gases perfeitos (Considerações Gerais)
   - ≡ Composição e análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
   - ≡ Modelo de Amagat
   - ≡ Modelo de Dalton
   - ≡ Modelo para misturas compostas por gases e um vapor
3. Psicrometria
   - ≡ Introdução aos Princípios Psicrométricos
   - ≡ Parâmetros Psicrométricos
   - ≡ Carta ou Diagrama Psicrométrico
   - ≡ Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido
   - ≡ Transferência de Calor e Massa (**)
   - ≡ Processos Básicos de Condicionamento de Ar
4. Torres de Resfriamento / Condensadores Evaporativos / Centrais de água gelada

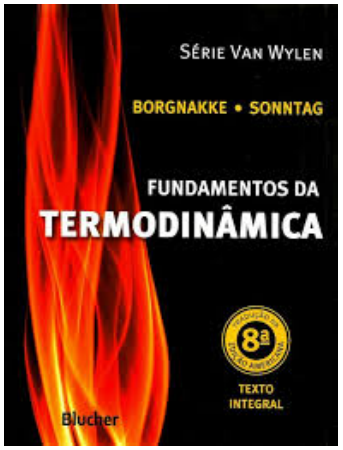
Sumário

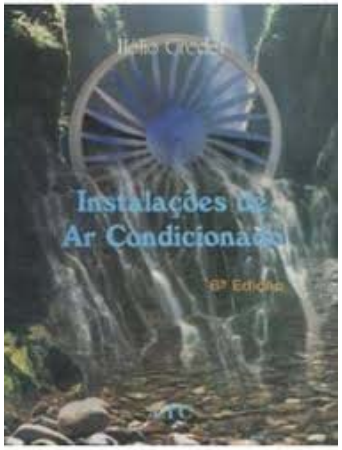
5. Ciclo Frigorífico e de Refrigeração de Carnot
6. Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor Ideal e Real
   - ≡ Seleção do Fluido Refrigerante
   - ≡ Modificações no Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor
7. Sistemas de Refrigeração por Absorção
8. Sistemas de Refrigeração a Gás
9. Sistemas de Bombas de Calor

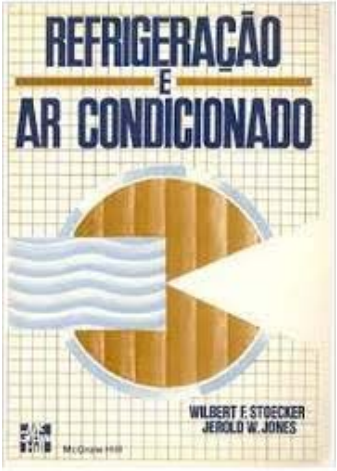
Bibliografia

1. Van Wylen, Gordon John; Sonntag, Richard Edwin e Bornakke, Claus; **Fundamentos da Termodinâmica** – Ed.Edgar Blücher Ltda – 8ªed
2. Michael J. Moran & Howard N. Shapiro, **Fundamentals of Engineering Thermodynamics** – Editora John Wiley & Sons – 6ªed
3. Stoccker, W.F. e Jones, J.W.; **Refrigeração e Ar Condicionado** – Editora McGraw-Hill – 2ªed









Bibliografia Complementar

1. PIMENTA, João. Ar Condicionado: Notas de Aula. UnB, www.laar.unb.br.
2. MILLER, Rex; MILLER, Mark R. Ar condicionado e refrigeração. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014
3. SILVA, JESUE GRACILIANO DA. Introdução a tecnologia da refrigeração e da climatização. São Paulo: Artliber, 2004
4. DOSSAT, Roy J. Principles of refrigeration. 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1997
5. STOECKER, W. F.; JONES, J. W. Refrigeração e ar condicionado. Tradução José M. Saiz Jabardo. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.
6. SILVA, J.G. Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização. São Paulo: Artliber, 2003.
7. WIRZ, DICK. Refrigeração comercial: para técnico de ar condicionado. São Paulo: Cengage, 2011.

Capítulo 1 – Introdução e Aplicações de Sistemas Térmicos para Refrigeração

Objetivos:

≡ Será apresentada neste capítulo uma breve descrição dos principais equipamentos de processos que utilizam conceitos psicrométricos e termodinâmicos para refrigeração, tais como: refrigeradores, umidificadores, compressores, torres de resfriamento, etc. O objetivo é familiarizar o estudante com estes equipamentos e termos.

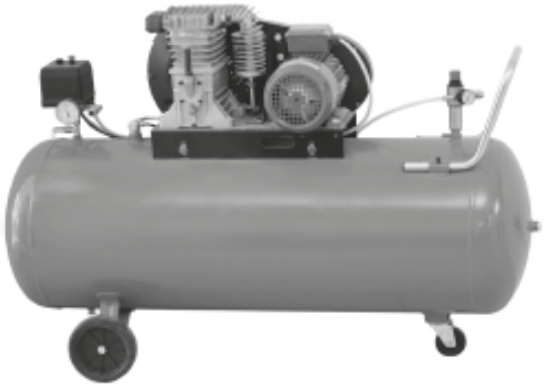
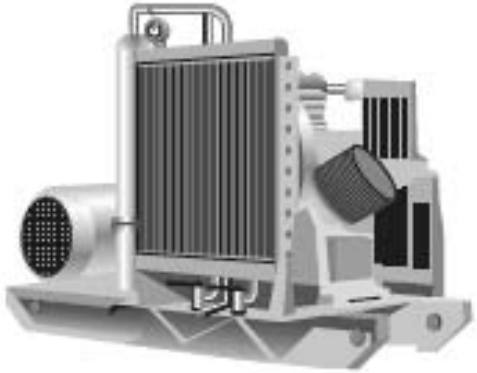
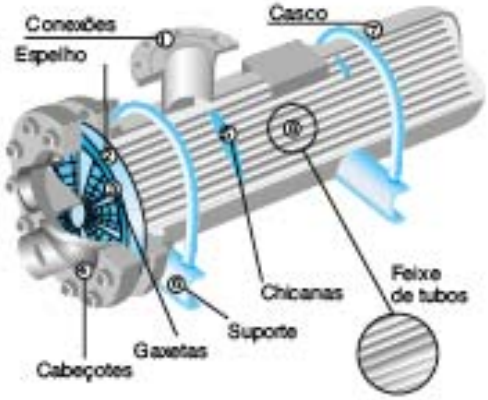


Figura 1.20

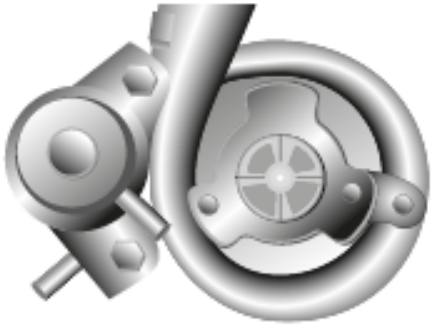


(a) Pós-resfriador (aftercooler) de um motor diesel

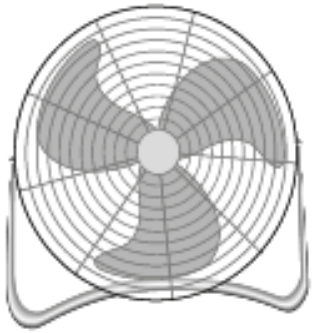


(b) Trocador de calor casco-tubos

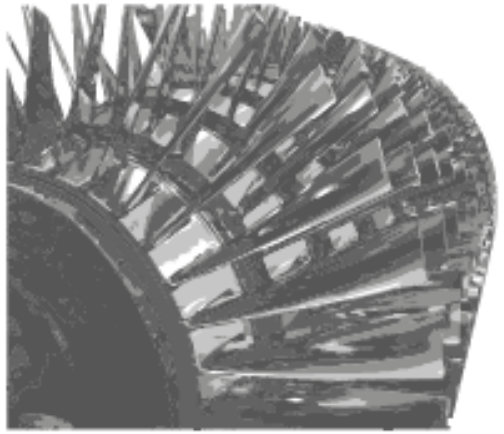
Figura 4.18
Trocadores de Calor.



(a) Compressor de ar centrífugo para veículo

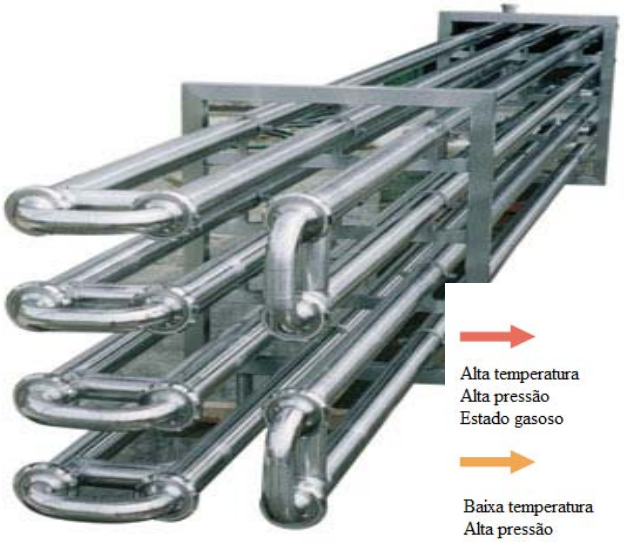


(b) Ventilador simples



(c) Rotor de grande porte de um compressor axial de uma turbina a gás

Figura 4.19
Compressores de ar e ventilador.



Alta temperatura
Alta pressão
Estado gasoso

Baixa temperatura
Alta pressão
Estado líquido

Baixa temperatura
Baixa pressão
Estado gasoso

Baixa temperatura
Baixa pressão
Estado líquido

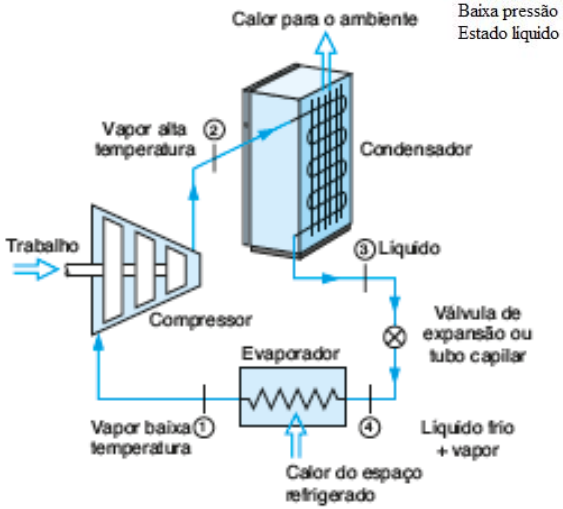
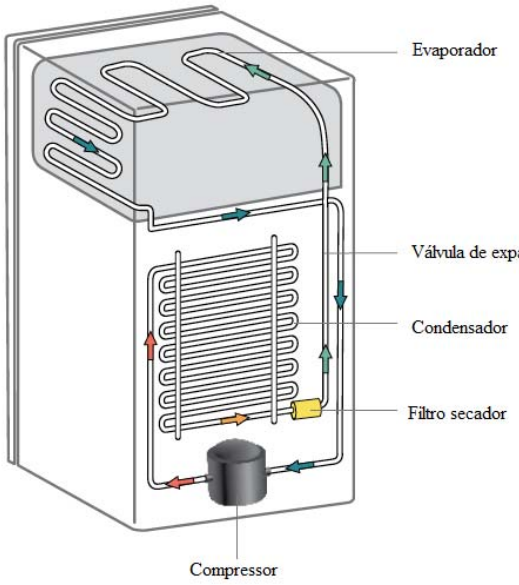


Figura 1.3
Esquema de um refrigerador.



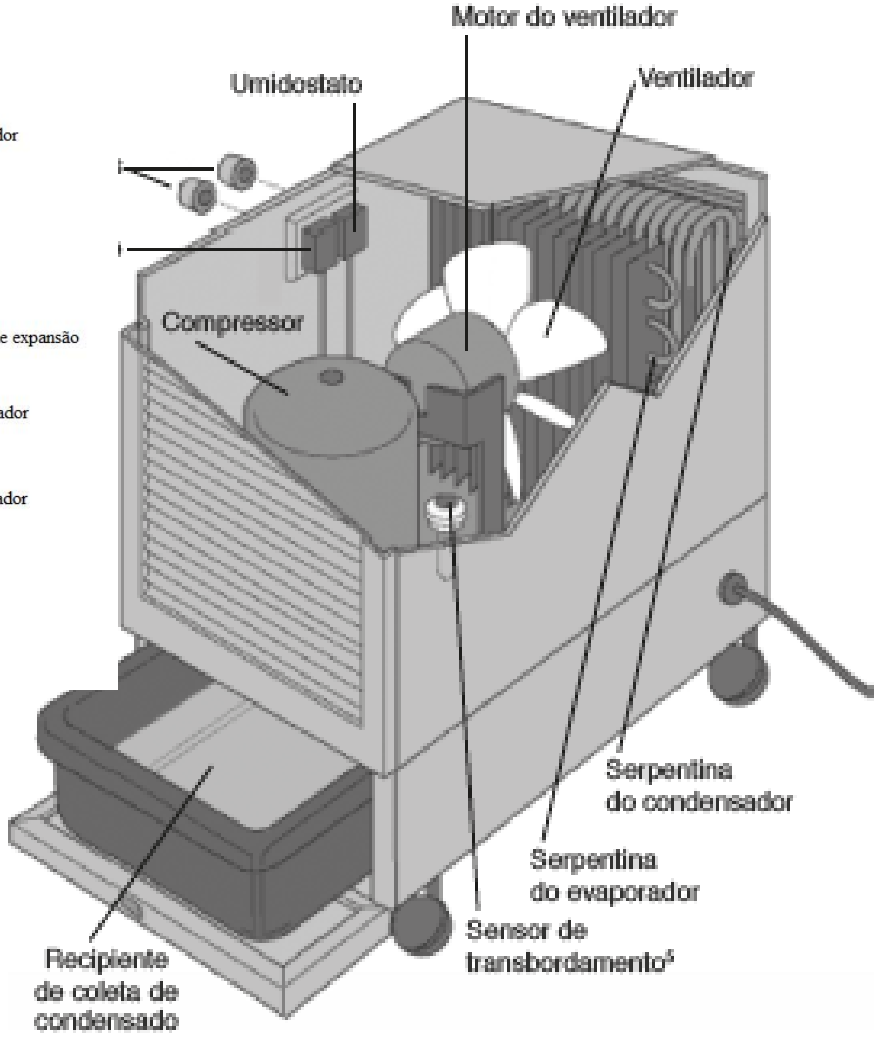
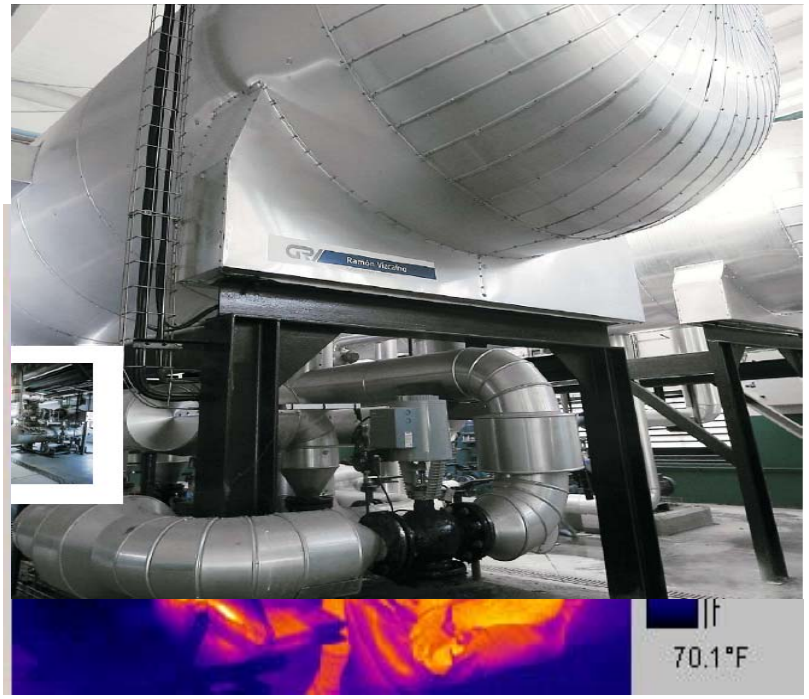


Figura 11.12
Uma unidade doméstica de desumidificação de ar.

comfee'
comfee'

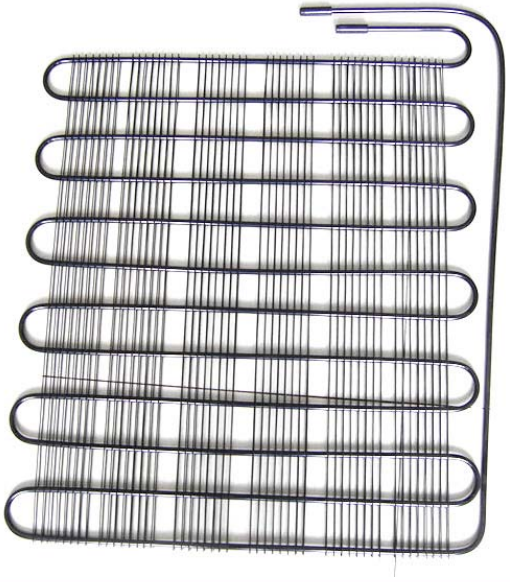

70.1°F

ELGIN

Desumidificador
de Ambientes
FORA-MOFO

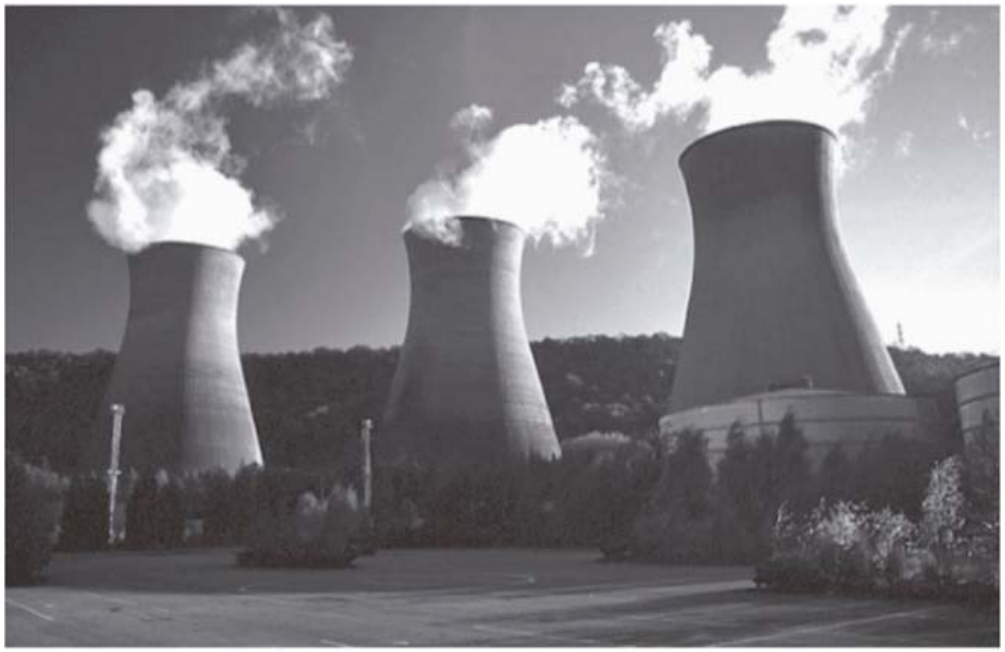
ECAL

AQUAFORCE
Carrier



UMIDADE RELATIVA
PIAUÍ ONTEM
BOM JESUS 14%
CARACOL 16%
ALVORADA DO GURGUÉIA 16%
URUÇUÍ 20%

VIDEO



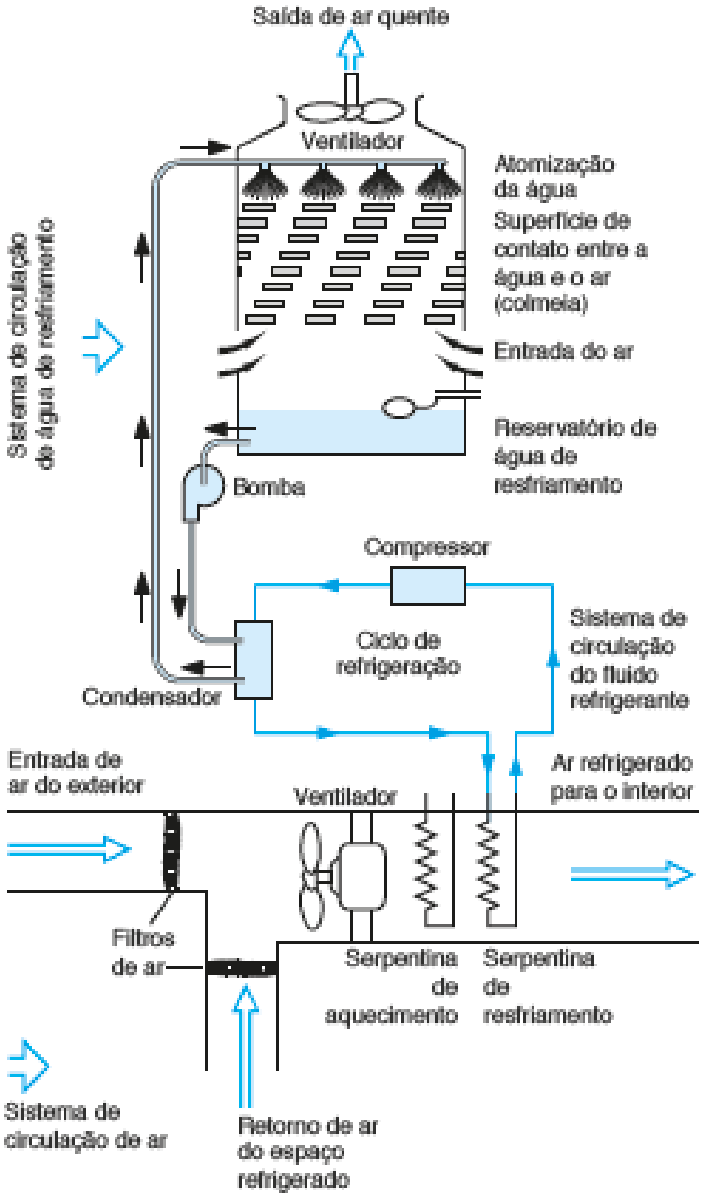


Figura 11.14
Uma torre de resfriamento para uso em sistema de ar-condicionado de edifícios.

TORRE
SÉRIE 1600
TORRE
SÉRIE 400
CONDENSADOR
EVAPORATIVO
SÉRIE ASP 6000
TORRE
SÉRIE INS
TORRE
SÉRIE ASP

Figura 3.32
O maior hidrorreservatório artificial do mundo situado em Ludington, Michigan, bombeia água a 100 m acima do Lago Michigan quando há excedente de energia. Ele pode fornecer 1800 MW quando necessário, por meio de um sistema reversível bomba/turbina.

FIGURA 14–33 Uma lagoa de resfriamento de água por pulverização.

Capítulo 2 - Mistura de gases perfeitos

Objetivo:

≡ Apresentar as considerações generalizadas para a Mistura de gases perfeitos bem como os modelos para misturas compostas por gases e um vapor para aplicações reais (ar atmosfético)

≡ Analisar sistemas de misturas de gases perfeitos e as suas composições

≡ Apresentar os modelos ordinários para o ar atmosférico (Modelo de Dalton, Modelo de Amagat, Modelo Gas-Vapor [ar atmosférico])

Introdução

- Várias considerações Termodinâmicas relativas às **misturas de gases** utilizam uma abordagem simplificada de mistura de **substâncias puras**, ou seja, **mistura de gases perfeitos**.
- Esta análise remete a um modelo simplificado, empregado ao ar atmosférico, que envolve **mistura de Gás-Vapor**, ou seja, que pode contemplar a fase condensada.

- Qual é a diferença entre gás e vapor?
  - Em temperaturas abaixo da temperatura crítica, a fase gasosa de uma substância é frequentemente chamada vapor.
- O termo **vapor** implica um **estado gasoso** que está **próximo da região de saturação** da substância, elevando a possibilidade de condensação durante um processo.

Introdução

- Misturas de gases que estão acima de suas temperaturas críticas têm uma modelagem, em geral, mais simplificada, por não haver a preocupação com uma possível condensação.
- Por outro lado, vamos estudar a mistura ar-vapor de água. A área de condicionamento de ar é a principal aplicação das misturas de ar-vapor de água.

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Para especificar o **estado termodinâmico** de uma mistura é necessário a sua composição e ao menos 2 variáveis temodinâmicas intensivas independentes (e.g., Temperatura e Pressão)

Assim, o objetivo inicial, aqui é considerar maneiras de descrever a composição de uma mistura. Para simplificar, considere um sistema fechado com uma **mistura gasosa de substâncias puras**.

$$m = m_1 + m_2 + \cdots + m_j = \sum_{i=1}^{j} m_i \qquad c_i = \frac{m_i}{m_{tot}} \qquad mf_i = \frac{m_i}{m}$$

A massa total ***m*** é a soma total de todos os componentes, e a quantidade relativa pode ser representada pela fração mássica, mf_i ***(análise gravimétrica)***

$$n = n_1 + n_2 + \cdots + n_j = \sum_{i=1}^{j} n_i \qquad y_i = \frac{n_i}{n}$$

Os moles totais ***n*** são a soma total de todos os moles, e a quantidade relativa pode ser representada pela fração molar, y_i ***(análise volumétrica)***

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

As frações mf_i e y_i, podem ser relacionadas através da **massa molecular aparente** da mistura, M.

$$M = \frac{m}{n} \qquad M = \frac{n_1 M_1 + n_2 M_2 + \cdots + n_j M_j}{n} \qquad M = \sum_{i=1}^{j} y_i M_i$$

Dessa forma, é possível converter da **base molar para a base mássica**

$$c_i = \frac{m_i}{m_{tot}} = \frac{n_i M_i}{\sum n_j M_j} = \frac{n_i M_i / n_{tot}}{\sum n_j M_j / n_{tot}} = \frac{y_i M_i}{\sum y_j M_j}$$

e da **base mássica para a base molar**:

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

Seria muito simples se pudéssemos determinar as propriedades termodinâmicas das misturas a partir das propriedades dos componentes puros

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico x Ar Seco x Ar Úmido

O **ar atmosférico** contêm vários componentes gasosos, bem como **vapor d'água** e contaminantes (particulados, pólen, etc.)

O **ar seco** existe quando todo o vapor d'água e contaminantes são removidos do ar atmosférico.

Componente	Fração molar(%)
Nitrogênio	78,08400%
Oxigênio	20,94760%
Argônio	0,93400%
Dióxido de carbono	0,03140%
Néon	0,00182%
Hélio	0,00052%
Metano	0,00015%
Dióxido de Enxofre	0 a 0,0001%
Hidrogênio	0,00005%
Criptônio, Xenônio, Ozônio, etc	0,00002%

Componente	Fração molar(%)
Nitrogênio	78,08%
Oxigênio	20,95%
Argônio	0,93%
Dióxido de carbono	0,03%
Neônio, hélio, Metano e outros)	0,01%

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico x Ar Seco x Ar Úmido

O ar úmido é considerado como uma mistura binária (2 componentes) de **ar seco** e **vapor d'água.** Mas, isso será tratado quando falarmos de Misturas Gás-Vapor pois, antes precisamos verificar outros temas.

A quantidade de vapor d´água no ar úmido varia de **zero** (ar seco) e um máximo que depende da pressão e temperatura da mistura

Embora a quantidade de vapor de água no ar seja pequena, ela tem um papel importante para o conforto humano.

Importante!

O ar úmido é considerado como uma mistura binária (2 componentes) de ar seco e vapor d'água.

Exemplo 1

Composição e análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Segue abaixo as respectivas frações molares para o **Ar Atmosférico Padrão**. É importante salientar que a composição do ar varia com a altitude, com o número de poluentes e com outras variáveis de uma localidade.

Componente	Fração molar(%)
Nitrogênio	78,08%
Oxigênio	20,95%
Argônio	0,93%
Dióxido de carbono	0,03%
Outros	0,01%

Selecionando os pesos moleculares de cada componente (Nitrogênio, Oxigênio, Argônio e Dióxido de Carbono) e, negligenciando os traços das demais substâncias, tem-se o **peso molecular aparente para o ar seco**.

$$M \approx 0.7808(28.02) + 0.2095(32.00) + 0.0093(39.94) + 0.0003(44.01)$$
$$= 28.97 \text{ kg/kmol}$$

Tabela A5

Exemplo 2

Composição e análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

A análise dos componentes de do ar atmosférico padrão pode ser definida pela **fração mássica** ou pela **fração molar** de cada componente.

(a) De **fração molar** Para **fração mássica**

Componente	Fórmula	Mol [%]	Fração molar		Massa molecular	Massa molecular	Massa kg por Mol de mistura	**Composição em base mássica**	
Nitrogênio	N2	78,08%	0,7808	x	28	28,0	21,862	=21,862/28,956	0,755
Oxigênio	O2	20,95%	0,2095	x	32	32,0	6,704	=6,704/28,956	0,232
Argônio	Ar	0,93%	0,0093	x	40	40,0	0,372	=0,372/28,956	0,013
Dióxido de carbono	CO2	0,04%	0,0004	x	44	44,0	0,018	=0,018/28,956	0,001
							28,956		

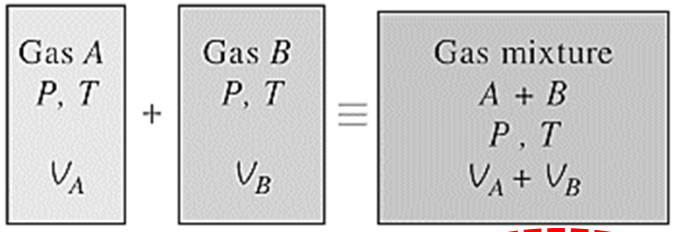
(b) De **fração mássica** Para **fração molar**

Componente	Fórmula	Composição mássica [%]	Fração mássica		Massa molecular	Massa kg por Mol de mistura	**Composição em base molar**	
Nitrogênio	N2	75,50%	0,7550	/	28	28,0	0,027	0,781	78,08%
Oxigênio	O2	23,15%	0,2315	/	32	32,0	0,007	0,210	20,95%
Argônio	Ar	1,28%	0,0128	/	40	40,0	0,000	0,009	0,93%
Dióxido de carbono	CO2	0,06%	0,0006	/	44	44,0	0,000	0,000	0,04%
							0,035		

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Modelo de Amagat

No **modelo de Amagat**, as propriedades de cada componente são determinadas a partir da hipótese de que **cada um dos componentes esteja a pressão e a temperatura da mistura**. A soma dos volumes parciais de cada componente da mistura, para o caso particular de gases perfeitos, é o volume total da mistura.



Assim, a soma das frações em volume é unitária e não haverá variação de volume se os componentes forem misturados e mantido a mesma T e P.

$$n = n_A + n_B$$

$$\frac{pV}{\overline{R}T} = \frac{p\ V_A}{\overline{R}T} + \frac{p\ V_B}{\overline{R}T}$$

$$V_A + V_B = V$$

$$\frac{V_A}{V} + \frac{V_B}{V} = 1$$

$$\frac{V_A}{V} = \frac{n_A}{n} = \frac{p_A}{p}$$

$$\frac{V_B}{V} = \frac{n_B}{n} = \frac{p_B}{p}$$

$$\frac{V_i}{V} = \frac{n_i \overline{R}T/p}{n\overline{R}T/p} = \frac{n_i}{n} = y_i \qquad V = \sum_{i=1}^{j} V_i$$

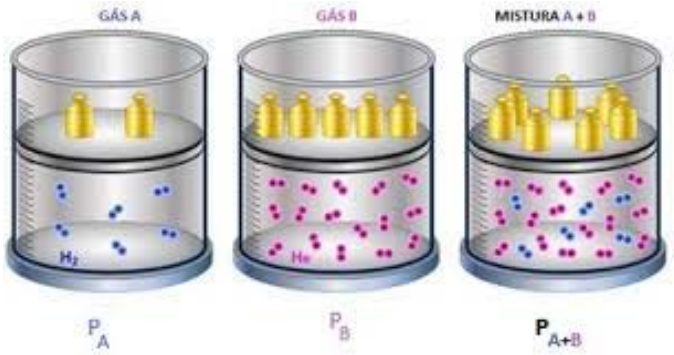
** A **fração volumétrica**, a **fração molar** e **relação entre a pressão parcial e a pressão total** são iguais para cada componente. **Esse é o problema do modelo.**

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Modelo de Dalton

No **modelo de Dalton**, as propriedades de cada componente são determinadas a partir da hipótese de que **cada um dos componentes ocupa todo o volume na temperatura da mistura**. A soma das **pressões parciais** de cada componente da mistura, para o caso particular de gases perfeitos, é a pressão total da mistura.

** Assim, as outras propriedades da mistura (energia interna, entalpia e entropia) podem ser calculadas como a soma das respectivas propriedades de cada componente **nas condições em que se encontram na mistura**.



$$p_A V = n_A \overline{R} T$$

$$p_B V = n_B \overline{R} T$$

$$n = n_A + n_B$$

$$\frac{pV}{\overline{R}T} = \frac{p_A V}{\overline{R}T} + \frac{p_B V}{\overline{R}T}$$

$$p = p_A + p_B$$

$$\frac{p_i}{p} = \frac{n_i \overline{R} T/V}{n \overline{R} T/V} = \frac{n_i}{n} = y_i$$

$$p = \sum_{i=1}^{j} p_i$$

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Modelo de Dalton (Avaliação de u, h, s, c_p e c_v)

Propriedades extensivas da mistura podem ser obtidas pela soma das contribuições individuais de cada componente *nas condições em que ele se encontra na mistura* (Modelo de Dalton).

$$U = U_1 + U_2 + \cdots + U_j = \sum_{i=1}^{j} U_i \qquad \overline{u} = \sum_{i=1}^{j} y_i \overline{u}_i \qquad \overline{c}_v = \sum_{i=1}^{j} y_i \overline{c}_{v,i}$$

$$H = H_1 + H_2 + \cdots + H_j = \sum_{i=1}^{j} H_i \qquad \overline{h} = \sum_{i=1}^{j} y_i \overline{h}_i \qquad \overline{c}_p = \sum_{i=1}^{j} y_i \overline{c}_{p,i}$$

Diferenciando as equações acima com relação a temperatura, tem-se respectivamente, os calores específicos da mistura na base molar. Analogamente, a entropia da mistura pode ser encontrada. Obs: A entropia depende de 2 propriedades [T e p_i] (não apenas da Temperatura como u e h).

$$S = S_1 + S_2 + \cdots + S_j = \sum_{i=1}^{j} S_i \qquad \overline{s} = \sum_{i=1}^{j} y_i \overline{s}_i$$

Todas as equações anteriores podem ser reescritas de modo geral para misturas com qualquer número de componentes

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Modelo de Dalton (Avaliação de u, h, s, c_p e c_v)

É interessante ressaltar que o aumento da entropia depende somente do número de moles dos gases componentes quando misturados nas mesmas condições termodinâmicas, sendo independente de sua composição. Assim, se 2 quantidades diferentes de um **mesmo componente** forem misturadas nas mesmas condições termodinâmicas (P e T), o **aumento de entropia é NULO**.

$$T\,ds = du + p\,dv$$
$$T\,ds = dh - v\,dp$$

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{p}{T}dv$$
$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{v}{T}dp$$

$$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\frac{dT}{T} + R\ln\frac{v_2}{v_1}$$
$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\frac{dT}{T} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$S_2 - S_1 = \sum_{i=1}^{j} n_i[\bar{s}_i(T_2, p_{i2}) - \bar{s}_i(T_1, p_{i1})]$$

A entropia aumenta quando são misturados gases diferentes. Quando não existe distinção entre eles, não haverá aumento de entropia.

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Ar Atmosférico x Gases Perfeitos

Voltando à modelagem do ar, mais uma vez. O ar úmido é considerado como uma mistura binária (2 componentes) de **ar seco** e **vapor d'água.** É razoável modelar ambos, **vapor d'água** e **ar seco,** como um **gás ideal**?

O que é um gás ideal?

- ❑ Análise do ar seco
- ❑ Análise vapor d'água

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Ar Atmosférico x Gases Perfeitos

Análise do ar seco

A temperatura do ar nas aplicações de condicionamento varia de cerca de -10°C até 50°C. Nesse intervalo, o ar seco pode ser tratado como um gás ideal com um valor de c_p constante igual a 1,005 kJ/kg.K, com **erro desprezível** (abaixo de 0,2%).

O c_p do ar pode ser considerado constante e igual a 1,005 kJ/kg.°C (média) no intervalo de temperatura de -10°C a 50°C, com um **erro abaixo de 0,2%**

(Ref., Termodinâmica, Çengel, 7ª ed.)

Ar seco

T, °C	c_p, kJ/kg·°C
−10	1,0038
0	1,0041
10	1,0045
20	1,0049
30	1,0054
40	1,0059
50	1,0065

Tabela A5 e A6

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Ar Atmosférico x Gases Perfeitos

Análise do ar seco

Considerando 0°C como uma **temperatura de referência**, a **entalpia** e a **variação da entalpia** do **ar seco** podem ser determinadas por:

$$h_{ar\ seco} = c_p \times T = 1{,}005 \left(\frac{kJ}{kg.°C}\right) \times T(°C) ==\Rightarrow \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\Delta_{ar\ seco} = c_p \times \Delta T = 1{,}005 \left(\frac{kJ}{kg.°C}\right) \times \Delta T(°C) ==\Rightarrow \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

T e ΔT são, respectivamente, temperatura do ar em °C e variação da temperatura.

Nos processos de condicionamento de ar, estamos preocupados com as variações da entalpia, Δh, que é independente do ponto de referência selecionado.

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico x Gases Perfeitos

Análise do ar seco

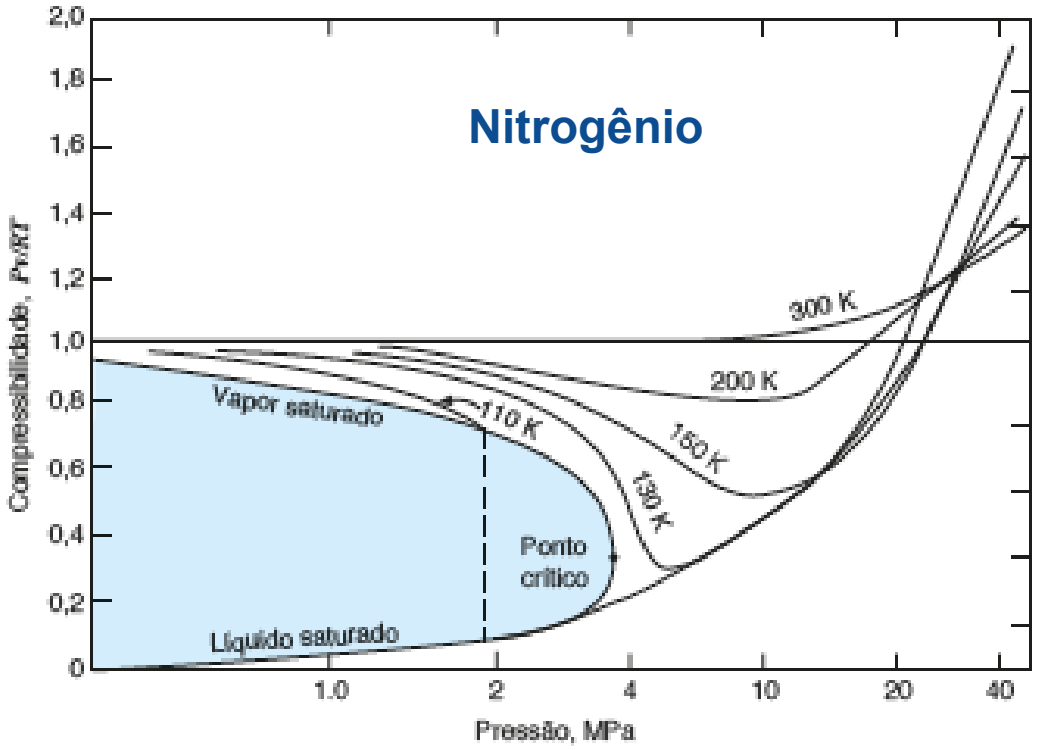
Fator de compressibilidade

Todos os gases e vapores apresentam comportamento próximo daquele do gás perfeito quando:

- a massa específica é baixa
- as pressões são baixas ($p<<p_c$)e,
- as temperaturas são altas ($T>2T_c$ até $p<4p_c$)).

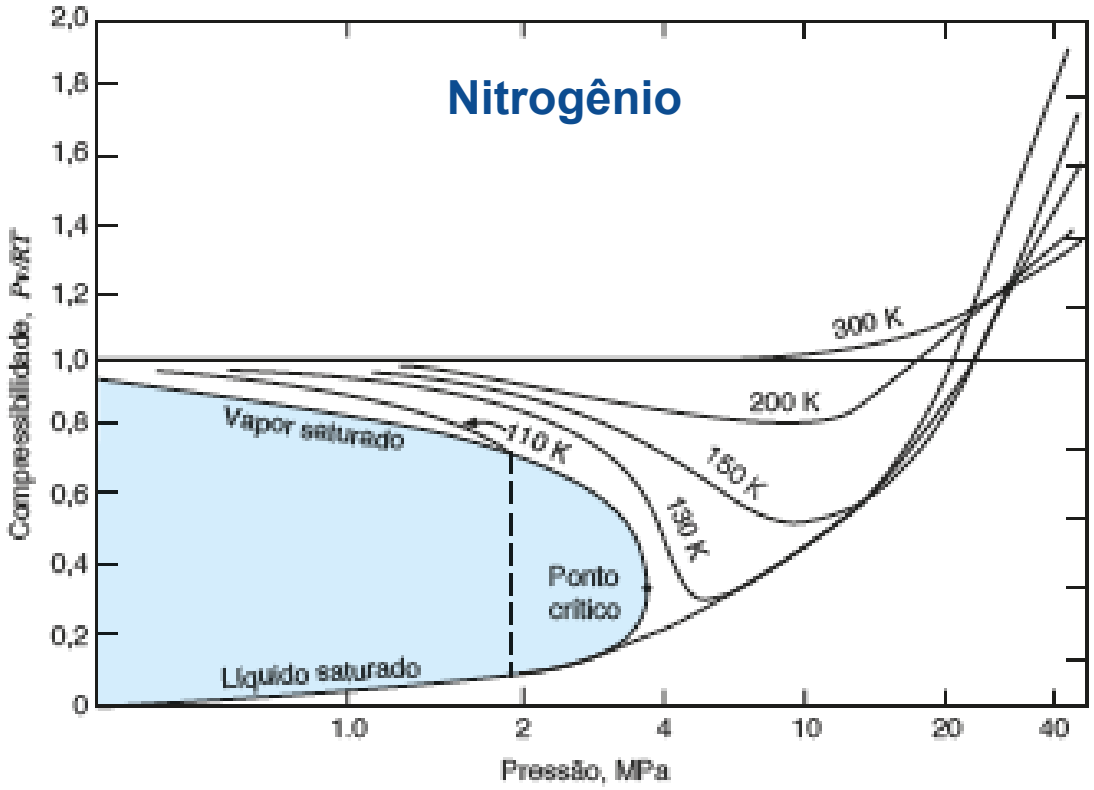
Conclusões:

Observe também que para T>300K, Z→1@P<10MPa. Isso significa que a equação de estado dos gases perfeitos pode ser utilizada para o **nitrogênio (e, também para o ar)**, nesta faixa, como boa precisão.



Estudo Dirigido
Atividade em grupo (em sala)

Pesquisa: fator de compressibilidade, conceitos de **pressão reduzida** e **temperatura reduzida**, e exercício **Exemplo 3-11**, Termodinâmica, Çengel, 7ª ed., página 139 (uso de diagramas generalizados)



Uso do diagrama generalizado de compressibilidade de Nelson-Obert ou fluido de Lee-Kesler simples. **Resultados e método gráfico**

Anexo D1

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico x Gases Perfeitos

Análise vapor d'água

O **vapor de água** sempre pode ser modelado como um **gás ideal**?

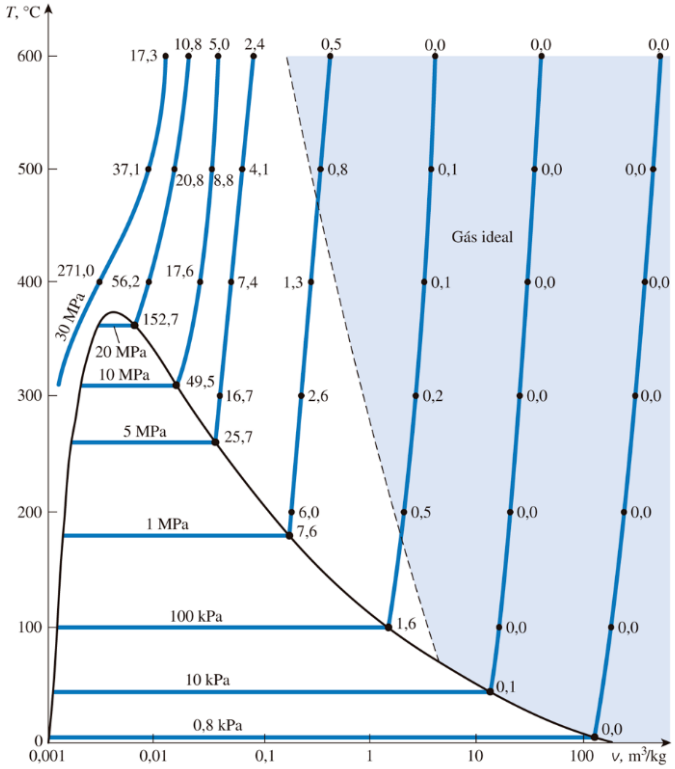


FIGURA 3–47 Erro percentual ($[|v_{tabela} - v_{ideal}|/v_{tabela}] \times 100$) ao se aplicar a hipótese de gás ideal para o vapor de água e a região na qual o vapor pode ser considerado um gás ideal com menos de 1% de erro.

Vapor de água

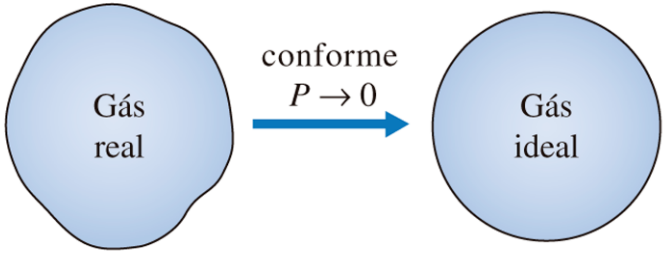


FIGURA 3–50 A pressões muito baixas, todos os gases se aproximam do comportamento de gás ideal (independentemente de sua temperatura).

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico x Gases Perfeitos

Análise vapor d'água

O **vapor de água** sempre pode ser modelado como um **gás ideal**?

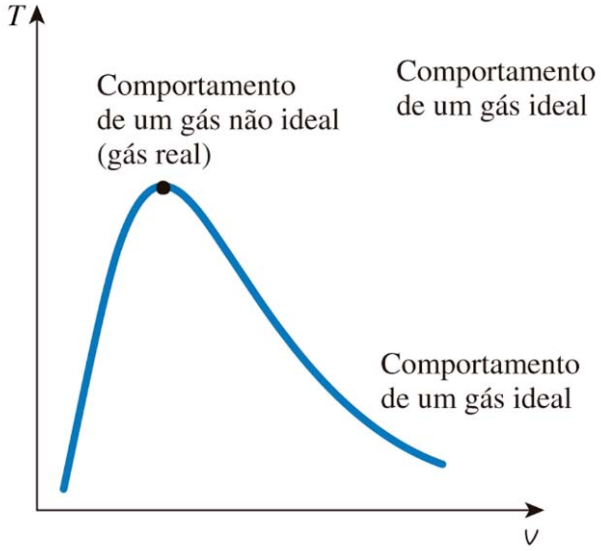


FIGURA 3–51 Gases se desviam do comportamento de gás ideal à medida que se aproximam da vizinhança do ponto crítico.

Os gases obedecem à equação do gás ideal a pressões baixas e temperaturas altas. Mas o que exatamente constitui pressão baixa ou temperatura alta? Leitura recomendada: Çengel, 7ª ed., pág 139.

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico x Gases Perfeitos

Análise vapor d'água

Fator de compressibilidade generalizado

Todos os **gases e vapores** apresentam comportamento próximo daquele do gás perfeito quando:

- a massa específica é baixa
- as pressões são baixas ($p<<p_c$)e,
- as temperaturas são altas ($T>2T_c$ até $p<4p_c$)).

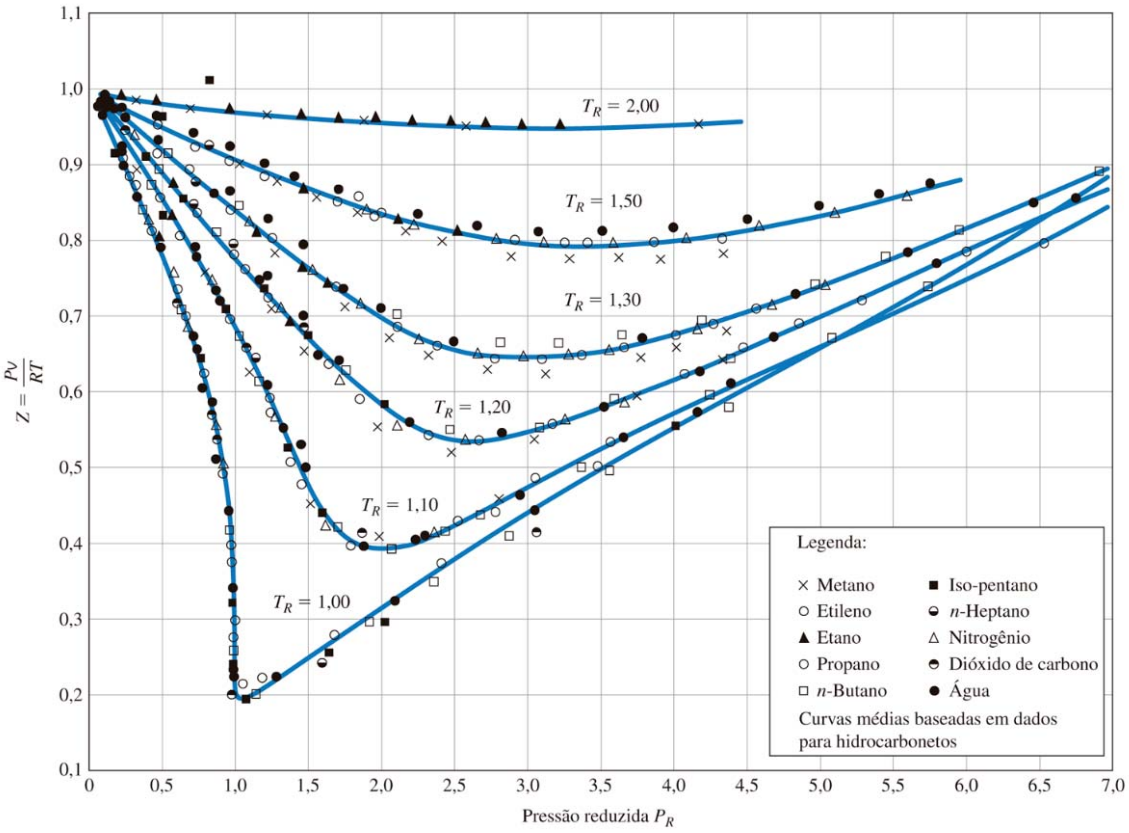


FIGURA 3–49 Comparação dos fatores Z para diversos gases.
Fonte: *Gour-Jen Su, "Modified Law of Corresponding States,"* Ind. Eng. Chem. *(international ed.) 38 (1946), p. 803.*

Anexo D1

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Ar Atmosférico x Gases Perfeitos

Análise vapor d'água

Fator de compressibilidade generalizado

Todos os **gases e vapores** apresentam comportamento próximo daquele do gás perfeito quando:

- a massa específica é baixa
- as pressões são baixas ($p << p_c$)e,
- as temperaturas são altas ($T > 2T_c$ até $p < 4p_c$)).

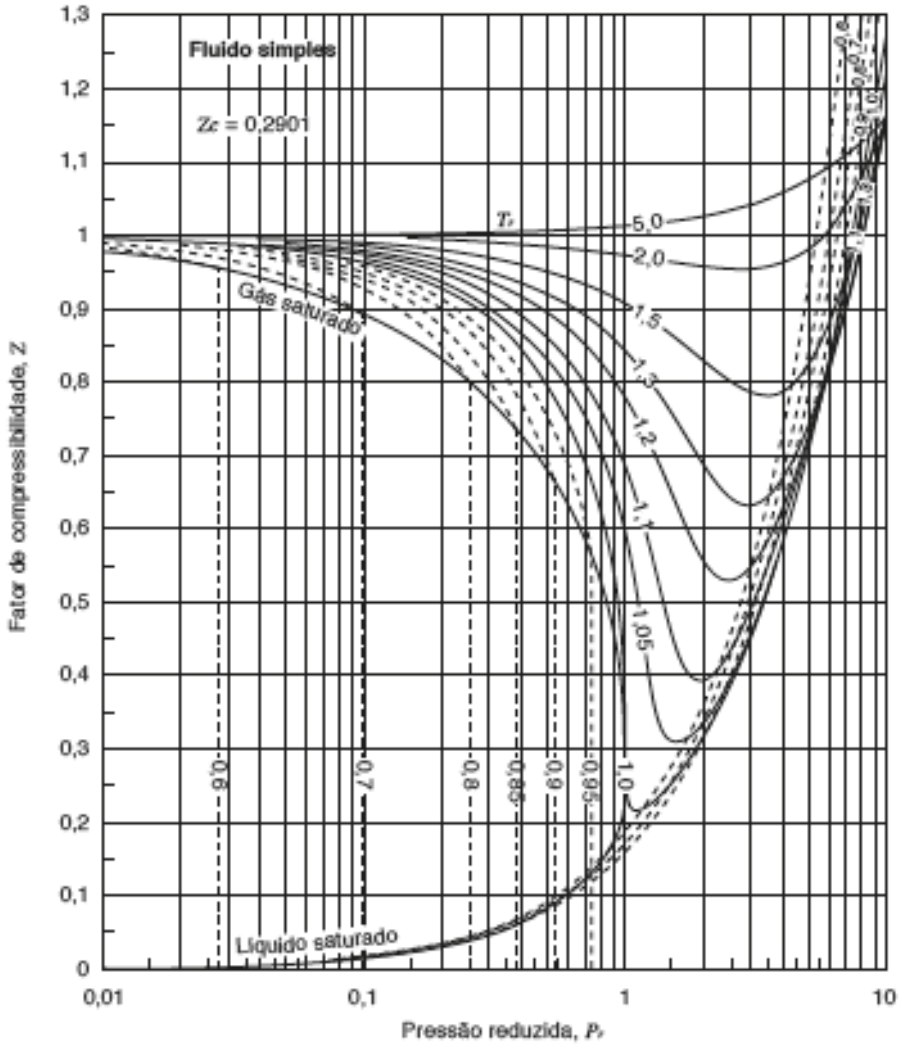


Figura D.1
Fator de compressibilidade para o fluido de Lee-Kesler simples.

Anexo D1

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Ar Atmosférico x Gases Perfeitos

Análise vapor d'água

O **vapor de água** sempre pode ser modelado como um **gás ideal**?

Então, o vapor de água, que assim como o ar seco, também pode ser modelado como um gás ideal..

A 50°C, a pressão de saturação da água é de 12,3 **kPa**. A pressões abaixo desse valor, o vapor de água pode ser tratado como um gás ideal com erro desprezível (abaixo de 0,2%), mesmo quando ele é vapor saturado.

Portanto, o vapor de água do ar se comporta como se existisse sozinho e obedece à relação de gás ideal Pv = RT.

O ar atmosférico pode ser tratado como uma mistura de gases ideais. É considerado como uma mistura binária (2 componentes) de ar seco e vapor d'água.

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico (Pressão)

Qual é/como calcular a pressão do ar atmosférico?

Conceito de pressão parcial

$$P = P_a + P_v \ (kPa)$$

Obs.: convenção o subscrito *a* indica ar seco e o subscrito *v* indica vapor de água.

Como o vapor de água é um gás ideal, a entalpia do vapor de água é uma função apenas da temperatura, ou seja, h = h(T). Logo, a entalpia do vapor de água no ar pode ser considerada igual à entalpia do vapor saturado à mesma temperatura.

$$h_v(T, baixa\ P) \cong h_g(T)$$

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Ar Atmosférico (Pressão)

Qual é/como calcular a pressão do ar atmosférico?

Conceito de pressão parcial

A entalpia do vapor de água a 0°C é 2500,9 kJ/kg. O valor médio do c_p do vapor de água no intervalo de temperaturas típico (-10°C a 50°C) pode ser assumido igual a 1,82 kJ/kg.°C.

Logo:

$$h_g(T) \cong 2500{,}9 + 1{,}82 \times T\left(\frac{kJ}{kg}\right) \; T \; em \; °C$$

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico (Pressão)

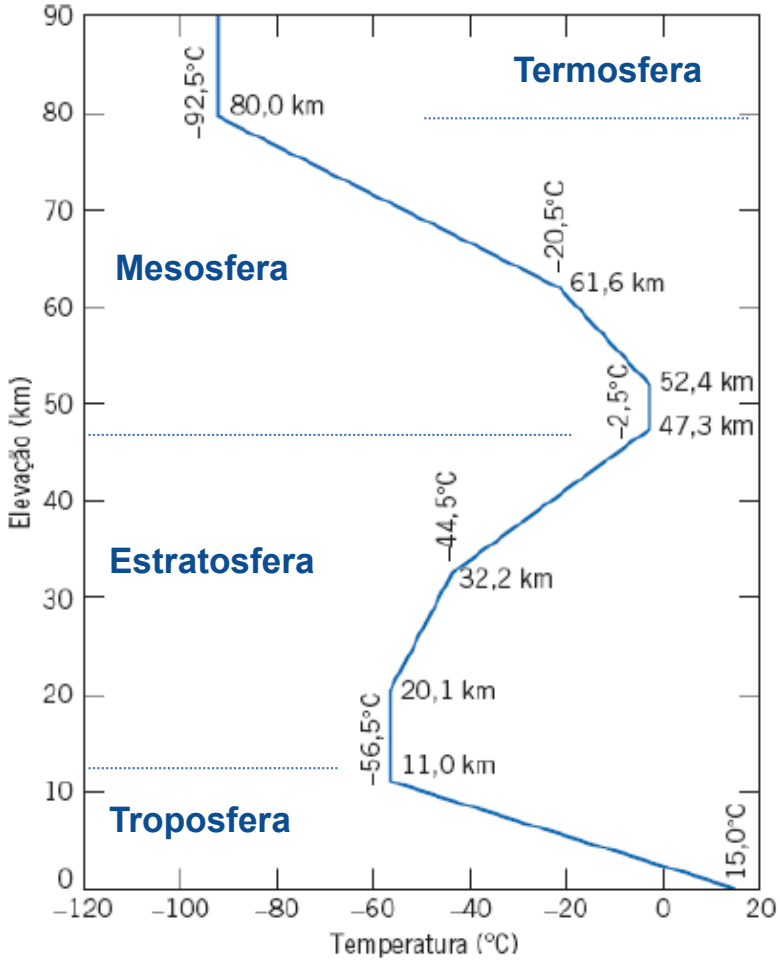
Qual é/como calcular a pressão do ar atmosférico?

Conceito de pressão da atmosfera

A **temperatura do ar atmosférico** e a **pressão atmosférica** variam consideravelmente com a altitude (também com a posição geográfica e as condições meteorológicas mas, estas não serão abordadas aqui!)

Por que isso é importante?

Porque nem todos os sistemas térmicos são projetados para a **pressão atmosférica padrão do nível do mar. A pressão atmosférica local é de suma relevância (altitude).**



Variação da temperatura com a altitude na Atmosfera-Padrão nos Estados Unidos.

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Ar Atmosférico (Pressão)

Qual é/como calcular a pressão do ar atmosférico?

Conceito de pressão da atmosfera

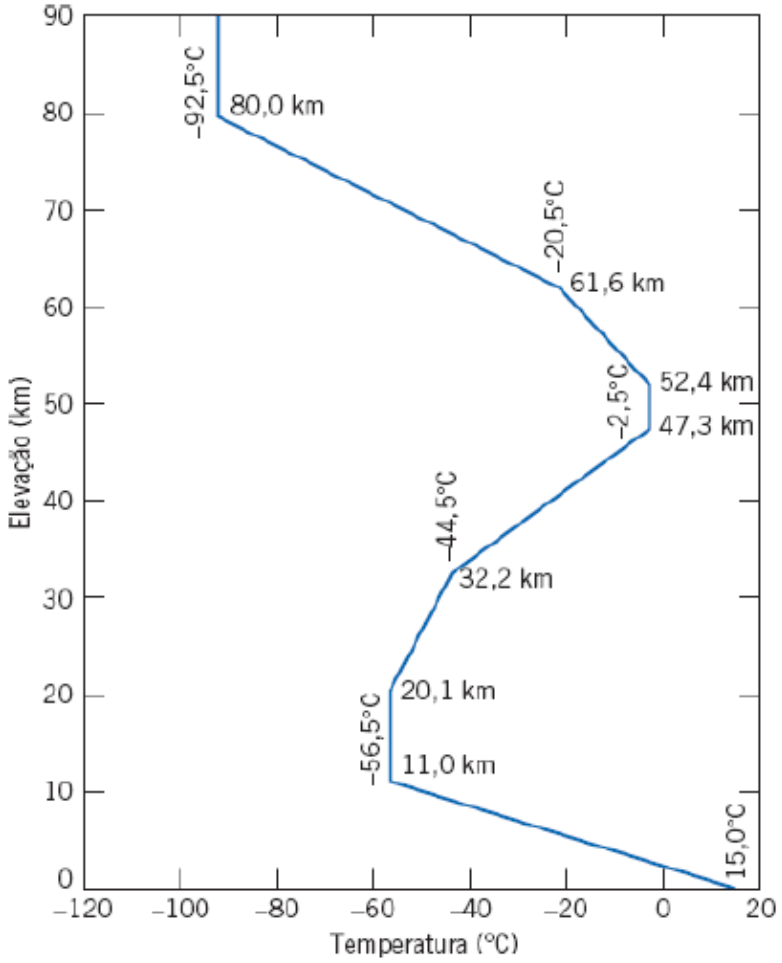
Uma Atmosfera Padrão Internacional (API) foi definida pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI). O perfil de temperatura da Atmosfera-Padrão é mostrado na Figura.

Hipóteses:

Isotérmica / VLT / Adiabática

$$P = 101,325\left(1 - 2,25577 \times 10^{-5}.h\right)^{5,2559}$$

$$h \rightarrow -500m < altitude < 11000m$$



Variação da temperatura com a altitude na Atmosfera-Padrão nos Estados Unidos.

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico (Pressão)

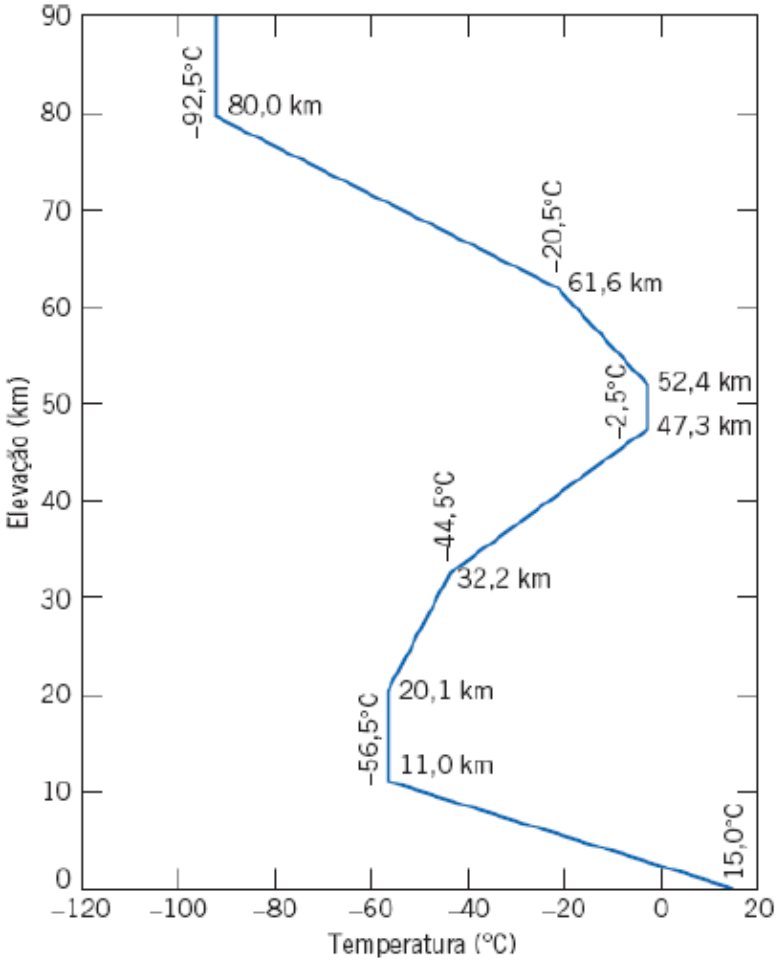
Qual é/como calcular a pressão do ar atmosférico?

Conceito de pressão da atmosfera

Tabela de Atmosfera Padrão

z, m	T, K	p, Pa	ρ, kg/m^3	a, m/s
−500	291.41	107,508	1.2854	342.2
0	288.16	101,350	1.2255	340.3
500	284.91	95,480	1.1677	338.4
1,000	281.66	89,889	1.1120	336.5
1,500	278.41	84,565	1.0583	334.5
2,000	275.16	79,500	1.0067	332.6
2,500	271.91	74,684	0.9570	330.6
3,000	268.66	70,107	0.9092	328.6
3,500	265.41	65,759	0.8633	326.6
4,000	262.16	61,633	0.8191	324.6
4,500	258.91	57,718	0.7768	322.6
5,000	255.66	54,008	0.7361	320.6
5,500	252.41	50,493	0.6970	318.5
6,000	249.16	47,166	0.6596	316.5
6,500	245.91	44,018	0.6237	314.4
7,000	242.66	41,043	0.5893	312.3
7,500	239.41	38,233	0.5564	310.2
8,000	236.16	35,581	0.5250	308.1
8,500	232.91	33,080	0.4949	306.0
9,000	229.66	30,723	0.4661	303.8
9,500	226.41	28,504	0.4387	301.7
10,000	223.16	26,416	0.4125	299.5
10,500	219.91	24,455	0.3875	297.3
11,000	216.66	22,612	0.3637	295.1
11,500	216.66	20,897	0.3361	295.1
12,000	216.66	19,312	0.3106	295.1

z, m	T, K	p, Pa	ρ, kg/m^3	a, m/s
12,000	216.66	19,312	0.3106	295.1
12,500	216.66	17,847	0.2870	295.1
13,000	216.66	16,494	0.2652	295.1
13,500	216.66	15,243	0.2451	295.1
14,000	216.66	14,087	0.2265	295.1
14,500	216.66	13,018	0.2094	295.1
15,000	216.66	12,031	0.1935	295.1
15,500	216.66	11,118	0.1788	295.1
16,000	216.66	10,275	0.1652	295.1
16,500	216.66	9,496	0.1527	295.1
17,000	216.66	8,775	0.1411	295.1
17,500	216.66	8,110	0.1304	295.1
18,000	216.66	7,495	0.1205	295.1
18,500	216.66	6,926	0.1114	295.1
19,000	216.66	6,401	0.1029	295.1
19,500	216.66	5,915	0.0951	295.1
20,000	216.66	5,467	0.0879	295.1
22,000	218.6	4,048	0.0645	296.4
24,000	220.6	2,972	0.0469	297.8
26,000	222.5	2,189	0.0343	299.1
28,000	224.5	1,616	0.0251	300.4
30,000	226.5	1,197	0.0184	301.7
40,000	250.4	287	0.0040	317.2
50,000	270.7	80	0.0010	329.9
60,000	255.7	22	0.0003	320.6
70,000	219.7	6	0.0001	297.2



Variação da temperatura com a altitude na Atmosfera-Padrão nos Estados Unidos.

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico (Pressão)

Conceito de pressão da atmosfera

Hipótese Isotérmica

Os gases são compressíveis, com a densidade aproximadamente proporcional à pressão. Logo, a massa específica deve ser considerada uma variável, se a integração for efetuada a intervalos com grande variação de pressão.

$$P = \rho RT \qquad \frac{dP}{dz} = -\gamma = -\rho g = -\frac{P}{RT} g$$

Separando as variáveis e integrando-se entre dois pontos quaisquer 1 e 2, teremos

$$\int_1^2 \frac{dP}{P} = \ln \frac{P_2}{P_1} = -\frac{g}{R} \int_1^2 \frac{dz}{T}$$

A integral em z requer uma hipótese a respeito da variação T(z). Uma hipótese é a isotérmica. Assim $T=T_0$. Consequentemente

$$P_2 = P_1 \, e^{\left[-\frac{g(z_2 - z_1)}{RT_0}\right]} \longrightarrow P = P_{atm} \, e^{-\left[\frac{gz}{RT_0}\right]}$$

A quantidade entre colchetes é adimensional.

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico (Pressão)

Conceito de pressão da atmosfera

Hipótese VLT (Variação Linear de Temperatura)

Mas a hipótese isotérmica é irrealista. A temperatura atmosférica média da Terra decresce quase linearmente com z até 11 km (Essa região mais interna da atmosfera é denominada **troposfera**):

$$T = T_0 - Bz$$

onde T_0 é a temperatura (absoluta) ao nível do mar e B é a taxa de declínio.

Por força de um acordo internacional, os valores de T_0 e B são padronizados:

$$T_0 = 288{,}16\ \text{K} = 15\ ^\circ\text{C}$$

$$B = 0{,}003566\ \text{R/ft} = 0{,}0065\ \text{K/m}$$

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico (Pressão)

Conceito de pressão da atmosfera

Hipótese VLT (Variação Linear de Temperatura)

Introduzindo a hipótese $T = T_0 - Bz$ em $P=\rho RT$, tem-se:

$u = -Bz + T_o$
$du = -Bdz$

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = -\frac{g}{R}\int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{T_o - Bz} \Rightarrow \ln\frac{P_2}{P_1} = -\frac{g}{R}\left(-\frac{1}{B}\right)\int_{u(z_1)}^{u(z_2)} \frac{du}{u} = \frac{g}{RB}\ln[u]\Big|_{u(z_1)}^{u(z_2)}$$

$$= \frac{g}{RB}\ln[T_o - Bz]\Big|_{z_1=0}^{z_2=z} = \frac{g}{RB}\ln\left[\frac{T_o - Bz}{T_o}\right]$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left[\frac{T_o - Bz}{T_o}\right]^{\frac{g}{RB}} = \left[1 - \frac{Bz}{T_o}\right]^{\frac{g}{RB}}$$

$$P = P_a\left[1 - \frac{Bz}{T_0}\right]^{\frac{g}{RB}}$$

Onde $\frac{g}{RB} = 5{,}26\ (ar)$

Exemplo

A Atmosfera Padrão - Hipótese Isotérmica x Hipótese com variação linear de temperatura

Se a pressão ao nível do mar for igual a 101,325 kPa, calcule a pressão padrão a uma altitude de 5 000 m e à temperatura de 15 °C (288,16 K) pela:

(a) hipótese com variação linear de temperatura

(b) hipótese isotérmica.

(a) $$P = P_{atm}\left[1 - \frac{BZ}{T_0}\right]^{\frac{g}{RB}} = 101{,}325\left[1 - \frac{0{,}065 \cdot 5\,000}{288{,}16}\right]^{5{,}26} \cong 54{,}0\ \text{kPa}$$

(b) $$P = P_{atm}\, e^{-\left[\frac{gz}{RT_0}\right]} = 101{,}325 e^{-\left[\frac{9{,}8 \cdot 5\,000}{287 \cdot 288{,}16}\right]} \cong 56{,}0\ \text{kPa}$$

(esse resultado é 4% maior que o calculado pela fórmula com variação linear de temperatura)

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico (Pressão)

Conceito de pressão da atmosfera

Hipótese Adiabática

Sob algumas condições, a atmosfera é adiabática, isto é, $P = c\rho^{K}$ onde "c" é uma constante e "k" é a razão entre calores específicos. Para uma atmosfera adiabática, a variação de pressão é dada por:

$$P = P_0\left[1 - \frac{(k-1)gz}{kRT_0}\right]^{\left(\frac{k}{k-1}\right)}$$

Introduzindo a hipótese adiabática na relação básica da hidrostática.

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \Rightarrow \frac{d(C_1\rho^k)}{dz} = kC_1\rho^{k-1}\frac{d\rho}{dz}$$

Separando as variáveis e integrando:

$$\int C_1\rho^{k-2}\,d\rho = -\int \frac{g}{k}dz \Rightarrow C_1\frac{\rho^{k-1}}{k-1} = -\frac{gz}{k} + C_2$$

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos
Ar Atmosférico (Pressão)

Conceito de pressão da atmosfera

Hipótese Adiabática

Esta constante de integração está relacionada com z = 0, isto é, $C_2 = C_1 \frac{{\rho_0}^{k-1}}{k-1}$

$$C_1 \frac{\rho^{k-1}}{k-1} = -\frac{gz}{k} + C_1 \frac{{\rho_0}^{k-1}}{k-1} \Rightarrow \frac{C_1}{k-1}\left(\rho^{k-1} - {\rho_0}^{k-1}\right) = -\frac{gz}{k} \Rightarrow \frac{C_1 {\rho_0}^{k-1}}{(k-1)}\left(\frac{\rho^{k-1}}{{\rho_0}^{k-1}} - 1\right) = -\frac{gz}{k}$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{k-1} - 1 = -\frac{gz}{k}\left[\frac{(k-1)}{C_1 {\rho_0}^{k-1}}\right] \Rightarrow \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{k-1} = 1 - \frac{gz}{k}\left[\frac{(k-1)}{C_1 {\rho_0}^{k-1}}\right] = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \text{ considerando que } p = C_1 \rho^k$$

Finalmente, repare que, $C_1 {\rho_0}^{k-1} = C_1 \frac{{\rho_0}^k}{\rho_0} = \frac{p_0}{\rho_0} = RT_0$

onde T_0 é a temperatura da superfície. Assim, a relação da pressão final desejada para uma atmosfera adiabática é

$$\frac{P}{P_0} = \left[1 - \frac{(k-1)gz}{kRT_0}\right]^{\left(\frac{k}{k-1}\right)}$$

Exemplo
A Atmosfera Padrão - Hipótese Adiabática

Se a pressão ao nível do mar for igual a 101,325 kPa, calcule a pressão padrão a uma altitude de 5 000 m e à temperatura de 15 °C (288,16 K) pela hipótese adiabática e compare com as propriedades para a atmosfera padrão.

Dados: P_0 = 1,01325 × 105 Pa, k = 1,4 (adiabática), g = 9,81 m/s² e R = 8,314 Pa.m³.K–¹.mol–¹.

(a) dados empíricos (API/OACI)

z, m	T, K	p, Pa	ρ, kg/m^3	a, m/s
5,000	255.66	54,008	0.7361	320.6

(b) hipótese adiabática.

$$\frac{P}{P_0} = \left[1 - \frac{(k-1)gz}{kRT_0}\right]^{\left(\frac{k}{k-1}\right)}$$

(@5.000 m, P=54.008 Pa (tabela), na hipótese adiabática (k=1,4) P=52.896 Pa (2,1% menor)

Estudo Dirigido
Variação da pressão e da massa específica da atmosfera (Estudo de Caso 1).

Um projeto de um sistema térmico deve adequar os dados de processo de um equipamento de uma cidade de baixa altitude (630mmHg) para uma maior elevação. Determine a pressão atmosférica local e a variação da massa específica do ar entre 2 cidades com elevações de 1610m@27°C e 3230m@17°C, respectivamente.

(a) hipótese com variação linear de massa específica

(b) hipótese de massa específica constante

(c) hipótese isotérmica

(d) hipótese adiabática

Estudo Dirigido
Variação da pressão e da massa específica da atmosfera (Estudo de Caso 1).

(a) hipótese com variação linear de massa específica

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{g/mR} \longrightarrow \frac{p}{p_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{g/mR} = \left(\frac{273+17}{273+27}\right)^{5,54} = (0,967)^{5,54} = 0,829$$

$$p = 0,829\,p_0 = (0,829)630\,\text{mmHg} = 522,3\,\text{mmHg} = 69,6\,\text{kPa}$$

Onde:

$$m = \frac{T_0 - T}{z - z_0} = \frac{(27-17)^\circ\text{C}}{(3230-1610)\,\text{m}} = 6,17\times10^{-3}\,^\circ\text{C/m}$$

$$\frac{g}{mR} = 9,81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\times\frac{1}{6,17\times10^{-3}}\times\frac{1}{286,9\,\text{J/kg}^\circ\text{K}}\times\frac{\text{N}\cdot\text{s}^2}{\text{kg}\cdot\text{m}}\times\frac{\text{J}}{\text{N}\cdot\text{m}} = 5,54$$

Note que a temperatura deve ser expressa como uma temperatura absoluta na equação do gás ideal

$$\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0} = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 = \frac{p}{p_0}\frac{T_0}{T} - 1 = \frac{0,829}{0,967} - 1 = -0,143 \quad \text{ou} \quad -14,3\%$$

(b) hipótese de massa específica constante

$$p = p_0 - \rho_0 g(z - z_0) = p_0 - \frac{p_0 g\,(z - z_0)}{RT_0} = p_0\left[1 - \frac{g(z - z_0)}{RT_0}\right]$$

$$p = 513{,}3\ \text{mmHg} = 68{,}4\ \text{kPa} \quad \text{e} \quad \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = 0$$

Note que, por hipótese, não há variação de massa específica

(c) hipótese isotérmica $(T=T_0)$

$$dp = -\rho g\,dz = -\frac{p}{RT} g\,dz$$

$$\int_{p_0}^{p} \frac{dp}{p} = -\int_{z_0}^{z} \frac{g}{RT} dz$$

$$p = p_0 \exp\left[\frac{-g(z - z_0)}{RT}\right] \longrightarrow p = 523{,}8\ \text{mmHg} = 69{,}8\ \text{kPa} \quad \text{e} \quad \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = -16{,}9\%$$

Estudo Dirigido
Variação da pressão e da massa específica da atmosfera (Estudo de Caso 1).

(d) hipótese adiabática

$$p = p_0\left(\frac{T}{T_0}\right)^{k/k-1} = 559{,}5\ \text{mmHg} = 74{,}6\ \text{kPa} \quad \text{e} \quad \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = -8{,}2\%$$

Conclusão:

Podemos notar que para variações de altitude, a pressão calculada dependente da hipótese adotada com desvios máximos em torno de 9%. Há um desvio consideravelmente maior (~17%) para a variação percentual da massa específica. **A hipótese de variação linear da temperatura com a altitude é a suposição mais razoável.**

Análise de sistemas de misturas de gases perfeitos

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

O **Ar seco** e **Vapor d'água** (ar atmosférico) em contato com a fase líquida ou sólida de um de seus componentes, como é o caso dos processos de condicionamento de ar e secagem, é um exemplo ordinário de aplicação do **modelo Gás-Vapor**, como as seguintes hipótese:

- A fase sólida ou líquida não contém gases dissolvidos
- A fase gasosa pode ser tratada como uma mistura de gases perfeitos
- Quando a mistura e fase condensada estão a uma dada pressão e temperatura, o equilíbrio entre a fase condensada e seu vapor não é influenciado pela presença do outro componente ($P_w=P_{sat}$).

** Este modelo é a base da Psicrometria **...e será tratado no próximo capitulo!**

Capítulo 3 - Psicrometria

Objetivo:

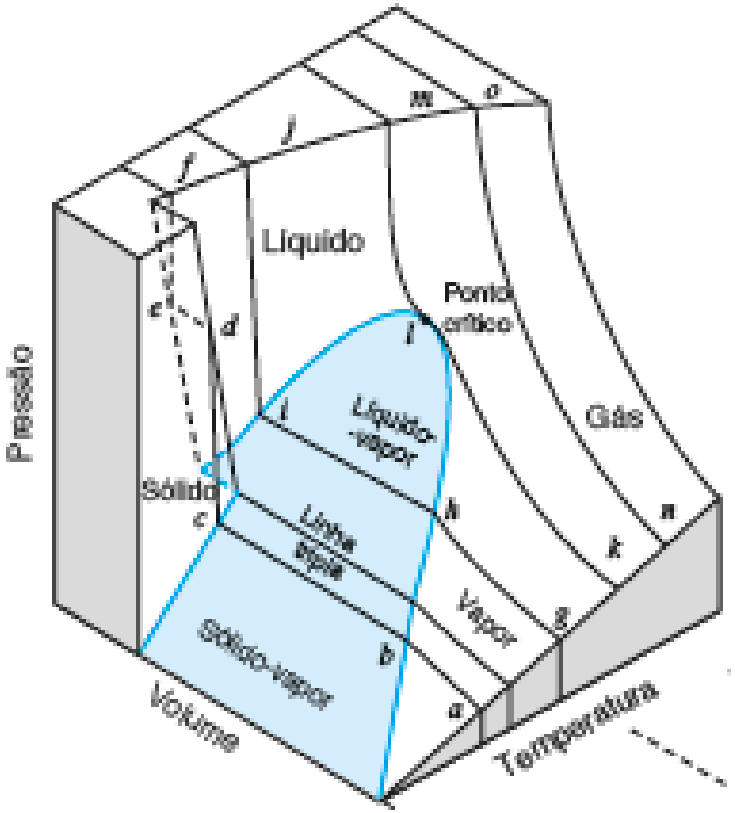
≡ Apresentar a Carta Psicrométrica e os conceitos relacionados: Ar Seco, Ar Saturado, Temperatura de Bulbo Seco e Bulbo Úmido, Umidade relativa, Umidade absoluta, Entalpia específica, Volume específico

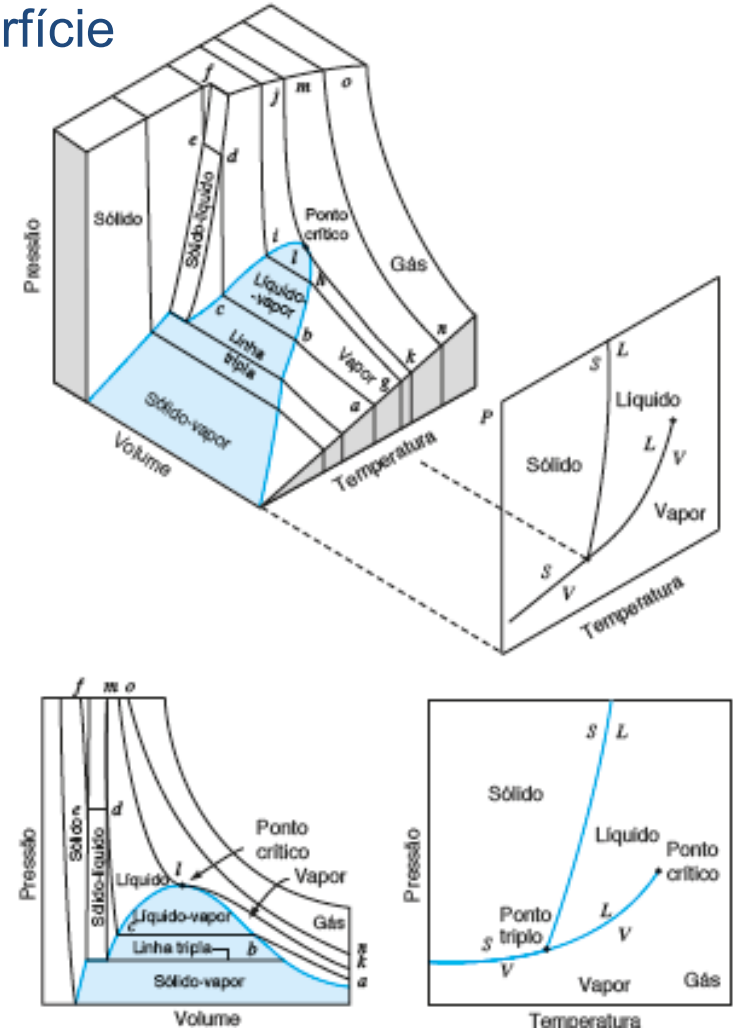
≡ Apresentar os Processos Psicrométricos de: Aquecimento, Umidificação, Resfriamento com Desumidificação, Mistura de dois fluxos de ar e Insuflamento no ambiente

≡ Apresentar processos de engenharia reais de condicionamento de ar: Saturador Adiabático, Transferência de Calor e Massa, Torres de Resfriamento, Condensadores Evaporativos, etc

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor
Superfícies Termodinâmicas (Gás ideal: P-v-T)

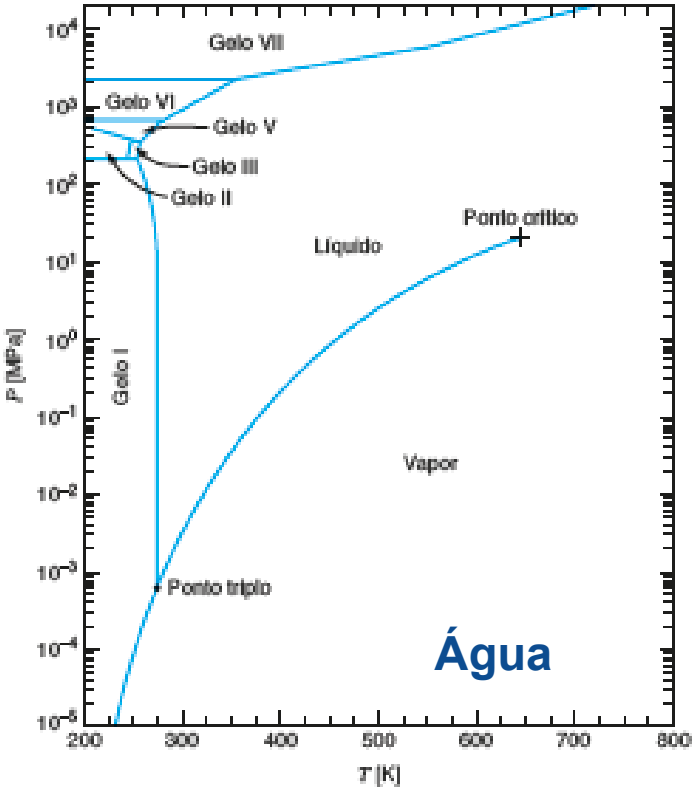
Cada **estado de equilíbrio** é representado por um ponto na superfície PvT e cada ponto na superfície representa um estado de equilíbrio possível.

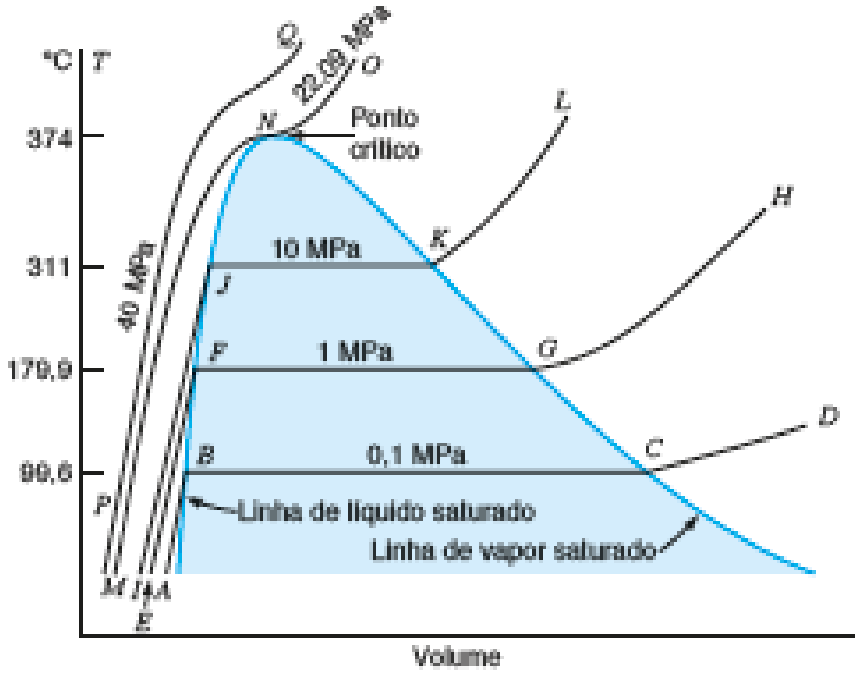




Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor
Superfícies Termodinâmicas (Gás ideal: P-v-T)

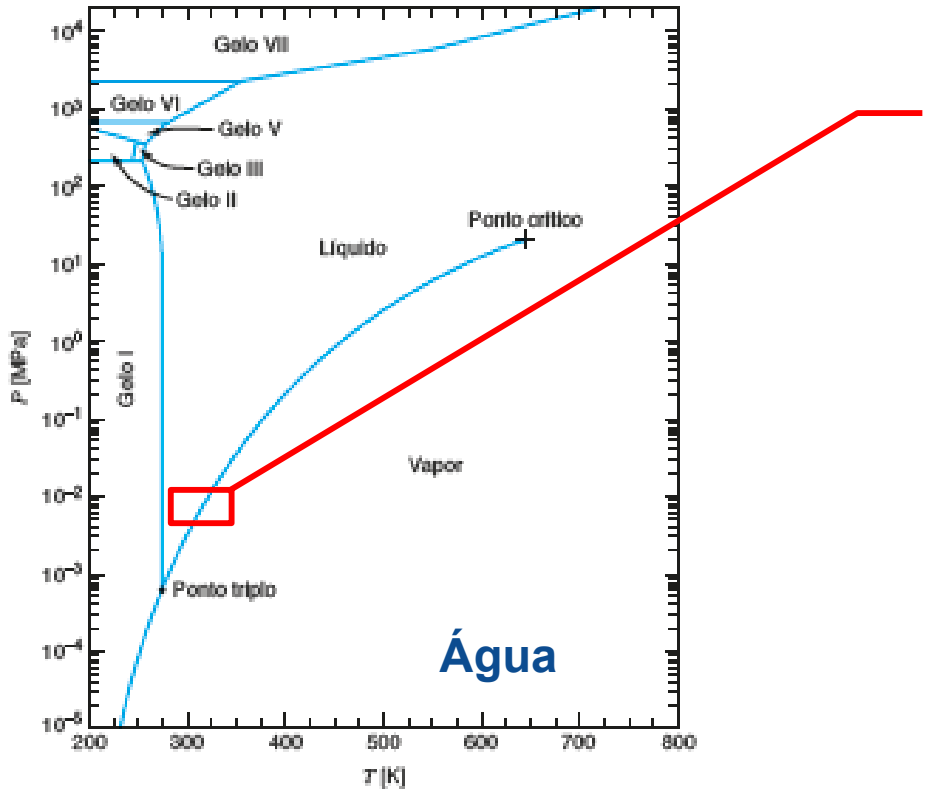
Sabemos da termodinâmica que o domínio das diferentes fases (sólido, líquido e vapor) de uma dada substância pura pode ser representado num plano pressão temperatura como abaixo...

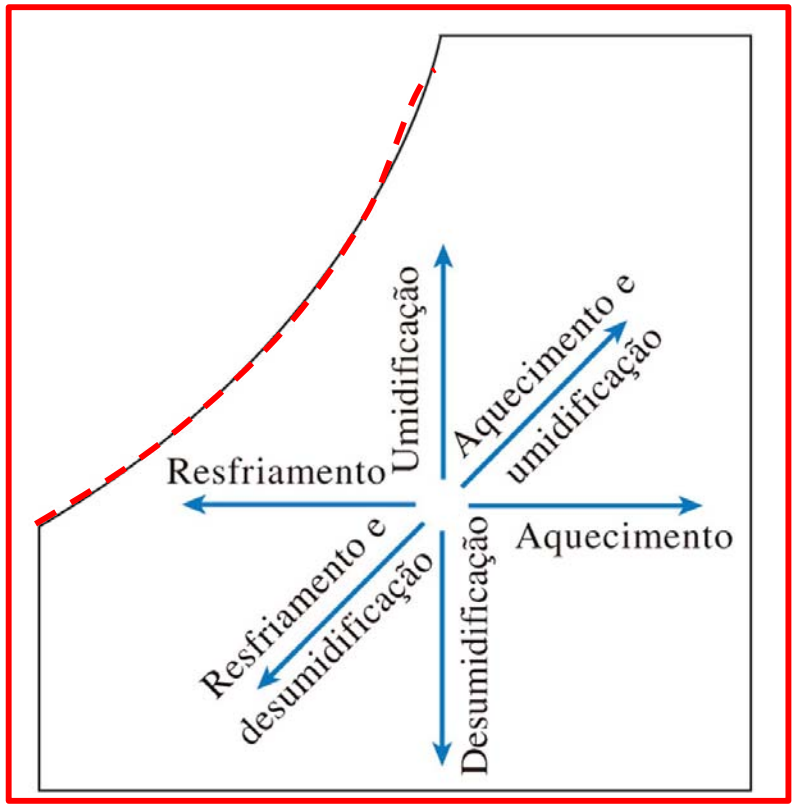




Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor
Superfícies Termodinâmicas (Gás ideal: P-v-T)

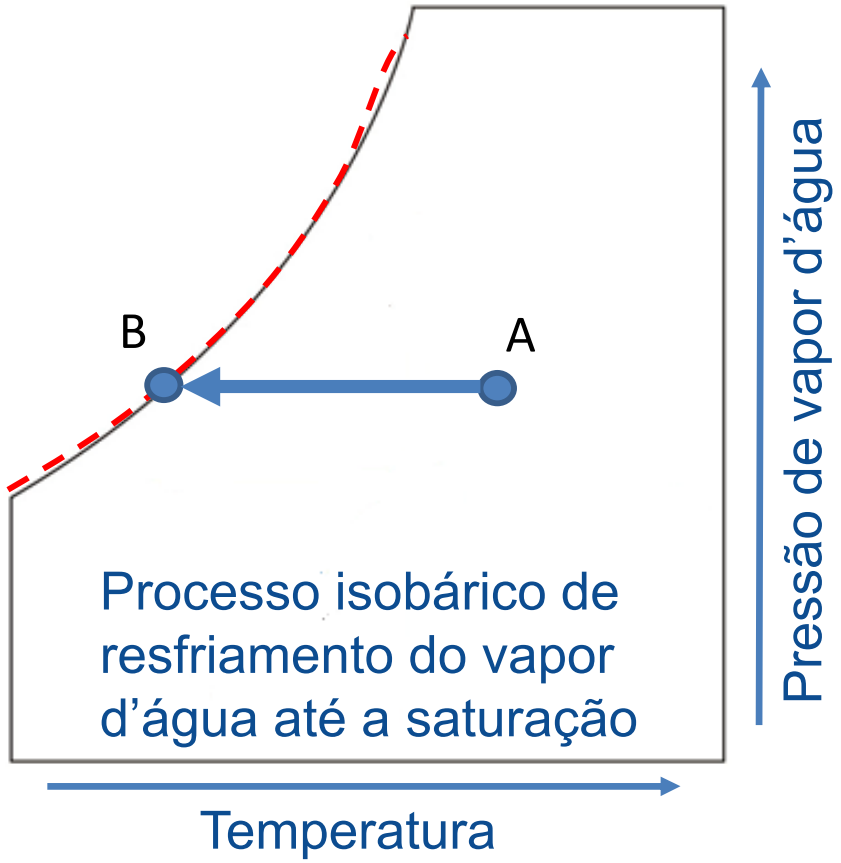
Em nosso estudo estaremos particularmente interessados com a linha de saturação (vaporização) que delimita as regiões de líquido e vapor





Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor
Superfícies Termodinâmicas (Gás ideal: P-v-T)

A região a direita dessa linha de saturação diz respeito ao vapor d'água superaquecido, tal qual o mesmo se encontra no ar úmido.



Importante!
Saturação – Estado de equilíbrio entre o ar úmido e a fase condensada (líquida ou sólida)

A quantidade de vapor d´água no ar úmido varia de **zero** (ar seco) e um máximo que depende da pressão e temperatura da mistura

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

O conceito de Psicrometria

≡ Estudo das misturas de ar e vapor d´água, isto é, o estudo do ar úmido (no limite, estudo de misturas binárias nas quais um dos componentes é um vapor condensável)

≡ Parte da Termodinâmica que estuda a mistura de ar e vapor d'água. Ela se ocupa também do condicionamento de ar para pessoas e processos.

Os rastros brancos deixados pelas turbinas dos aviões

A quantidade de vapor de água que contém na atmosfera é de grande importância no condicionamento de ar, já que afeta o conforto humano e determina a qualidade muitos produtos manufaturados.

Do grego *psychro {ψρon, ψρa}* [esfriar, resfriar]; e μετρos [medir]

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor
O conceito de Psicrometria

Aplicações da Psicrometria

≡ Controle de clima, em especial em condicionamento de ar para conforto térmico;

≡ Condensação em superfícies frias (ex: desumidificação [extração de água do ar]; o orvalho sobre a grama em uma manhã fria, a água sobre a superfície externa de um recipiente, etc.);

≡ Aquecimento e Resfriamento do ar

≡ Aquecimento/Resfriamento com Umidificação ou Desumidificação

≡ Resfriamento Evaporativo

≡ Mistura Adiabática de correntes de Ar

≡ Torres de Resfriamento / Condensadores Evaporativos

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

O conceito de Psicrometria (Relações Gases Perfeitos)

O ar úmido é considerado como uma mistura binária (2 componentes) de **ar seco** e **vapor d'água.**

Quando o ar úmido é considerado uma mistura de gases perfeitos independentes (ar seco + vapor d'água), temos: (já mencionado!)

Para o ar seco: $p_a V = n_a RT$

Para o vapor d'água: $p_v V = n_v RT$

Onde:

p_a pressão parcial do ar seco / p_v=pressão parcial do vapor d'água

V=volume total da mistura

n_a=número de moles de ar seco / n_v=número de moles de vapor d'água

R=constante universal dos gases (8314,4 kJ/kg.mol.K)

T=temperatura a absoluta [K]

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

O conceito de Psicrometria (Relações Gases Perfeitos)

A massa molecular do ar seco é de 28,9645 sendo a constante do gás para o ar seco de:

$$R_a = \frac{8314{,}41}{28{,}9645} = 287{,}055 \ \frac{J}{kg\ K}$$

A massa molecular relativa da água é de 18,01528 sendo a constante do gás para o vapor d'água de:

$$R_v = \frac{8314{,}41}{18{,}01528} = 461{,}520 \ \frac{J}{kg\ K}$$

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

O conceito de Psicrometria (Relações Gases Perfeitos)

Por sua vez, para a mistura ar seco + vapor d'água, também deve obedecer a equação do gás perfeito...

$$P\,V = n\,RT$$

Ou seja,

$$(p_a + p_v)V = (n_a + n_v)RT$$

Sendo,

$$P = p_a + p_v$$

$$n = n_a + n_v$$

Com essas equações, as frações molares de ar seco e vapor d'água podem ser dadas como,

$$y_a = \frac{p_a}{p_a + p_v} = \frac{p_a}{P} \quad e \quad y_v = \frac{p_v}{p_a + p_v} = \frac{p_v}{P}$$

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

O conceito de Psicrometria (Relações Gases Perfeitos)

Uma série de parâmetros psicrométricos é utilizada para a caracterização do estado termodinâmico do ar úmido...

- Umidade Absoluta / Específica
- Umidade Relativa
- Grau de Saturação
- Volume Específico
- Entalpia Específica
- Calor Específico a Pressão Constante
- Temperatura de Bulbo Seco
- Temperatura de Orvalho
- Temperatura de Bulbo Úmido

Seção 3.2 – Parâmetros Psicrométricos

Objetivo:

≡ Caracterizar o Estado Termodinâmico do ar úmido

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Umidade absoluta, específica e relativa do ar

A quantidade de vapor de água no ar pode ser especificada de diversas maneiras.

Provavelmente, a maneira mais lógica é especificar a quantidade de vapor de água por unidade de ar seco. Essa umidade é denominada **umidade absoluta**. **Para uma dada amostra de ar úmido, define a razão entre a massa de vapor d'água (m_v) e a massa de ar seco (m_a)**, i.e.,

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{kg\ de\ vapor\ d'água}{kg\ de\ ar\ seco}$$

Uma importante simplificação pode ser feita assumindo a mistura de 2 gases perfeitos. Da equação de estado par o gás perfeito e considerando a Lei de Mistura de Dalton, temos...

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Umidade absoluta, específica e relativa do ar

Da equação de estado para o gás perfeito e modelo Dalton,

$$m_a = \frac{p_a V}{R_a T} \quad e \quad m_v = \frac{p_v V}{R_v T}$$

Substituindo em *w*, vem ...

$$w = \frac{R_a p_v}{R_v p_a}$$

Porém, da relação de massas... Temos que,

$$\frac{R_a}{R_v} = \frac{M_v}{M_a} = \frac{18{,}01534}{28{,}9645} = 0{,}62198$$

Assim,

$$w = 0{,}62198 \, \frac{p_v}{p_a}$$

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Umidade absoluta, específica e relativa do ar

Além disso, como a pressão total da mistura (p) é dada pela soma das pressões parciais dos constituintes da mesma (p_a e p_v), temos que ...

$$w = 0{,}62198\,\frac{p_v}{p_a} = 0{,}62198\,\frac{p_v}{P - p_v}$$

Que é a forma mais conhecida e muitas vezes apresentada como a definição da umidade absoluta.

Nota: a expressão decorre da hipótese de comportamento ideal que fica comprometida quando a pressão parcial do vapor se aproxima da pressão total da mistura.

$$\omega = \frac{0{,}622\ \times p_v}{P - p_v}\,(kg\ de\ vapor\,\frac{d'água}{kg}\,de\ ar\ seco)$$

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Umidade absoluta, específica e relativa do ar

Qual é a umidade absoluta do ar seco?

Resposta: 0 (zero), por definição o ar seco não contém vapor de água.

Ao adicionar vapor de água ao ar seco, sua umidade absoluta aumenta. No limite em que o ar não absorve mais vapor de água, diz-se que o **ar** está **saturado**.

O que ocorre se adicionarmos umidade no ar saturado?

Resposta: toda umidade introduzida no ar saturado **se condensará**.

Como calcular a quantidade de vapor de água no ar saturado considerando a equação anterior:

$$\omega = \frac{0{,}622 \times p_v}{P - p_v}$$

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Umidade absoluta, específica e relativa do ar

Outra maneira de especificar a quantidade de vapor de água no ar é por unidade de ar total (ar úmido). Essa umidade é denominada **umidade específica** (também conhecida como relação de umidade)

$$\mathrm{q} = \frac{m_v}{m_a + m_v} = \frac{kg\ de\ vapor\ d'água}{kg\ de\ ar\ úmido}$$

Razão entre a massa de vapor d'água (m_v) e a massa total da amostra de ar úmido (m_a+m_v).

Em psicrometria não é usual considerar a umidade específica (é mais usual considerar a umidade absoluta e a umidade relativa)

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Umidade absoluta, específica e relativa do ar

A quantidade de umidade no ar tem um efeito definitivo sobre o conforto humano.

No entanto, o conforto está mais relacionado à quantidade de umidade relativa que o ar contém, ou seja, a razão entre a fração molar do vapor d'água presente na mistura (y_v) e a fração molar que o vapor d'água teria se a mistura estivesse saturada na mesma temperatura e pressão (y_g ou $y_{v,sat}$). A relação entre essas duas quantidades é chamada de **umidade relativa (φ)**.

$$\phi = \left.\frac{y_v}{y_{v,sat}}\right|_{T,P}$$

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Umidade absoluta, específica e relativa do ar

Considerando a equação dos gases perfeitos e a definição das frações molares do vapor d'água,

$$y_v = \frac{n_v}{n} \quad e \quad y_{v,sat} = \frac{n_{v,sat}}{n}$$

Tem-se, $\phi = \left.\frac{y_v}{y_{v,sat}}\right|_{T,P} = \frac{p_v}{p_{v,sat}}$

$$\phi = \frac{p_v}{p_g}$$

Também pode ser entendida como (m_v) com relação à quantidade máxima de umidade que o ar pode conter à mesma temperatura.

O subscrito *"v,sat"* também pode ser escrito como *"g"* em algumas bibliografias e está relacionado ao estado de saturação: $p_g = p_{sat@T}$

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Umidade absoluta, específica e relativa do ar

$$\phi = \frac{p_v}{p_g}$$

É possível escrever ω e ϕ da seguinte maneira:

$$\phi = \frac{\omega \times P}{(0{,}622 + \omega) \times p_{v,sat}} \quad e \quad \omega = \frac{0{,}622 \times \phi \times p_{v,sat}}{P - \phi \times p_{v,sat}}$$

Razão entre a pressão parcial do vapor d'água na mistura (p_v) e a pressão parcial que o vapor d'água teria ($p_{v,sat}$) se a mistura estivesse saturada na mesma temperatura e pressão total da mistura.

Qual é a umidade relativa do ar seco?

Resposta: 0 (zero) $\quad \phi = 0 \rightarrow ar\ seco$

Qual é a umidade relativa do ar saturado?

Resposta: 1 $\quad \phi = 1 \rightarrow ar\ úmido\ saturado$

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Grau de saturação

Razão entre umidade absoluta do ar e a umidade absoluta do ar saturado, mantidas temperatura e pressão de mistura constantes.

$$\mu = \frac{w}{w_{sat}}$$

Substituindo as expressões simplificadas da umidade absoluta e da umidade relativa temos,

$$\mu = \phi \frac{P - p_{v,sat}}{P - p_v} \quad ou \quad \mu = \phi \frac{P - p_{v,sat}}{P - \phi\, p_{v,sat}}$$

Nota: se a umidade relativa for alta ou a pressão parcial do vapor for baixa face a pressão da mistura, o grau de saturação será aproximadamente o mesmo que o da umidade relativa.

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Propriedades Específicas

Propriedades específicas são dadas por unidade de massa da substância de interesse. Em Psicrometria convenciona-se referenciar tais propriedades **a massa de ar seco** (e não a massa da mistura).

A razão dessa convenção deve-se ao fato de que nos processos com o ar úmido o fluxo de ar seco permanece constante enquanto que vapor d'água pode ser retirado ou adicionado ao ar úmido. Ou seja, o fluxo mássico de ar seco se conserva no processo.

Assim, o volume específico, a entalpia específica e o calor específico são referenciados a base de ar seco.

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Propriedades Específicas

Volume Específico, *v*

Razão entre o volume ocupado pela mistura e a massa de ar seco presente na mesma, $v = \frac{V}{m_a}$

Simplificação de gases perfeitos $m_a = \frac{p_a V}{R_a T}$ e lembrando que $R_a = \frac{R}{M_a}$

$$v = 0{,}287055 \frac{T}{P - p_v} \left[\frac{m^3}{kg\ ar\ seco}\right]$$

que pode ser modificada usando a expressão de definição da umidade absoluta, resultando em,

$$v = 0{,}287055 \frac{T}{P}(1 + 1{,}6078\ w) \left[\frac{m^3}{kg\ ar\ seco}\right]$$

com T em Kelvin e P em kPa.

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Propriedades Específicas

Volume Específico, *v*

Nota: Se o volume específico da mistura fosse referido a massa de ar úmido (v_m), este seria ligeiramente menor que o volume específico referido a massa de ar seco. Com efeito, temos,

$$v_m = \frac{v_a}{1+w} \left[\frac{m^3}{kg\ ar\ úmido}\right]$$

Portanto, os dois volumes específicos diferem pelo fator ***(1+w)***

É interessante notar que quanto maior a umidade absoluta maior será o volume específico do ar úmido → ou seja, menor sua densidade.

Assim, o ar úmido é mais "leve" que o ar seco o que implica na facilidade com que o ar úmido se dispersa na atmosfera.

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Propriedades Específicas

Entalpia (H) e Entalpia Específica (h)

A entalpia total da mistura é dada pela contribuição isolada da entalpia do ar seco e do vapor d'água, dada a hipótese do gás perfeito. Assim,

$$H = H_a + H_v = m_a h_a \times m_v h_v$$

Na maioria das aplicações de ar condicionado, a quantidade de ar seco permanece constante, enquanto a quantidade de umidade varia. Por essa razão, a entalpia é expressa **por unidade de massa de ar seco** e não por unidade de massa da mistura ar seco e vapor de água.

$$h = \frac{H}{m_a} = \frac{m_a h_a}{m_a} \times \frac{m_v h_v}{m_a}$$

e, com a definição de umidade absoluta, temos a seguinte expressão final em kJ/kg de ar seco, para $h_v \cong h_g$

$$h = h_a + \omega h_v \quad ou \quad h = h_a + \omega h_g$$

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Propriedades Específicas

Calor Específico a pressão constante (c_p)

Referido a massa de ar seco é dado pela combinação dos calores específicos do ar seco $c_{p,a}$ e do vapor d'água $c_{p,v}$,como,

$$c_p = c_{p,a} + c_{p,v} \left[\frac{kJ}{kg\ ar\ seco\ .°C}\right]$$

De forma simplificada,

$$c_{p,a} = 1{,}004 \frac{kJ}{kg\ °C} \quad ou \quad c_{p,v} = 1{,}872 \frac{kJ}{kg\ °C}$$ *Tab. A5*

Com tais valores e com a definição $c_p = dh/dT$, obtemos uma expressão simplificada para a entalpia específica do ar úmido,

$$h_a = 1{,}004\ .T \quad ou \quad h_v = 2547{,}2 + 1{,}872\ .T$$

Entalpia de vaporização da água@25°C *Tab. B1*

$$h_a = 1{,}004.T + w(2547{,}2 + 1{,}872.T)$$

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Temperatura de Bulbo Seco (T_{BS})

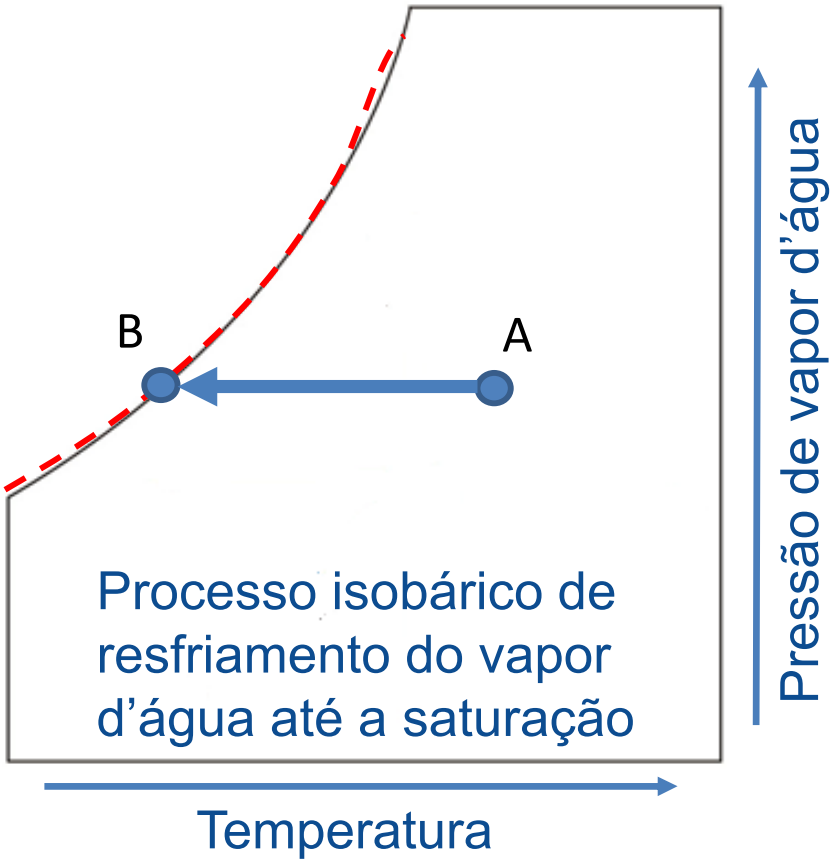
A temperatura comum do ar atmosférico é frequentemente chamada de temperatura de bulbo seco. É simplesmente a temperatura da mistura indicada por um termômetro.

My NASA Data
https://mynasadata.larc.nasa.gov/glossary.php?&word=ALL

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Temperatura de Orvalho (T_o)

Temperatura correspondente ao ponto de início da condensação do vapor d'água presente no ar úmido quando seu resfriamento ocorre a pressão constante.



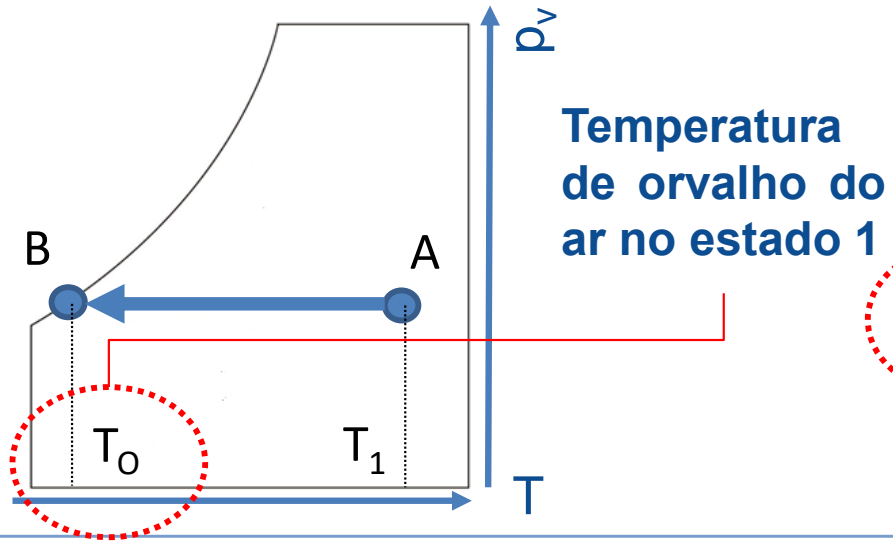
Em dias específicos percebemos, a vegetação úmida pela manhã, mesmo não chovendo! Aprendemos a chamar isso de orvalho mas, por que isso ocorre? **O que aconteceu?**

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

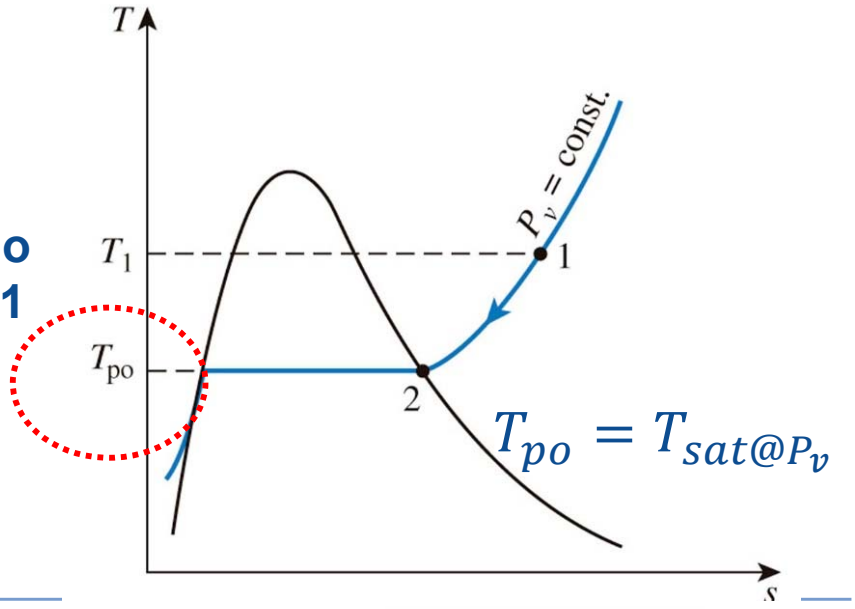
Temperatura de Orvalho (T_O)

O que aconteceu?

O excesso de umidade no ar condensou nas superfícies frias, formando o que conhecemos como **orvalho**. Uma quantidade considerável de água vaporiza durante o dia. Durante a noite a temperatura cai. Após algum tempo o ar fica saturado. Qualquer outra queda de temperatura resulta na condensação de parte da umidade, e esse é o começo do orvalho.



Temperatura de orvalho do ar no estado 1



Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Temperatura de Orvalho (T_o)

Outro exemplo: (mais descontraído para nossa aula!)

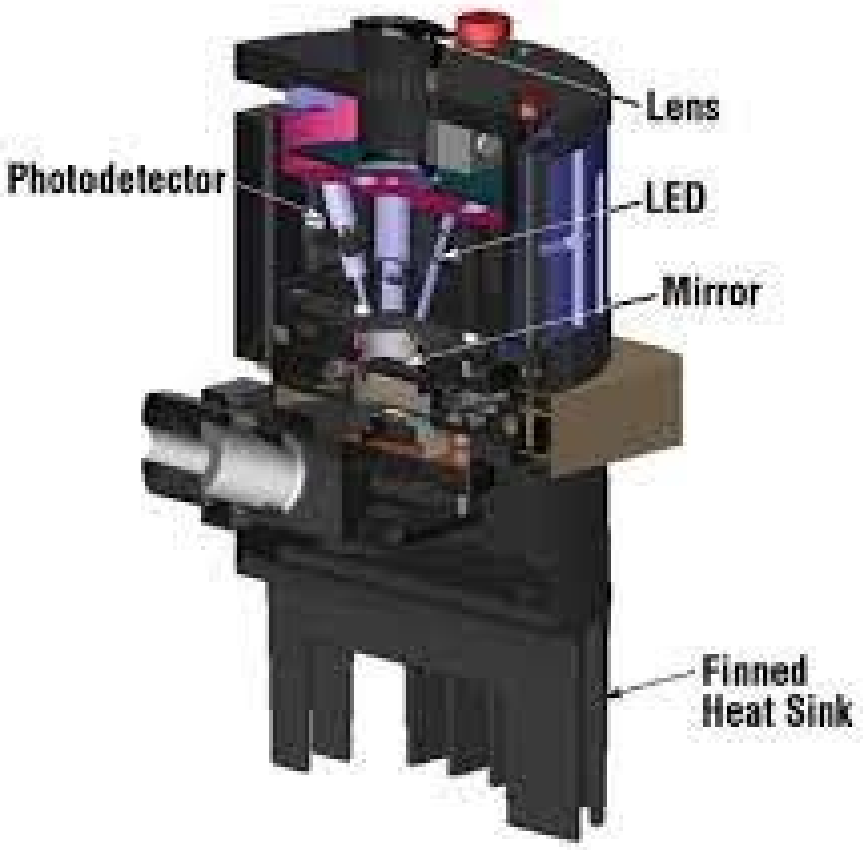
Em um bebida gelada em um dia quente e úmido, o orvalho se forma

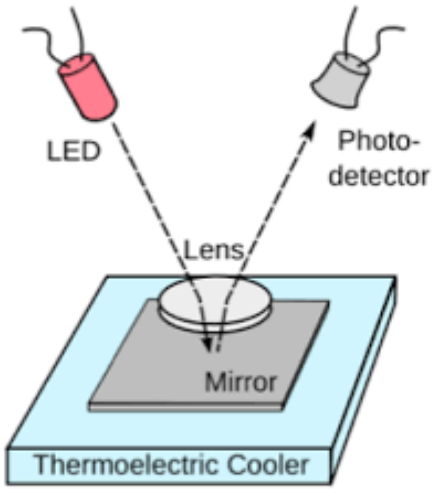
Nesse caso, a temperatura da bebida (e do recipiente) está abaixo da temperatura do ponto de orvalho do ar da vizinhança.

Modelo para misturas compostas por Gás-Vapor

Temperatura de Orvalho (T_o)

Como se mede na prática? Através do **higrômetro de espelho gelado** ***(chilled mirror hygrometer)***





Exemplo 1
Parâmetros Psicrométricos - Climatização

Considere 100m^3 de uma mistura ar-vapor d'água a 0,1MPa, 35°C e 70% de umidade relativa. Calcule a umidade absoluta, o ponto de orvalho, a massa de ar e a massa de vapor.

Análise e solução: Da Eq. 12.25 e das tabelas de vapor

$$\phi = 0{,}7 = \frac{p_v}{p_g} \quad \Rightarrow \quad p_v = 0{,}70\,(5{,}628) = 3{,}94 \text{ kPa}$$

O ponto de orvalho é a temperatura de saturação correspondente a essa pressão. Assim, utilizando as tabelas de vapor, encontramos que o ponto de orvalho é igual a 28,6 °C.

A pressão parcial do ar é

$$p_a = p - p_v = 100 - 3{,}94 = 96{,}06 \text{ kPa}$$

A umidade absoluta pode ser calculada com a Eq. 12.28

$$\omega = 0{,}622 \times \frac{p_v}{p_a} = 0{,}622 \times \frac{3{,}94}{96{,}06} = 0{,}0255$$

A massa de ar é

$$m_a = \frac{p_a V}{R_a T} = \frac{96{,}06 \times 100}{0{,}287 \times 308{,}2} = 108{,}6 \text{ kg}$$

A massa de vapor pode ser calculada a partir da umidade absoluta ou utilizando a equação dos gases perfeitos.

$$m_v = \omega\, m_a = 0{,}0255\,(108{,}6) = 2{,}77 \text{ kg}$$

$$m_v = \frac{3{,}94 \times 100}{0{,}4615 \times 308{,}2} = 2{,}77 \text{ kg}$$

Tab. A5

Tab. B1

Exemplo 1
Parâmetros Psicrométricos - Climatização

Tabela B.1 — Propriedades Termodinâmicas da Água

Tabela B.1.1 — Água saturada: tabela em função da temperatura

		Volume específico (m^3/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
Temp. °C	Pressão kPa	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0	2375,33	2375,33	0	2501,35	2501,35	0	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3593	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8932	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3	

Tabela B.1.2

Água saturada: tabela em função da pressão

		Volume específico (m^3/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
Pressão kPa	Temp. °C	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
P	T	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0	2375,3	2375,3	0,00	2501,30	2501,30	0	9,1562	9,1562
1	6,98	0,001000	129,20802	29,29	2355,69	2384,98	29,29	2484,89	2514,18	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98013	54,70	2338,63	2393,32	54,70	2470,59	2525,30	0,1956	8,6322	8,8278
2	17,50	0,001001	67,00385	73,47	2326,02	2399,48	73,47	2460,02	2533,49	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,25385	88,47	2315,93	2404,40	88,47	2451,56	2540,03	0,3120	8,3311	8,6431
3	24,08	0,001003	45,66502	101,03	2307,48	2408,51	101,03	2444,47	2545,50	0,3545	8,2231	8,5775
4	28,96	0,001004	34,80015	121,44	2293,73	2415,17	121,44	2432,93	2554,37	0,4226	8,0520	8,4746
5	32,88	0,001005	28,19251	137,79	2282,70	2420,49	137,79	2423,66	2561,45	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,23775	168,76	2261,74	2430,50	168,77	2406,02	2574,79	0,5763	7,6751	8,2514
10	45,81	0,001010	14,67355	191,79	2246,10	2437,89	191,81	2392,82	2584,63	0,6492	7,5010	8,1501

Exemplo 1
Parâmetros Psicrométricos - Climatização

Tabela A.5
Propriedades de vários gases ideais a 25 °C e 100 kPa*

Gás	Fórmula química	Peso molecular	R kJ/kg K	ρ (kg/m³)	c_{p0} kJ/kg K	c_{v0} kJ/kg K	$k = c_p/c_v$
Acetileno	C_2H_2	26,038	0,3193	1,05	1,699	1,380	1,231
Água (vapor)	H_2O	18,015	0,4615	0,0231	1,872	1,410	1,327
Ar		28,97	0,287	1,169	1,004	0,717	1,400
Amônia	NH_3	17,031	0,4882	0,694	2,130	1,642	1,297
Argônio	Ar	39,948	0,2081	1,613	0,520	0,312	1,667
Butano	C_4H_{10}	58,124	0,1430	2,407	1,716	1,573	1,091
Dióxido de Carbono	CO_2	44,01	0,1889	1,775	0,842	0,653	1,289
Monóxido de Carbono	CO	28,01	0,2968	1,13	1,041	0,744	1,399
Etano	C_2H_6	30,07	0,2765	1,222	1,766	1,490	1,186
Etanol	C_2H_5OH	46,069	0,1805	1,883	1,427	1,246	1,145
Etileno	C_2H_4	28,054	0,2964	1,138	1,548	1,252	1,237
Hélio	He	4,003	2,0771	0,1615	5,193	3,116	1,667
Hidrogênio	H_2	2,016	4,1243	0,0813	14,209	10,085	1,409
Metano	CH_4	16,043	0,5183	0,648	2,254	1,736	1,299
Metanol	CH_3OH	32,042	0,2595	1,31	1,405	1,146	1,227
Neônio	Ne	20,183	0,4120	0,814	1,03	0,618	1,667
Nitrogênio	N_2	28,013	0,2968	1,13	1,042	0,745	1,400
Óxido nítrico	NO	30,006	0,2771	1,21	0,993	0,716	1,387
Óxido nitroso	N_2O	44,013	0,1889	1,775	0,879	0,690	1,274
n-Octano	C_8H_{18}	114,23	0,07279	0,092	1,711	1,638	1,044
Oxigênio	O_2	31,999	0,2598	1,292	0,922	0,662	1,393
Propano	C_3H_8	44,094	0,1886	1,808	1,679	1,490	1,126
R-12	CCl_2F_2	120,914	0,06876	4,98	0,616	0,547	1,126
R-22	$CHClF_2$	86,469	0,09616	3,54	0,658	0,562	1,171
R-32	CF_2H_2	52,024	0,1598	2,125	0,822	0,662	1,242
R-125	CHF_2CF_3	120,022	0,06927	4,918	0,791	0,722	1,097
R-134a	CF_3CH_2F	102,03	0,08149	4,20	0,852	0,771	1,106
R-410a		72,585	0,114 55	2,967	0,809	0,694	1,165
Dióxido de enxofre	SO_2	64,059	0,1298	2,618	0,624	0,494	1,263
Trióxido de enxofre	SO_3	80,053	0,10386	3,272	0,635	0,531	1,196

* Ou na pressão de saturação, se esta for menor que 100 kPa.

Tab. A5

Exemplo 2
Parâmetros Psicrométricos - Climatização

Uma amostra de ar atmosférico, a 100kPa, apresenta temperatura e umidade relativa iguais a 25°C e 75%. Determine a umidade absoluta e o ponto de orvalho dessa mistura. Considere que a mistura é aquecida até que a temperatura atinja 30°C num processo isobárico. Qual é o ponto de orvalho da mistura nesta nova condição?

Eq.12.25: $P_v = \phi\, P_g = 0.75 \times 3.169 = 2.377$ kPa

Eq.12.28: $w = 0.622\, P_v/(P_{tot} - P_v) = 0.622 \times 2.377/(100 - 2.377) = 0.01514$

T_{dew} is the T such that $P_g(T) = P_v = 2.377$ kPa

B.1.1 => $T \cong 20.2$ °C

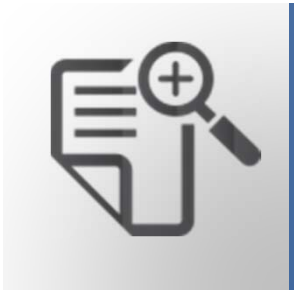
Heating => w is constant => P_v is constant

From Table B.1.1: $P_g(30°C) = 4.246$ kPa

$\phi = P_v/P_g = 2.377/4.246 =$ **0.56 or 56 %**

Tab. A5

Tab. B1



Estudo Dirigido
Atividade em grupo (em sala)

1. Considere 100 m^3 de ar atmosférico a 15°C, 100 kPa e com umidade relativa igual a 40%. Determine a quantidade de água contida neste volume e a umidade absoluta da mistura. Qual é o ponto de orvalho deste sistema?

2. Calcule a quantidade de vapor d'água condensada se a mistura do exemplo anterior for resfriada a 5°C em um processo a pressão constante.

Considere 100 m^3 de ar atmosférico a 15°C, 100 kPa e com umidade relativa igual a 40%. Determine a quantidade de água contida neste volume e a umidade absoluta da mistura. Qual é o ponto de orvalho deste sistema?

Air-vapor $P = 100$ kPa, $T = 15\ ^{o}C$, $\phi = 40\%$

Use Table B.1.1 and then Eq.12.25

$$P_g = P_{sat15} = 1.705 \text{ kPa} \quad \Rightarrow \quad P_v = \phi P_g = 0.4 \times 1.705 = 0.682 \text{ kPa}$$

$$m_v = \frac{P_v V}{R_v T} = \frac{0.682 \times 100}{0.461 \times 288.15} = \mathbf{0.513\ kg}$$

$$P_a = P_{tot} - P_{v1} = 100 - 0.682 = 99.32 \text{ kPa}$$

$$m_a = \frac{P_a V}{R_a T} = \frac{99.32 \times 100}{0.287 \times 288.15} = 120.1 \text{ kg}$$

$$w_1 = \frac{m_v}{m_a} = \frac{0.513}{120.1} = \mathbf{0.0043}$$

T_{dew} is T when $P_v = P_g = 0.682$ kPa;

Table B.1.2 gives $T = \mathbf{1.4\ ^{o}C}$

Tab. A5

Tab. B1

Calcule a quantidade de vapor d'água condensada se a mistura do exemplo anterior for resfriada a 1°C em um processo a pressão constante.

$$p_{v2} = p_{g2} \qquad p_{a2} = p - p_{v2}$$

$$\omega_2 = 0,622 \frac{p_{v2}}{p_{a2}}$$

A quantidade de vapor d'água condensada pode ser calculada a partir da equação de conservação da massa. Deste modo, ela é igual a diferença entre a massa de vapor d'água inicial e final.

$$\text{Massa de vapor condensada} = m_a(\omega_1 - \omega_2)$$

Solução:

$$p_{v2} = p_{g2} = 0,663\text{kPa}$$

$$p_{a2} = 100 - 0,663\text{kPa}$$

$$\omega_2 = 0,622 \times \frac{0,8721}{99,337} = 0,004151$$

$$\text{Massa de vapor condensada} = m_a(\omega_1 - \omega_2) = 108,6\ (0,0043\text{-}0,004151) = 0,016\text{kg}$$

Seção 3.3 – Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Objetivo:

≡ Apresentar o conceito de saturação adiabática e temperatura de bulbo úmido

≡ Exemplificar um saturador adiabático

≡ Apresentar os instrumentos de medição co-relacionando os conceitos

Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática

Os conceitos de umidade relativa e umidade absoluta são muito utilizados na Engenharia e nas ciências atmosféricas. É desejável **relacionar ambas** as umidades a **quantidades facilmente mensuráveis**, como **temperatura** e **pressão**.

Uma maneira de determinar a umidade relativa é por meio da temperatura do ponto de orvalho do ar. Conhecendo a temperatura do ponto de orvalho, podemos determinar a pressão do vapor p_v, e, consequentemente, a umidade relativa. Essa abordagem é simples, porém não é muito prática.

Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

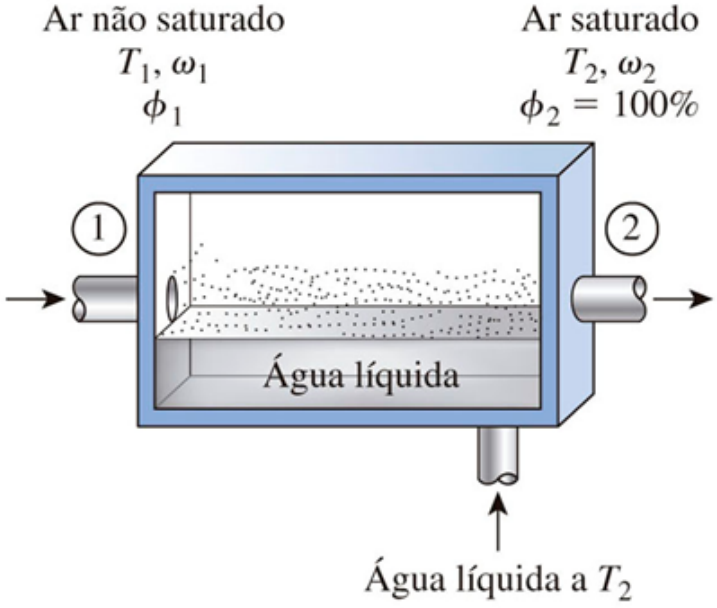
Saturação Adiabática (Modelo experimental 1)

Uma maneira de determinar a umidade absoluta e relativa está relacionada a um **processo de saturação adiabática** pelo Modelo 1.O sistema consiste em um longo canal isolado que contém um reservatório com água. Uma corrente constante de ar não saturado com uma umidade específica ω_1(desconhecida) e uma temperatura T_1 escoa através desse canal;

O ar escoa acima da água e, parte da água evapora e se mistura à corrente de ar;

O conteúdo de umidade do ar aumenta e sua temperatura diminui, uma vez que parte do calor latente da vaporização da água que evapora vem do ar;

Se o canal for suficientemente longo, a corrente de ar sai como ar saturado (φ = 100%) à temperatura T_2, que é chamada de **temperatura de saturação adiabática** ou **temperatura de bulbo úmido termodinâmica**.



Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 1)

Se a **água de reposição** é fornecida ao canal na taxa de evaporação à temperatura T_2, o processo de saturação adiabático descrito pode ser modelado como processo em regime permanente;

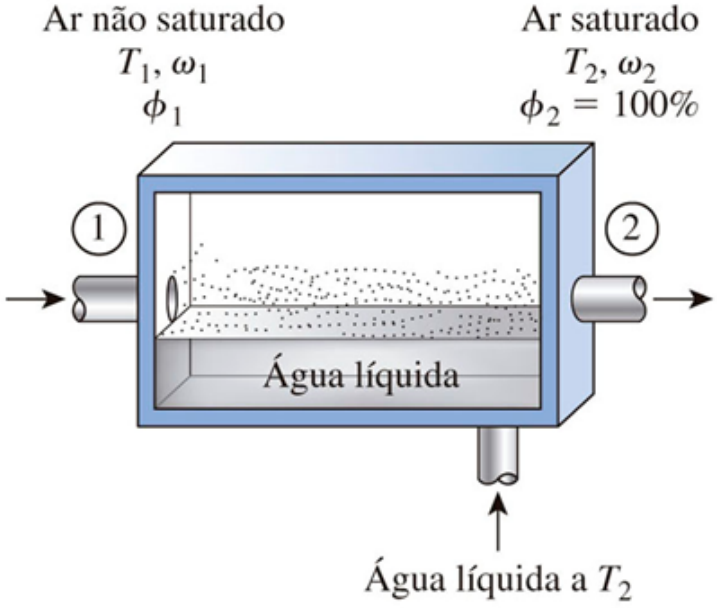
Como o processo não envolve calor ou trabalho, e as variações de energia cinética e potencial podem ser desprezadas, o **balanço de massa** e o **balanço de energia** podem ser escritos da seguinte maneira:

Balanço de massa

$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$ (a vazão mássica do ar seco permanece constante)

$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_l = \dot{m}_{v2}$ (a vazão mássica do vapor no ar aumenta na mesma quantidade da taxa de evaporação $\dot{m}_l$), ou

$\dot{m}_a \times \omega_1 + \dot{m}_l = \dot{m}_a \times \omega_2$ e $\dot{m}_l = \dot{m}_a \times (\omega_2 - \omega_1)$



Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 1)

Balanço de energia

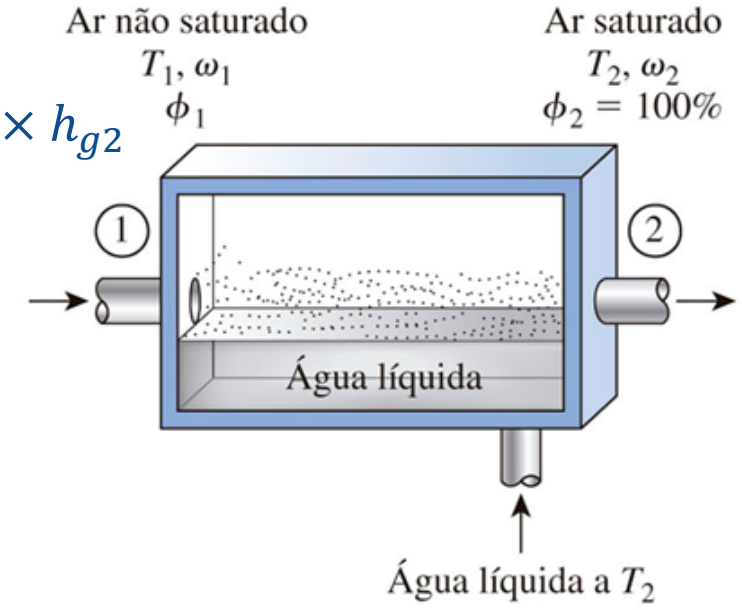
$\dot{m}_a \times h_1 + \dot{m}_l \times h_{l2} = \dot{m}_a \times h_2$, ou

$\dot{m}_a \times h_1 + \dot{m}_a \times (\omega_2 - \omega_1) \times h_{l2} = \dot{m}_a \times h_2$

Dividindo por $\dot{m}_a$

$h_1 + (\omega_2 - \omega_1) \times h_{l2} = h_2$ ou

$c_p \times T_1 + \omega_1 \times h_{g1} + (\omega_2 - \omega_1) \times h_{l2} = c_p \times T_2 + \omega_2 \times h_{g2}$



Isolando ω_1

$$\omega_1 = \frac{c_p \times (T_2 - T_1) + \omega_2 \times h_{l2}}{h_{g1} - h_{l2}} \quad e \quad \omega_2 = \frac{0{,}622 \times p_{g2}}{P_2 - p_{g2}},$$

uma vez que $\phi_2 = 100\%$

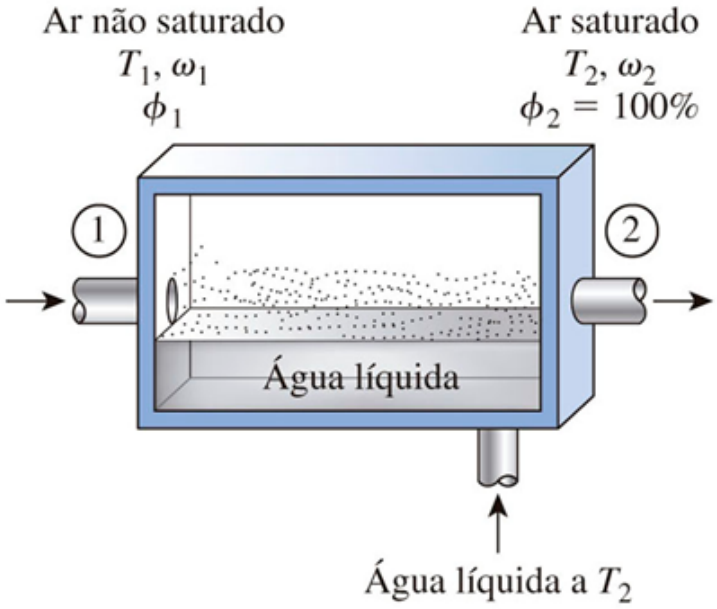
Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 1)

Conclusão: é possível determinar a **umidade absoluta e a umidade relativa** do ar medindo a **pressão e a temperatura** do ar na entrada e na saída de um saturador adiabático

O processo de saturação adiabática discutido oferece um meio de determinar a umidade absoluta ou relativa do ar, mas exige um canal longo ou um mecanismo de aspersão para atingir condições de saturação na saída.

Uma abordagem mais prática é usar um termômetro cujo bulbo esteja coberto por uma mecha de algodão saturado com água e soprar ar sobre a mecha (Modelo experimental 3). A temperatura medida dessa maneira é chamada de **temperatura de bulbo úmido**, e normalmente é usada em **aplicações de condicionamento de ar**.



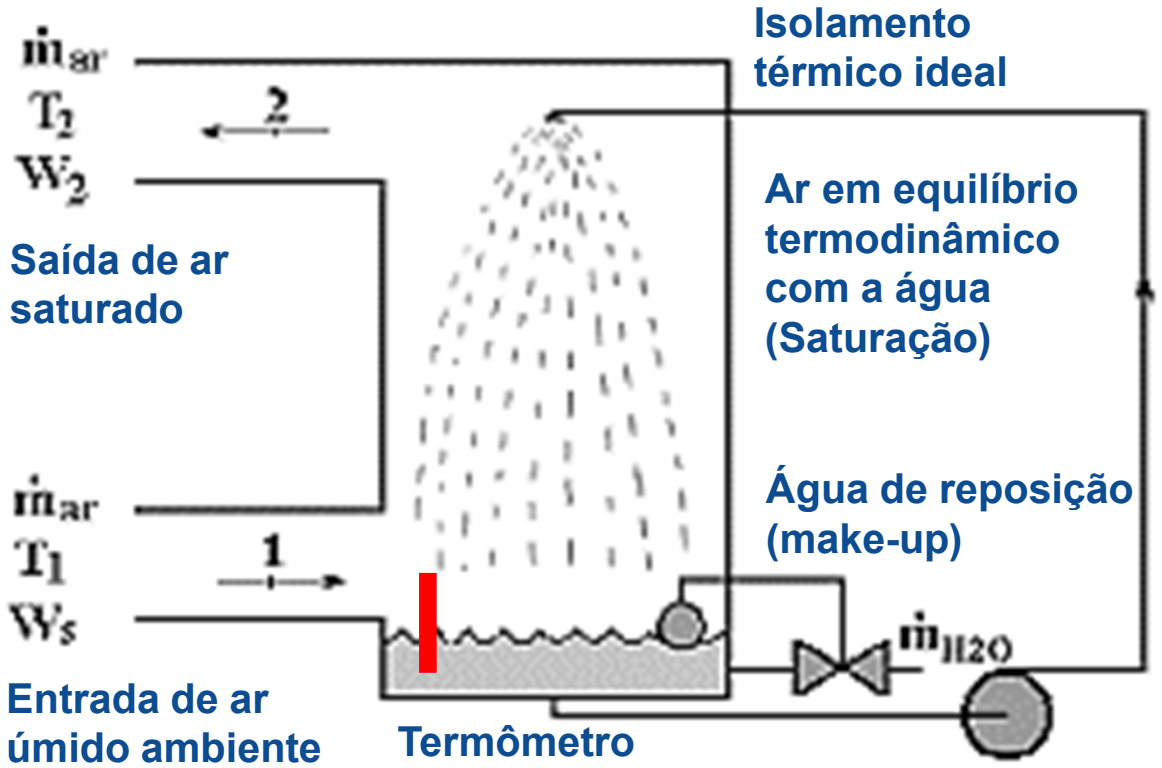
Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 2)

Outra maneira de determinar a umidade absoluta e relativa está relacionada a um **processo de saturação adiabática** pelo Modelo 2.

O saturador adiabático é um dispositivo ideal no qual o ar úmido escoa contra uma fina névoa de água, a pressão constante.

Ao longo do saturador a área de transferência de calor e massa entre o ar úmido e as gotículas de água é tal que, ao sair do saturador o ar encontra-se em equilíbrio termodinâmico com a água, isto é, **saturado.**



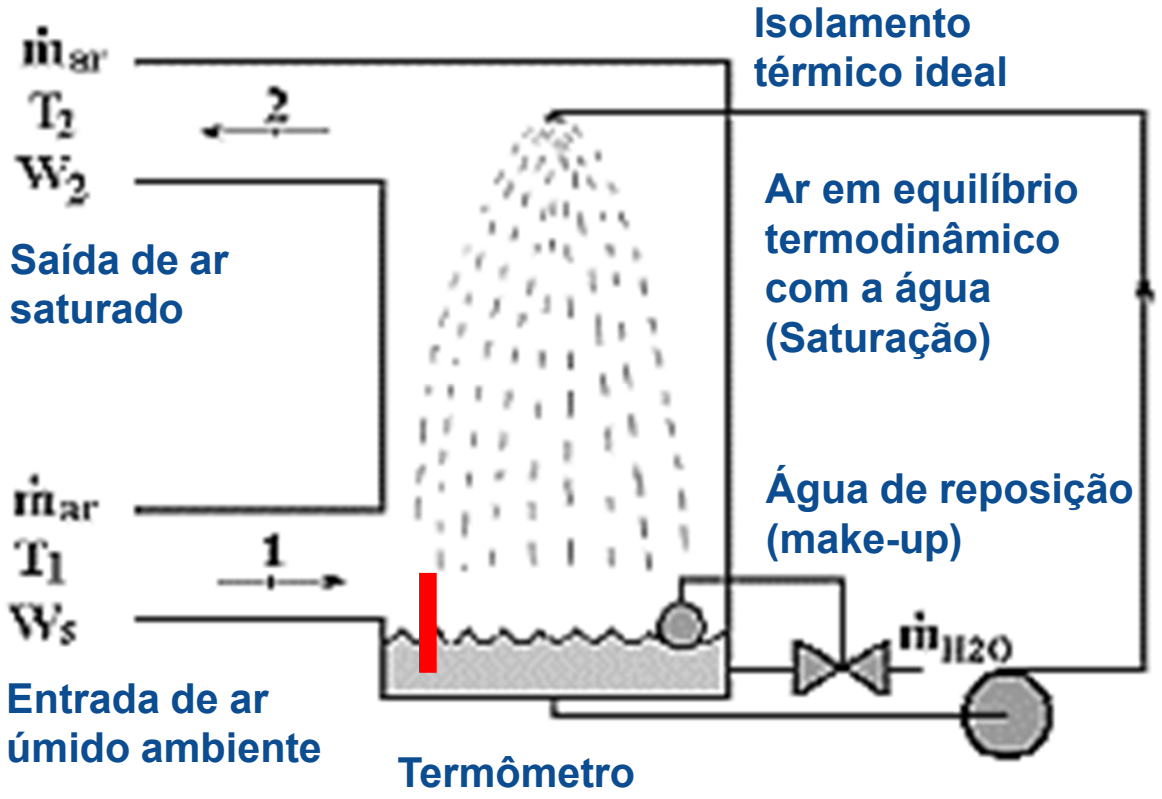
Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 2)

Um isolamento térmico ideal é considerado de forma que o processo é adiabático (não há troca de calor com o ambiente – todo o calor trocado ocorre apenas entre o ar e a água).

A parcela de água evaporada para a corrente de ar é reposta de forma a manter a operação em regime permanente.

Mantida a operação em regime permanente, a temperatura da água lida no termômetro é denominada **temperatura de saturação adiabática** ou **temperatura de bulbo úmido termodinâmica**.



Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 2)

Balanço de massa

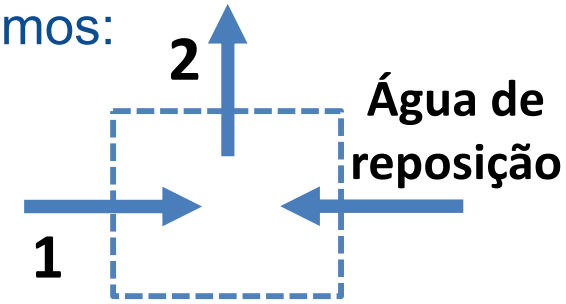
$\dot{m}_1 = \dot{m}_a + \dot{m}_{v1}$ (Seção 1)

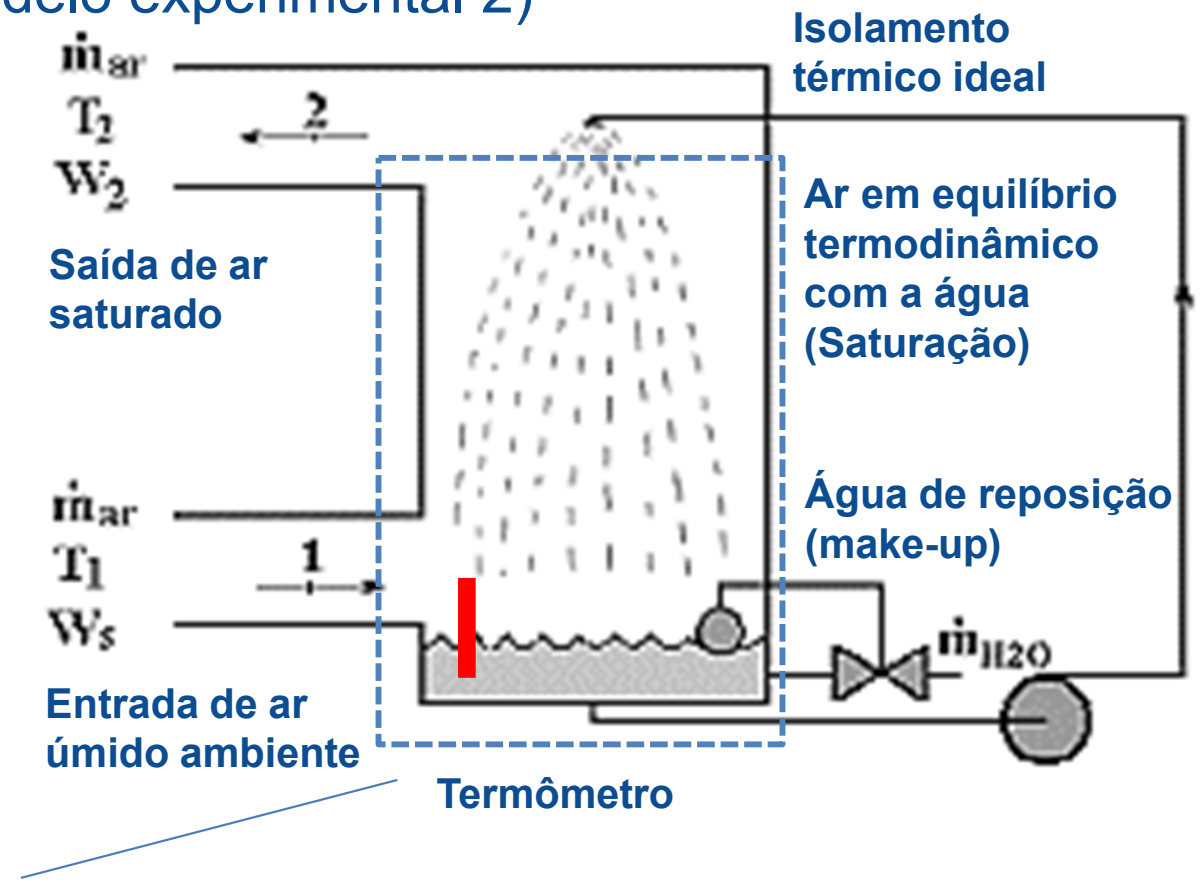
$\dot{m}_2 = \dot{m}_a + \dot{m}_{v2}$ (Seção 2)

$\dot{m}_l = \dot{m}_{v2} - \dot{m}_{v1}$ (Reposição)

Balanço de energia

Da 1ª Lei da Termodinâmica, em regime permanente, temos:

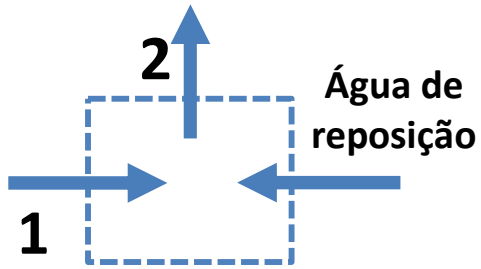




$$\underbrace{\dot{m}_a \times h_{a1} + \dot{m}_{v1} \times h_{v1}}_{H1} + \underbrace{(\dot{m}_{v2} - \dot{m}_{v1}) \times h_l^*}_{H\ (\text{Água de reposição})} = \underbrace{\dot{m}_a \times h_{a2}^* + \dot{m}_{v2} \times h_{v2}^*}_{H2}$$

Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 2)



$$\dot{m}_a \times h_{a1} + \dot{m}_{v1} \times h_{v1} + (\dot{m}_{v2} - \dot{m}_{v1}) \times h_l^* = \dot{m}_a \times h_{a2}^* + \dot{m}_{v2} \times h_{v2}^*$$

Como o fluxo mássico de ar seco $\dot{m}_a$ é constante através do saturador, essa equação pode ser dividida termo a termo por esse valor e, com a definição da umidade absoluta, $w = {\dot{m}_v}/{\dot{m}_a}$, temos:

$$h_{a1} + w_1 \times h_{v1} + (w_2^* - w_1) \times h_l^* = h_{a2}^* + w_2^* \times h_{v2}^*$$

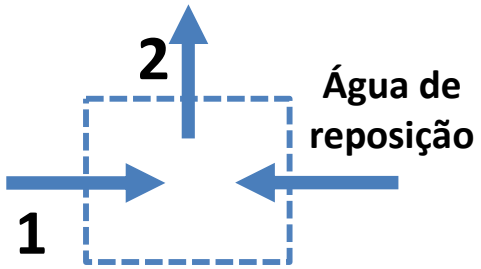
Nesta última equação as entalpias se referem a massa de fluido correspondente, mas podem ser referidas a massa de ar seco, levando a ,

$$h_1 + (w_2^* - w_1) \times h_l^* = h_2^*$$

O asterisco nas equações precedentes lembra que a água de reposição e a corrente de ar que deixa o saturador estão a mesma temperatura T*.

Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 2)

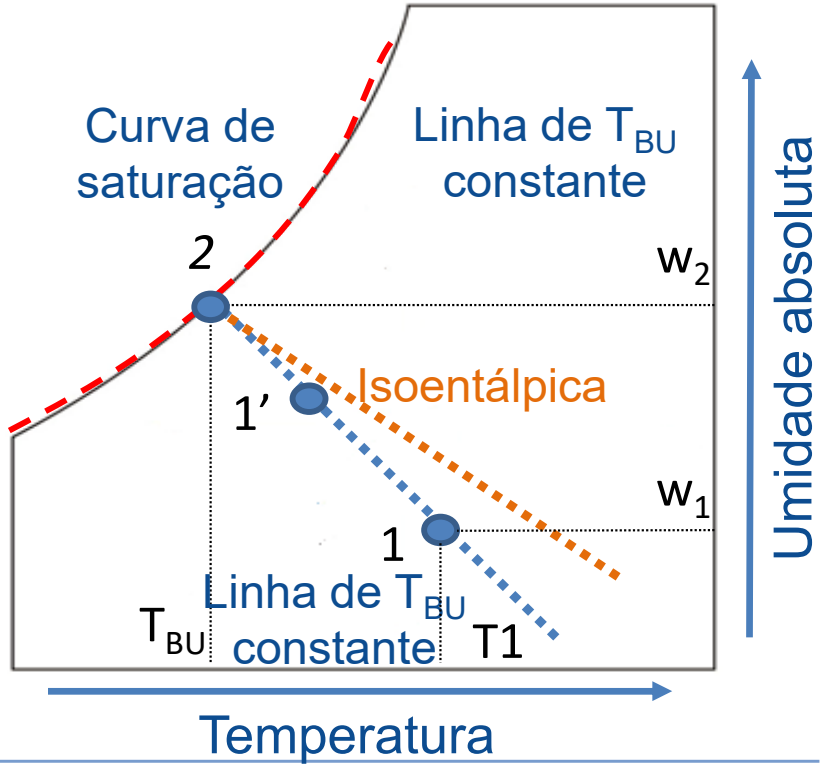


$$h_1 + (w_2^* - w_1) \times h_l^* = h_2^*$$

É interessante notar que, na equação acima, mantida a pressão constante, as propriedades w_2^*, h_l^*, h_2^* são apenas função da temperatura T*, já que o vapor d'água está saturado.

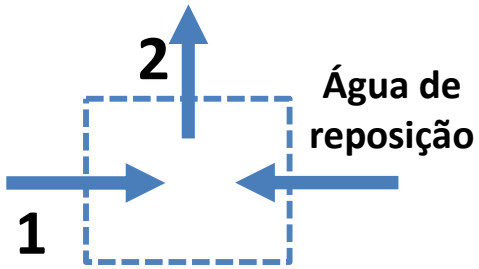
Isso implica em que *T** é função apenas da entalpia h_1 e da umidade w_1 do fluxo e ar que entra no saturador.

Ou seja, a temperatura *T** depende tão somente do estado termodinâmico do ar que deixa o saturador adiabático que é batizada como **Temperatura de Bulbo Úmido Termodinâmica** (por vezes denominada temperatura de saturação adiabática).

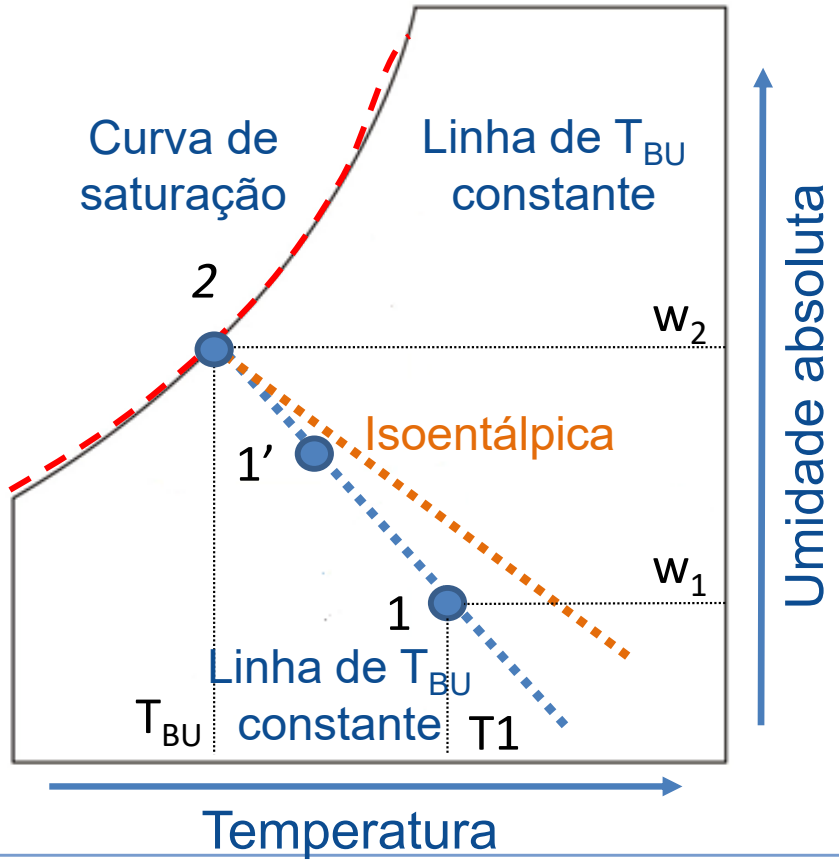


Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 2)



$$h_1 + (w_2^* - w_1) \times h_l^* = h_2^*$$



Nota: Se a água no saturador estiver na fase sólida, ao invés de líquido, a análise permanece válida bastando substituir a entalpia da água líquida $h_{água}$ pela entalpia da água sólida.

Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

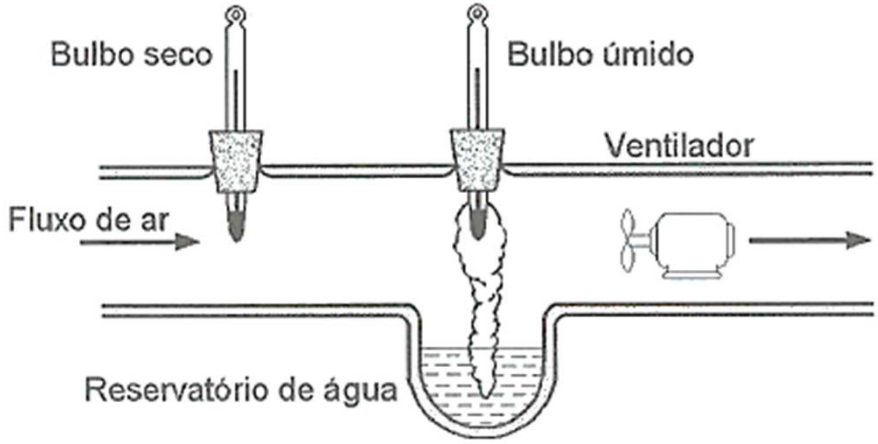
Saturação Adiabática (Modelo experimental 3)

O princípio básico envolvido é semelhante àquele da saturação adiabática (Modelo 1 e 2, anterior). Após algum tempo a temperatura da água se estabiliza (regime permanente). A leitura do termômetro nesse ponto é a **temperatura de bulbo úmido**.

Em geral, a **temperatura de saturação adiabática** e a **temperatura de bulbo úmido** não são iguais. Entretanto, para misturas de ar e vapor de água à pressão atmosférica, a **temperatura de bulbo úmido é aproximadamente igual à temperatura de saturação adiabática**.

Portanto, a temperatura de bulbo úmido pode ser utilizada na equação abaixo, no lugar de T_2, para determinar a umidade específica do ar.

$$\omega_1 = \frac{c_p \times (T_2 - T_1) + \omega_2 \times h_{l2}}{h_{g1} - h_{l2}}$$



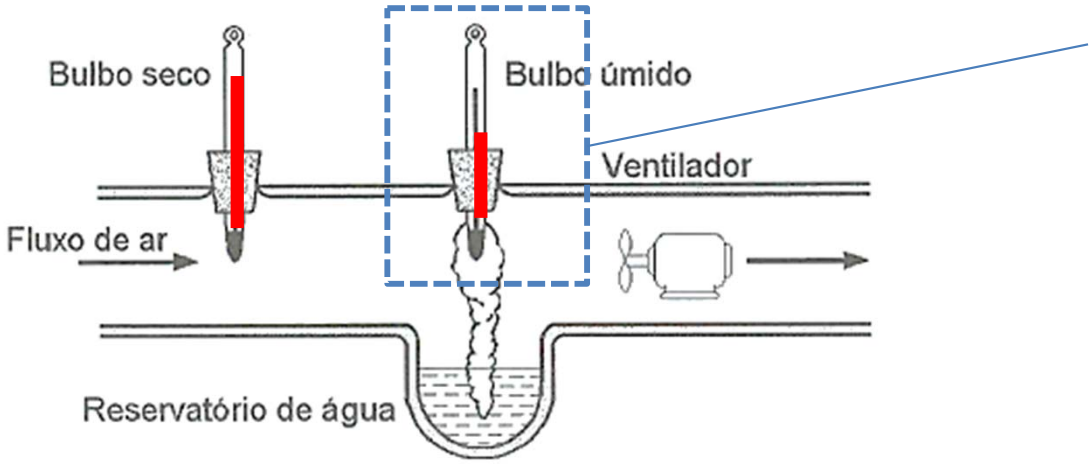
Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

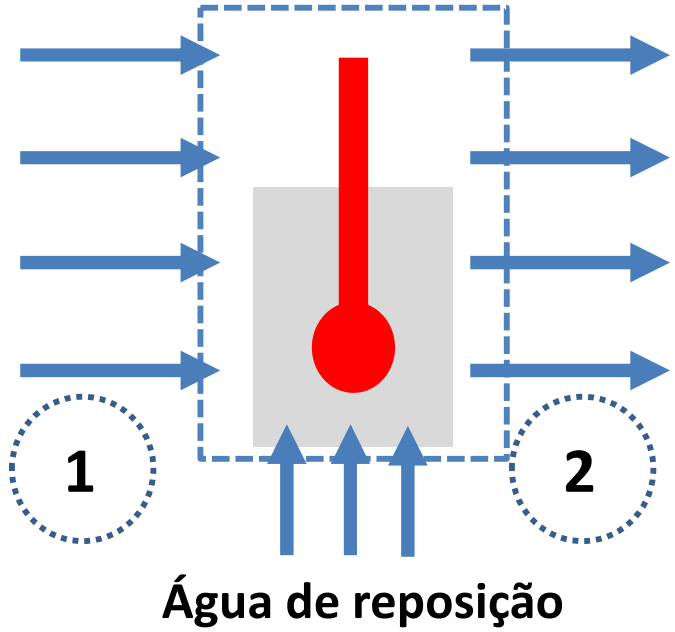
Saturação Adiabática (Modelo experimental 3)

...e qual é a explicação para $T_{BU} \neq T_{BU,\ sat.\ adiabática}$?

Um processo simultâneo de transferência de calor e massa ocorre em torno da mecha úmida. Parte da água na mecha se evapora causando uma redução da temperatura do bulbo do termômetro de T_{BU}.

Uma espécie de equilíbrio termodinâmico se estabelece onde o calor cedido da corrente de ar para a mecha é usado para evaporar a água da mecha.



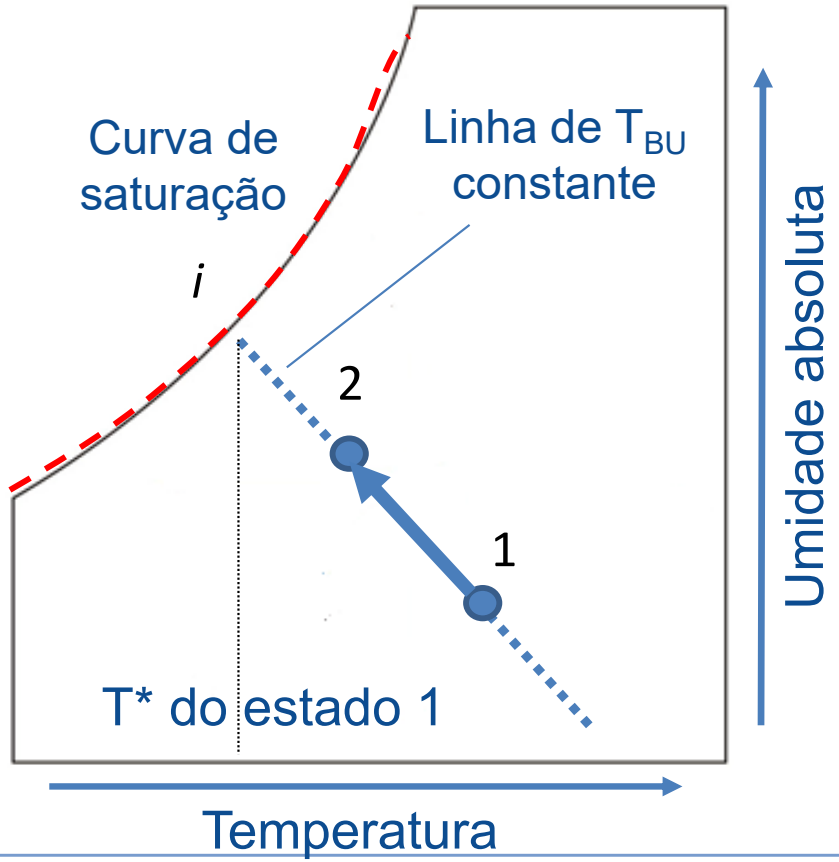


Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

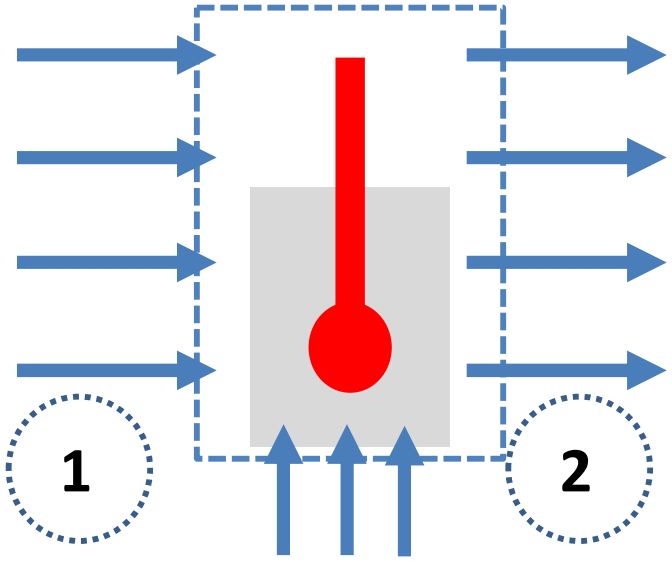
Saturação Adiabática (Modelo experimental 3)

...e qual é a explicação para T_{BU}<>$T_{BU,\ sat.\ adiabática}$?

Uma vez em regime permanente o termômetro úmido indicará a temperatura de equilíbrio, isto é a temperatura de bulbo úmido T_{BU}.



Dica: A velocidade da corrente de ar deve ser da ordem de 3 a 5 m/s



Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 3)

Até que ponto a temperatura medida pelo psicrometro (T_{BU}) é uma boa representação da temperatura de bulbo úmido termodinâmica ??

Temperatura de bulbo úmido termodinâmica → decorre de uma condição de equilíbrio termodinâmico num processo ideal de saturação adiabática → trata-se de uma **propriedade termodinâmica do ar**.

Temperatura de bulbo úmido → resulta de um processo de equilíbrio dinâmico de na transferência simultânea de calor e massa dependente de vários fatores, como a velocidade do ar, a geometria do bulbo, etc.

A área da mecha é finita e as condições de transferência de calor e massa não são ideais (como no saturador adiabático teórico)
→ **A temperatura do ar varia de T_1 a $T_2 > T^*_i$ (gráfico anterior).**

Qual a aproximação da temperatura da água na mecha (medida pelo termômetro, T_{BU}) da temperatura de bulbo úmido termodinâmica ?? Qual o erro cometido ??

Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Saturação Adiabática (Modelo experimental 3)

Até que ponto a temperatura medida pelo psicrometro (T_{BU}) é uma boa representação da temperatura de bulbo úmido termodinâmica ??

Qual a aproximação da temperatura da água na mecha (medida pelo termômetro,TBU) da temperatura de bulbo úmido termodinâmica ?? Qual o erro cometido ??

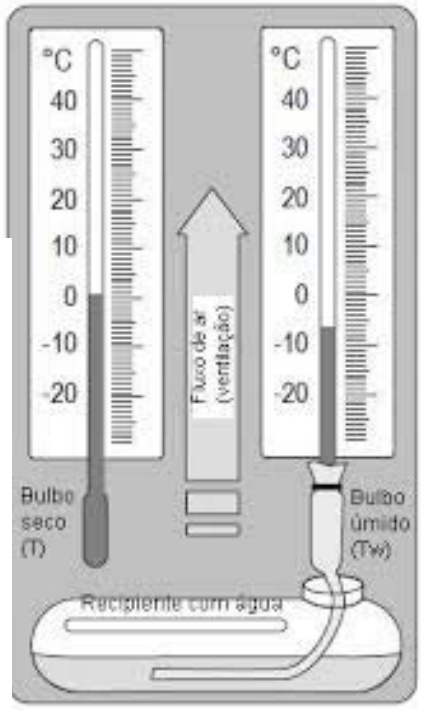
- Carrier (1911) → admitiu não haver diferença
- Lewis (1922) → agrupou variáveis psicrométricas formando um novo grupo adimensional (Número de Lewis) concluindo que se esse adimensional fosse unitário, a hipótese de Carrier estaria correta.
- Experimentos posteriores → mostraram que, na maioria das condições normais de uso, é possível considerar que a temperatura da mecha úmida corresponde a temperatura de bulbo úmido termodinâmica → correções são em geral pequenas e podem ser desprezadas em **aplicações de condicionamento de ar**.

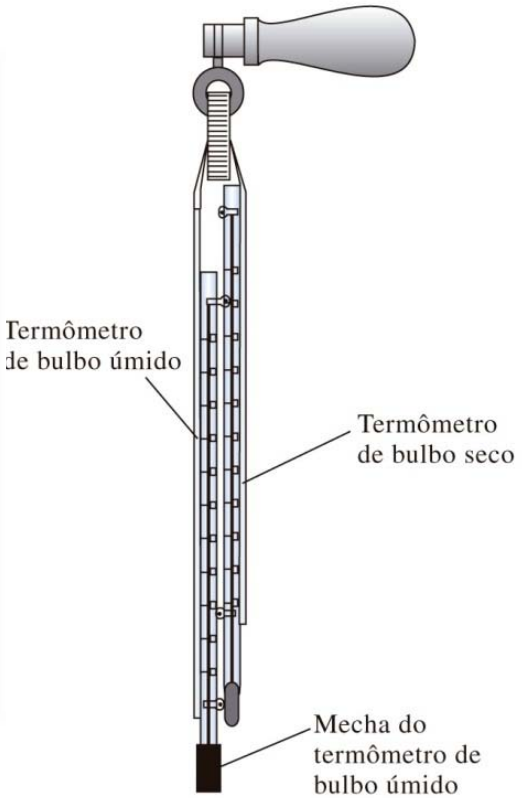
Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Psicrômetro Giratório (~Modelo experimental 3)

Um dispositivo que funciona de acordo com o princípio associado ao processo de saturação adiabático (Modelo experimental 3) é o **psicrômetro giratório**

A **temperatura do bulbo úmido** também pode ser medida ao se colocar o termômetro de bulbo úmido em um recipiente preso a uma haste giratória, ou seja, fazendo com que o termômetro se movimente em vez do ar.





https://www.youtube.com/watch?v=mB9VTmQ5V4o

Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

Psicrômetro Eletrônico (~Modelo experimental 3)

Os avanços da eletrônica possibilitaram a medição da umidade de forma direta, rápida e confiável, parece que o psicrômetro giratório e os termômetros de mecha úmida estão para se tornarem coisas do passado (apesar de ser extremamente práticos e baratos!). Hoje os dispositivos eletrônicos podem detectar e exibir digitalmente a umidade relativa com precisão de 1% em questão de segundos.

Seção 3.4 – A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Objetivo:

≡ Apresentar o conceito da carta Psicrométrica

≡ Utilizar a carta Psicrométrica para resolução de problemas de processos termodinâmicos

A Carta ou Diagrama Psicrométrico

O estado do ar atmosférico **a uma pressão específicada** é completamente determinado por **duas propriedades intensivas independentes**. O restante das propriedades pode ser calculado facilmente com as relações apresentadas nas aulas anteriores.

O dimensionamento de sistemas de condicionamento de ar envolve um número elevado de cálculos. Portanto, existe uma motivação clara para realizar esses cálculos em computador ou para realizá-los uma vez e apresentar os dados na forma de **diagramas de leitura fácil**.

Esses diagramas são chamados de **cartas ou diagramas psicrométricos** e são muito utilizados nas aplicações de condicionamento de ar.

A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Uma carta psicrométrica reúne graficamente as propriedades termodinâmicas até aqui apresentadas.

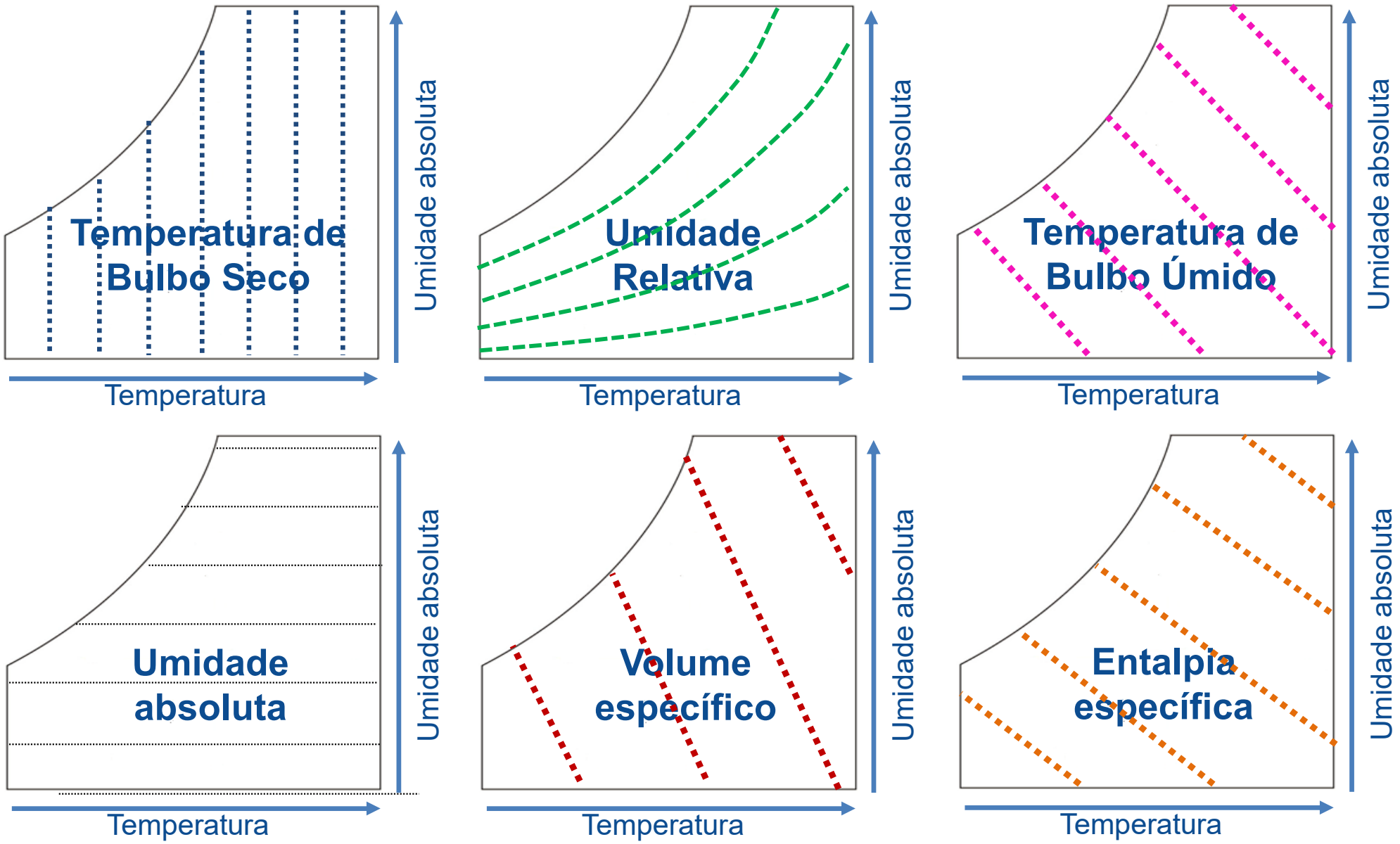
Basicamente, a carta psicrométrica é útil em duas circunstancias:

1) Obtenção de propriedades do ar úmido, e;
2) Análise de processos.

Na carta psicrométrica temos representadas uma série de linhas, cada qual representando valores constantes para:

- ❑ Umidade Absoluta
- ❑ Umidade Relativa
- ❑ Volume Específico
- ❑ Entalpia Específica
- ❑ Temperatura de Bulbo Seco
- ❑ Temperatura de Bulbo Úmido

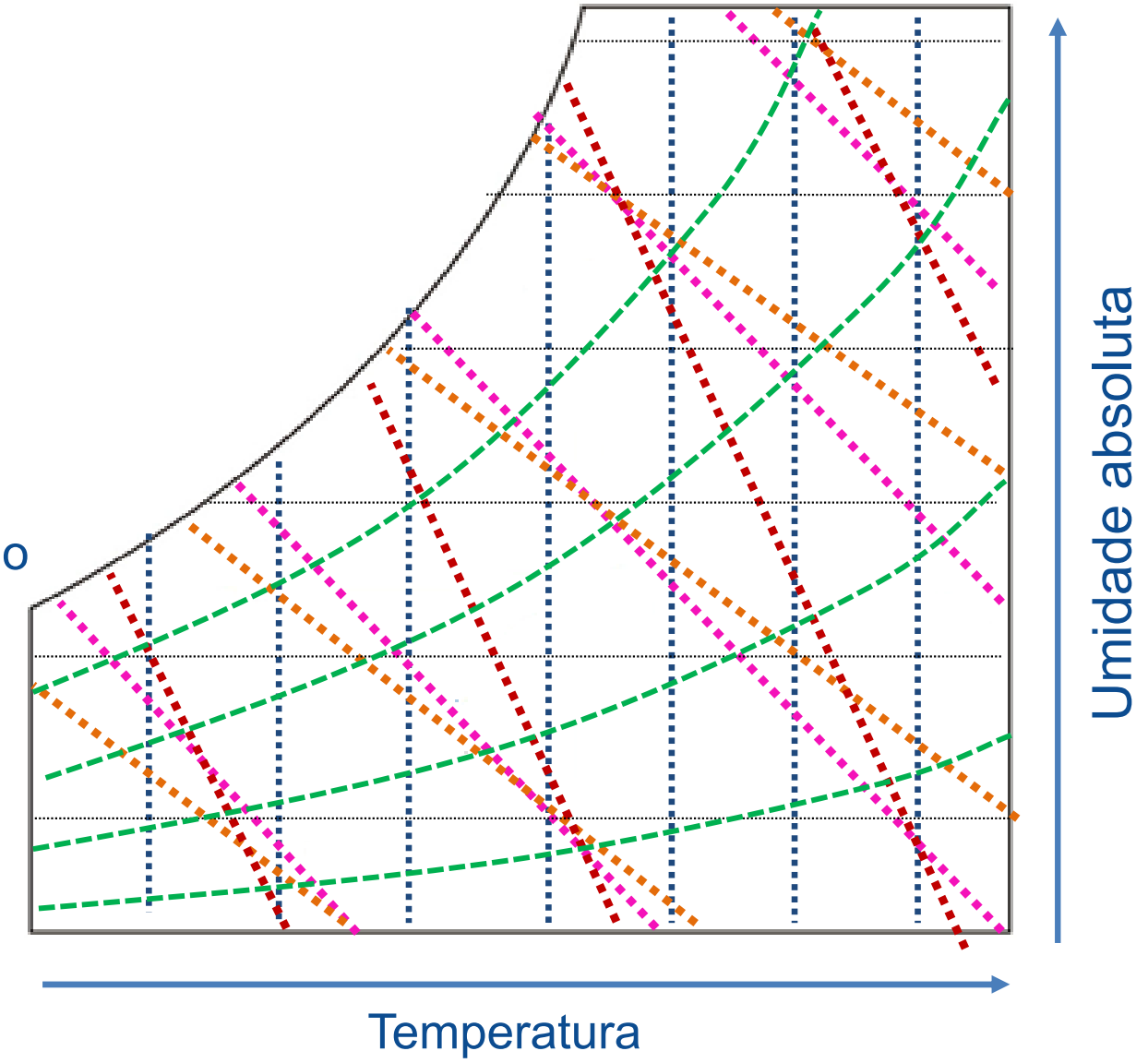
A Carta ou Diagrama Psicrométrico



A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Juntando tudo !!!!

- ❑ Umidade Absoluta
- ❑ Umidade Relativa
- ❑ Volume Específico
- ❑ Entalpia Específica
- ❑ Temperatura de Bulbo Seco
- ❑ Temperatura de Bulbo Úmido



A Carta ou Diagrama Psicrométrico

- As **temperaturas de bulbo seco** são mostradas no **eixo horizontal**;
- A **umidade absoluta** é mostrada no **eixo vertical**; Alguns diagramas também mostram a pressão de vapor no eixo vertical (porque?);
- No lado esquerdo do diagrama há uma curva (chamada **linha de saturação**) em vez de uma linha reta, onde todos os estados de ar saturado estão localizados nessa curva (φ = 100%); Outras **curvas de umidade relativa constante** têm a **mesma forma geral**;
- As **linhas da temperatura constante de bulbo úmido** têm uma aparência de **declínio à direita**; As **linhas de volume específico constante são semelhantes**, **exceto** por serem **mais inclinadas**;
- As **linhas da entalpia constante** ficam bem **paralelas** às **linhas de temperatura de bulbo úmido**.

A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Unidades Métricas SI

Pressão Atmosférica Padrão (Patm = 101.325kPa)

Nível do Mar

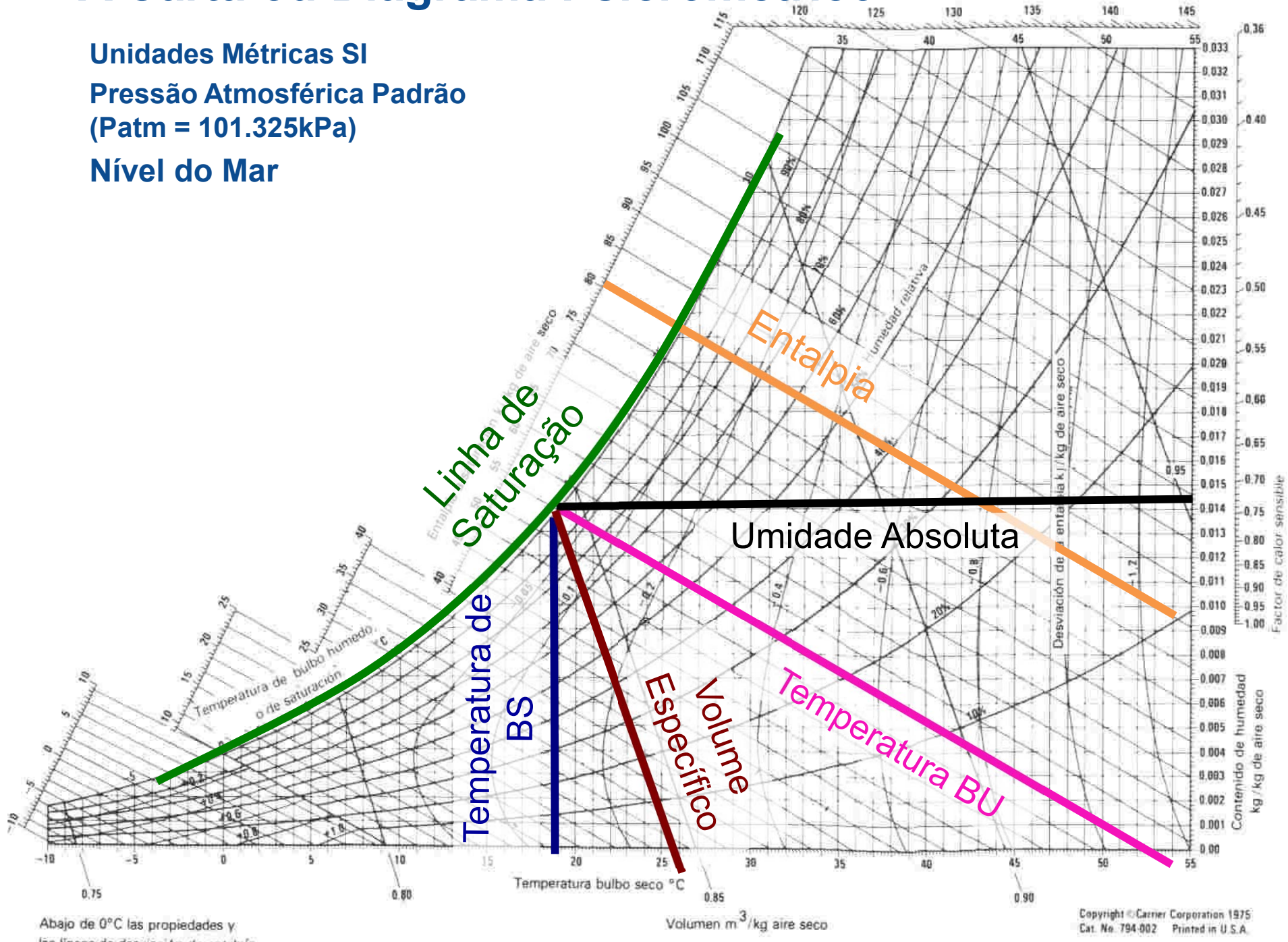


Fig. 5-11

A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Unidades Métricas SI

Pressão Atmosférica Padrão (Patm = 101.325kPa)

Nível do Mar

Nomograma de temperatura efetiva

Carta Bioclimátiva x Carta de Givoni

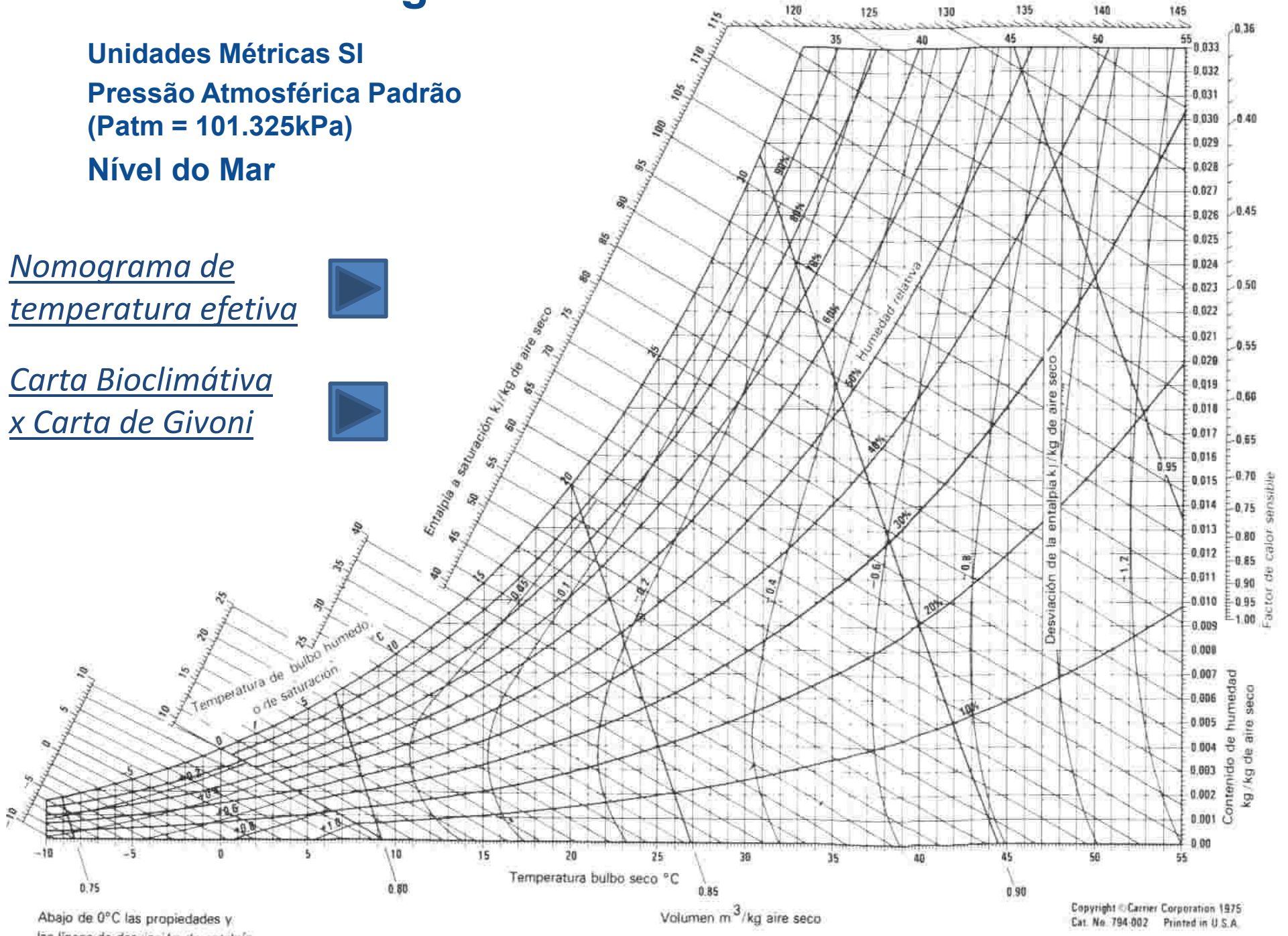
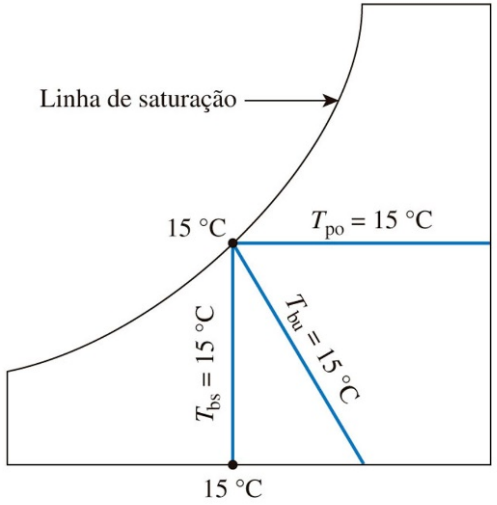


Fig. 5-11

A Carta ou Diagrama Psicrométrico

- Os diagramas psicrométricos a outras pressões (para utilização a altitudes consideravelmente mais altas do que o nível do mar) também estão disponíveis porém, mais raros. Essa é a grande **desvantagem** das cartas psicrométricas. Outra questão é a imprecisão na leitura dos parâmetros diretamente no diagrama psicrométrico.
- A **vantagem** principal é a facilidade de leitura e, também a simplicidade em enxergar as mudanças de estado quando há um processo de condicionamento de ar ocorrendo (que será visto no próximo capítulo!).

Observação



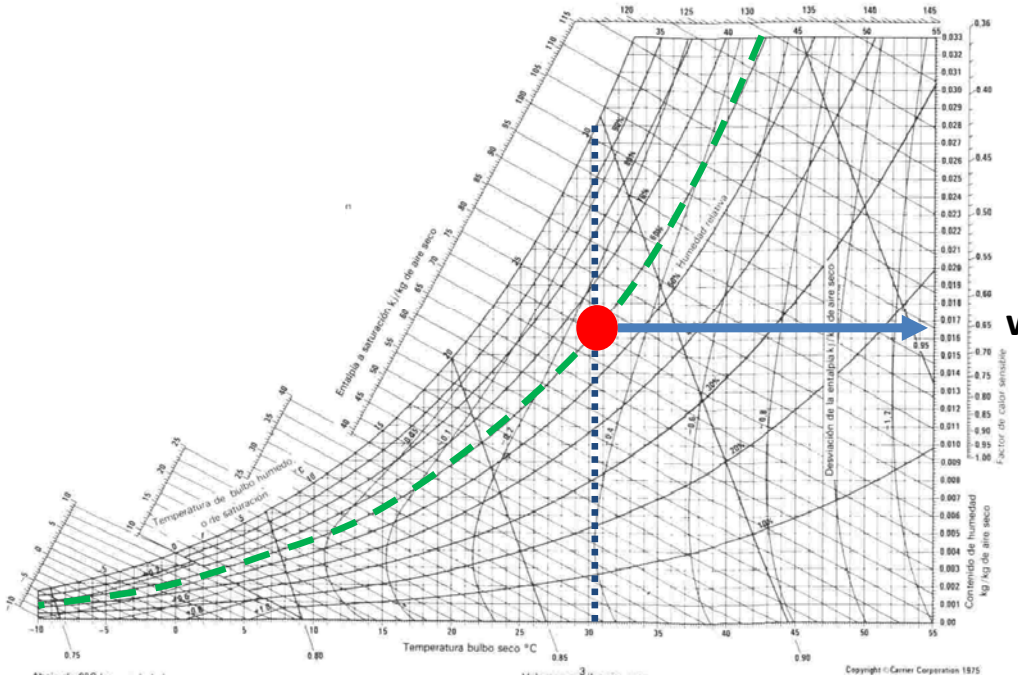
Para o ar saturado, as temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e ponto de orvalho são idênticas. Dessa forma, a temperatura de ponto de orvalho do ar atmosférico em certo ponto do diagrama pode ser determinada desenhando-se uma linha horizontal (ω = constante ou P_v = constante) do ponto até a curva de saturação.

Exemplo 1
A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Determinar a umidade absoluta do ar com umidade relativa de 60 % e temperatura de 30°C, numa pressão de 101,325 kPa.

Solução A)

Na carta psicrométrica, com UR = 60% e TBS= 40°C ...



w = 0,017 $kg_{água}/kg_{ar\ seco}$

Tab. A5

Tab. B1

Exemplo 1
A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Determinar a umidade absoluta do ar com umidade relativa de 60 % e temperatura de 30°C, numa pressão de 101,325 kPa.

Solução B)

Usando a Equação, $w = 0{,}62198\ \frac{p_v}{p_a} = 0{,}62198 \frac{p_v}{P - p_v}$

e com a definição de umidade relativa $\rightarrow \phi = \frac{y_v}{y_{v,sat}}\Big|_{T,P} = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \rightarrow p_v = \phi\, p_{v,sat}$

Da tabela de vapor d'água, $p_{v,s} = p_{sat}$ (30°C)=4,246 kPa, logo,

$$p_v = \phi\, p_{v,sat} = 0{,}6 \times 4{,}246 = 2{,}548 kPa$$

Assim, $w = 0{,}62198\ \frac{2{,}548}{101{,}325 - 2{,}548} = 0{,}0160\ kg_{água}/kg_{ar\ seco}$

Tab. A5

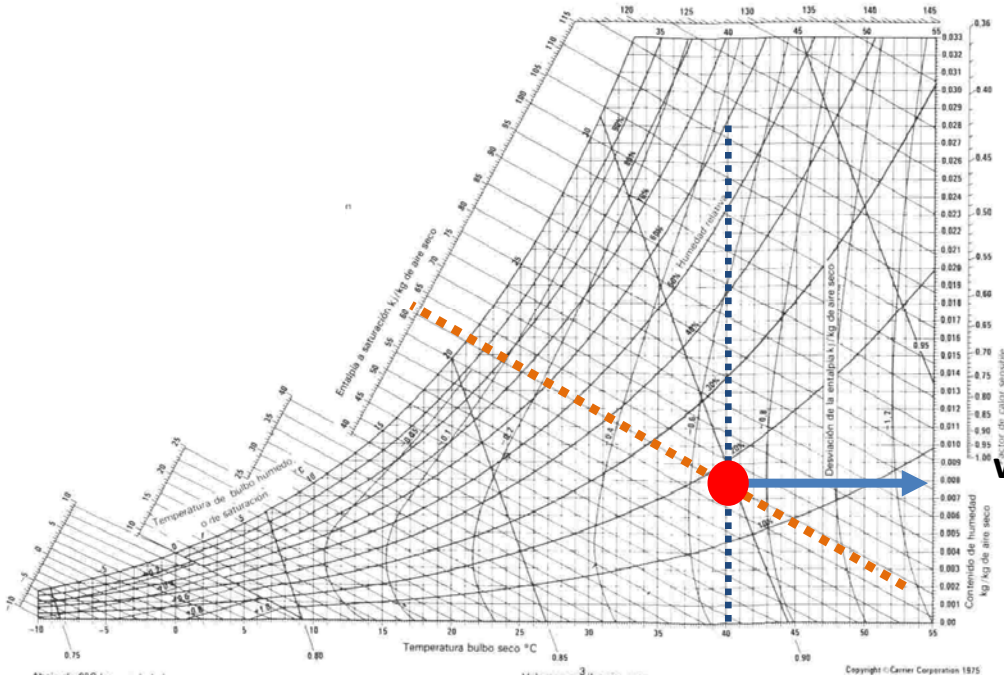
Tab. B1

Exemplo 2
A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Determinar a umidade absoluta do ar com entalpia de 61 kJ/kg e temperatura de 40°C, numa pressão de 101,325 kPa.

Solução A)

Na carta psicrométrica, com h=61 kJ/kg e TBS= 40°C ...



w = 0,008 $kg_{água}/kg_{ar\ seco}$

Tab. A5

Tab. B1

Determinar a umidade absoluta do ar com entalpia de 61 kJ/kg e temperatura de 40°C, numa pressão de 101,325 kPa.

Solução B)

Com a equação, $h_a = 1{,}004.T + w(2547{,}2 + 1{,}872.T)$

temos, $w = \frac{h - 1{,}004\,T}{2{,}547{,}2 + 1{,}872T} = \frac{61 - 1{,}004\,(40)}{2{,}547{,}2 + 1{,}872(40)} =$

$$0{,}0079 \frac{kg_{água}}{kg_{ar\ seco}} = 7{,}9 g_{água}/kg_{ar\ seco}$$

Tab. A5

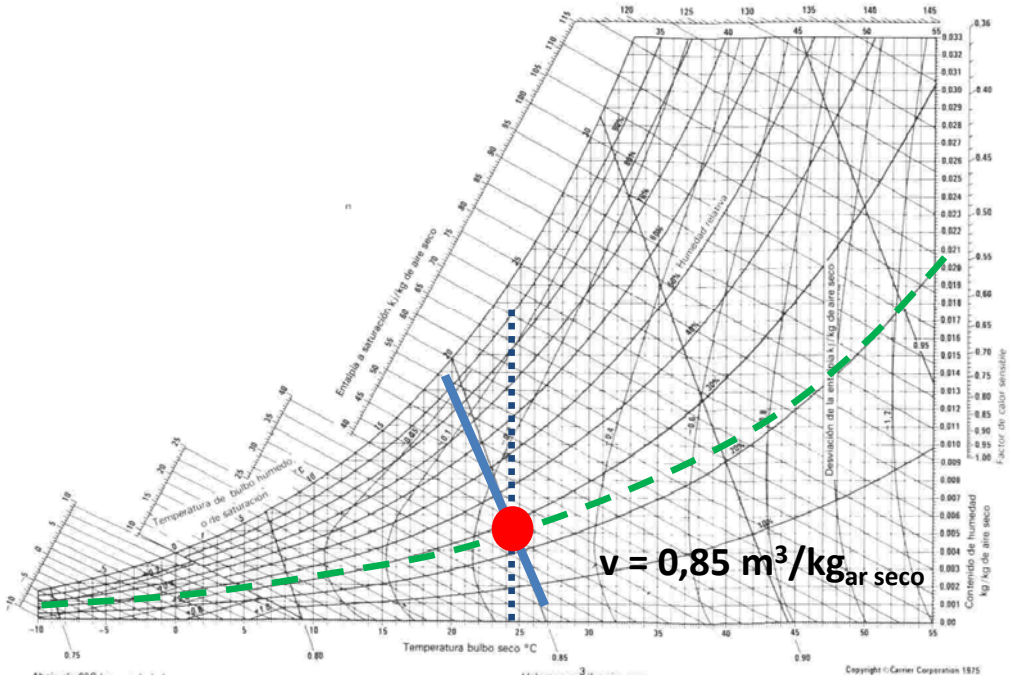
Tab. B1

Exemplo 3
A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Qual o volume específico do ar úmido com umidade relativa de 20% e temperatura de 24°C, numa pressão de 101,325 kPa.

Solução A)

Na carta psicrométrica, com UR=20% e TBS= 24°C ...



Tab. A5

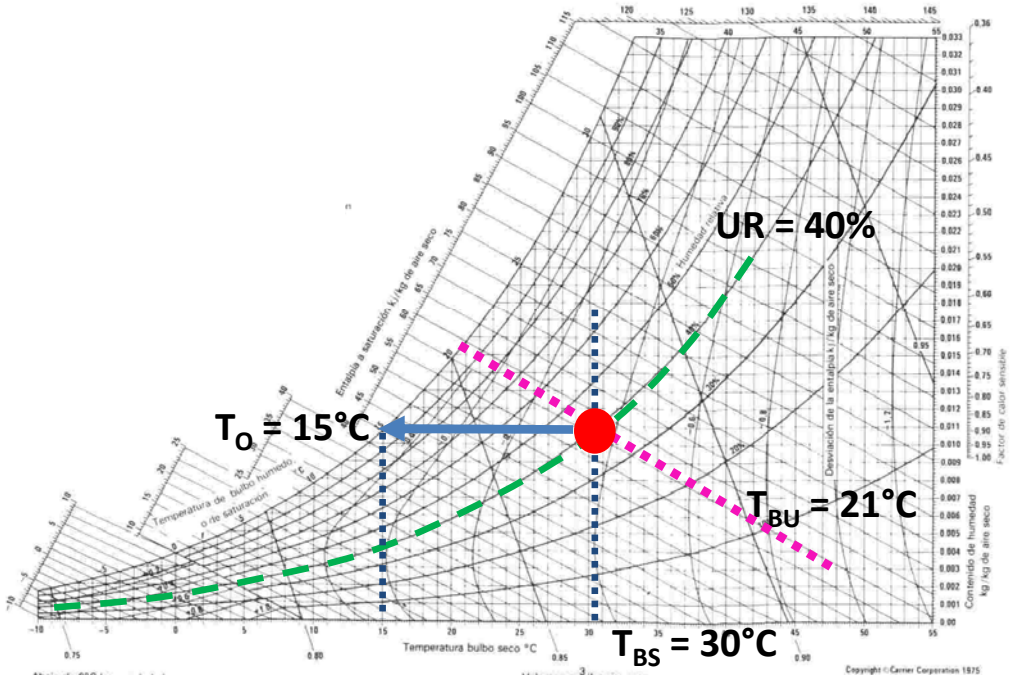
Tab. B1

Exemplo 4
A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Determine as temperaturas de orvalho e bulbo úmido do ar na temperatura de 30°C, UR de 40 % e pressão de 101,325 kPa.

Solução A)

Na carta psicrométrica, com UR = 40% e TBS= 30°C ...



Tab. A5

Tab. B1

Exemplo 5
A Carta ou Diagrama Psicrométrico

A umidade relativa e a temperatura do ar em um ambiente são de 60% e 40°C, respectivamente. Se a pressão é normal (101,325 kPa) calcule a umidade absoluta do ar e o grau de saturação.

A pressão parcial do vapor d'água saturado $p_{v,s}$ à temperatura de 40°C vale 7,384 kPa (Tabela)

$$p_v = \phi\, p_{v,sat} = 0{,}6 \times 7{,}384 = 4{,}430 kPa$$

A umidade absoluta (w) é calculada por,

$$w = 0{,}62198 \frac{p_v}{P - p_v} = 0{,}62198 \frac{4{,}430}{101{,}325 - 4{,}430} = 0{,}0284\ kg_{água}/kg_{ar\ seco}$$

O grau de saturação é dado por,

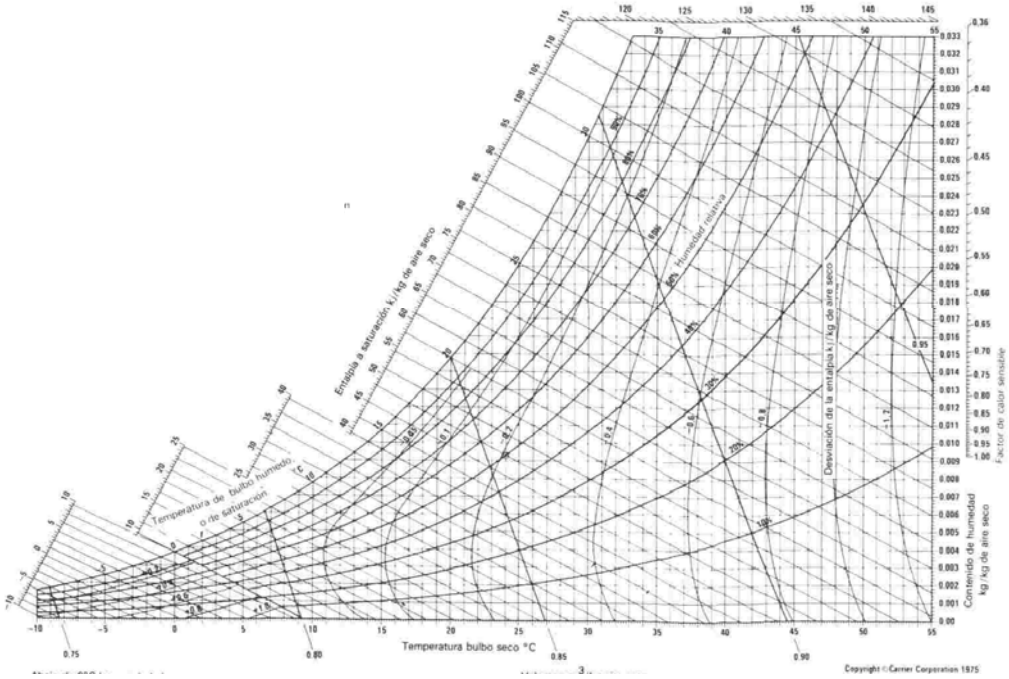
$$\mu = \phi \frac{P - p_{v,sat}}{P - p_v} = 0{,}60 \frac{101{,}325 - 7{,}384}{101{,}325 - (4{,}430)} = 0{,}5817 = 58{,}17\%$$

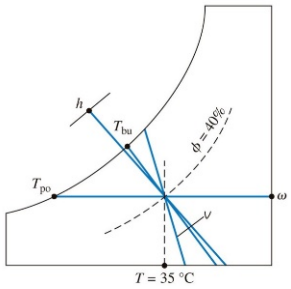
Tab. A5

Tab. B1

Estudo Dirigido 3
A Carta ou Diagrama Psicrométrico

Considere uma sala que contenha ar a 1 atm, esteja a 35°C e tenha 40% de umidade relativa. Usando o diagrama psicrométrico determine (a) a umidade específica, b) a entalpia, c) a temperatura de bulbo úmido, d) a temperatura do ponto de orvalho e (e) o volume específico do ar





Respostas:

a) $\omega = 0{,}0142\ kg\ H_2O/kg\ ar\ seco$

b) $h = 71{,}5\ kJ/kg\ ar\ seco$

c) $T_{bu} = 24°C$

d) $T_{po} = 19{,}4°C$

e) $v = 0{,}893\ m^3/kg\ ar\ seco$

Tab. A5

Tab. B1

Importante!
Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

Exercícios Incropera - 7ed								
Capítulo 6								
Resfriamento evaporativo	6.78	6.80						
Capítulo 7								
Transf. de calor e massa	7.139							

Exercícios Van Wyllen - 5ed								
Capítulo 12								
Parâmetros Psicrométricos	12.54	12.55	12.56	12.58				

Seção 3.5 – Transferência de Calor e Massa

Objetivo:

Apresentar:

- Coeficientes de Transferência de Calor e Massa
- A Transferência Simultânea de Calor e Massa
- O Potencial de Entalpia
- Regra da Linha Reta

Transferência de Calor e Massa

Coeficientes de Transferência de Calor e Massa

A análise dimensional das equações que regem a transferência de calor e massa na convecção se relacionam entre si (condições de camadas limite):

Grupo	Definição	Interpretação
Reynolds $(Re)_L$	$\frac{VL}{\nu}$	Razão entre as forças de inércia e forças viscosas
Schmidt *(Sc)*	$\frac{\nu}{D_{AB}}$	Razão entre as difusividades de momento e massa
Sherwood $(Sh)_L$	$\frac{h_m L}{D_{AB}}$	Gradiente de concentração (mássica) adimensional na superfície
Prandtl (Pr)	$\frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$	Razão entre as difusividades de momento e térmica
Nusselt (Nu)	$\frac{hL}{k_f}$	Gradiente de temperatura adimensional na superfície
Lewis (Le)	$\frac{\alpha}{D_{AB}}$	Razão entre as difusividades térmica e de massa

Transferência de Calor e Massa

Coeficientes de Transferência de Calor e Massa

Transferência de calor por convecção e transferência de massa são processos adimensionalmente análogos, isto é, possuem a mesma forma funcional.

Cada equação é relacionada ao campo de velocidade através de *Re*, ou seja, uma análise dimensional das equações que regem a transferência de calor e massa na convecção indica ainda existir uma correlação do tipo:

n° Nusselt

$$\boldsymbol{Nu} = \frac{\boldsymbol{h_c L}}{\boldsymbol{k}} \quad \begin{cases} Nu = f(Re_L, Pr) \\ Nu = f(x^*, Re_L) Pr^n \end{cases} \quad \boldsymbol{Pr} = \frac{\boldsymbol{c_p \mu}}{\boldsymbol{k}} = \frac{\boldsymbol{\nu}}{\boldsymbol{\alpha}}$$

n° Prandtl

k → condutividade térmica [W/m.K]

---

n° Sherwood

$$\boldsymbol{Sh} = \frac{\boldsymbol{h_m L}}{\boldsymbol{D}} \quad \begin{cases} Sh = f(Re_L, Sc) \\ Sh = f(x^*, Re_L) Sc^n \end{cases} \quad \boldsymbol{Sc} = \frac{\boldsymbol{\nu}}{\boldsymbol{D}}$$

n° Schimdt

D → Coeficiente de difusão mássica [m^2/s]

Coeficientes de Transferência de Calor e Massa

Dessa forma, relacionando Transferência de calor por convecção e transferência de massa, ou seja, dividindo *Nu* por *Sh*:

$$\frac{\boldsymbol{Nu}}{\boldsymbol{Sh}} = \frac{\boldsymbol{Pr^n}}{\boldsymbol{Sc^n}} \rightarrow \frac{\boldsymbol{Nu}}{\boldsymbol{Pr^n}} = \frac{\boldsymbol{Sh}}{\boldsymbol{Sc^n}}$$

Substituindo os respectivos números adimensionais, tem-se:

$$\frac{h_c \; L/k}{Pr^n} = \frac{h_m \, L/D_{AB}}{Sc^n}$$

Ou seja:

$$\left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{1-n} = \frac{h_c}{h_m c_p \rho} = \left(\frac{\alpha}{D_{AB}}\right)^{1-n} = Le^{1-n}$$

**** vale tanto para o escoamento externo turbulento quanto laminar**

**** para a maioria das aplicações é razoável admitir *n=1/3***

Transferência de Calor e Massa

Coeficientes de Transferência de Calor e Massa

$$\left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{1-n} = \left(\frac{\alpha}{D_{AB}}\right)^{1-n} = \frac{h_c}{h_m c_p \rho} = Le^{1-n}$$

Um novo parâmetro adimensional é apresentado (Le – Lewis) definido por $\boldsymbol{Le = \alpha / D_{AB} = Sc/Pr}$, ou seja, pela razão entre as difusividades térmicas e mássicas

- *O número de Lewis para o ar úmido é aproximadamente 0,865 e aumenta ligeiramente com a temperatura*

$$\boldsymbol{R_{Le} = Le^{1-n} = \frac{Nu}{Sh} = (0,865)^{2/3} = 0,908 \approx 1,00}$$

O valor unitário para a relação de Lewis $R_{Le} = Le^{1-n}$ mostra que o coeficiente de transferência de massa pode ser diretamente determinado a partir do conhecimento do coeficiente de transferência de calor.

Um filme de água com temperatura de 27ºC sobre uma superfície plana de 0,5m x 0,5m está exposto a brisa de ar atmosférico com velocidade de 10 m/s, pressão normal, umidade relativa de 60% e temperatura também de 27ºC. Calcule a taxa de evaporação da água para o ar.

Como primeira aprox. se adotam as propriedades do ar seco a 27ºC,

$$\mu = 1{,}85 \times 10^{-5} Pa.s\,;\, c_p = 1{,}01 \frac{kJ}{kg.K}\,;\, \rho = 1{,}161 \frac{m^3}{kg}\,;\, Pr = 0{,}707\,;\, k = 0{,}026 \frac{W}{m.K}$$

Cálculo do número de Reynolds, $Re_L = \frac{V\,L\,\rho}{\mu} = \frac{10 \times 0{,}5 \times 1{,}161}{1{,}85 \times 10^{-5}} = 3 \times 10^5$

Cálculo do número de Nusselt, $\mathrm{Nu} = 0{,}644\,(3 \times 10^5)^{1/2}(0{,}707)^{1/3} = 324{,}0$

Cálculo de h_c, $\mathrm{Nu} = \frac{h_c\,L}{k} \rightarrow h_c = \frac{Nu\,k}{L} = \frac{324{,}0 \times 0{,}026}{0{,}5} = 16{,}85\ W/m^2K$

Usando a relação de Lewis, sendo $R_{Le} \approx 1$, temos,

$$h_m = \frac{h_c}{c_p \times \rho} = \frac{16{,}85}{1{,}01 \times 10^3 \times 1{,}161} = 0{,}014\ m/s$$

Determinação da densidade do vapor d'água no ar úmido na condição da interface com a superfície úmida "*sup*" e ao longe da mesma "∞";

$$\begin{cases} T = 27°C\ e\ \phi = 100\% \rightarrow w_{sup} = 0{,}0227\ kg_{vap}/kg_{ar\ seco} \\ T = 27°C\ e\ \phi = 60\% \rightarrow w_{sup} = 0{,}0134\ kg_{vap}/kg_{ar\ seco} \end{cases}$$

Então ...

$$\begin{cases} \rho_{sup} = \rho\ .w_{sup} = 1{,}161 \times 0{,}0227 = 0{,}0264\ m^3/kg \\ \rho_{\infty} = 0{,}0156\ m^3/kg \end{cases}$$

Exemplo
Transferência de Calor e Massa

Finalmente, o fluxo evaporativo de massa será dado por,

$$m_v = 0{,}014 \times (0{,}5)^2 \times (0{,}0264 - 0{,}0156) = 0{,}038 \times 10^{-3}\ kg/s$$

FIGURA 14–33 Uma lagoa de resfriamento de água por pulverização.

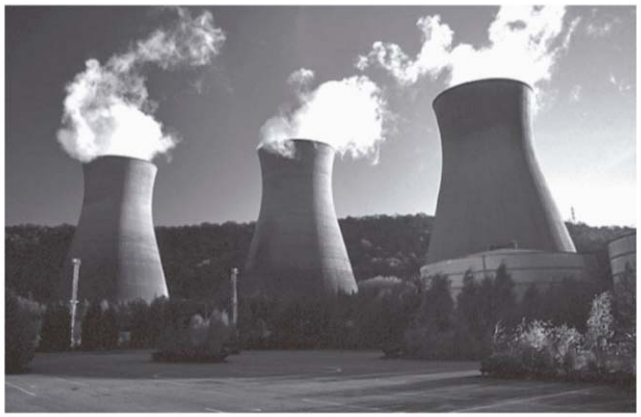


FIGURA 14–32 Três torres de resfriamento com corrente de ar natural em uma estrada.

O fluxo evaporativo neste exemplo, mostra a transferência de massa em uma superfície, o que será objeto de comparação mais a frente no conceito de Lagoas de Resfriamento e Torres de Resfriamento.

Exemplo

Transferência de Calor e Massa

Monitoramento ambiental por imagens de satélite

Imagens de satélite capturadas pela Nasa, a agência espacial americana, mostram a gravidade da seca que atinge o centro e sul do Brasil, a pior em quase um século. Os registros foram capturados no Lago das Brisas, no rio Paranaíba (Minas Gerais), pelo instrumento Operational Land Imager (OLI), do satélite Landsat 8, em 17/06/21, e comparados com os de 12/06/19.

Cinco reservatórios próximos registraram níveis de água mais de 2 metros abaixo da média (1993-2002), de acordo com o Global Reservoir and Lake Monitor, que monitora variações na altura da água para aproximadamente 70 lagos e reservatórios em todo o mundo.

https://www.bbc.com/portuguese/geral-57581390.amp

Exemplo

Transferência de Calor e Massa

Monitoramento ambiental por imagens de satélite

A taxa na qual a água é perdida devido a evaporação no corpo de água do Lago das Brisas (MG) de **776km²**, pode ser determinada através da medida da taxa de variação do seu nível, conforme monitoramento ambiental por imagens de satélite. Obviamente, há se se considerar o histórico de variação de temperatura e umidade do microclima do entorno mas, por simplificação, se **considerarmos**:

As temperaturas médias da água e do ambiente são aprox. **26,85°C (300K)**. A UR aprox. **50%**, na região. A taxa de queda do nível da água é **0,1mm/h** indicadas pelas imagens de satélite. Calcule então: a) perda de massa pela evaporação e, b) o coef. de transferência de massa por convecção.

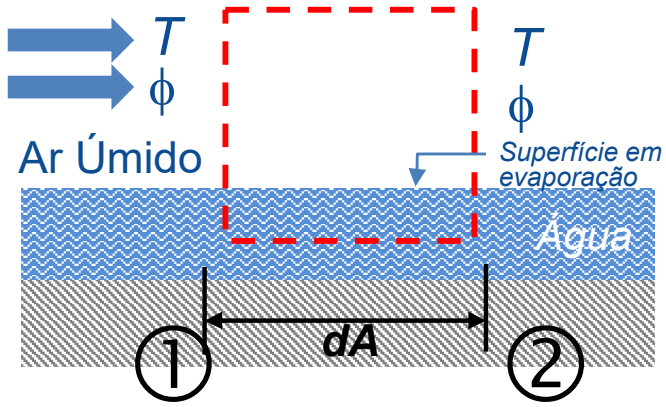
https://www.bbc.com/portuguese/geral-57581390.amp

Da tabela das propriedades da água.

$$\rho_{v,sat} = v_{v,sat}{}^{-1} = 0{,}023063\ kg/m^3; \rho_{l,sat} = v_{l,sat}{}^{-1} = 997\ kg/m^3$$

Perda de massa:

$$-\dot{m}_{evap}A = \frac{d}{dt}\left(\rho_{l,sat}AH\right) = \rho_{l,sat}A\frac{dH}{dt}$$



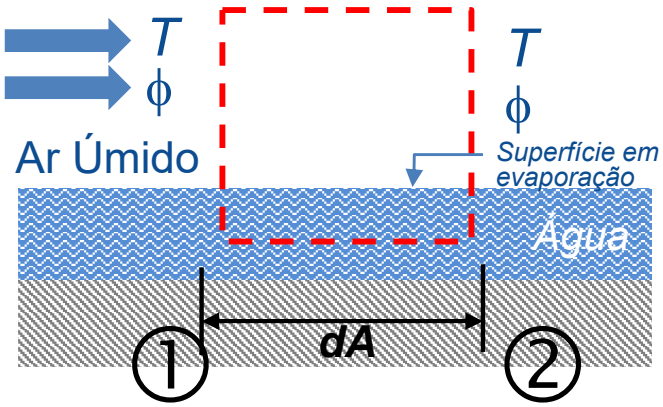
A evaporação também é um processo de trans de massa por convecção:

$$\dot{m}_{evap} = h_m\left(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}\right) = h_m\left(\rho_{v,sat}(T_s) - \phi_\infty\rho_{v,\infty}(T_\infty)\right)$$

Perda de massa: $-\dot{m}_{evap}A = \frac{d}{dt}\left(\rho_{l,sat}AH\right) = \rho_{l,sat}A\frac{dH}{dt}$

Coeficiente de trans de massa por convecção:

$$h_m = \frac{\dot{m}_{evap}}{\rho_{v,sat}(T_s)(1-\phi_\infty)}$$



Resolvendo numericamente, tem-se:

$$\dot{m}_{evap} = -997\ kg/m^3\left(-10^{-4}\frac{m}{h}\right)\left(\frac{1}{3600}\frac{s}{h}\right) = 2{,}76\times10^{-5}\frac{kg}{s\,m^2}$$

$$\rightarrow para\ (776\times10^6 m^2) = 21.491\ kg/s$$

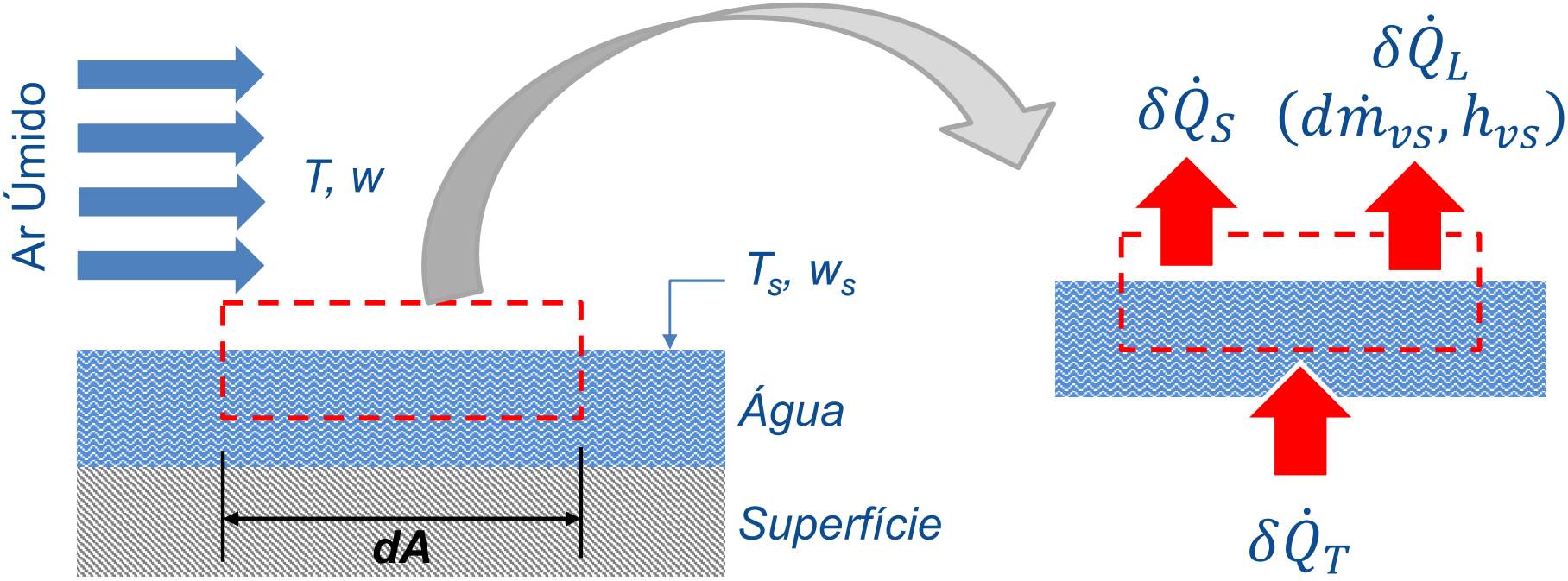
$$h_m = \frac{\dot{m}_{evap}}{\rho_{v,sat}(T_s)(1-\phi_\infty)} = \frac{2{,}76\times10^{-5}}{0{,}023063(1-0{,}5)} = 2{,}40\times10^{-3} m/s$$

Transferência Simultânea de Calor e Massa

INDUSTRIALMENTE FALANDO... A manipulação do ar úmido geralmente resulta na adição ou remoção de vapor d'água. Isso é particularmente verdade para torres de resfriamento, condensadores evaporativos, serpentinas de resfriamento e desumidificação, umidificadores, etc. Processos evaporativos e de condensação que também são comuns na natureza.

Transferência Simultânea de Calor e Massa

A mudança de fase da água requer o fornecimento ou remoção de calor correspondente à sua entalpia de vaporização. Assim, os processos de transferência de calor e massa devem ser considerados simultaneamente.



Transferência de Calor e Massa

Transferência Simultânea de Calor e Massa

Fluxo de calor sensível

$$\delta \dot{Q}_S = h_c \, dA \, (T_s - T)$$

Taxa de transferência de vapor d'água

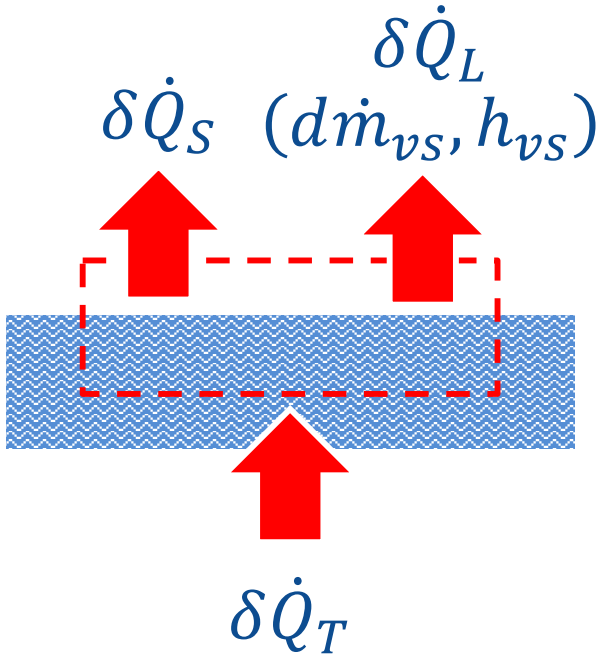
$$\delta \dot{m}_v = h_v \, \rho_a \, dA \, (w_s - w)$$

Conservação da energia para o v.c.

$$\delta \dot{Q}_L = \delta \dot{Q}_T - \delta \dot{Q}_S = h_{LVs} \, d\dot{m}_v$$

Com $\delta \dot{m}_v$ na equação acima temos

$$\delta \dot{Q}_L = \rho_a \, h_{LVs} \, h_m \, dA \, (w_s - w)$$



Finalmente, das equações acima, o fluxo de calor total será dado por,

$$\delta \dot{Q}_T = \delta \dot{Q}_S + \delta \dot{Q}_L = [h_c \, (T_s - T) + \rho_a \, h_{LVs} \, h_m \, (w_s - w)] \, dA$$

Transferência de Calor e Massa

Potencial de Entalpia

Primeiramente considerando que a entalpia específica de uma mistura pode ser dada pela soma das entalpias individuais; podemos escrever para o ar úmido que,

$$\boldsymbol{h_s - h = (h_{sa} - h) + (w_s h_{vs} - w\, h_v)}$$

Somando e subtraindo o produto ao segundo membro e ainda admitindo o comportamento de gás perfeito, temos,

$$\boldsymbol{h_s - h = c_{pu}(T_s - T) + h_{vs}(w_s - w)}$$

onde o calor específico do ar úmido é $c_{pu} = c_{pa} + w\, c_{pv}$ .Isolando a diferença de temperatura da equação anterior vem,

$$\boldsymbol{T_s - T_s = \frac{(h_s - h) - h_{vs}(w_s - w)}{c_{pu}}}$$

Esta última equação substituída na equação anterior para o calor total permite eliminar desta a temperatura. Temos ....

Potencial de Entalpia

$$T_s - T_s = \frac{(h_s - h) - h_{vs}(w_s - w)}{c_{pu}}$$

$$\delta\dot{Q}_T = \delta\dot{Q}_S + \delta\dot{Q}_L = [h_c\,(T_s - T) + \rho_a\, h_{LVs}\, h_m\,(w_s - w)]\, dA$$

$$\delta\dot{Q}_T = \frac{h_c\, dA}{c_{pu}}\left[(h_s - h) + \frac{(w_s - w)}{Re_{Le}}(h_{Lvs} - Re_{Le}\, h_{vs})\right]$$

Para esta última considerando que $R_{Le} \cong 1 \Longrightarrow h_{Lvs} - R_{Le}h_{vs} \approx h_{Lvs}$; o termo resultante $(w - w_s)h_{Ls}$ é desprezível em relação a $h_s - h$. Assim, somente o primeiro termo entre colchetes é significativo.

Com isso o fluxo total de calor será dado por,

$$\delta\dot{Q}_T = \frac{h_c\, dA}{c_{pu}}(h_s - h)$$

Potencial de Entalpia

A equação anterior é importante pois permite determinar o fluxo de calor total em equipamentos de contato direto entre o ar e a água (torres de resfriamento, etc.).

$$\delta\dot{Q}_T = \frac{h_c\, dA}{c_{pu}}(h_s - h) \quad \begin{cases} \textbf{se } h > h_s \rightarrow \delta\dot{Q}_T \textbf{ será do ar para a água} \\ \textbf{se } h > h_s \rightarrow \delta\dot{Q}_T \textbf{ será da água para o ar} \end{cases}$$

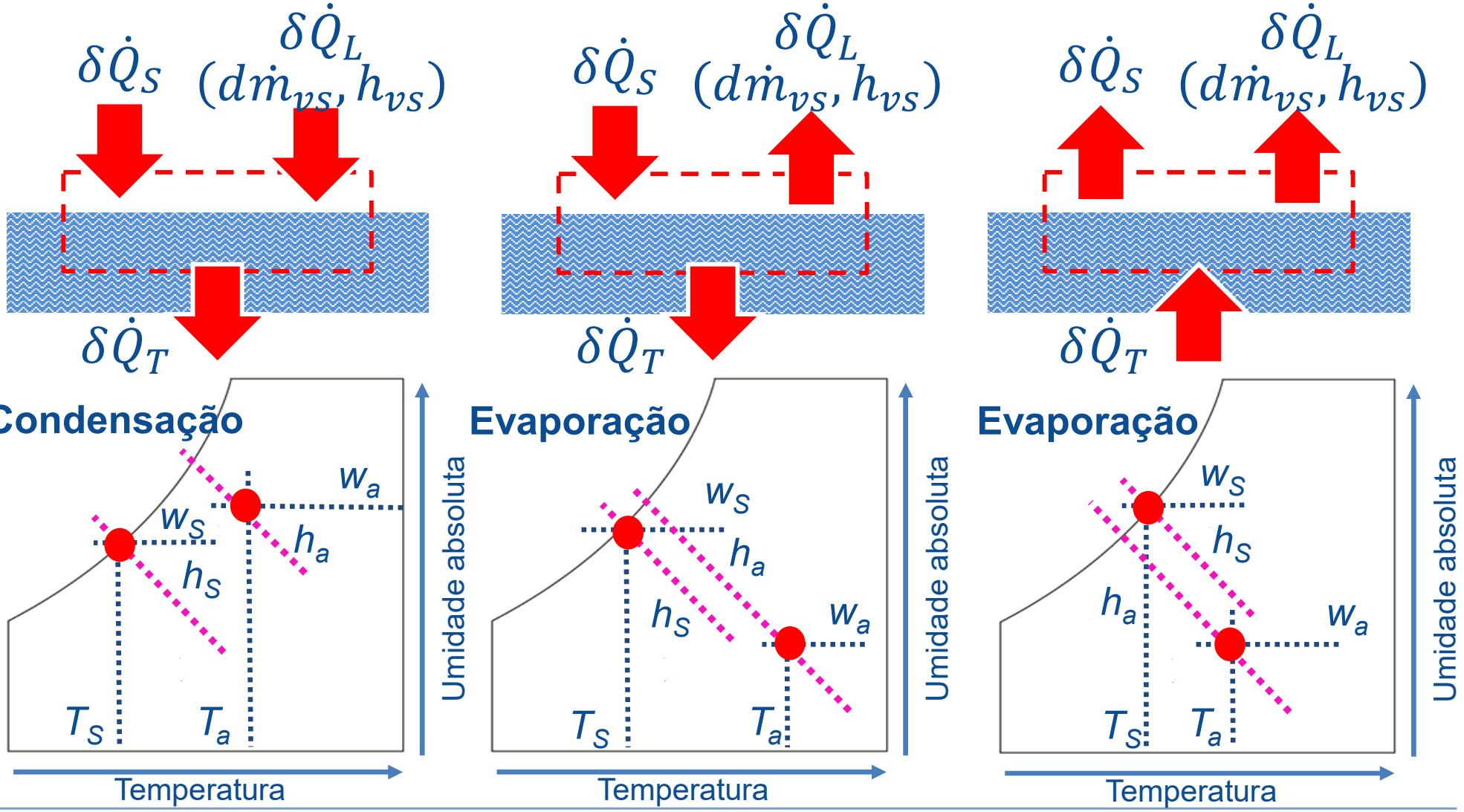
Além disso, já era óbvio que:

$$\delta\dot{Q}_S = h_c\, dA\, (T_s - T) \quad \begin{cases} \textbf{se } T > T_s \rightarrow \delta\dot{Q}_S \textbf{ será do ar para a água} \\ \textbf{se } T > T_s \rightarrow \delta\dot{Q}_S \textbf{ será da água para o ar} \end{cases}$$

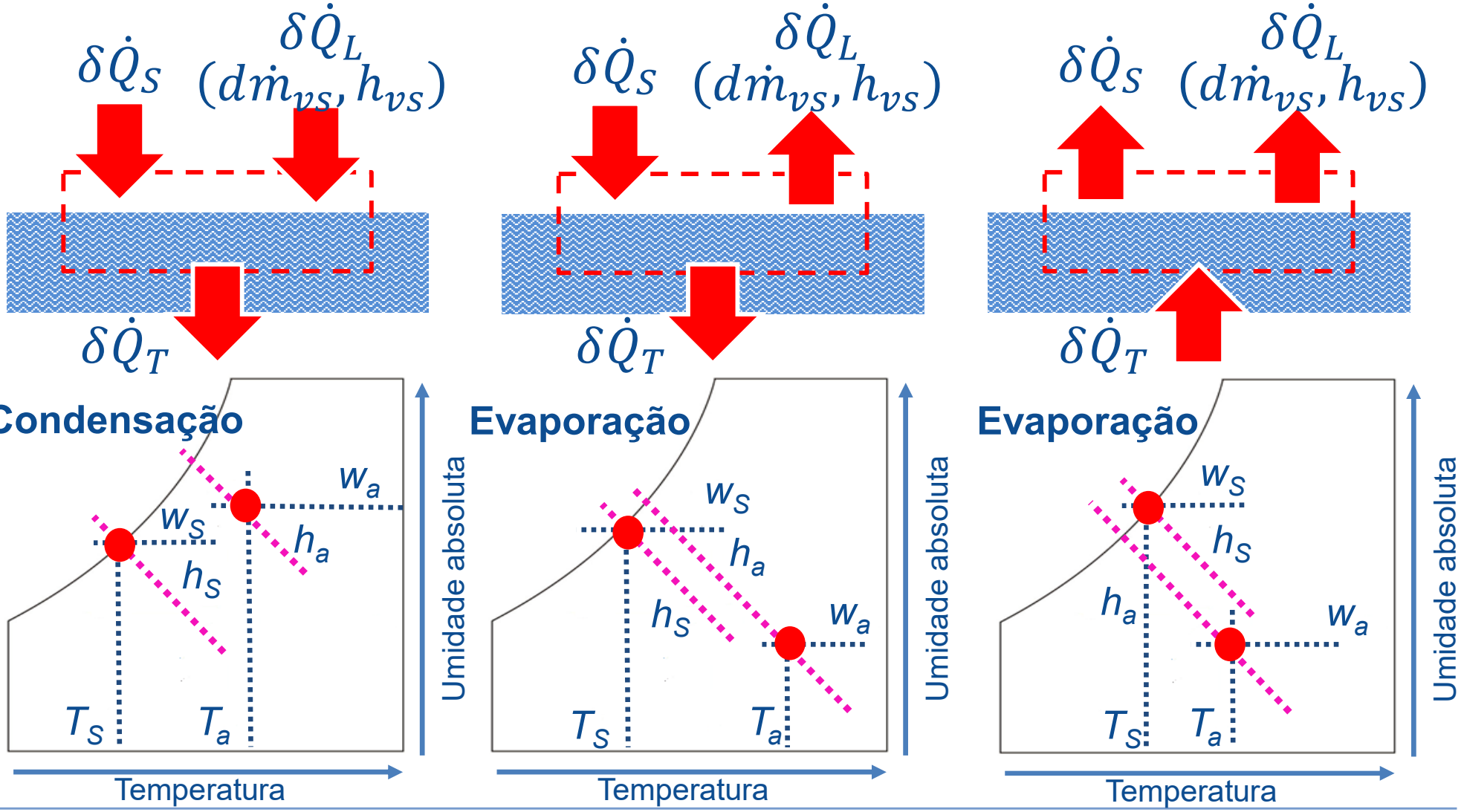
$$\delta\dot{Q}_L = \rho_a\, h_{LVs}\, h_m\, dA\, (w_s - w) \quad \begin{cases} \textbf{se } w > w_s \rightarrow \delta\dot{Q}_L \textbf{ será do ar para a água} \\ \textbf{se } w > w_s \rightarrow \delta\dot{Q}_L \textbf{ será da água para o ar} \end{cases}$$

Exemplos de 3 possibilidades

Estudo Dirigido
Transferência de Calor e Massa
Potencial de Entalpia (Conclusões).



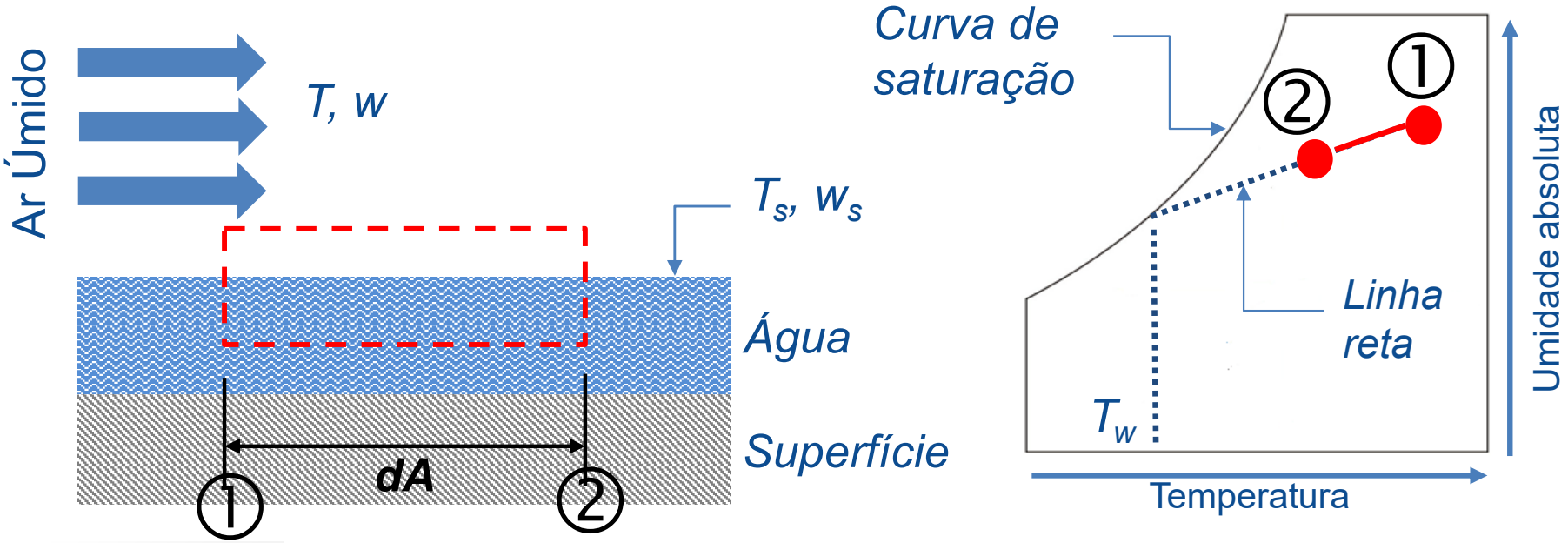
Estudo Dirigido
Transferência de Calor e Massa
Potencial de Entalpia (Conclusões).



Transferência de Calor e Massa

Regra da Linha Reta

"quando o ar úmido transfere calor e massa de/para uma superfície úmida, o estado do ar tende para a temperatura da superfície úmida(tw) sobre a linha de saturação"

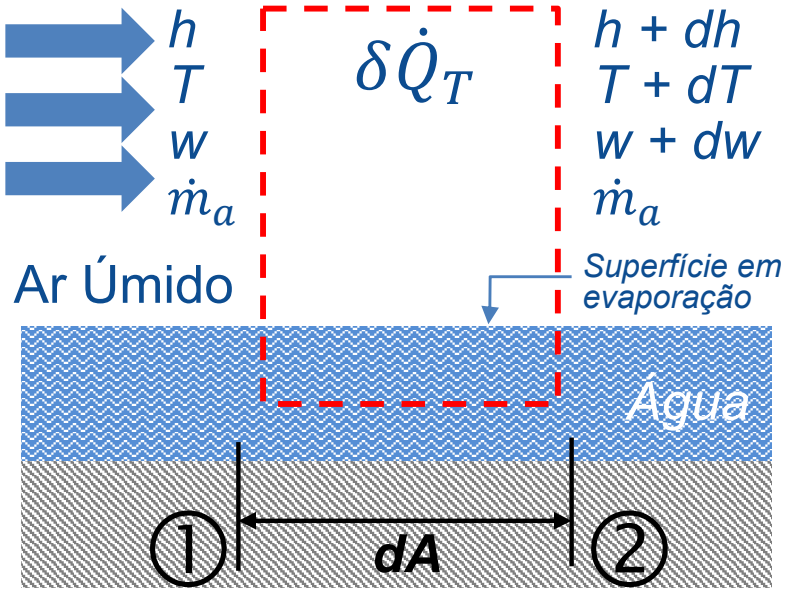


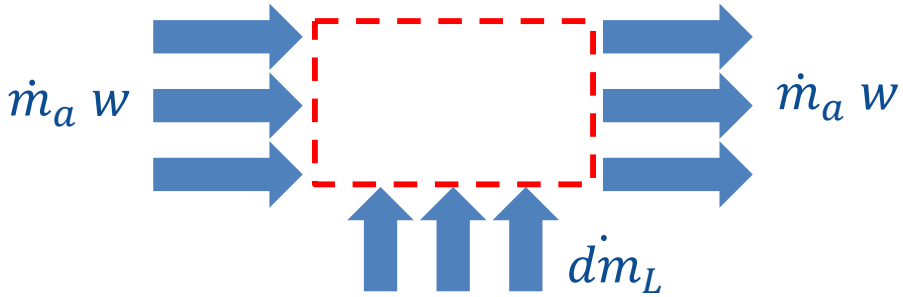
As taxas de transferência de calor e massa se interrelacionam de tal modo que o processo se mostra como uma reta no plano temperatura-umidade absoluta

Transferência de Calor e Massa

Regra da Linha Reta

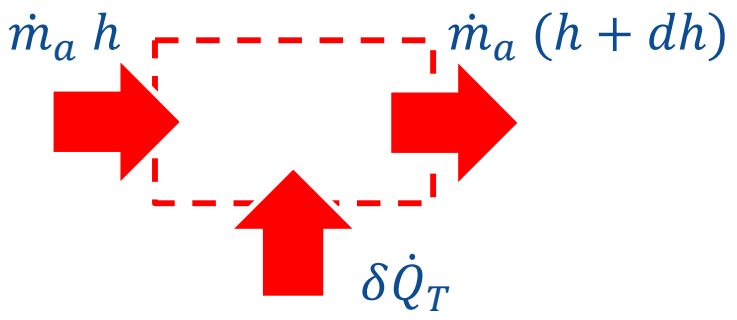
A conservação da massa e energia aplicada ao volume de controle resulta em:





$$\dot{m}_a\, w + d\dot{m}_L = \dot{m}_a(w + dw)$$

$$d\dot{m}_L = \dot{m}_a\, dw$$



$$\delta\dot{Q}_T = \dot{m}_a(h + dh) - \dot{m}_a h - h_L d\dot{m}_L$$

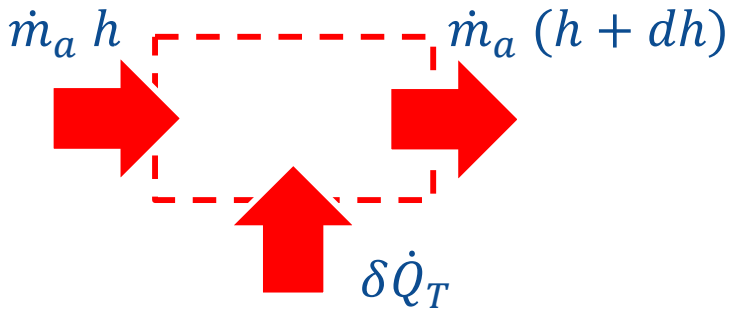
$$\delta\dot{Q}_T = \dot{m}_a h - h_L d\dot{m}_L$$

Transferência de Calor e Massa

Regra da Linha Reta

Substituindo $d\dot{m}_L$ do balanço de massa, no balanço de energia, tem-se:

$$\boldsymbol{\delta \dot{Q}_T = \dot{m}_a h - h_L \dot{d}m_L}$$



Como anteriormente mostrado,

$$\boldsymbol{\delta \dot{Q}_T = \frac{h_c\ dA}{c_{pu}} (h_s - h)}$$

Então, igualando, tem-se

$$\boldsymbol{\dot{m}_a h - h_L \dot{d}m_L = \frac{h_c\ dA}{c_{pu}} (h_s - h)}$$

Rearranjando, tem-se:

Usando a definição do coeficiente de transferência de massa,

$\boldsymbol{\delta \dot{m}_v = h_m\ \rho_a\ dA\ (w_s - w)}$ e considerando que, $\boldsymbol{d\dot{m}_v = d\dot{m}_L = \dot{m}_a dw}$, então:

$$\boldsymbol{dA = \frac{\dot{m}_a\ dw}{h_m \rho_a\ (w_s - w)}}$$

Substituindo em

Regra da Linha Reta

$$\frac{dh}{dw} = R_{Le}\,\frac{(h_s - h)}{w_s - w}$$

onde a relação de Lewis (R_{Le}) aparece quando a densidade do ar seco é confundida com a de mistura.

Como $R_{Le} \approx 1$, a equação acima pode se integrada pelo método de separação de variáveis resultando em,

$$\frac{(h_s - h)}{w_s - w} = \mathbb{C}$$

onde $\mathbb{C}$ é uma constante de integração cujo valor pode ser obtido da condição inicial do ar, ou seja, $w=w_1$ para $h=h_1$, de forma que, $\mathbb{C} = \frac{(h_s - h_1)}{w_s - w_1}$

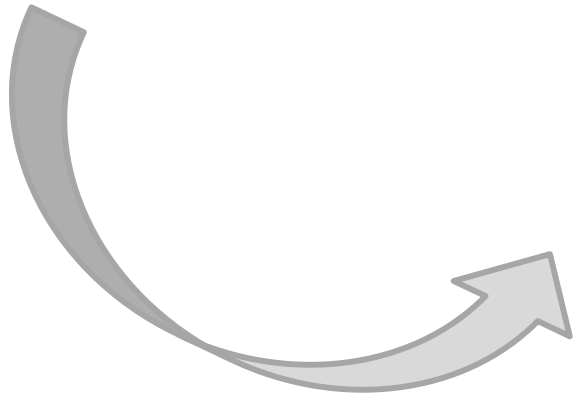
Igualando, tem-se a Regra da Linha Reta
(quando a densidade do ar seco é confundida com a de mistura)

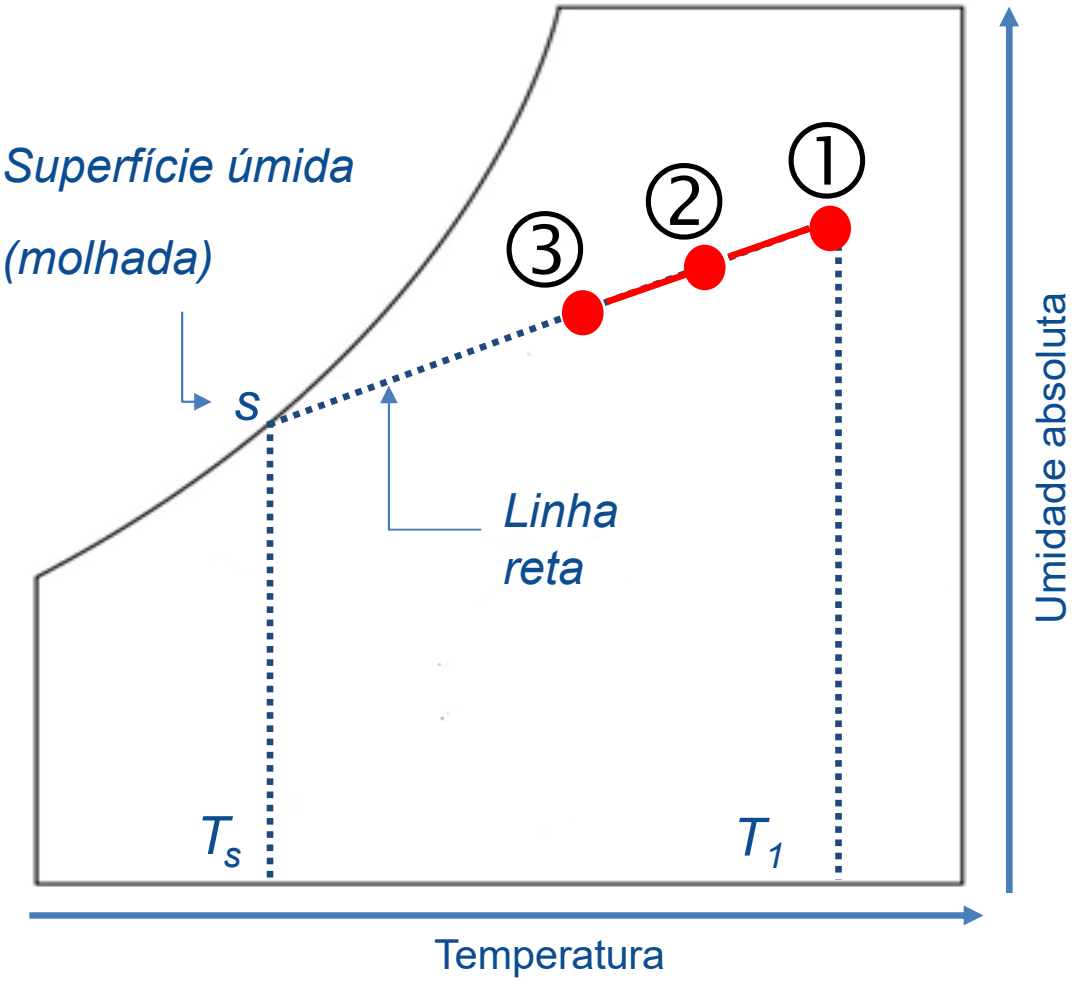
$$\frac{(h_s - h)}{w_s - w} = \frac{(h_s - h_1)}{w_s - w_1}$$

Transferência de Calor e Massa

Regra da Linha Reta

$$\frac{(h_s - h)}{w_s - w} = \frac{(h_s - h_1)}{w_s - w_1}$$





Uma sucessão de estados é verificada tal que....

$$\frac{(h_s - h_1)}{w_s - w_1} = \frac{(h_s - h_2)}{w_s - w_2} = \frac{(h_s - h_3)}{w_s - w_3} = \cdots = \frac{(h_s - h_n)}{w_s - w_n} = \mathbb{C}$$

Importante!
Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

Exercícios Incropera - 7ed								
Capítulo 6								
Coef. de transf. de massa	6.52	6.53	6.54	Ex.7.3				

Estudo Dirigido
Atividade em grupo
(Lista de exercício - em sala)

Em um dia de verão, a temperatura do ar é de 27°C e sua umidade relativa é 30%. Água evapora da superfície de um lago a uma taxa de 0,10kg/h por metro quadrado de área da superfície. A temperatura da água também é de 27°C. determine o coeficiente de transferência de massa por convecção. *(Incropera 7ed – 6.52)*

PROPERTIES: *Table A-6*, Saturated water vapor (300K): $p_{A,sat} = 0.03531$ bar, $\rho_{A,sat} = 1/v_g = 0.02556$ kg/m^3.

ANALYSIS: The convection mass transfer (evaporation) rate equation can be written in the form

$$\bar{h}_m = \frac{n''_A}{(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})}$$

where

$$\rho_{A,s} = \rho_{A,sat},$$

the saturation density at the temperature of the water and

$$\rho_{A,\infty} = \phi \rho_{A,sat}$$

which follows from the definition of the relative humidity, $\phi = p_A/p_{A,sat}$ and perfect gas behavior. Hence,

$$\bar{h}_m = \frac{n''_A}{\rho_{A,sat}(1-\phi)}$$

and substituting numerical values, find

$$\bar{h}_m = \frac{0.1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \times 1/3600 \text{ s/h}}{0.02556 \text{ kg/m}^3 (1-0.3)} = 1.55 \times 10^{-3} \text{ m/s}.$$

SCHEMATIC:

Estudo Dirigido
Atividade em grupo
(Lista de exercício - em sala)

É observado que uma panela com 230mm de diâmetro contendo água a 23°C apresenta uma taxa de perda de massa de $1{,}5\times10^{-5}$kg/s, quando o ar ambiente está seco e a uma temperatura de 23°C. *(Incropera 7ed – 6.53)*

PROPERTIES: *Table A-6*, Saturated water vapor ($T_s = 296$K): $\rho_{A,sat} = v_g^{-1} = (49.4\ m^3/kg)^{-1} =$ $0.0202\ kg/m^3$; ($T_s = 320$ K): $\rho_{A,sat} = v_g^{-1} = \left(13.98\ m^3/kg\right)^{-1} = 0.0715\ kg/m^3$.

ANALYSIS: (a) Since evaporation is a convection mass transfer process, the rate equation has the form $\dot{m}_{evap} = \bar{h}_m A\left(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}\right)$ and the mass transfer coefficient is

$$\bar{h}_m = \frac{\dot{m}_{evap}}{\left(\pi D^2/4\right)\left(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}\right)} = \frac{1.5\times10^{-5}\ kg/s}{(\pi/4)(0.23\ m)^2\ 0.0202\ kg/m^3} = 0.0179\ m/s \quad <$$

with $T_s = T_\infty = 23°C$ and $\phi_\infty = 0$.

(b) If the relative humidity of the ambient air is increased to 50%, the ratio of the evaporation rates is

$$\frac{\dot{m}_{evap}(\phi_\infty = 0.5)}{\dot{m}_{evap}(\phi_\infty = 0)} = \frac{\bar{h}_m A\left[\rho_{A,s}(T_s) - \phi_\infty \rho_{A,s}(T_\infty)\right]}{\bar{h}_m A\,\rho_{A,s}(T_s)} = 1 - \phi_\infty \frac{\rho_{A,s}(T_\infty)}{\rho_{A,s}(T_s)}.$$

Hence, $\dot{m}_{evap}(\phi_\infty = 0.5) = 1.5\times10^{-5}\ kg/s\left[1 - 0.5\dfrac{0.0202\ kg/m^3}{0.0202\ kg/m^3}\right] = 0.75\times10^{-5}\ kg/s.$

a) Determine o coeficiente de transferência de massa por convecção nessa situação

b) Estime a perda de massa por evaporação quando o ar ambiente apresentar uma UR de 50%

c) Estime a perda de massa por evaporação para as temperaturas da água e do ar ambiente iguais a 47°C, admitindo que o coeficiente de transferência de massa por convecção permaneça inalterado e que o ar ambiente seja seco

Estudo Dirigido
Atividade em grupo
(Lista de exercício - em sala)

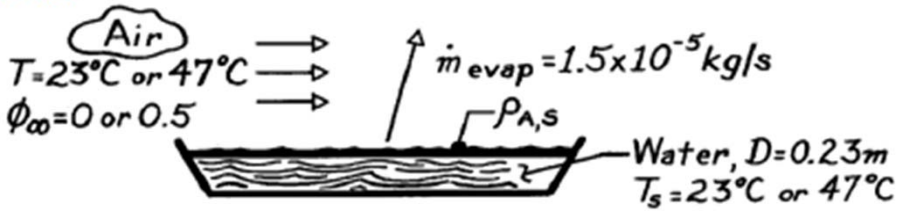
É observado que uma panela com 230mm de diâmetro contendo água a 23°C apresenta uma taxa de perda de massa de $1{,}5 \times 10^{-5}$kg/s, quando o ar ambiente está seco e a uma temperatura de 23°C. *(Incropera 7ed – 6.53)*

(c) If the temperature of the ambient air is increased from 23°C to 47°C, with $\phi_\infty = 0$ for both cases, the ratio of the evaporation rates is

$$\frac{\dot{m}_{evap}\left(T_s = T_\infty = 47^\circ C\right)}{\dot{m}_{evap}\left(T_s = T_\infty = 23^\circ C\right)} = \frac{\bar{h}_m A \rho_{A,s}\left(47^\circ C\right)}{\bar{h}_m A \rho_{A,s}\left(23^\circ C\right)} = \frac{\rho_{A,s}\left(47^\circ C\right)}{\rho_{A,s}\left(23^\circ C\right)}.$$

Hence, $\dot{m}_{evap}\left(T_s = T_\infty = 47^\circ C\right) = 1.5\times10^{-5}\,\text{kg/s}\,\dfrac{0.0715\,\text{kg/m}^3}{0.0202\,\text{kg/m}^3} = 5.31\times10^{-5}\,\text{kg/s}.$ <

SCHEMATIC:



a) Determine o coeficiente de transferência de massa por convecção nessa situação

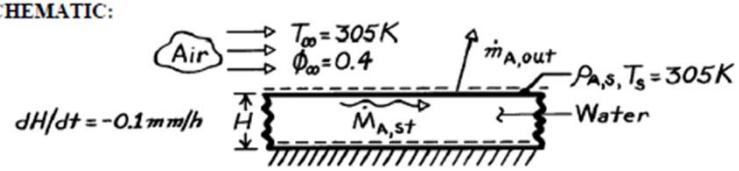
b) Estime a perda de massa por evaporação quando o ar ambiente apresentar uma UR de 50%

c) Estime a perda de massa por evaporação para as temperaturas da água e do ar ambiente iguais a 47°C, admitindo que o coeficiente de transferência de massa por convecção permaneça inalterado e que o ar ambiente seja seco

Estudo Dirigido
Atividade em grupo
(Lista de exercício - em sala)

A taxa na qual a água é perdida devido a evaporação em uma superfície de um corpo de água pode ser determinada através da medida da taxa de variação do seu nível. Considere um dia de verão no qual as temperaturas da água e do ar ambiente são de 305K e a umidade relativa do ar é de 40%. Se a taxa de queda de nível for de 0,1mm/h, qual é a taxa, por unidade de área superficial, de perda de massa de água causada pela evaporação? Qual é o coeficiente de transferência de massa por convecção *(Incropera 7ed – 6.54)*

SCHEMATIC:



PROPERTIES: *Table A-6*, Saturated water: Vapor (305K), $\rho_g = v_g^{-1} = 0.0336\ kg/m^3$; Liquid (305K), $\rho_f = v_f^{-1} = 995\ kg/m^3$.

ANALYSIS: Applying conservation of species to a control volume about the water,

$$-\dot{M}_{A,out} = \dot{M}_{A,st}$$

$$-\dot{m}''_{evap} A = \frac{d}{dt}(\rho_f V) = \frac{d}{dt}(\rho_f AH) = \rho_f A \frac{dH}{dt}.$$

Substituting numerical values, find

$$\dot{m}''_{evap} = -\rho_f \frac{dH}{dt} = -995 kg/m^3 \left(-10^{-4} m/h\right) (1/3600\ s/h)$$

$$\dot{m}''_{evap} = 2.76\times10^{-5} kg/s\cdot m^2.$$

Because evaporation is a convection mass transfer process, it also follows that

$$\dot{m}''_{evap} = n''_A$$

or in terms of the rate equation,

$$\dot{m}''_{evap} = h_m\left(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}\right) = h_m\left[\rho_{A,sat}(T_s) - \phi_\infty \rho_{A,sat}(T_\infty)\right]$$

$$\dot{m}''_{evap} = h_m \rho_{A,sat}(305K)\ (1-\phi_\infty),$$

and solving for the convection mass transfer coefficient,

$$h_m = \frac{\dot{m}''_{evap}}{\rho_{A,sat}(305K)\ (1-\phi_\infty)} = \frac{2.76\times10^{-5} kg/s\cdot m^2}{0.0336\ kg/m^3 (1-0.4)}$$

$$h_m = 1.37\times10^{-3} m/s. \quad <$$

Seção 2.6 – Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Objetivo:

≡ Apresentar os Processos Psicrométricos típicos de: Refrigeração com Desumidificação, Aquecimento com Umidificação, Aquecimento e Resfriamento Sensível, Mistura de fluxos e Climatização Ambiental

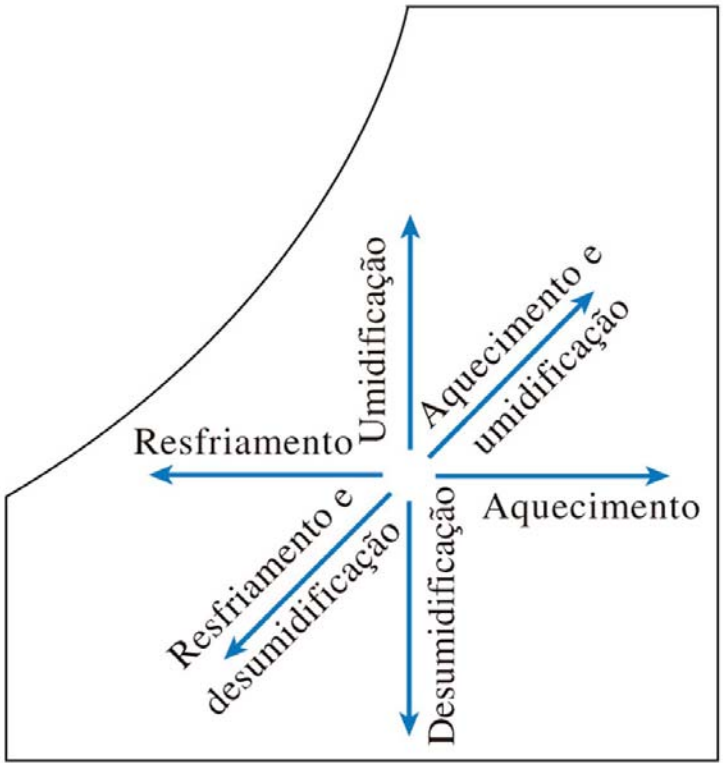
≡ Exemplificar e contextualizar os equipamentos aos conceitos apresentados

Processos Básicos de Condicionamento de Ar

A carta ou diagrama psicrométrico apresentada nos capítulos anteriores também serve como um auxílio na visualização dos processos de condicionamento de ar.

Uma série de processos de tratamento do ar de interesse pode ser representado e analisado com o auxilio da carta psicrométrica.

Por vezes, temos a combinação de dois ou mais processos para deixar o ar com a temperatura e o nível de umidade desejados.



Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Processos Típicos:

- **Aquecimento / Resfriamento Sensível**

  A temperatura de bulbo seco (T_{BS}) varia enquanto a umidade absoluta (w) permanece constante.

- **Umidificação / Desumidificação**

  A umidade absoluta varia a T_{BS} constante (processo latente)

- **Resfriamento e Desumidificação**

  Tanto T_{BS} quanto w diminuem (serpentinas de resfriamento)

- **Aquecimento e Umidificação**

  Tanto T_{BS} quanto w aumentam.

- **Resfriamento Evaporativo**

  Transferência de calor adiabática na qual T_{BU} permanece constante enquanto T_{BS} diminui e w aumenta.

- **Desumidificação Química**

  A umidade contida no ar é absorvia ou adsorvida por alguma substância higroscópica (em geral ocorre a temperatura constante).

  ****

- **Mistura Adiabática**

  Duas correntes de ar úmido em estados distintos são misturadas gerando um novo estado.

Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Aquecimento / Resfriamento Sensível

Os processos simples de **aquecimento** e **resfriamento** aparecem como **linhas horizontais** no diagrama psicrométrico, uma vez que o conteúdo de mistura do ar permanece constante (ω = constante) durante esses processos

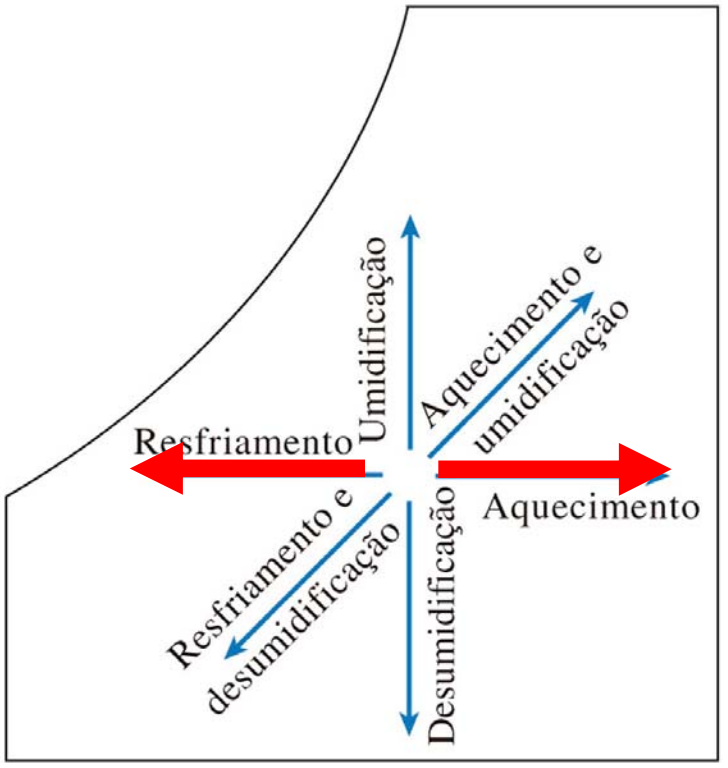
*A maioria dos processos de condicionamento de ar pode ser modelada como em **regime permanente**

Balanço de massa do ar seco:

$$\sum_{ent} \dot{m}_a = \sum_{sai} \dot{m}_a \; (kg/s)$$

Balanço de massa da água

$$\sum_{ent} \dot{m}_w = \sum_{sai} \dot{m}_w \; ou \sum_{ent} \dot{m}_a \times \omega = \sum_{sai} \dot{m}_a \times \omega$$



Processos Básicos de Condicionamento de Ar

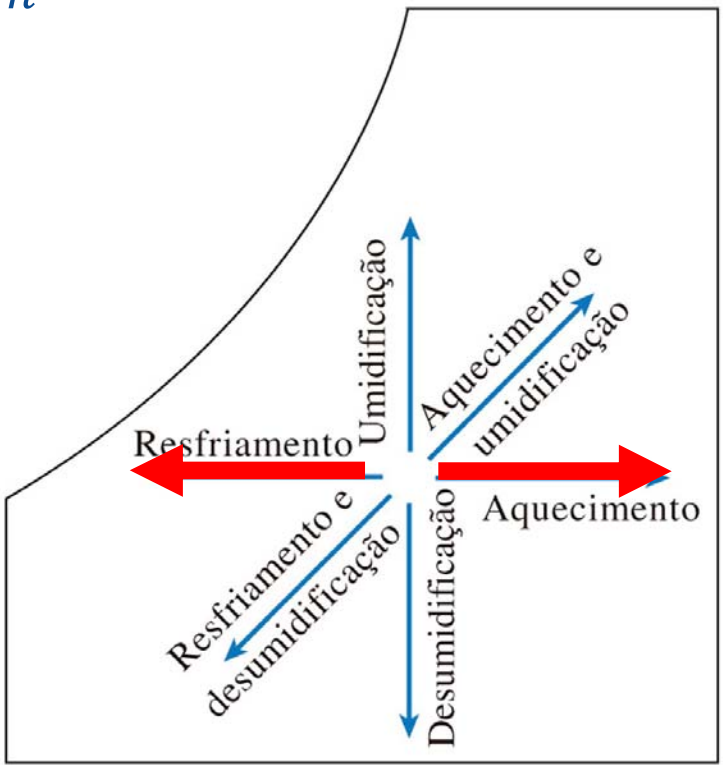
Aquecimento / Resfriamento Sensível

Desprezando as variações das energias cinética e potencial, a equação do balanço de energia com escoamento em regime permanente pode ser expressa como:

$$\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum_{ent} \dot{m} \times h = \dot{Q}_{sai} + \dot{W}_{sai} + \sum_{sai} \dot{m} \times h$$

O termo de trabalho na equação acima está associado a qual equipamento?

Geralmente, o termo trabalho consiste na entrada de trabalho do ventilador, que é pequeno em relação aos outros termos da equação de balanço de energia.



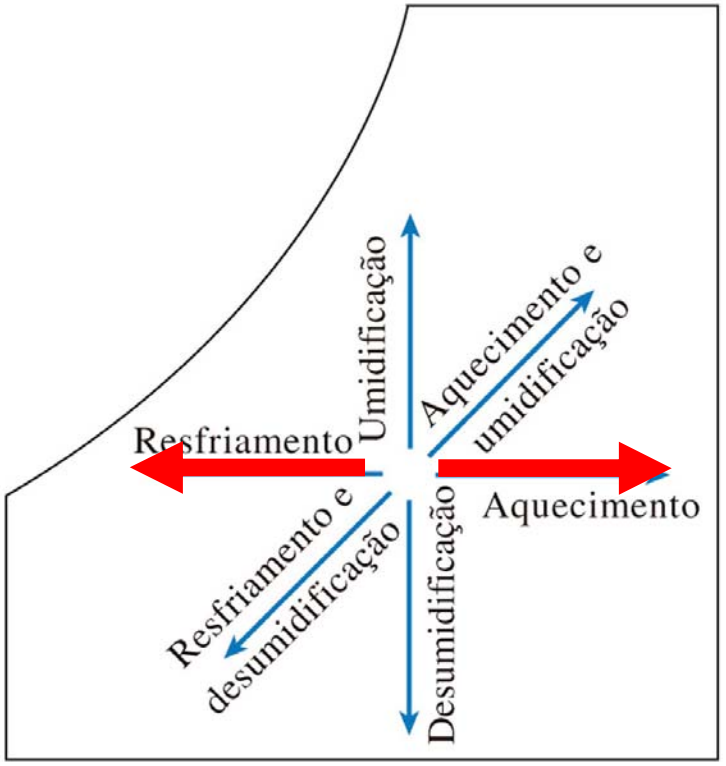
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Aquecimento / Resfriamento Sensível

As equações de conservação de massa para um processo de aquecimento ou resfriamento que não envolve umidificação ou desumidificação reduzem-se a $\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$ para o ar seco e ω_1=ω_2 para a água.

Desprezando o trabalho do ventilador que pode estar presente, a equação de conservação da energia neste caso se reduz:

$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}_a(h_2 - h_1)$, onde h_1 e h_2 são as entalpias por unidade de massa do ar seco na entrada e saída da seção de aquecimento ou resfriamento, respectivamente.

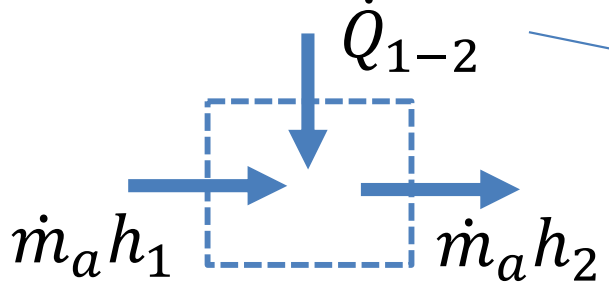


Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Aquecimento / Resfriamento Sensível

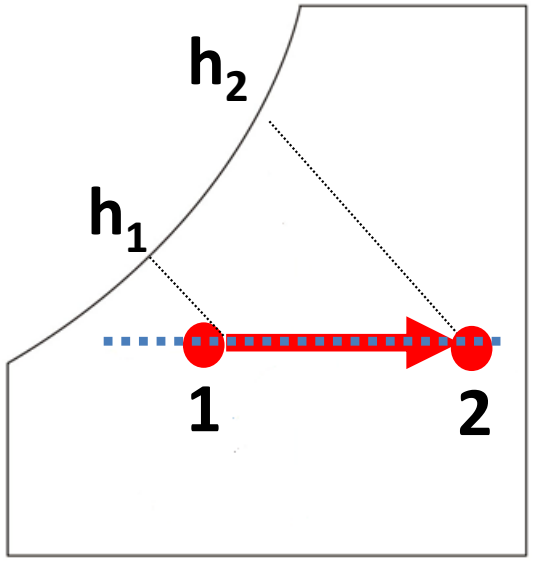
Aquecimento Sensível

$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}_a(h_2 - h_1)$, em regime permanente



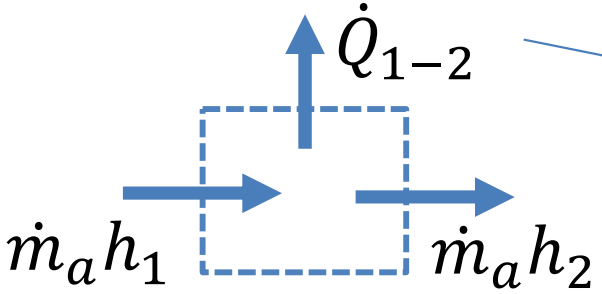
Aquecimento

Água quente, vapor, etc.



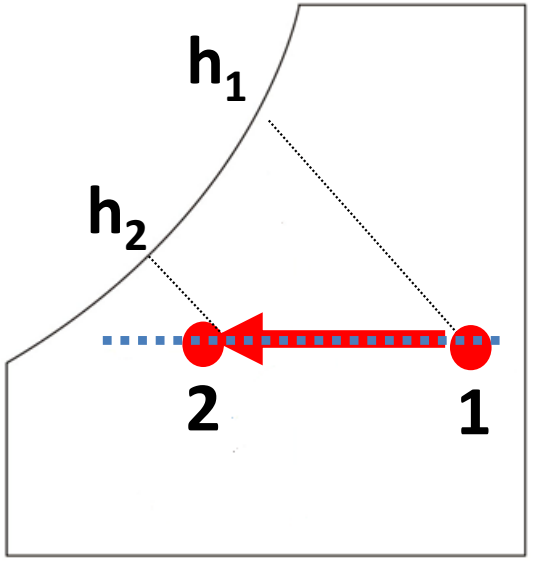
Resfriamento Sensível

$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}_a(h_1 - h_2)$, em regime permanente



Resfriamento

Água gelada, refrigerante, etc..



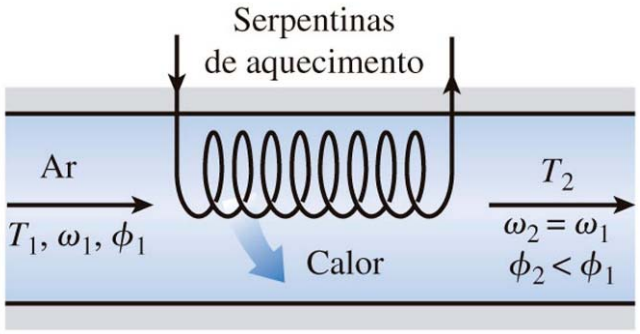
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

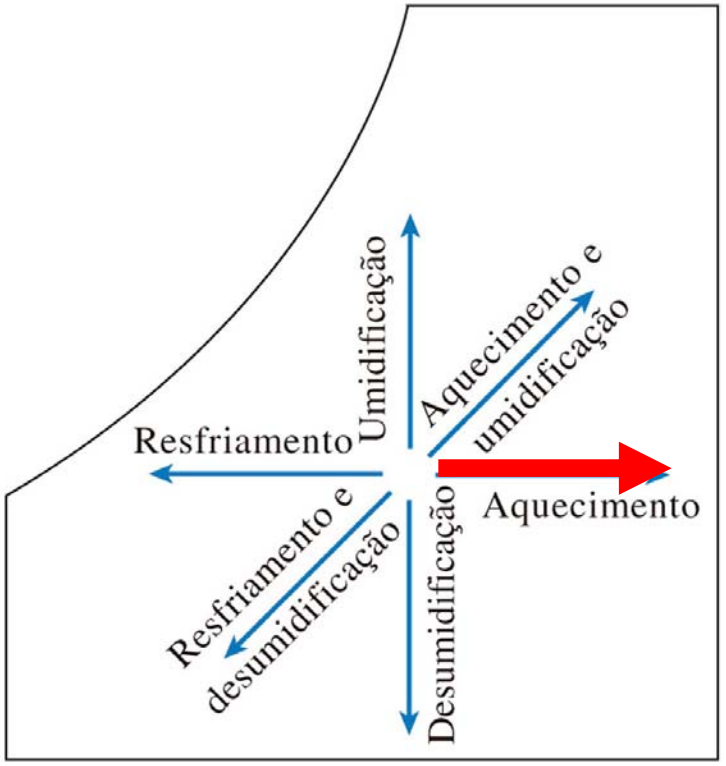
Aquecimento / Resfriamento Sensível

Sistemas de **aquecimento** residencial: geralmente consistem em um forno, uma bomba de calor ou um aquecedor elétrico.

O ar é aquecido pela sua circulação por um duto contendo a tubulação dos gases quentes ou os fios da resistência elétrica.

O que acontece com a umidade?





Processos Básicos de Condicionamento de Ar

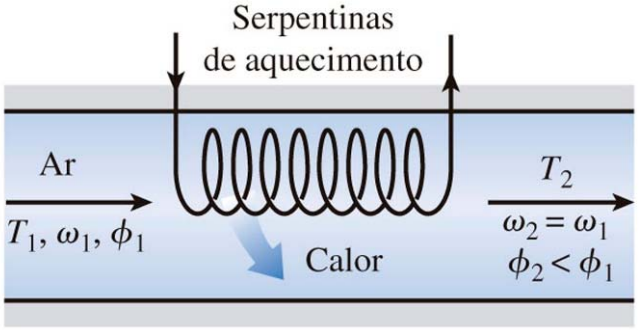
Aquecimento / Resfriamento Sensível

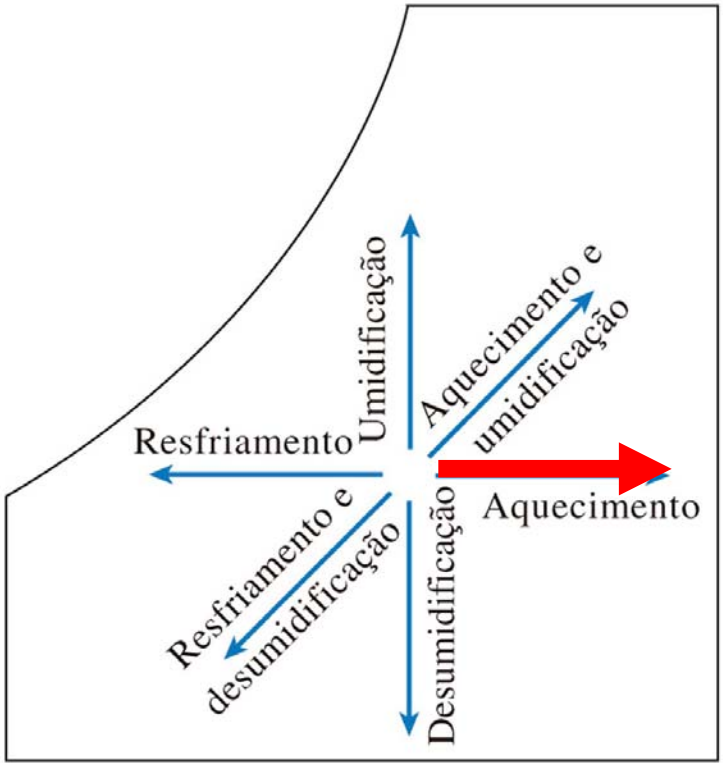
Durante o **aquecimento** simples, a umidade absoluta permanece constante. Por que?

Porque nenhuma umidade foi adicionada ou removida do ar.

Logo ω = constante durante aquecimento ou resfriamento sem nenhuma umidificação ou desumidificação.

O processo de aquecimento simples continua na direção do aumento da temperatura do bulbo seco, seguindo uma linha de umidade específica constante, linha horizontal.





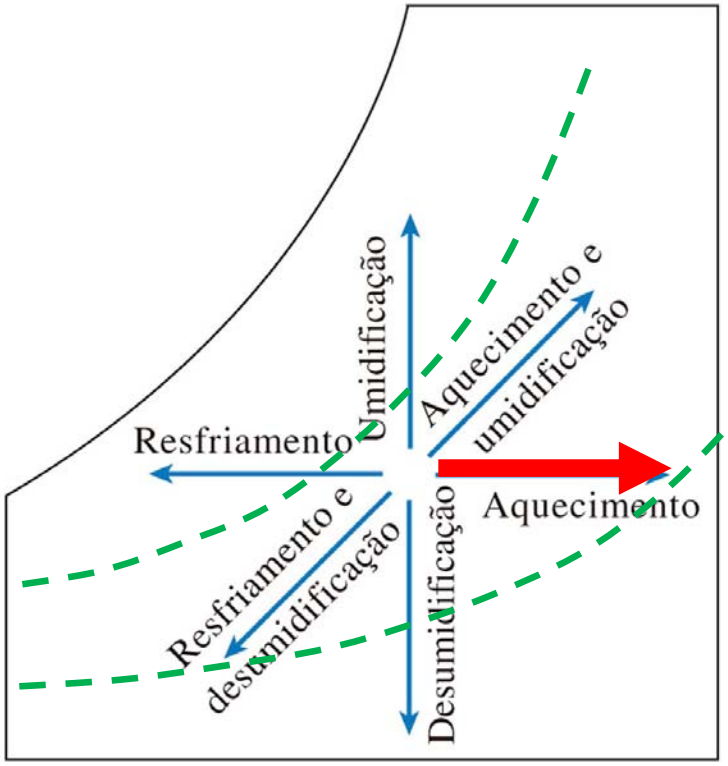
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Aquecimento / Resfriamento Sensível

A umidade relativa diminui. Por que?

A capacidade de absorção de umidade aumenta com a temperatura.

Observação: a umidade relativa do ar aquecido pode estar bem abaixo de níveis confortáveis, causando ressecamento da pele, dificuldades respiratórias e aumento da eletricidade estática.



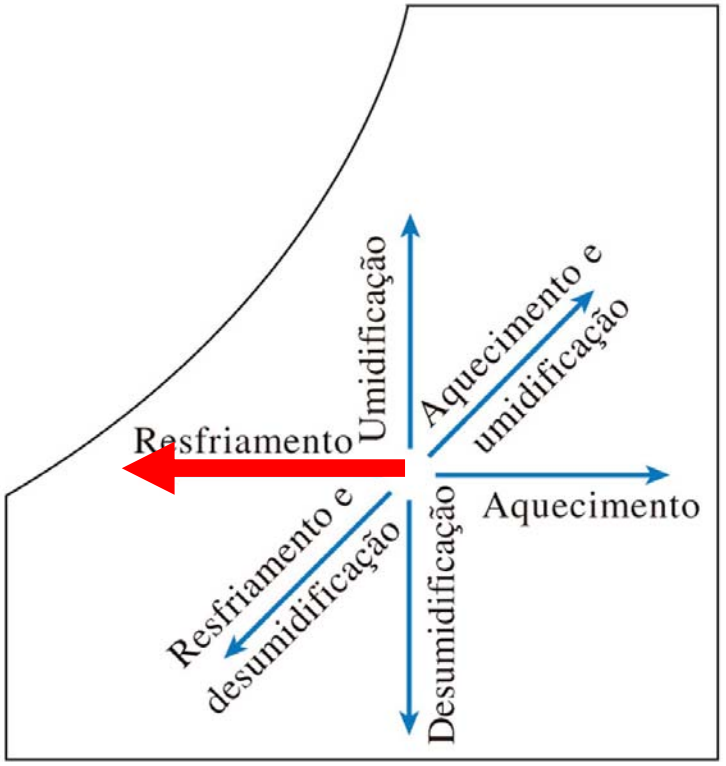
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Aquecimento / Resfriamento Sensível

O processo de **resfriamento** é o inverso, ou seja, a temperatura de bulbo seco diminui e a umidade relativa aumenta.

Como o resfriamento pode ser realizado?

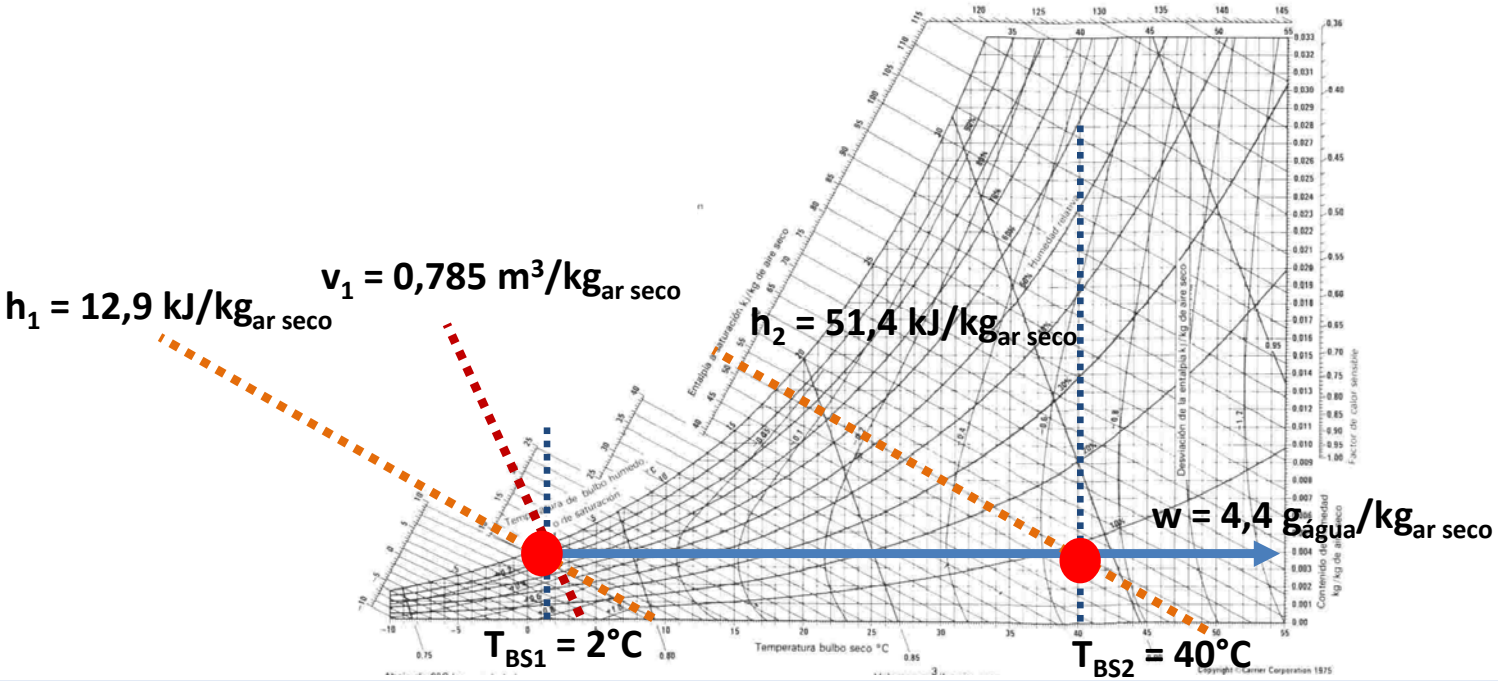
O resfriamento pode ser realizado passando o ar sobre algumas serpentinas através das quais escoa um refrigerante ou água gelada.



Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar
Aquecimento / Resfriamento Sensível

Ar úmido saturado a TBS= 2°C atravessa um aquecedor com vazão de 3000m^3/h. Após a serpentina de aquecimento deseja-se obter uma temperatura de 40°C. Calcule a potência térmica necessária para a fonte de calor.



Tab. A5

Tab. B1

Da carta psicrométrica (ou tabela) o estado dos pontos 1 e 2 será:

Ponto 1: Com TBS= 2°C e UR=100% (saturado), temos:

h_1=12,982 kJ/$kg_{ar\ seco}$; v_1= 0,785 m^3/kg ; w_1=4,4 $g_{água}$/$kg_{ar\ seco}$

Ponto 2: Com TBS= 40°C e w_2=w_1=4,4 g/kg, temos:

h_2=12,982 kJ/$kg_{ar\ seco}$

A vazão mássica de ar seco é calculada por,

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_1} \rightarrow \left[\frac{m^3/_h}{m^3/_{kg_{ar\ seco}}}\right] \rightarrow \left[\frac{kg_{ar\ seco}}{h}\right] \;//\; \dot{m}_a = \frac{3000}{0{,}785} = 3822\left[\frac{kg_{ar\ seco}}{h}\right]$$

Finalmente, na equação do balanço energético, vem,

Tab. A5

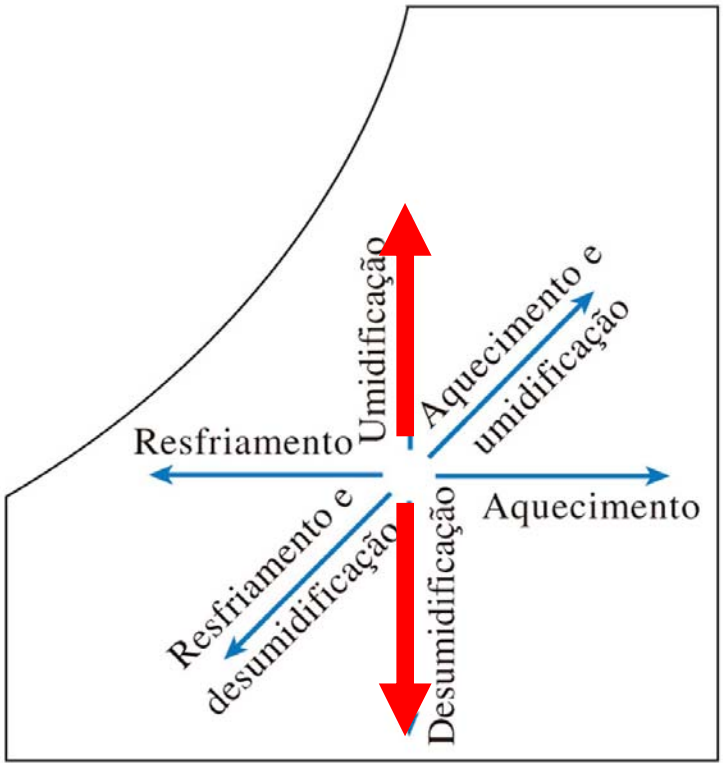
Tab. B1

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}_a(h_2 - h_1) = 3822\,(51{,}4 - 12{,}5) = 148{,}7\,{}^{MJ}/_h = 41{,}3kW$$

Processos Básicos de Condicionamento de Ar

❑ Umidificação / Desumidificação

A **umidade absoluta** varia e a temperatura de bulbo seco $\mathbf{T_{BS}}$ **permanece constante** (processo latente)

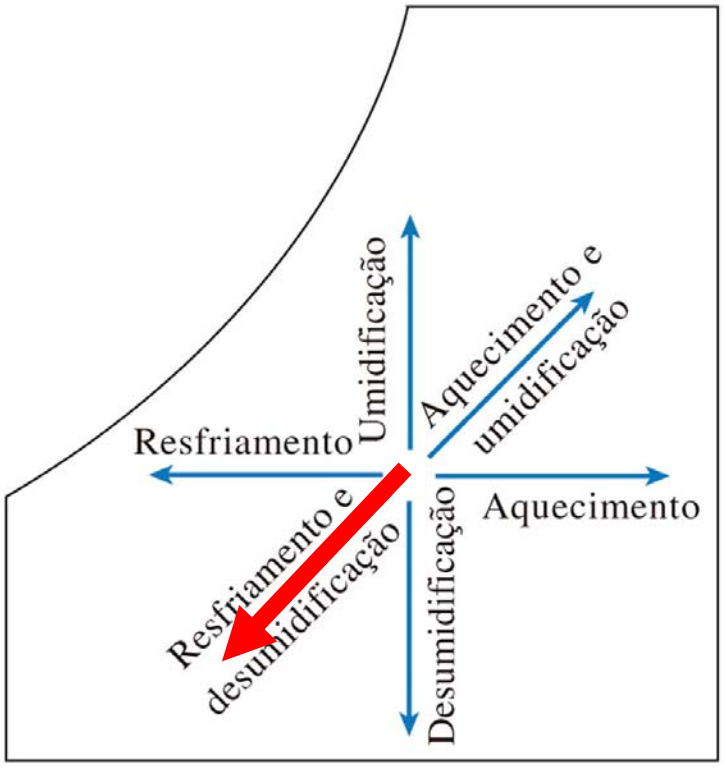


Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Resfriamento com desumidificação

A **umidade absoluta** do ar permanece **constante** durante o **processo simples de resfriamento**, mas sua **umidade relativa aumenta**. Posteriormente, com a redução de TBS a **umidade absoluta** reduz por atingir o ponto de orvalho do estado inicial.

Se a umidade relativa atingir níveis altos indesejados, será preciso remover umidade do ar, ou seja, desumidificá-lo. Isso exige o resfriamento do ar abaixo de sua temperatura de ponto de orvalho.



Normalmente,

Inverno: o ar é aquecido e umidificado

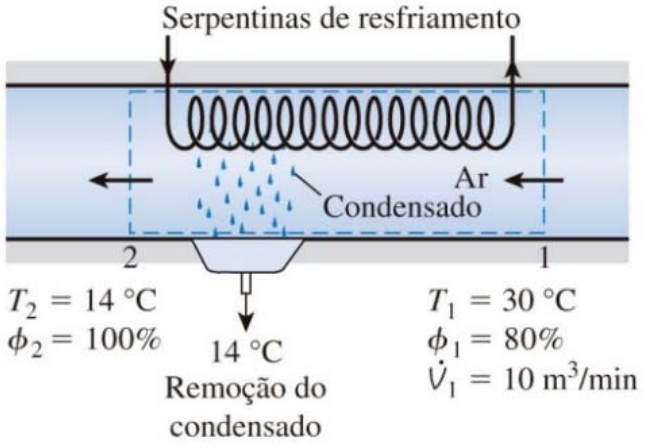
Verão: o ar é resfriado e desumidificado

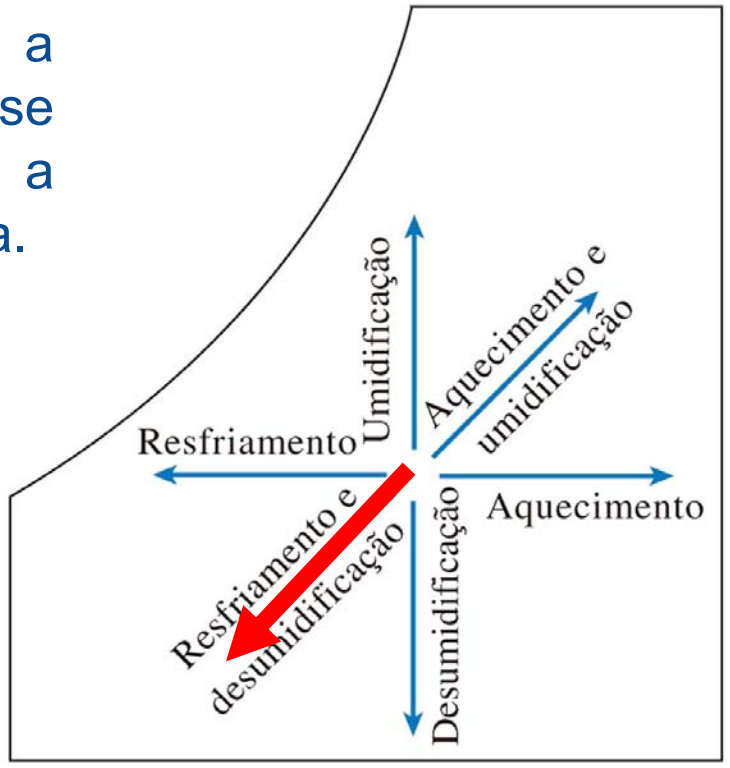
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Resfriamento com desumidificação

O resfriamento do ar úmido a uma temperatura inferior a sua temperatura de orvalho resulta na condensação do vapor d'água contido no ar.

Embora a água possa ser separada numa faixa de temperaturas entre o ponto de orvalho e a temperatura final de condensação, assume-se que a água condensada é resfriada até a temperatura final T_2, sendo em seguida drenada.





Processos Básicos de Condicionamento de Ar

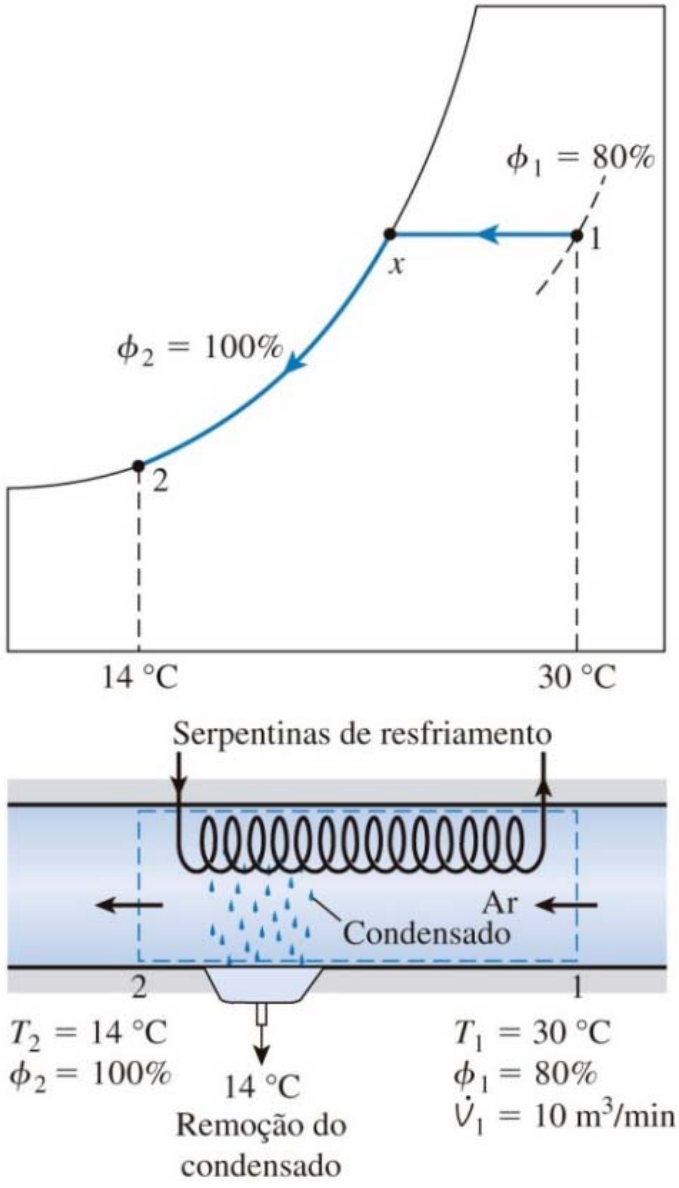
Resfriamento com desumidificação

O processo de resfriamento com desumidificação está ilustrado de forma esquemática e representado pelo diagrama ao lado.

O ar quente e úmido entra na seção de resfriamento, sua temperatura diminui e sua umidade relativa aumenta a uma umidade absoluta constante.

Se a seção de resfriamento for suficientemente longa, o ar atinge seu ponto de orvalho (estado x na figura ao lado, ou seja, ar saturado).

O maior resfriamento do ar resulta na condensação de parte da umidade do ar. O ar permanece saturado durante todo o processo de condensação, que segue uma linha de umidade relativa 100% até o estado final (estado 2).



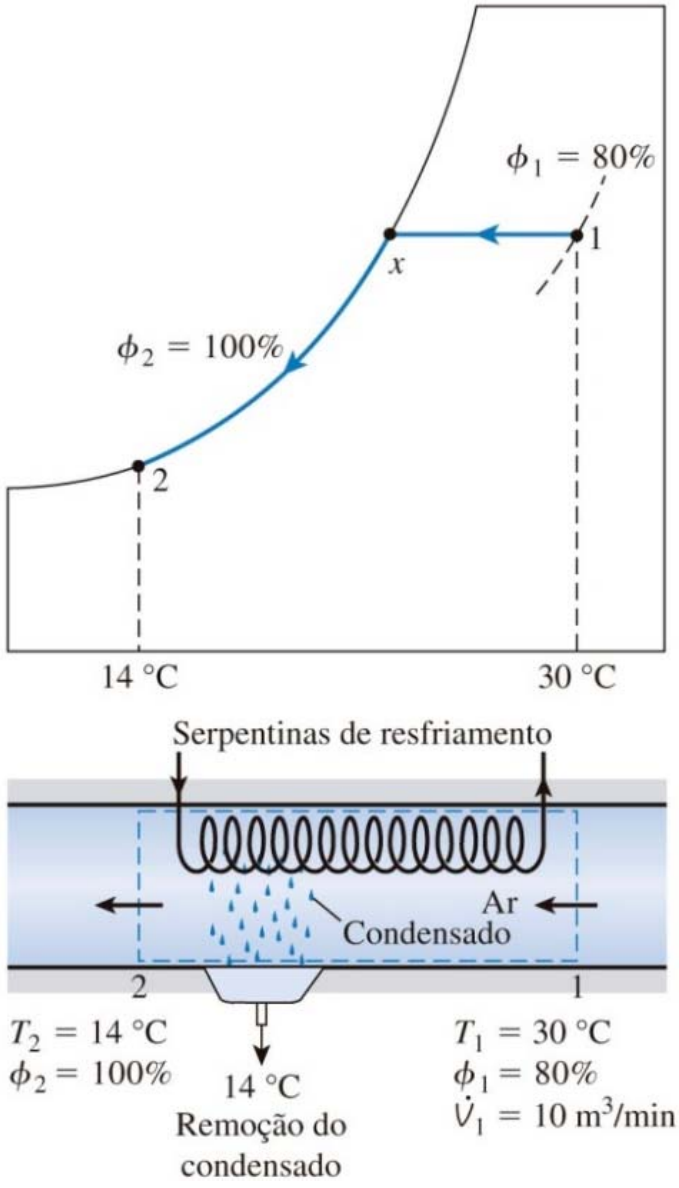
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Resfriamento com desumidificação

O vapor de água que se condensa a partir do ar durante esse processo é removido da seção de resfriamento por meio de um canal separado. Em geral, considera-se que a condensação saia da seção de resfriamento a T_2.

O ar resfriado e saturado no estado 2 geralmente é direcionado para a sala, onde ele se mistura ao ar do ambiente.

Em alguns casos, porém, o ar no estado 2 pode estar com umidade específica certa, mas a uma temperatura muito baixa. Em tais casos, o ar deve passar através de uma seção de aquecimento na qual sua temperatura se eleva até um nível mais confortável, antes de ser direcionado para a sala.

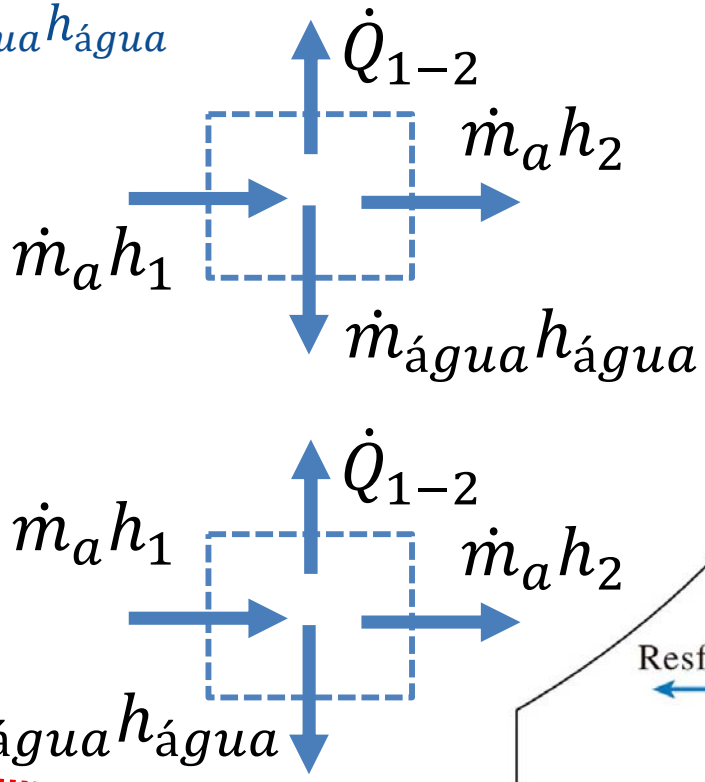


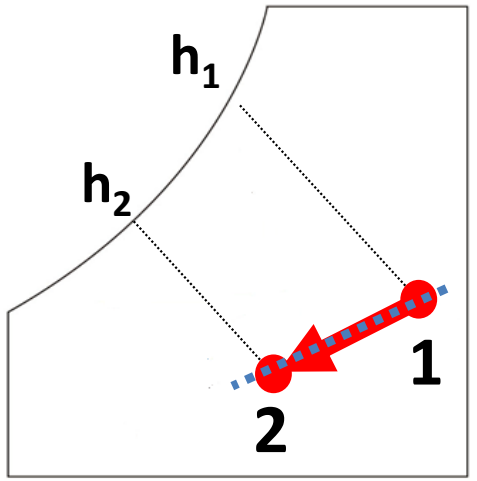
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Resfriamento com desumidificação

Balanço de Energia

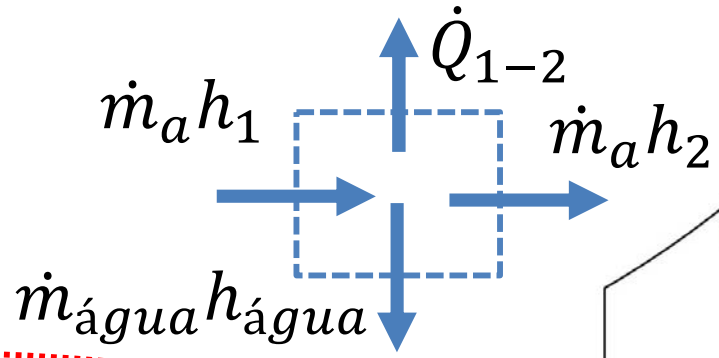
$$\dot{m}_a h_1 = \dot{m}_a h_2 + \dot{Q}_{1-2} + \dot{m}_{água} h_{água}$$

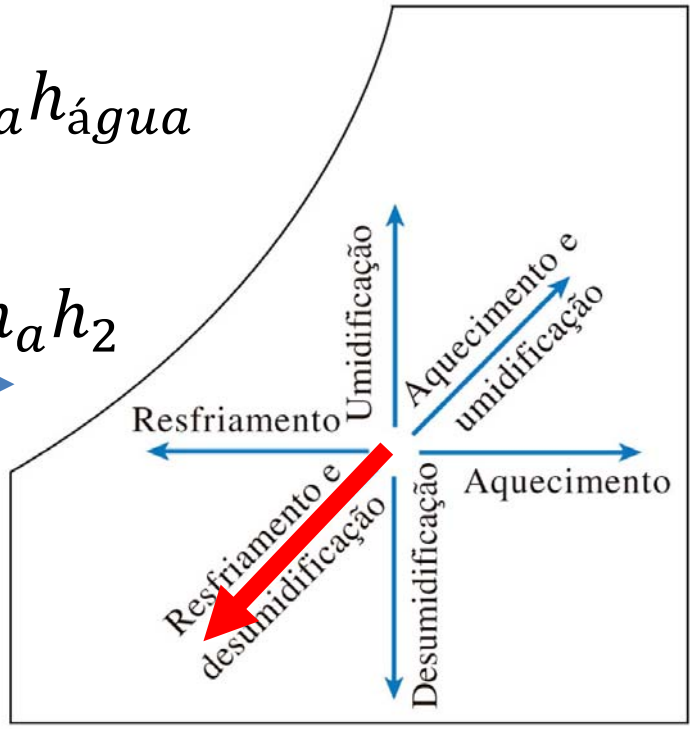




Balanço de Massa

$$\begin{cases} \dot{m}_a w_1 = \dot{m}_a w_2 + \dot{m}_{água} \\ \dot{m}_{água} = \dot{m}_a (w_1 - w_2) \end{cases}$$

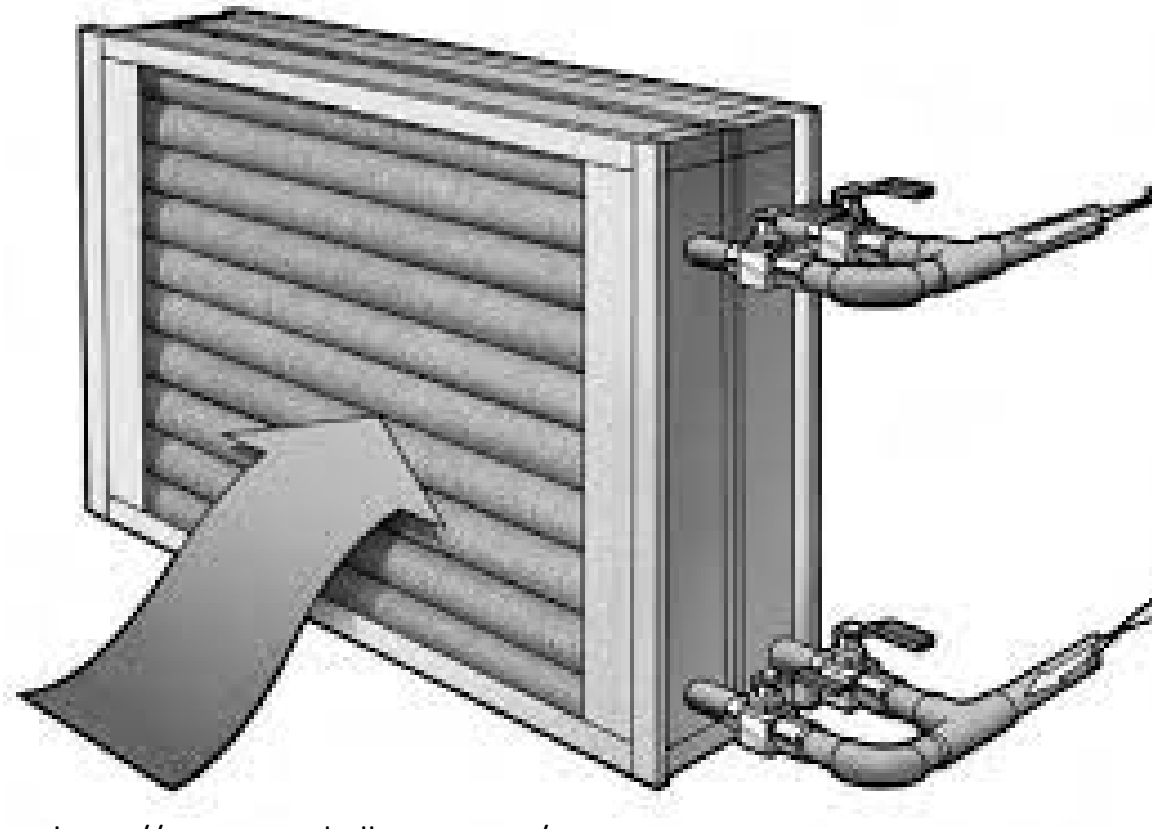




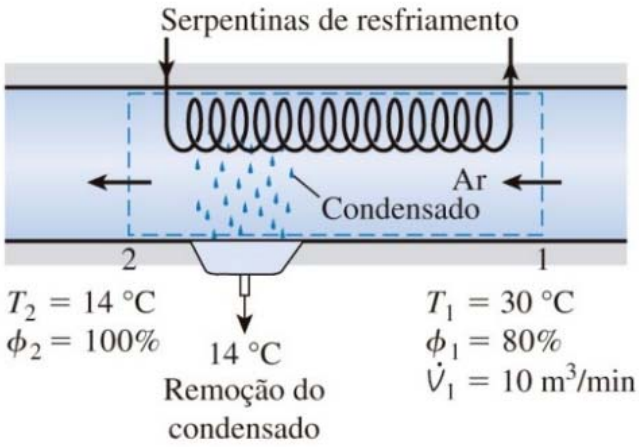
$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}_a [(h_1 - h_2) - (w_1 - w_2) h_{água}]$$

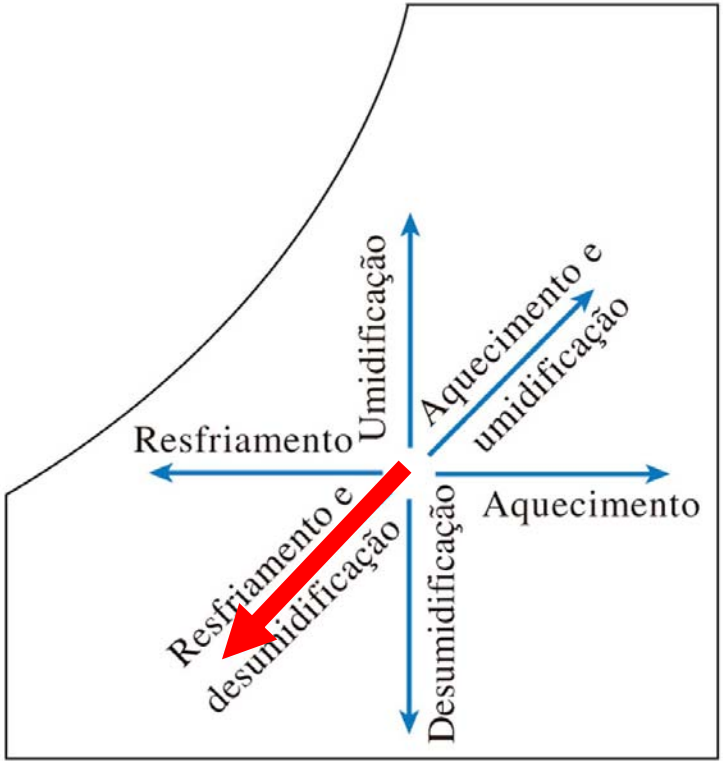
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Resfriamento com desumidificação



https://www.campbell-sevey.com/wp-content/uploads/2018/12/Armstrong-Hunt_catalog.pdf

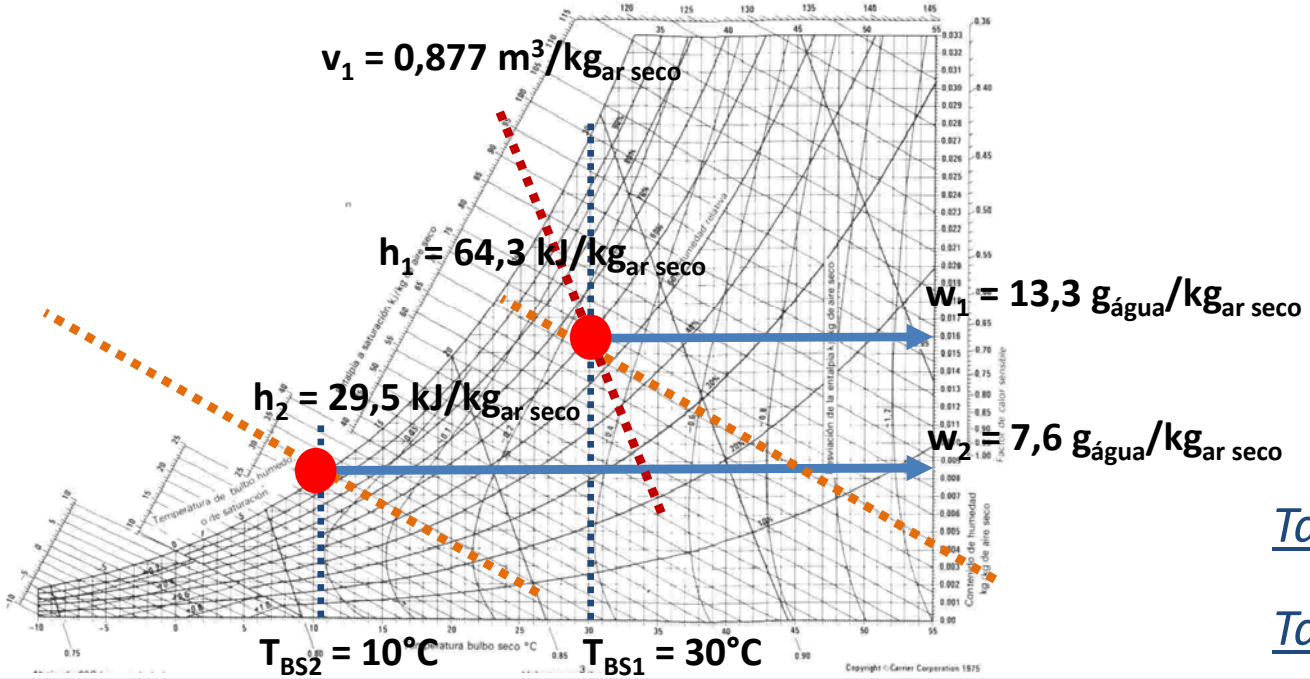




Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar
Resfriamento com desumidificação

Ar úmido a T_{BS}= 30°C e 50% UR atravessa uma serpentina de resfriamento numa vazão de 17.000 m^3/h, sendo resfriado até uma estado final saturado a 10°C. Calcule a potência frigorífica do sistema de refrigeração.



Tab. A5

Tab. B1

Da carta psicrométrica (ou tabela) o estado dos pontos 1 e 2 será:

Ponto 1: Com TBS= 30°C e UR=50%, temos:

h_1=64,3 kJ/$kg_{ar\ seco}$; v_1= 0,877 m^3/kg ; w_1=13,3 $g_{água}$/$kg_{ar\ seco}$

Ponto 2: Com TBS= 10°C e UR=50% (saturado), temos:

h_2=29,5 kJ/$kg_{ar\ seco}$; w_2=7,6 $g_{água}$/$kg_{ar\ seco}$

A vazão mássica de ar seco é calculada por,

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_1} \rightarrow \left[\frac{m^3/_h}{m^3/_{kg_{ar\ seco}}}\right] \rightarrow \left[\frac{kg_{ar\ seco}}{h}\right] \;//\; \dot{m}_a = \frac{17000}{0{,}877} = 19384 \left[\frac{kg_{ar\ seco}}{h}\right]$$

Tab. A5

Tab. B1

Agora, antes de aplicar a equação do balanço de energia e massa para este processo, precisamos ainda determinar a entalpia da água líquida saturada drenada do saturador. Temos,

Tabela B.1 — Propriedades Termodinâmicas da Água

Tabela B.1.1 — Água saturada: tabela em função da temperatura

		Volume específico (m^3/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
Temp. °C	Pressão kPa	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0	2375,33	2375,33	0	2501,35	2501,35	0	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007

Finalmente, na equação do balanço energético, vem,

Tab. A5

Tab. B1

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}_a[(h_1 - h_2) - (w_1 - w_2)h_{água}$$

$$\dot{Q}_{1-2} = 19384\,[(64{,}3 - 29{,}5) - (0{,}0133 - 0{,}0076)41{,}99] = 669\,{}^{MJ}/_{h} = 186kW$$

Exemplo
Processos Básicos Condicionamento de Ar
Resfriamento com Desumidificação

Na unidade de ar condicionado abaixo, calcule o calor transferido por kg de ar seco supondo desprezíveis as variações de energia cinética.

Análise: As equações da continuidade, aplicadas ao ar e à água, apresentam a seguinte forma:

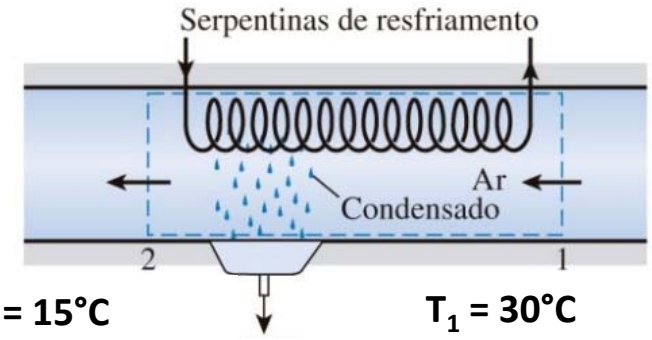
$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2}$$

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2} + \dot{m}_{l2}$$

A equação da primeira lei da termodinâmica para este processo é

$$\dot{Q}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e h_e = \sum \dot{m}_s h_s$$

$$\dot{Q}_{v.c.} + \dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1} = \dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2} + \dot{m}_{l2} h_{l2}$$



$T_2 = 15°C$
$\phi_2 = 95\%$
$P_2 = 100kPa$

$T = 15°C$
Remoção do condensado

$T_1 = 30°C$
$\phi_1 = 80\%$
$P_1 = 105kPa$

Se nós dividirmos esta equação por $\dot{m}_a$, introduzirmos a equação da continuidade para a água, notando que $m_v = \omega m_a$, a primeira lei pode ser reescrita do seguinte modo:

$$\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{\dot{m}_a} + h_{a1} + \omega_1 h_{v1} = h_{a2} + \omega_2 h_{v2} + (\omega_1 - \omega_2) h_{l2}$$

Tab. A5

Tab. B1

Exemplo
Processos Básicos Condicionamento de Ar
Resfriamento com Desumidificação

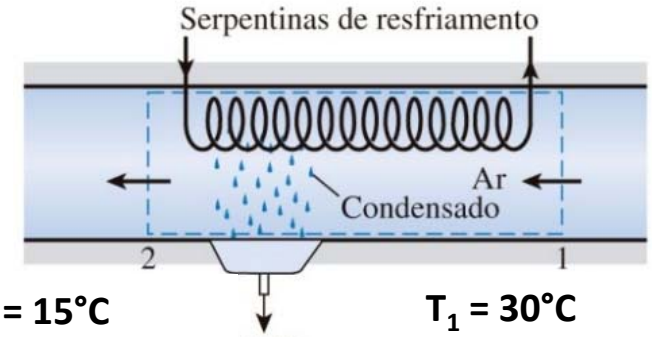
Na unidade de ar condicionado abaixo, calcule o calor transferido por kg de ar seco supondo desprezíveis as variações de energia cinética.

$$p_{v1} = \phi_1 p_{g1} = 0{,}80\,(4{,}246) = 3{,}397 \text{ kPa}$$

$$\omega_1 = \frac{R_a}{R_v}\frac{p_{v1}}{p_{a1}} = 0{,}622 \times \left(\frac{3{,}397}{105 - 3{,}4}\right) = 0{,}0208$$

$$p_{v2} = \phi_2 p_{g2} = 0{,}95\,(1{,}7051) = 1{,}620 \text{ kPa}$$

$$\omega_2 = \frac{R_a}{R_v}\frac{p_{v2}}{p_{a2}} = 0{,}622 \times \left(\frac{1{,}62}{100 - 1{,}62}\right) = 0{,}0102$$



T_2 = 15°C
ϕ_2 = 95%
P_2 = 100kPa

T = 15°C
Remoção do condensado

T_1 = 30°C
ϕ_1 = 80%
P_1 = 105kPa

Substituindo,

$$\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{\dot{m}_a} + h_{a1} + \omega_1 h_{v1} = h_{a2} + \omega_2 h_{v2} + (\omega_1 - \omega_2) h_{l2}$$

$$\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{\dot{m}_a} = 1{,}004(15-30) + 0{,}0102(2528{,}9) - 0{,}0208(2556{,}3) + (0{,}0208 - 0{,}0102)(62{,}99)$$

$$= -41{,}76 \text{ kJ/kg de ar seco}$$

Tab. A5

Tab. B1

Processos Básicos de Condicionamento de Ar

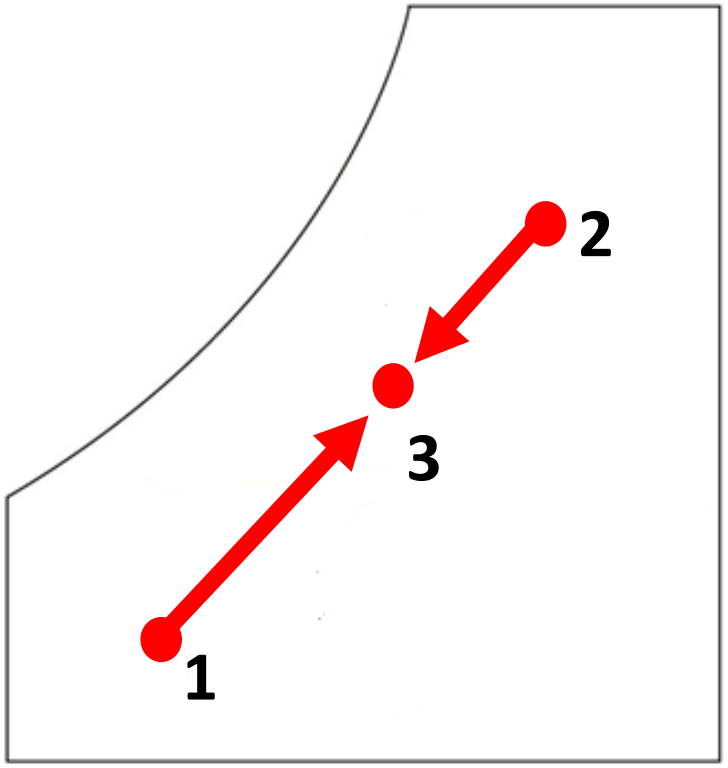
Mistura adiabática de correntes de ar

Muitas das aplicações de resfriamento de ar exigem a mistura de duas correntes de ar.

Trata-se de um processo comum em aplicações de ar condicionado, cujo exemplo mais representativo refere-se a mistura do ar de retorno com o ar de renovação.

A mistura é realizada simplesmente combinando as duas correntes de ar

Exemplos: instalações de produção e processamento onde o ar condicionado é misturado a uma determinada fração de ar externo fresco antes de ser direcionado para o espaço habitado (ar externo = renovação de ar).

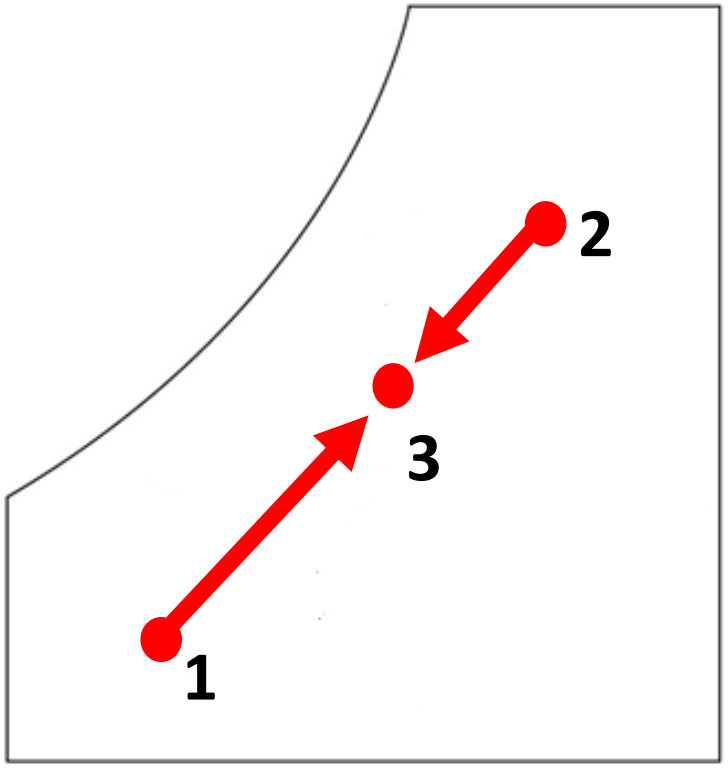


Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Mistura adiabática de correntes de ar

A transferência de calor para a vizinhança geralmente é pequena, e **portanto os processos de mistura podem ser considerados adiabáticos**.

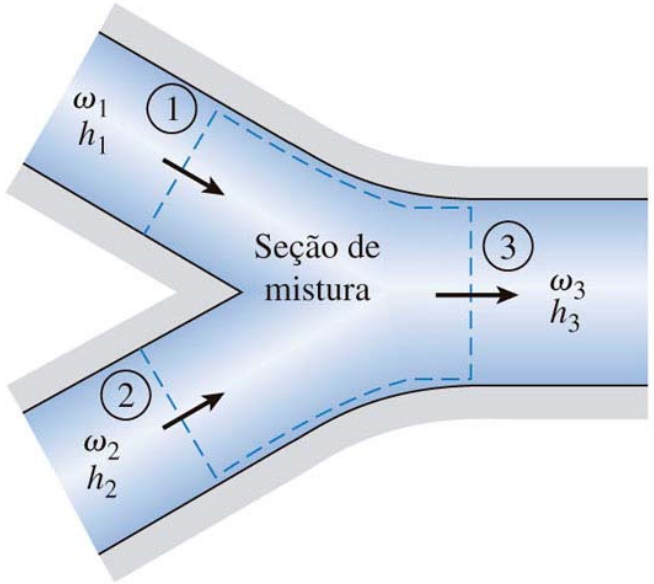
Os processos de mistura normalmente não envolvem interações de trabalho, e as variações de energias cinética e potencial são desprezíveis.



Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Mistura adiabática de correntes de ar

Os balanços de massa e energia da mistura adiabática são:

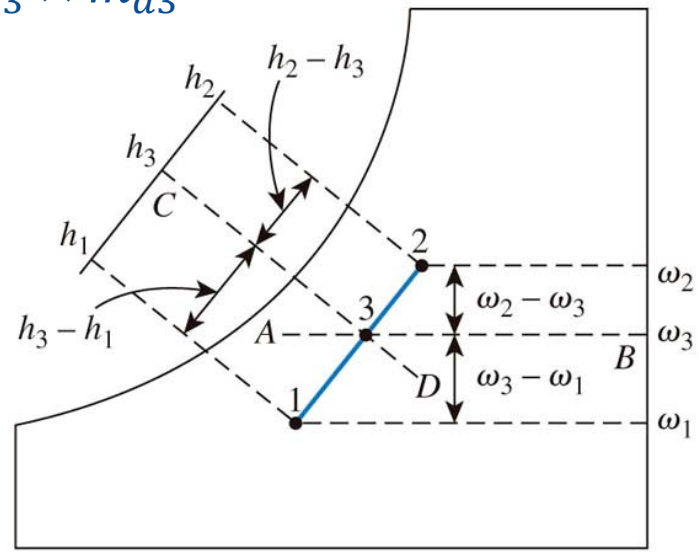


Massa de ar seco: $\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3}$

Massa de vapor de água: $\omega_1 \times \dot{m}_{a1} + \omega_2 \times \dot{m}_{a2} = \omega_3 \times \dot{m}_{a3}$

Energia: $\dot{m}_{a1} \times h_1 + \dot{m}_{a2} \times h_2 = \dot{m}_{a3} \times h_3$

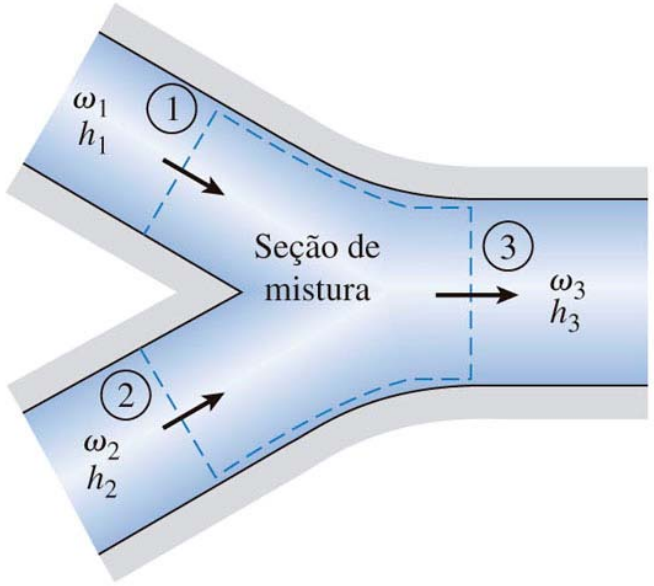
É possível mostrar que: $\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1}$



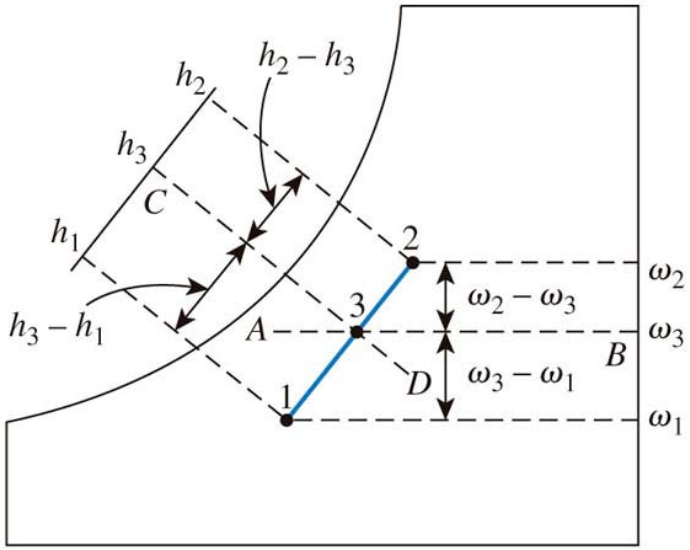
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Mistura adiabática de correntes de ar

A última equação tem uma interpretação geométrica instrutiva no diagrama psicrométrico.



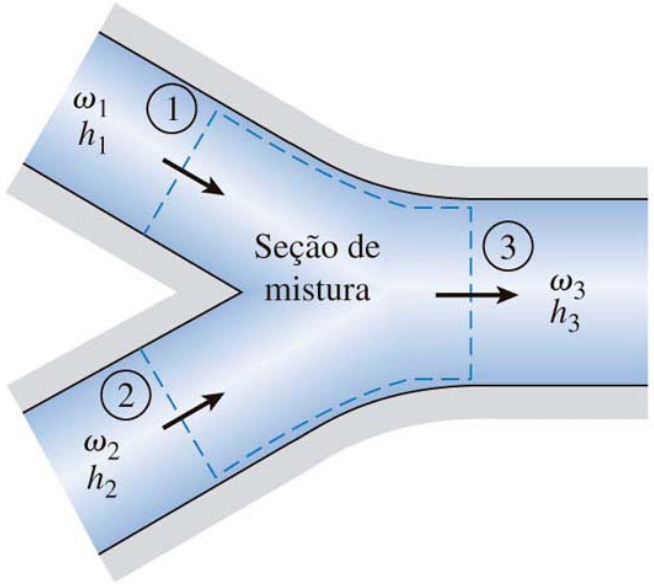
A razão entre $\omega_2 - \omega_3$ e $\omega_3 - \omega_1$ é igual à razão entre $\dot{m}_{a1}$ e $\dot{m}_{a2}$. Os estados que atendem essa condição são indicados pela linha tracejada AB. A razão entre $h_2 - h_3$ e $h_3 - h_1$ também é igual à razão entre $\dot{m}_{a1}$ e $\dot{m}_{a2}$. Os estados que atendem essa condição são indicados pela linha tracejada CD.



O único estado que atende ambas as condições é o estado identificado por 3 (na linha reta que conecta os estados 1 e 2.

Processos Básicos de Condicionamento de Ar

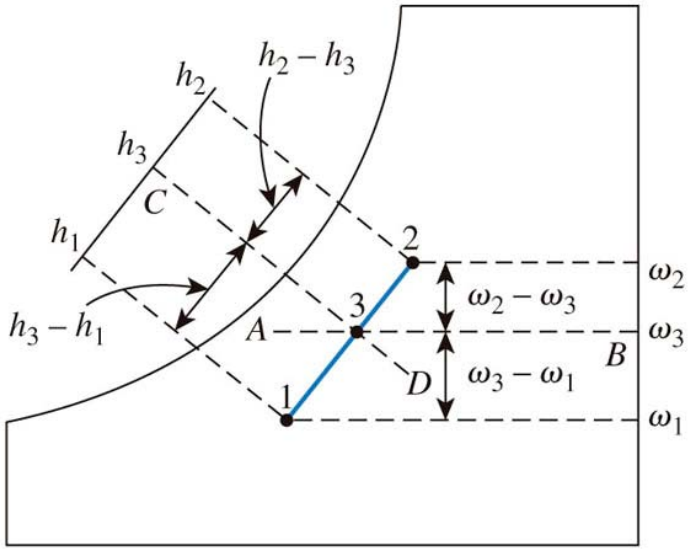
Mistura adiabática de correntes de ar



Conclusão: quando duas correntes de ar em dois estados diferentes (estados 1 e 2) são misturadas adiabaticamente, o estado da mistura (estado 3) fica na linha reta que conecta os estados 1 e 2, e a razão entre as distâncias 2-3 e 3-1 é igual à razão entre $\dot{m}_{a1}$ e $\dot{m}_{a2}$.

<u>O que ocorre quando os estados 1 e 2 estão localizados próximos à curva de saturação?</u>

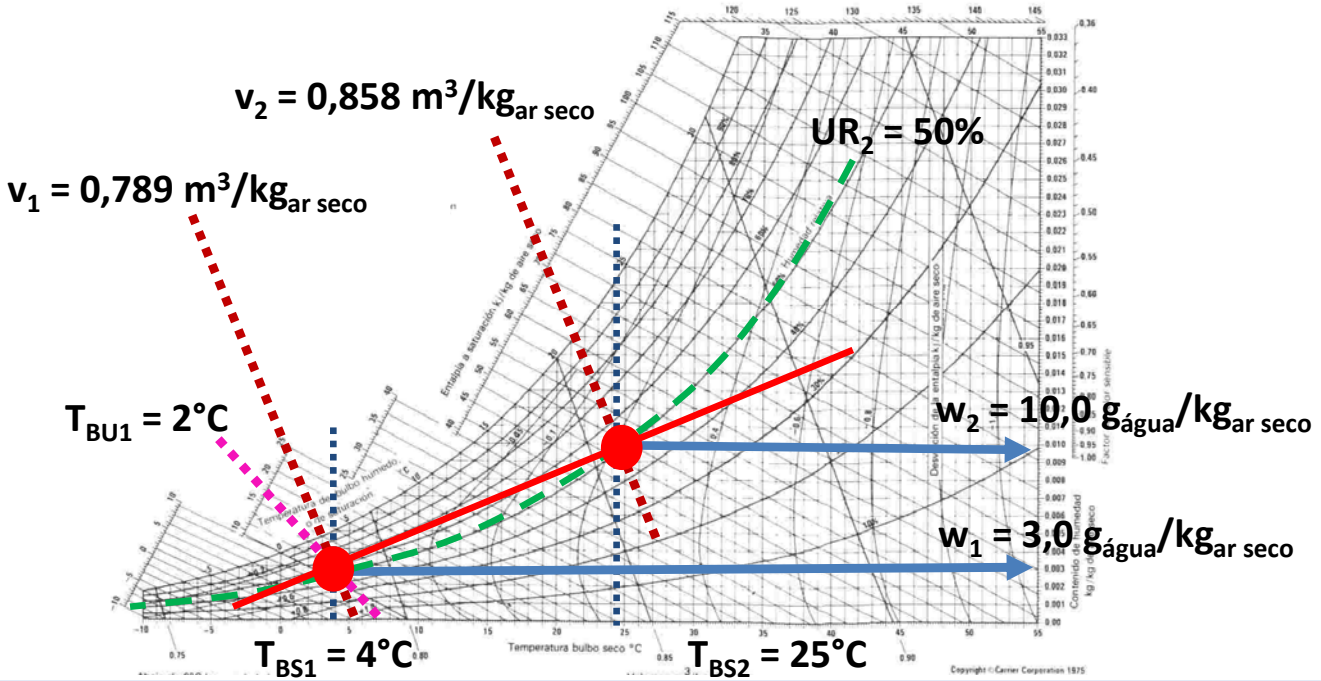
Devido à natureza côncava da curva de saturação, a linha reta que conecta os dois estados cruzará a curva de saturação e o estado 3 poderá ficar à esquerda da curva de saturação. Nesse caso, a água inevitavelmente condensará durante o processo de mistura.



Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar
Mistura adiabática de correntes de ar

Uma corrente de 8000m^3/h de ar exterior a TBS= 4°C e TBU= 2°C é misturada adiabaticamente com ar recirculado de um recinto numa vazão de atravessa uma serpentina de resfriamento numa vazão de 25000m^3/h com TBS= 25 ºC e UR=50%. Determine TBS e TBU para a mistura resultante.



Tab. A5

Tab. B1

Da carta psicrométrica (ou tabela) o estado dos pontos 1 e 2 será:

$$\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{V}_{a1}}{v_1} \rightarrow \frac{8000}{0{,}789} = 10140 \left[\frac{kg_{ar\ seco}}{h}\right]; \dot{m}_{a2} = \frac{\dot{V}_{a2}}{v_2} \rightarrow \frac{25000}{0{,}858} = 29140 \left[\frac{kg_{ar\ seco}}{h}\right]$$

Assim a razão $m_{a,1}/m_{a,2}$ é obtida e aplicada na equação anterior como,

$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = 0{,}742 = \frac{(w_2 - w_3)}{(w_3 - w_1)} \rightarrow w_3 = 9{,}96 \left[\frac{g_{água}}{kg_{ar\ seco}}\right]$$

$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = 0{,}742 = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_3 - h_1)} \rightarrow h_3 = 41{,}22 \left[\frac{kJ}{kg_{ar\ seco}}\right]$$

Então, com os valores de w_3 e h_3 o ponto 3 pode ser posicionado na carta, sobre a linha 1-2, permitindo assim obter

$$T_{BS3} = 19{,}96°C \quad e \quad T_{BU3} = 14{,}77°C$$

Tab. A5

Tab. B1

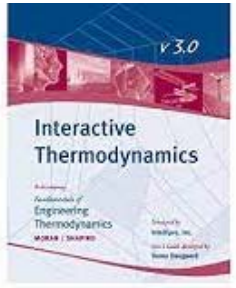
Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar

Mistura adiabática de correntes de ar (análise computacional)

Uma corrente de 142m^3/min de ar exterior a TBS= 5°C e w=0,002 é misturada adiabaticamente com uma segunda corrente com uma vazão de 425m^3/min com TBS= 24 ºC e UR=50%. Determine UR, TBS e TBU para a mistura resultante.

Proposta: Estudo Dirigido: análise paramétrica



Solve: T_3 = 19,01°C // w_3=0,00745

Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Aquecimento com Umidificação

Tanto a temperatura de bulbo seco quanto a umidade absoluta aumentam.

Aquecimento ➔ resulta em baixa umidade relativa

Solução: umidificação do ar aquecido.

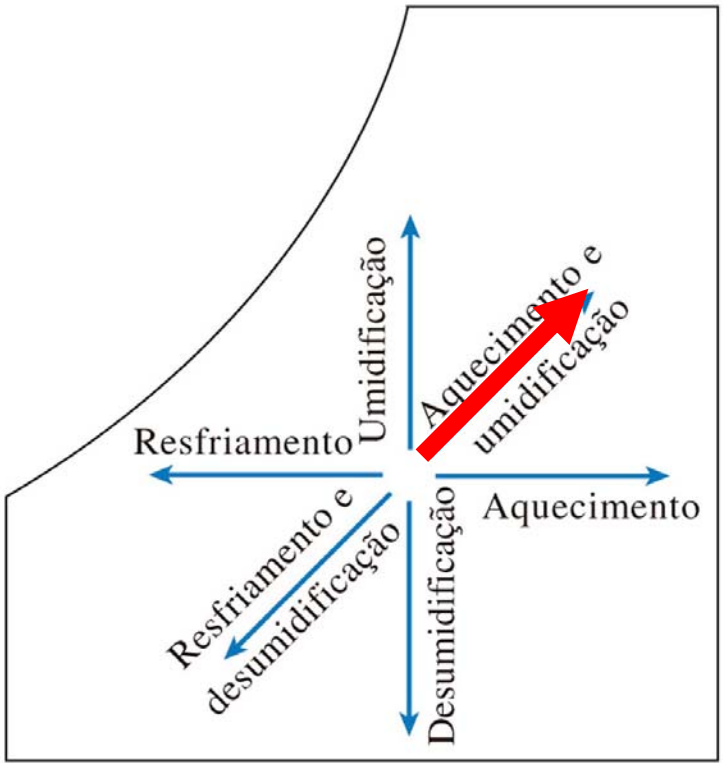
Como realizar o aquecimento com umidificação? Exemplo de projeto

Passar o ar primeiramente através de uma **seção de aquecimento** (processo 1-2) e depois através de uma **seção de umidificação** (processo 2-3).

Normalmente,

Inverno: o ar é aquecido e umidificado

Verão: o ar é resfriado e desumidificado



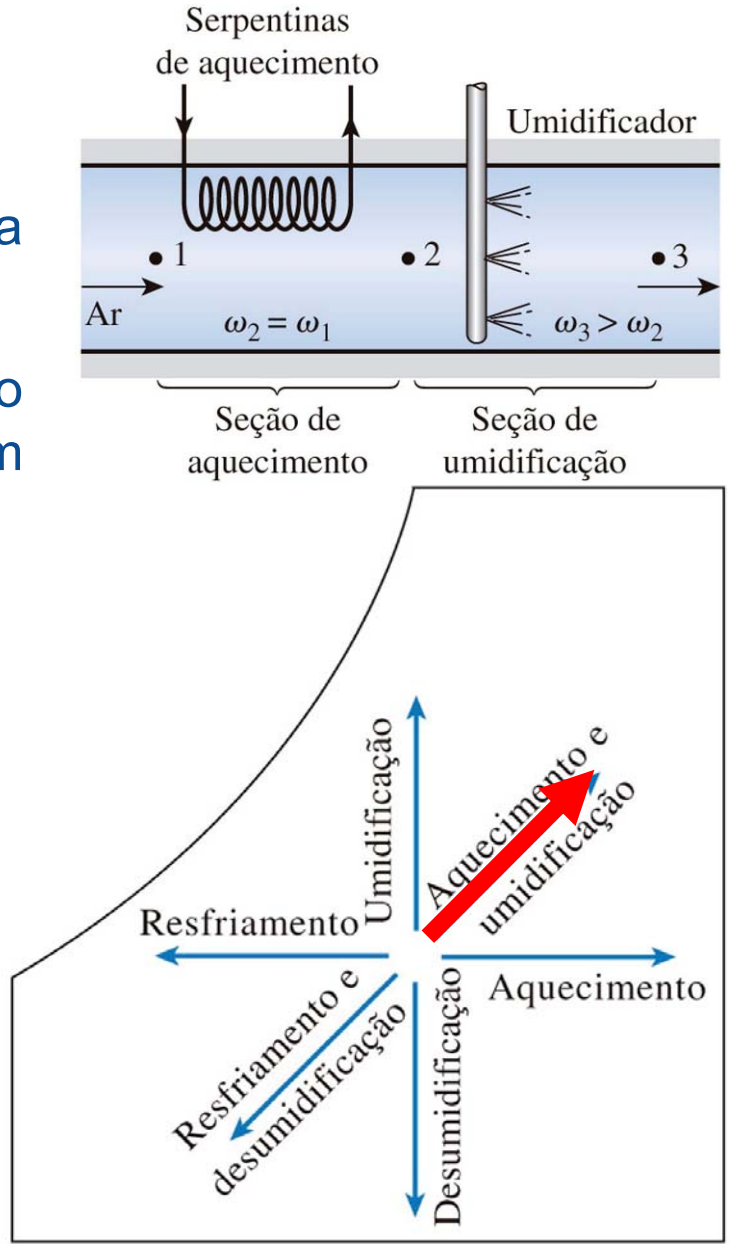
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Aquecimento com Umidificação

A localização do estado 3 depende de como a umidificação é realizada.

1) **Vapor** introduzido na seção de umidificação (corrente de ar): resulta em umidificação com aquecimento adicional (T3 > T2).

2) **Água líquida** introduzida (pulverizada) na seção de umidificação (corrente de ar): Parte do calor latente de vaporização virá do ar, o que resulta no resfriamento da corrente de ar aquecida (T3 < T2). Nesse caso, o ar deve ser aquecido até uma temperatura mais alta na seção de aquecimento para compensar o efeito de resfriamento durante o processo de umidificação.



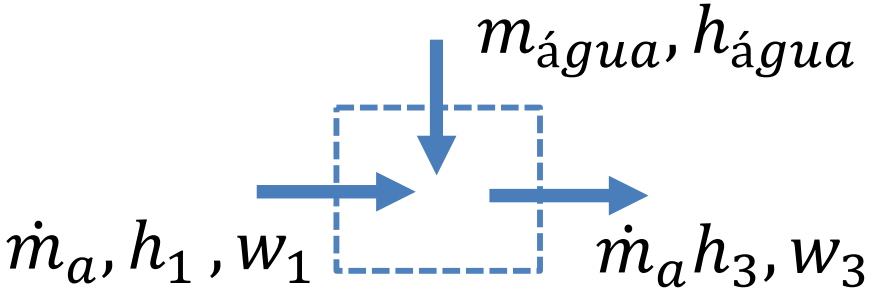
Processos Básicos de Condicionamento de Ar

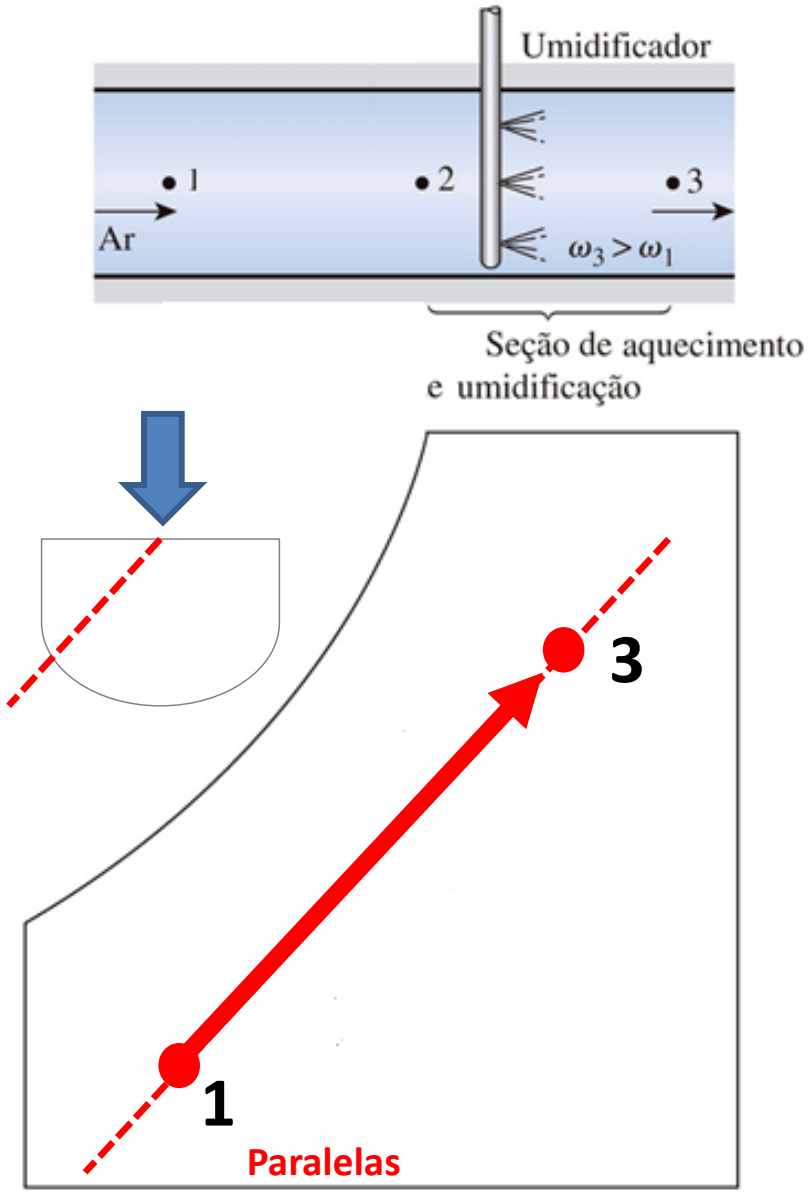
Aquecimento com Umidificação

1) **Vapor** introduzido na seção de umidificação

Permite aumentar a umidade do ar pela injeção de vapor d'água ou água líquida na corrente de ar úmido.

A linha que representa o processo possui inclinação plotada de acordo com o transferidor da carta psicrométrica



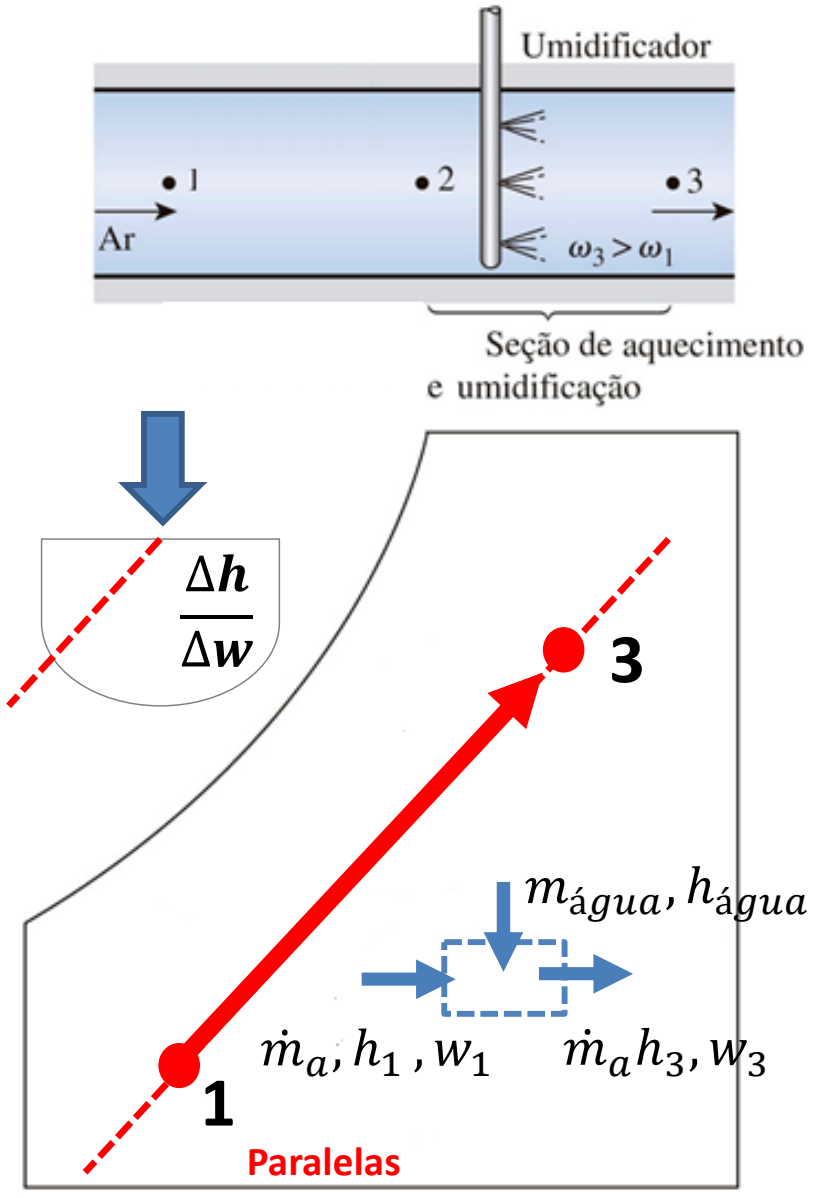


Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Aquecimento com Umidificação

1) **Vapor** introduzido na seção de umidificação

O estado final do ar encontra-se sobre uma reta cuja inclinação **Δh/Δw** corresponde a entalpia da água injetada.



Balanço de massa de ar seco:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a3}$$

Balanço de massa de vapor de água:

$$\omega_1 \times \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{água} = \omega_3 \times \dot{m}_{a3}$$

Balanço de Energia:

$$\dot{m}_{a1} \times h_1 + \dot{m}_{água} \times h_{água} = \dot{m}_{a3} \times h_3$$

Então: $\boldsymbol{h_{água} = \frac{h_3 - h_1}{w_3 - w_1}}$

Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar
Aquecimento com Umidificação

Ar úmido com T_{BS}= 20°C e T_{BU}= 8°C é processado para uma temperatura de ponto de orvalho de 13°C pela injeção de vapor d'água saturado a 110°C. A vazão de ar seco no processo é de 100 kg/h. Pede-se obter T_{BS} para o estado final do ar úmido e a vazão de vapor necessária.

Solução: O estado do ponto 1 é conhecido mas para plotar o processo precisamos antes determinar a entalpia do vapor d'água injetado.

$$h_{água} = \frac{h_3 - h_1}{w_3 - w_1} = 2691,47 \frac{kJ}{kg_{ar\ seco}}$$

Tabela B.1 — Propriedades Termodinâmicas da Água

Tabela B.1.1 — Água saturada: tabela em função da temperatura

		Volume específico (m^3/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
Temp. °C	Pressão kPa	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	419,02	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958
110	143,3	0,001052	1,21014	461,12	2056,96	2518,09	461,27	2230,00	2691,47	1,4184	5,8202	7,2386
115	169,1	0,001056	1,03658	482,28	2041,44	2523,72	482,46	2216,50	2698,96	1,4733	5,7100	7,1832
120	198,5	0,001060	0,89186	503,48	2025,76	2529,24	503,69	2202,61	2706,30	1,5275	5,6020	7,1295

Tab. A5

Tab. B1

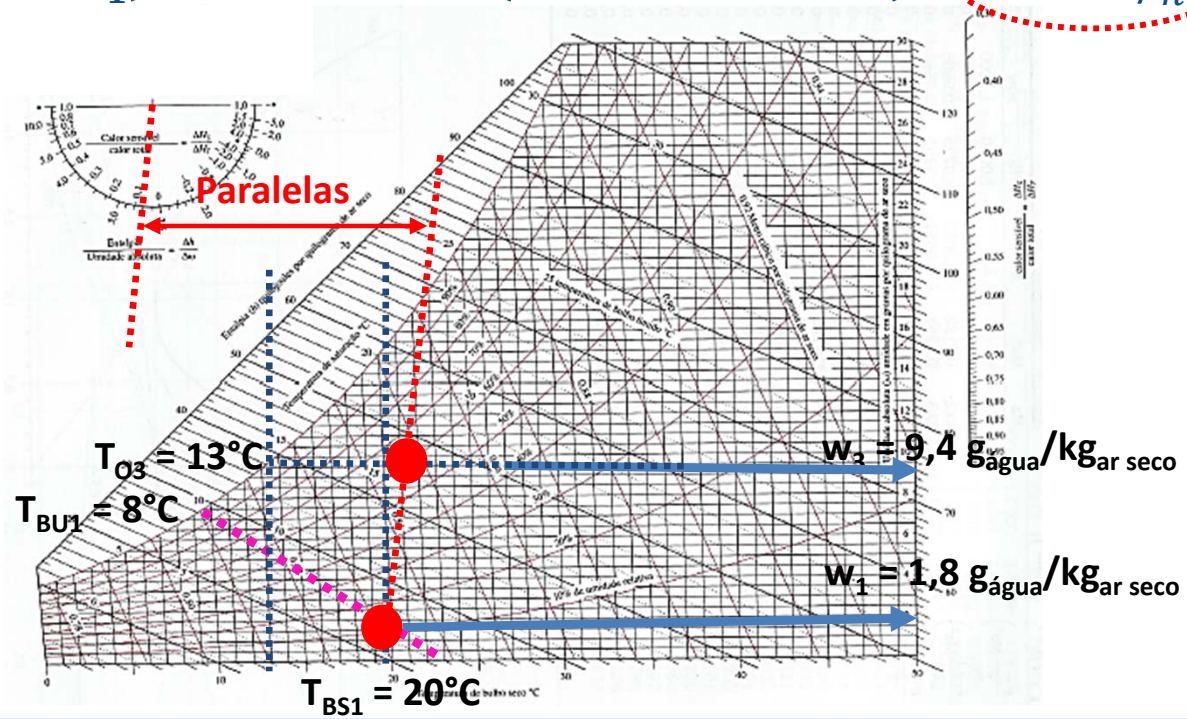
Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar
Aquecimento com Umidificação

Solução: Com o auxílio do transferidor a inclinação da linha que representa o processo é obtida. O ponto 3 é plotado na intercessão da linha obtida com a linha de To=13°C. No ponto 3 temos então $T_{BS,3}$=20,2°C.

A vazão de vapor d'água requerida para injeção é então obtida fazendo,

$$\dot{m}_{água} = \dot{m}_a(w_3 - w_1) = 100 \times 60 \times (0{,}0094 - 0{,}0018) = 45{,}6\ {}^{kg}/_{h}$$



Tab. A5

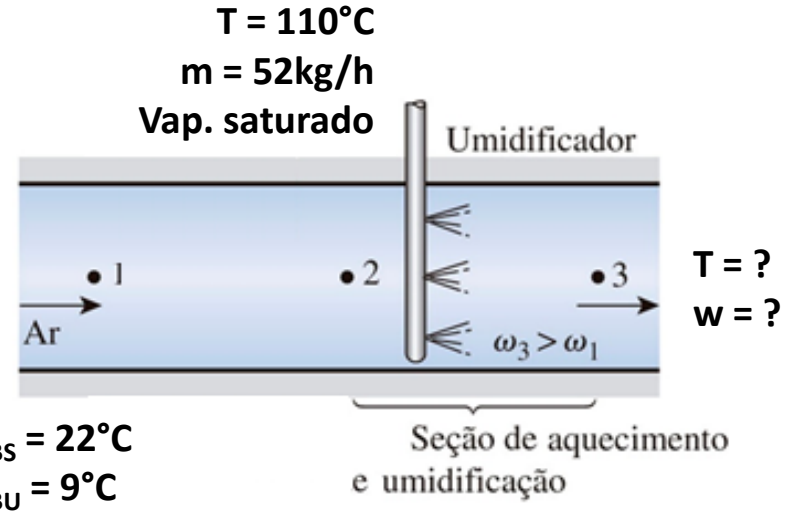
Tab. B1

Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar
Aquecimento com Umidificação (análise computacional)

Ar úmido com T_{BS}= 22°C e T_{BU}= 9°C é processado pela injeção de vapor d'água saturado a 110°C a 52kg/h. A vazão de ar seco no processo é de 90 kg/min. Pede-se obter T_{BS} para o estado final do ar úmido e a sua umidade w_2.

Proposta: Solução computacional e análise paramétrica: A solução é conhecida conforme o exemplo anterior mas, para otimizar o processo é necessário plotar uma análise paramétrica.



T_{BS} = 22°C
T_{BU} = 9°C
m_a = 90kg/min

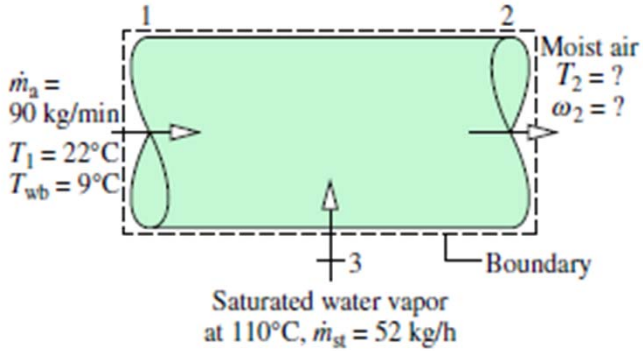
Tab. A5

Tab. B1

Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar
Aquecimento com Umidificação (análise computacional)

Proposta: Solução computacional e análise paramétrica:



Balanço de massa de ar seco:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$$

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_{água} = \dot{m}_{v2}$$

Balanço de massa de vapor de água:

$$\omega_1 \times \dot{m}_a + \dot{m}_{água} = \omega_2 \times \dot{m}_a$$

Então: $\boldsymbol{w_2 = w_1 + \frac{\dot{m}_{água}}{\dot{m}_a}}$ $\quad \boldsymbol{w_2 = 0,002 + \frac{52\frac{kg}{h}(\frac{1h}{60min})}{90\ kg/min} = 0,0116\frac{kg_{água}}{kg_{ar\ seco}}}$

Balanço de Energia:

$$\dot{m}_{a1} \times h_1 + \dot{m}_{água} \times h_{água} = \dot{m}_{a2} \times h_2$$

$\boldsymbol{T_2 = 23,5°C}$

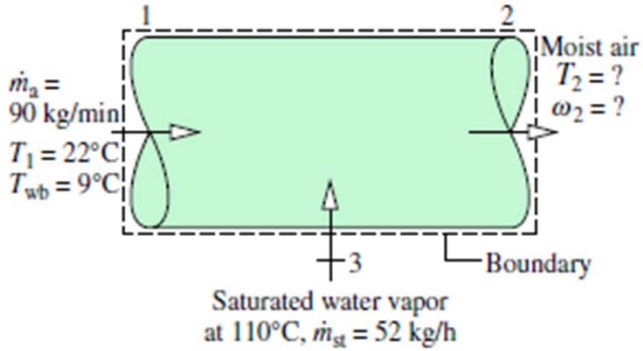
Tab. A5

Tab. B1

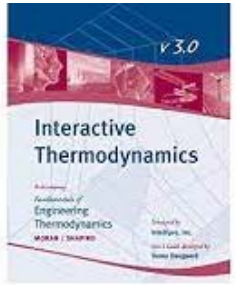
Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar
Aquecimento com Umidificação (análise computacional)

Proposta: Estudo Dirigido: análise paramétrica



Solve: $T_2 = 23.4°C$

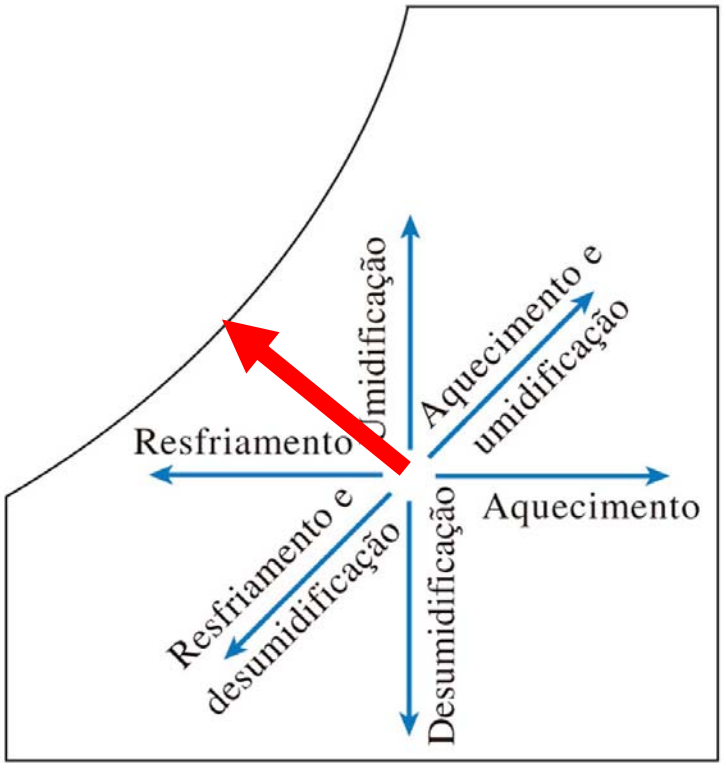


Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Resfriamento evaporativo

Os sistemas convencionais de resfriamento operam em um ciclo de refrigeração, e podem ser usados em qualquer parte do mundo. Mas eles têm um custo inicial e operacional alto. Em climas áridos (quente e seco), podemos evitar o alto custo da refrigeração usando os **resfriadores evaporativos**.

Princípio: à medida que a água evapora, o calor latente da vaporização é absorvido do corpo de água e do ar da vizinhança. Como resultado, a água e o ar são resfriados durante o processo.



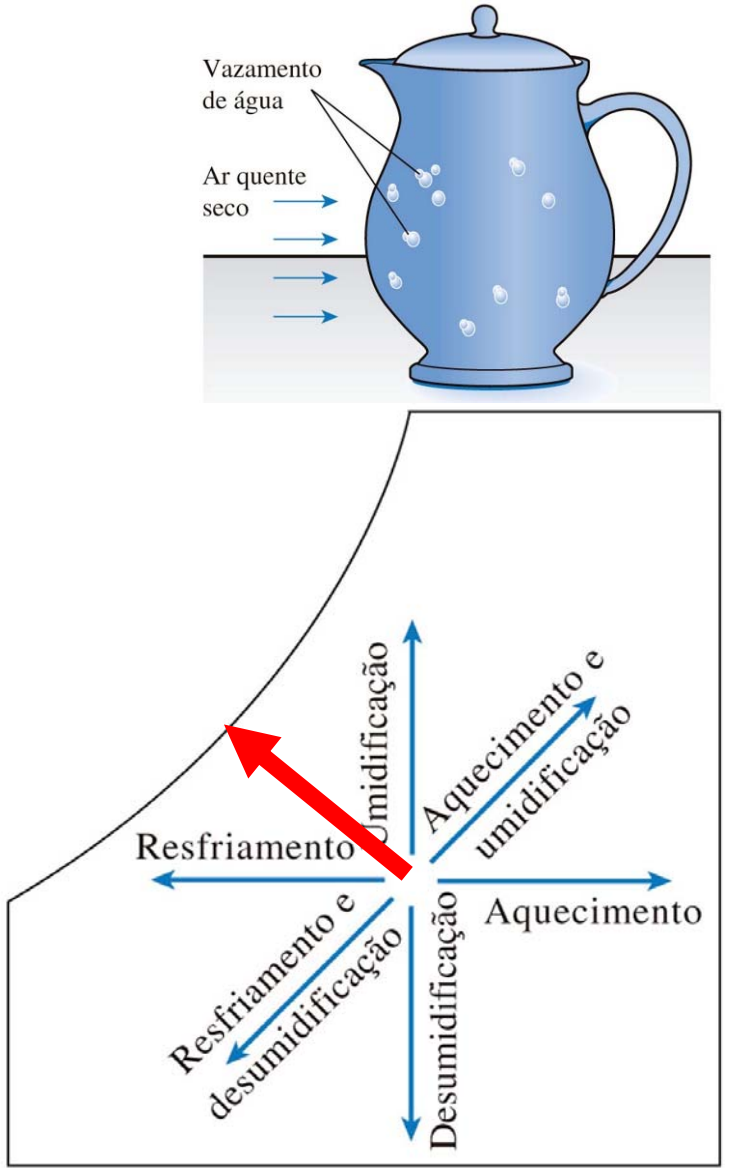
Esse processo tem sido usado há milhares de anos para resfriar a água. Uma jarra de material poroso cheia de água é deixada em uma área aberta à sombra. Uma pequena

Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Resfriamento evaporativo

Esse processo tem sido usado há milhares de anos para resfriar a água. Uma jarra de material poroso cheia de água é deixada em uma área aberta à sombra. Uma pequena quantidade de água vaza através dos orifícios porosos e a jarra “transpira”. Em um ambiente seco, essa água evapora e resfria a água restante na jarra.

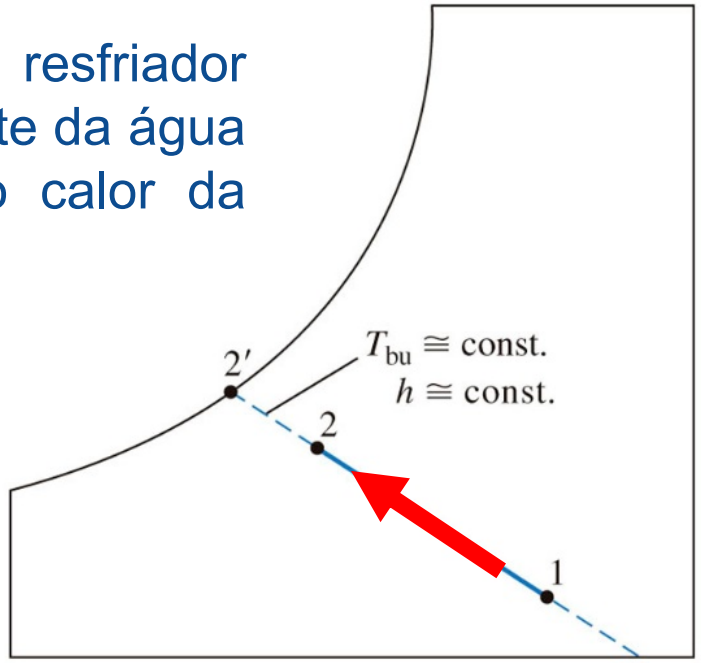
Provavelmente você já notou que em um dia quente e seco o ar parece um pouco mais fresco quando o jardim é regado. Isso acontece porque a água absorve calor do ar à medida que ela evapora. Um resfriador evaporativo funciona de acordo com o mesmo princípio.



Processos Básicos de Condicionamento de Ar

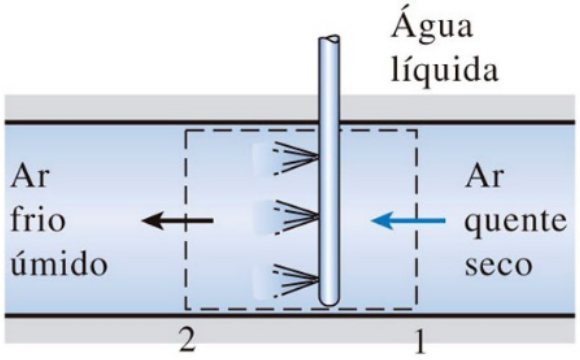
Resfriamento evaporativo

O ar quente e seco no estado 1 entra no resfriador evaporativo, onde é pulverizada água líquida. Parte da água evapora durante o processo pela absorção do calor da corrente de ar.



Como resultado, a temperatura da corrente de ar diminui e sua umidade aumenta (estado 2). No caso limite, o ar sai do resfriador evaporativo saturado no estado 2'. Essa é a menor temperatura que pode ser atingida por esse processo.

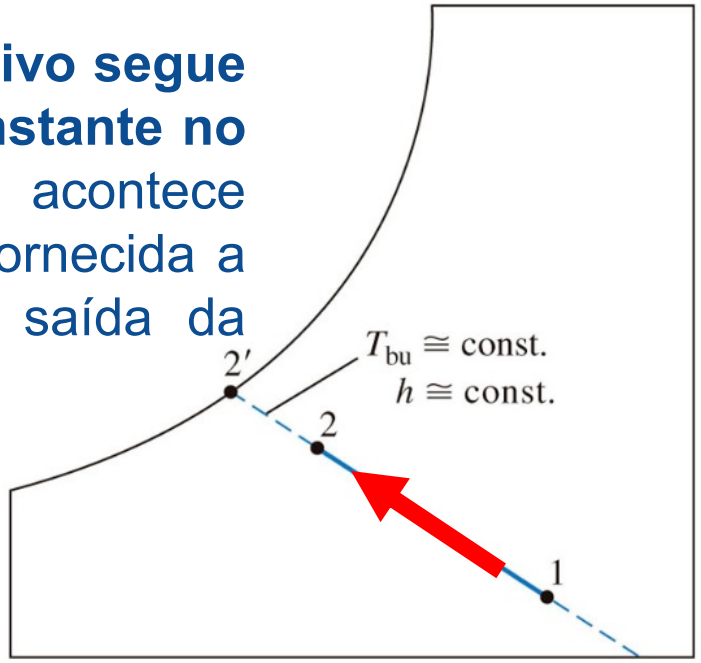
O processo de resfriamento evaporativo, em sua essência, é idêntico ao processo de saturação adiabática, uma vez que a transferência de calor entre a corrente de ar e a vizinhança geralmente é desprezível.



Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Resfriamento evaporativo

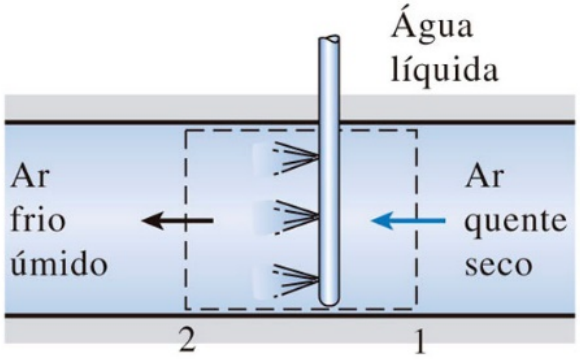
Portanto, o **processo de resfriamento evaporativo segue uma linha de temperatura de bulbo úmido constante no diagrama psicrométrico**. Observar que não acontece exatamente o mesmo quando a água líquida é fornecida a uma temperatura diferente da temperatura de saída da corrente de ar.



Como as linhas de temperatura de bulbo úmido constante quase coincidem com as linhas de entalpia constante, a entalpia da corrente de ar também pode ser admitida como constante. Essa é uma aproximação relativamente exata, e normalmente é usada nos cálculos de condicionamento de ar.

$$T_{bu} \cong constante$$

$$\mathrm{h} \cong constante$$

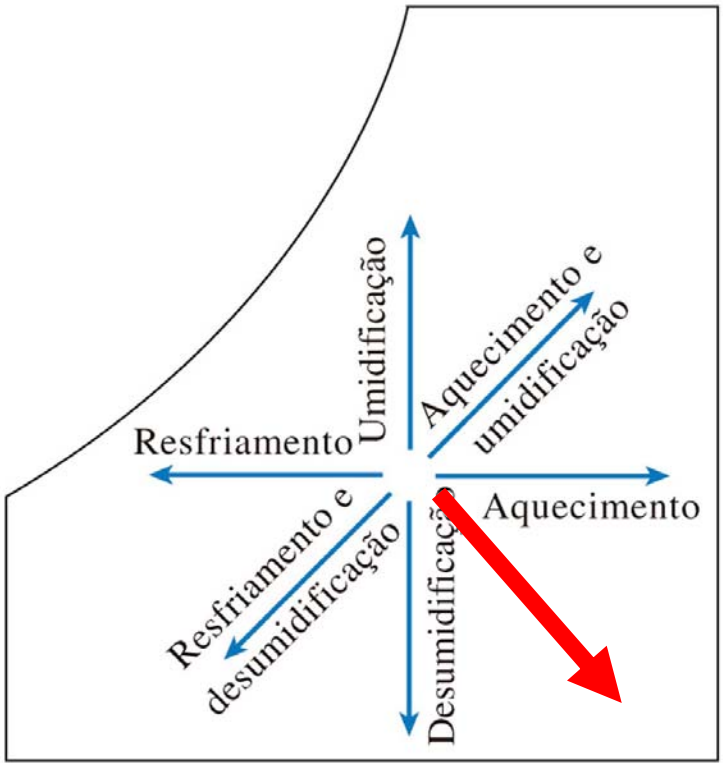


Processos Básicos de Condicionamento de Ar

Desumidificação Química

A umidade contida no ar é absorvia ou adsorvida por alguma substância higroscópica (em geral ocorre a temperatura constante).

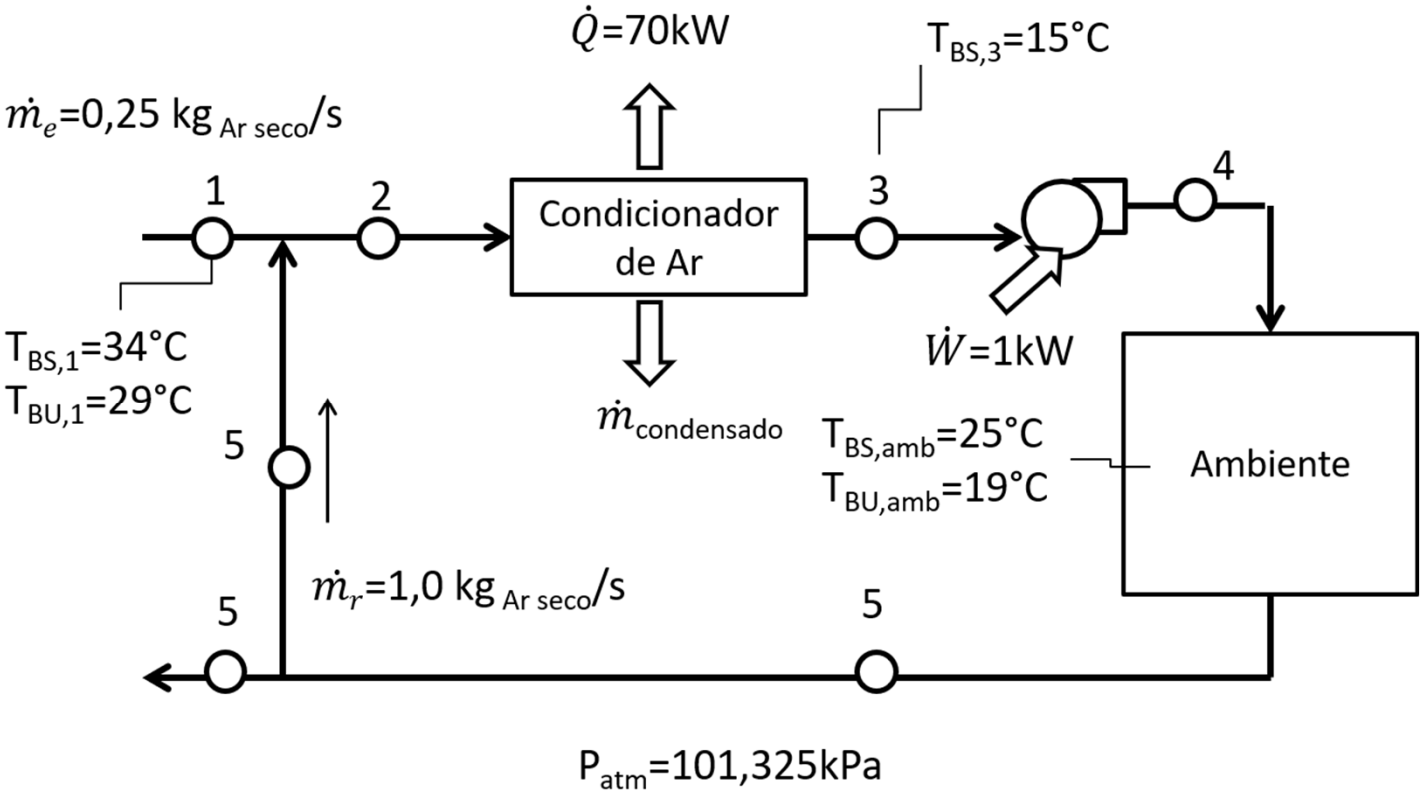
Este processo NÃO faz parte do escopo deste material de aprendizado e não será tratado aqui. É um processo predominantemente químico. Seu sentido e direção está representado na carta psicrométrica ao lado.



Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar
Sistema de Ar Condicionado Completo

A figura abaixo ilustra esquematicamente um sistema de AC e suas variáveis operacionais. Despreze as perdas de calor nos dutos e represente todo o processo numa carta psicrométrica.



Vamos examinar cada processo elementar separadamente.

a) Determinação do estado 2: após a mistura

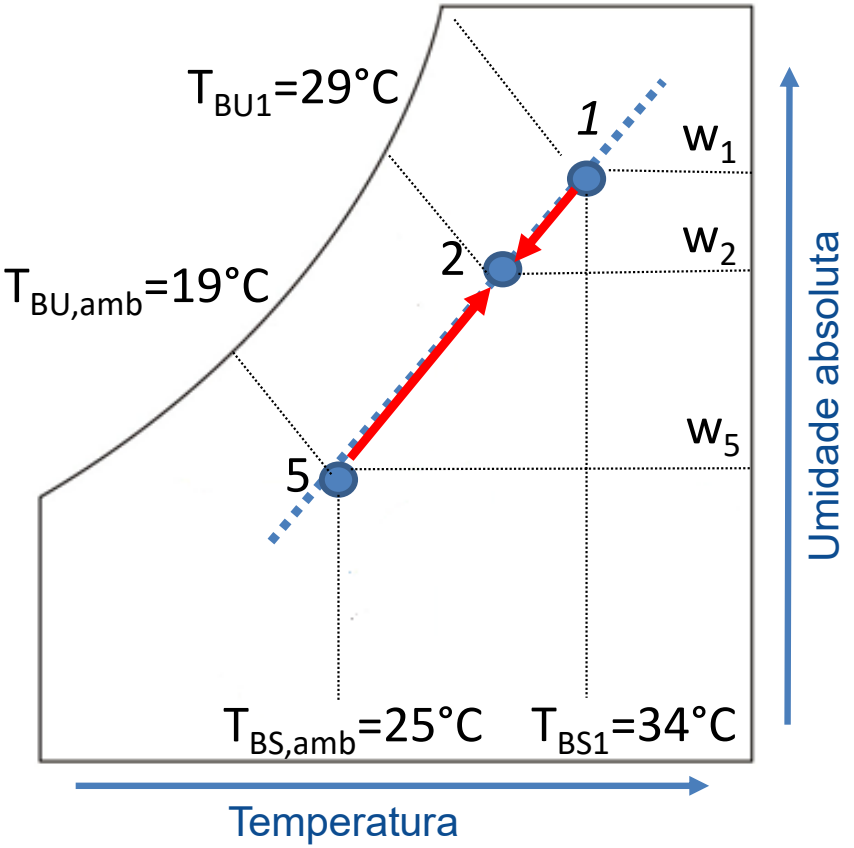
$$\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_e} = \frac{\omega_5 - \omega_2}{\omega_2 - \omega_1} = w_2 = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_e + m_r}[w_5 + w_1 \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_e}]$$

$$w_2 = \frac{0{,}25}{1{,}25}[0{,}0127 + 0{,}0260 \frac{1{,}0}{0{,}25}]$$

$$w_2 = 0{,}023\ {}^{kg_{água}}/_{kg_{ar\ seco}}$$

No ponto 2 então temos,

$$\begin{cases} T_{BS2} = 32{,}1°C \\ \emptyset_2 = 70\% \\ h_2 = 92{,}1\ {}^{kJ}/_{kg_{ar\ seco}} \end{cases}$$



Vamos examinar cada processo elementar separadamente.

b) Determinação do estado 3: saída do condicionador de ar

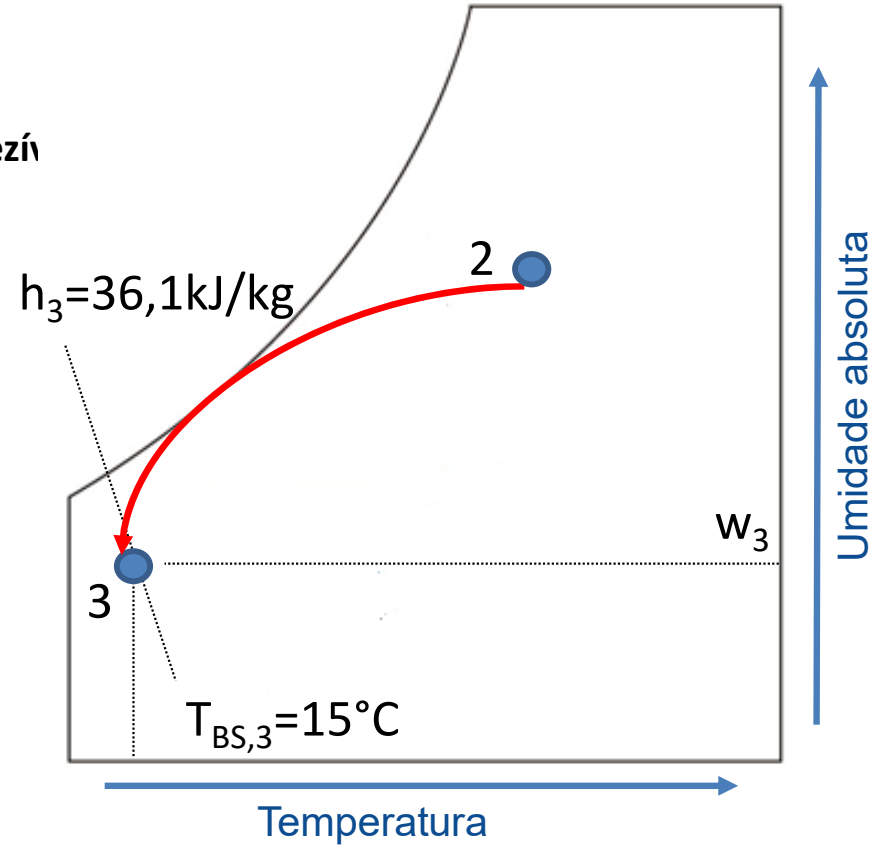
$$h_3 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_e + \dot{m}_r} + h_2 - (w_3 + w_2)h_{água}$$

desprezí

$$h_3 = \frac{-70}{1{,}25} + 92{,}1 = 36{,}1\ {}^{kJ}/_{kg_{ar\ seco}}$$

No ponto 3 então temos,

$$w_3 = 0{,}08307\ {}^{kg_{água}}/_{kg_{ar\ seco}}$$



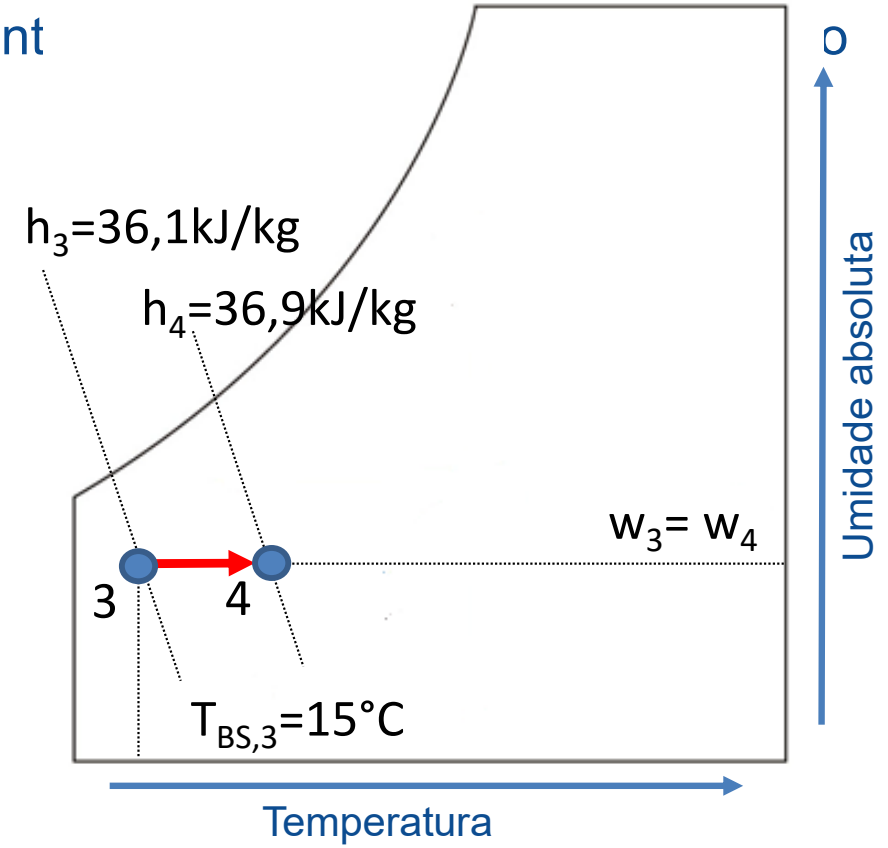
Vamos examinar cada processo elementar separadamente.

c) Determinação do estado 4: ar de insuflamento

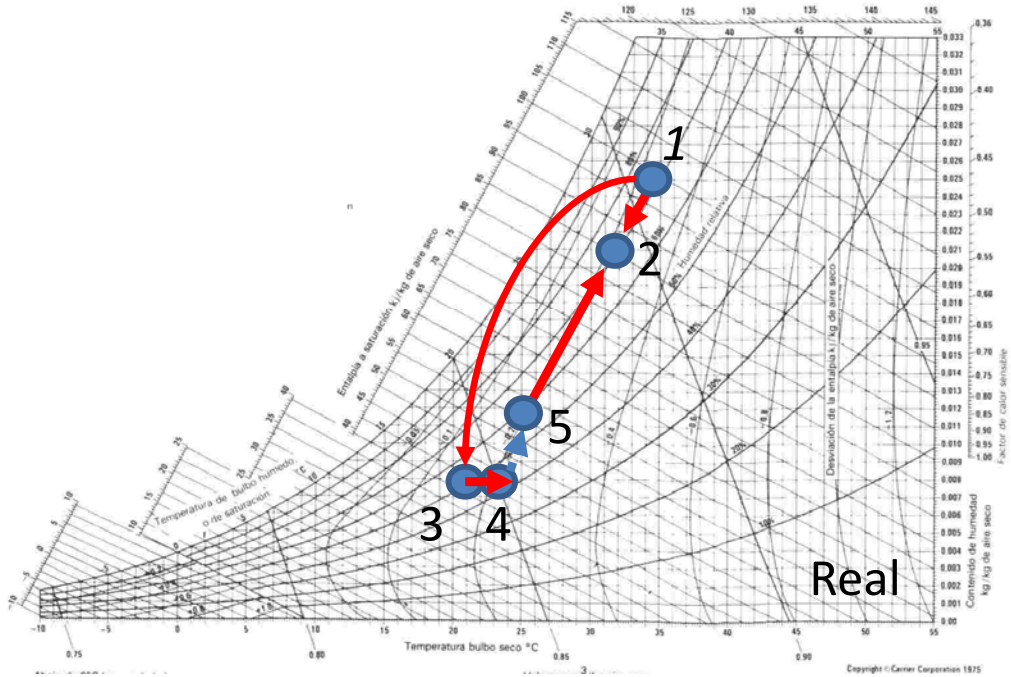
Neste caso o ar sofre apenas aqueciment ventilador, assim, no ponto 4 então temos,

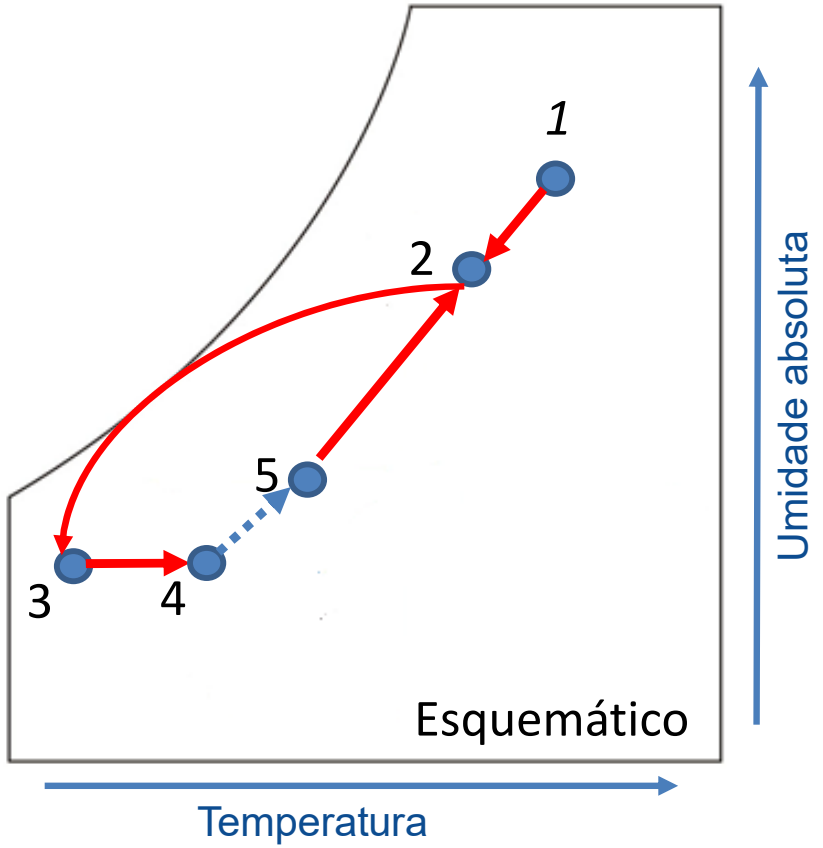
$$h_4 = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_e + m_r} + h_3$$

$$h_4 = \frac{+1}{1{,}25} + 36{,}1 = 36{,}9\ {}^{kJ}/_{kg_{ar\ seco}}$$



Finalmente, representamos todos os processos





Estudo Dirigido
Atividade em grupo (em sala)

1. Um aquecedor é alimentado com 1 kg/s de ar úmido saturado a 100 kPa e 10°C. A temperatura do ar úmido na seção de descarga do aquecedor é igual a 25°C. Determine a umidade relativa do ar úmido na seção de descarga do aquecedor. Calcule, também, a taxa de transferência de calor para a mistura nesse processo de aquecimento.

2. A pressão da mistura nas seções de alimentação e descarga de um saturador adiabático são iguais a 0,1MPa. Sabendo que a Temperatura na seção de alimentação é 30°C e que a temperatura na seção de descarga é 20°C, determine a umidade absoluta e relativa da mistura na seção de alimentação do saturador.

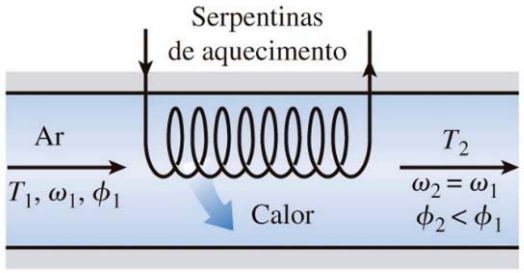
3. A vazão de ar úmido na seção de alimentação de um resfriador é 1 m3/s. A pressão, temperatura e umidade relativa na seção de alimentação do resfriador são iguais a 100kPa, 25°C e 80%. Sabendo que a pressão e a temperatura da mistura na seção de descarga do resfriador são iguais a 100kPa e 15°C, determine a taxa de condensação de água no aquecimento.

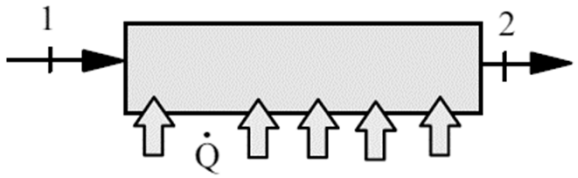
Estudo Dirigido

Processos Básicos Condicionamento de Ar

Aquecimento

Um aquecedor é alimentado com 1 kg/s de ar úmido saturado a 100 kPa e 10°C. A temperatura do ar úmido na seção de descarga do aquecedor é igual a 25°C. Determine a umidade relativa do ar úmido na seção de descarga do aquecedor. Calcule, também, a taxa de transferência de calor para a mistura nesse processo de aquecimento.





State 1 : $\phi_1 = 1$; $P_v = P_g = 1.2276$

Eq.12.28: $w = 0.622\ P_v/P_a = 0.622 \times 1.2276/(100 - 1.2276) = 0.00773$

State 2 : No water added => $w_2 = w_1$ => $P_{v2} = P_{v1}$

$\phi_2 = P_{v2}/P_{g2} = 1.2276/3.169 = 0.387$ or 39 %

Energy Eq.6.10

$$\dot{Q} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_a (h_2 - h_1)_{air} + w\dot{m}_a (h_2 - h_1)_{vapor}$$

$$\dot{m}_{tot} = \dot{m}_a + \dot{m}_v = \dot{m}_a (1 + w_1)$$

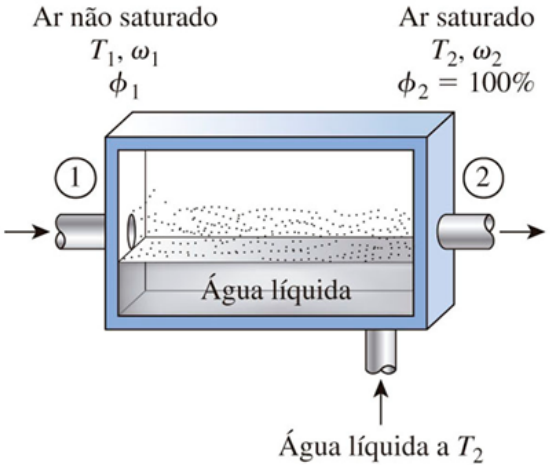
Energy equation with $C_{P\ air}$ from A.5 and h's from B.1.1

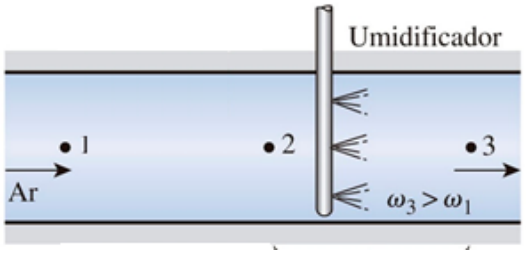
$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}_{tot}}{1 + w_1} C_{P\ air} (25 - 10) + \frac{\dot{m}_{tot}}{1 + w_1} w (h_{g2} - h_{g1})$$

$$= \frac{1}{1.00773} \times 1.004(25 - 10) + \frac{1 \times 0.00773}{1.00773} (2547.17 - 2519.74)$$

$$= 14.9445 + 0.210407 = \mathbf{15.15\ kW}$$

A pressão da mistura nas seções de alimentação e descarga de um saturador adiabático são iguais a 0,1MPa. Sabendo que a Temperatura na seção de alimentação é 30°C e que a temperatura na seção de descarga é 20°C, determine a umidade absoluta e relativa da mistura na seção de alimentação do saturador





$$h_{a1} + \omega_1 h_{v1} + (\omega_2 - \omega_1) h_{l2} = h_{a2} + \omega_2 h_{v2}$$

$$\omega_1 (h_{v1} - h_{l2}) = c_{pa} (T_2 - T_1) + \omega_2 (h_{v2} - h_{l2})$$

$$\omega_1 (h_{v1} - h_{l2}) = c_{pa} (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{lv2}$$

Solução: Como o vapor d'água na seção de descarga está saturado, $p_{v2} = p_{g2}$, ω_2 pode ser calculado.

$$\omega_2 = 0{,}622 \times \left(\frac{2{,}339}{100 - 2{,}34} \right) = 0{,}0149$$

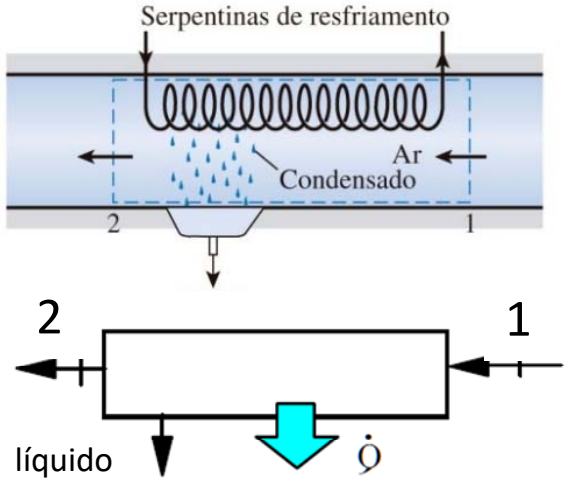
ω_1 pode ser calculado utilizando a Eq. 12.30.

$$\omega_1 = \frac{c_{pa}(T_2 - T_1) + \omega_2 h_{lv2}}{(h_{v1} - h_{l2})} = \frac{1{,}004(20 - 30) + 0{,}0149 \times 2454{,}1}{2556{,}3 - 83{,}96} = 0{,}0107$$

$$\omega_1 = 0{,}0107 = 0{,}622 \left(\frac{p_{v1}}{100 - p_{v1}} \right) \quad \Rightarrow \quad p_{v1} = 1{,}691 \text{ kPa}$$

$$\phi_1 = \frac{p_{v1}}{p_{g1}} = \frac{1{,}691}{4{,}246} = 0{,}398$$

A vazão de ar úmido na seção de alimentação de um resfriador é 1 m3/s. A pressão, temperatura e umidade relativa na seção de alimentação do resfriador são iguais a 100kPa, 25°C e 80%. Sabendo que a pressão e a temperatura da mistura na seção de descarga do resfriador são iguais a 100kPa e 15°C, determine a taxa de condensação de água no aquecimento.



State 1: $P_g = P_{sat25} = 3.169\ \text{kPa} \Rightarrow P_v = \phi P_g = 0.8 \times 3.169 = 2.535\ \text{kPa}$

$$\dot{m}_{v1} = \frac{P_v \dot{V}}{R_v T} = \frac{2.535 \times 1}{0.461 \times 298.15} = 0.0184\ \text{kg/s}$$

$$w_1 = \frac{\dot{m}_{v1}}{\dot{m}_{A1}} = 0.622 \frac{P_{v1}}{P_{A1}} = 0.622 \frac{2.535}{100 - 2.535} = 0.0162$$

$$\dot{m}_{A1} = \frac{\dot{m}_{v1}}{w_1} = \frac{0.0184}{0.0162} = 1.136\ \text{kg/s} = \dot{m}_{A2} \qquad \text{(continuity for air)}$$

State 2 is saturated $\phi_2 = 100\%$, $P_{v2} = P_{g2} = 1.705\ \text{kPa}$

$$w_2 = 0.622 \frac{P_{v2}}{P_{A2}} = 0.622 \frac{1.705}{100 - 1.705} = 0.0108$$

$$\dot{m}_{v2} = w_2 \dot{m}_{A2} = 0.0108 \times 1.136 = 0.0123\ \text{kg/s}$$

$$\dot{m}_{liq} = \dot{m}_{v1} - \dot{m}_{v2} = 0.0184 - 0.0123 = \mathbf{0.0061\ kg/s}$$

Check for state 2:

$P_{g15°C} = 1.705\ \text{kPa} < P_{v1}$

so liquid water out.

Importante!
Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

Exercícios Van Wyllen - 5ed								
Capítulo 12								
Processos Psicr. Simples	12.48	12.51	12.52	12.60	12.61	12.62		
Processos Psicr. Diversos	12.63	12.64	12.65	12.66	12.67	12.68	12.69	12.71
	12.72	12.84	12.85					
Torre de Resfriamento	12. 70	12.73						
Resfriamento Evaporativo	12.57	12.78						

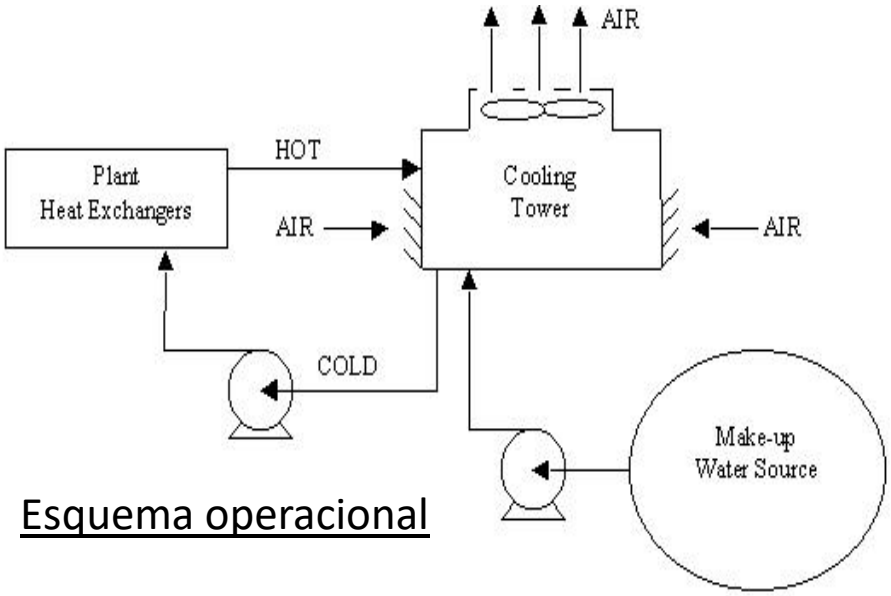
Exercícios Incropera - 7ed								
Capítulo 7								
Torre de Resfriamento	7.140							

Capítulo 4 – Torres de Resfriamento / Condensadores Evaporativos / Centrais de água gelada

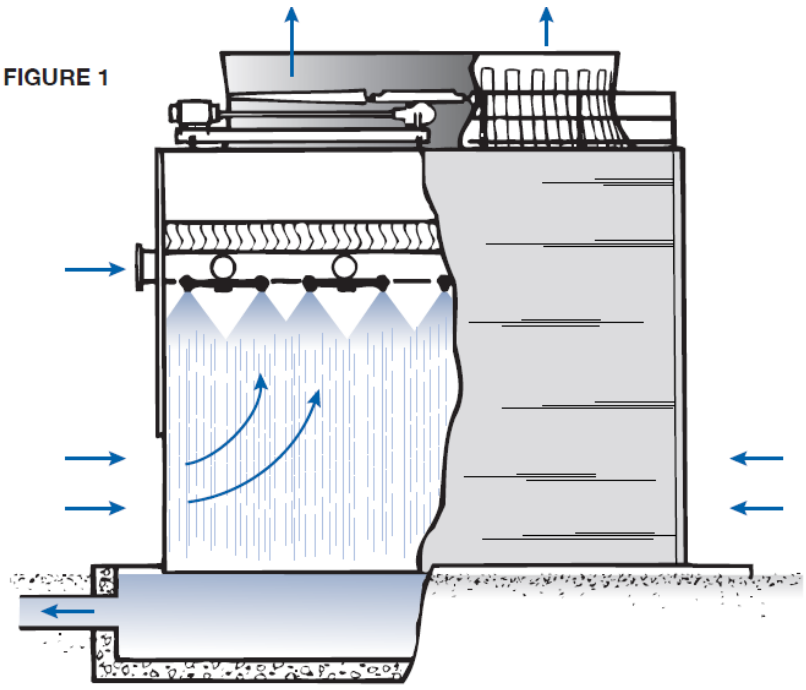
Torres de Resfriamento

A torre de resfriamento é um equipamento de rejeição de calor: rejeita calor para a atmosfera (p/ o ar), resfriando um fluxo de água quente. A água arrefecida na torre é usada para resfriar o fluido refrigerante em um condensador, para arrefecer a água de refrigeração de uma usina, para resfriar a água que circula em um equipamento qualquer, etc, e várias outras aplicações.

O resfriamento da água se dá, fundamentalmente, pela transferência de calor latente, pela evaporação da água.



Esquema operacional



Torres de Resfriamento

Objetivo

As torres de resfriamento são equipamentos utilizados para o resfriamento de água industrial, como aquela proveniente de condensadores de usinas de geração de potência, ou de instalações de refrigeração, trocadores de calor, etc. A água aquecida é gotejada na parte superior da torre e desce lentamente através de "enchimentos" de diferentes tipos, em contracorrente com uma corrente de ar frio (normalmente à temperatura ambiente). No contato direto das correntes de água e ar ocorre a evaporação da água, principal fenômeno que produz seu resfriamento.

Torres de Resfriamento

Aplicação

Usinas, grandes sistemas de condicionamento de ar e algumas indústrias **geram grandes quantidades de calor liberado**, que quase sempre é rejeitado para a água de resfriamento de lagos ou rios próximos.

Em alguns casos, porém, o fornecimento de água de resfriamento é limitado ou a **poluição térmica** é uma preocupação séria.

Em tais casos, o calor liberado deve ser rejeitado para a atmosfera, com a água de resfriamento circulando novamente e servindo como meio de transporte para a transferência de calor entre a fonte e o sumidouro (a atmosfera). Uma forma de realizar isso é usar as **torres de resfriamento úmidas**.

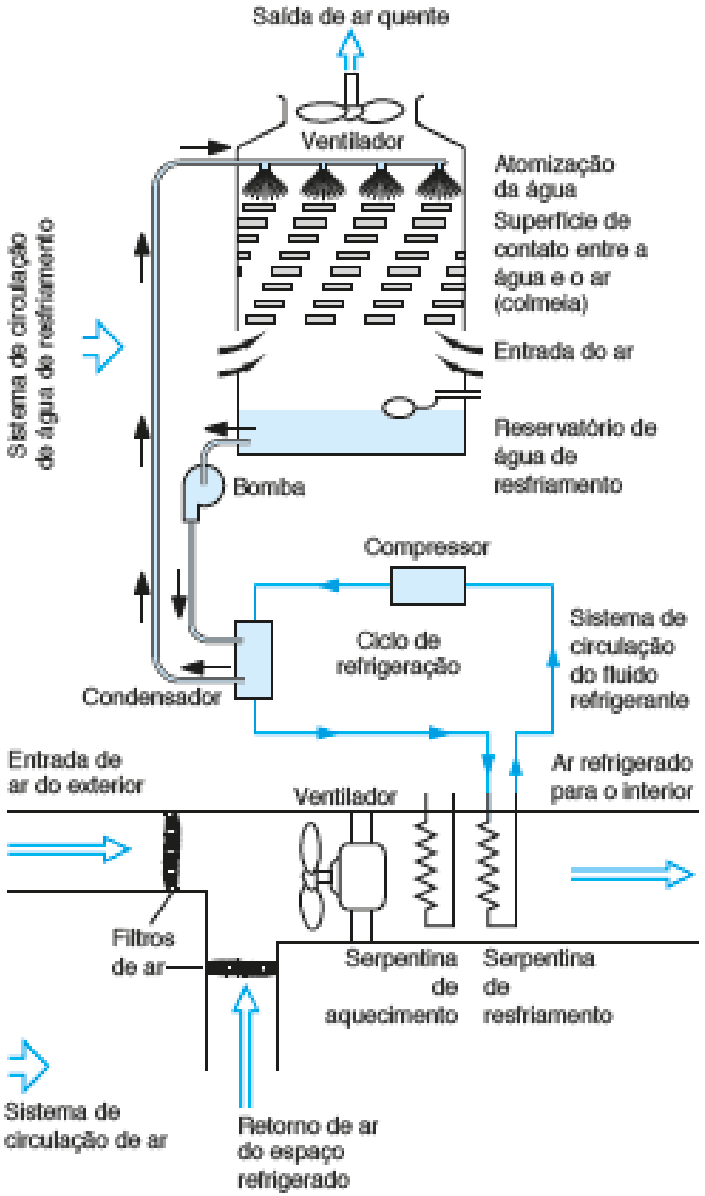


Figura 11.14
Uma torre de resfriamento para uso em sistema de ar-condicionado de edifícios.

Torres de Resfriamento

Torres de Resfriamento

Torres de Resfriamento

Torres de Resfriamento

Conceito

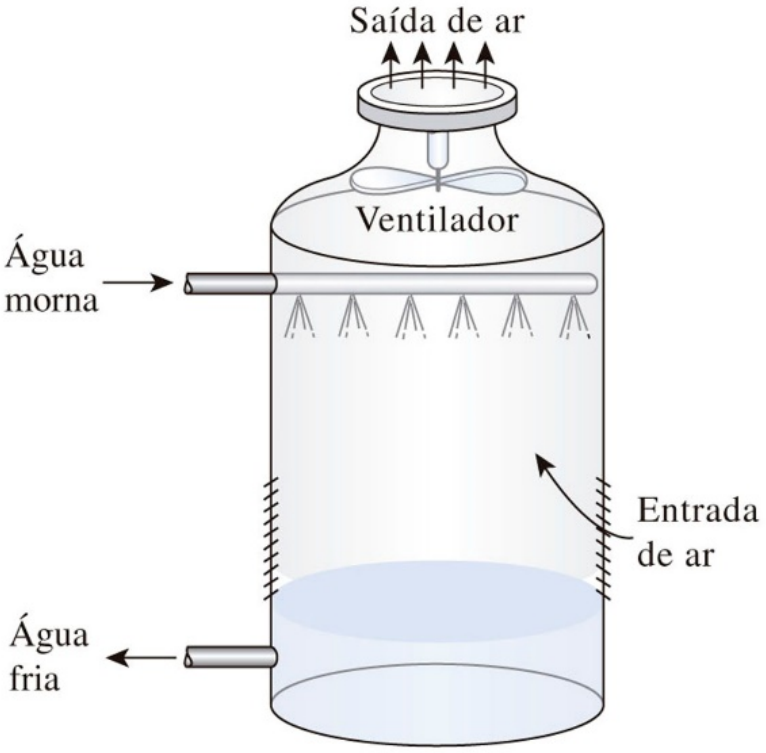
O ar entra na torre pela parte inferior e sai pela parte superior.

A água aquecida do condensador é bombeada para a parte superior da torre e pulverizada nessa corrente de ar.

A finalidade da pulverização da água é expor uma área de superfície grande de água no ar.

As gotas de água caem por gravidade e uma fração pequena da água (geralmente uma pequena porcentagem) evapora e resfria a água restante.

A temperatura e o conteúdo de umidade do ar aumentam durante esse processo.



Torres de Resfriamento

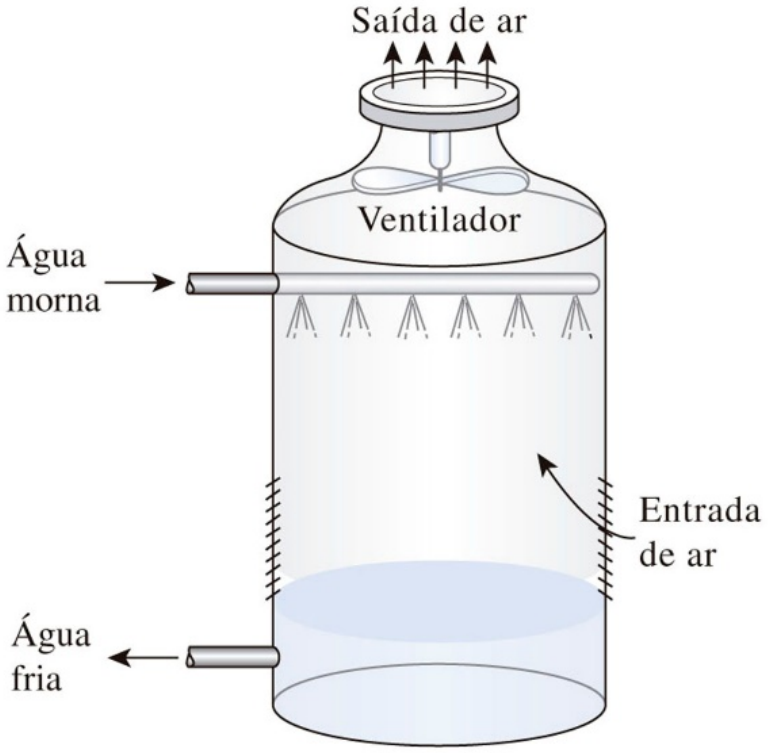
Conceito

A água resfriada fica na parte inferior da torre e é bombeada de volta ao condensador para absorver calor rejeitado adicional.

A água de reposição deve ser adicionada ao ciclo para substituir a água perdida pela evaporação e retirada do ar.

Para minimizar a água transportada pelo ar, **filtros** são instalados nas torres de resfriamento **na seção de pulverização**.

A circulação do ar na torre é fornecida por um **ventilador**, e portanto é classificada como uma torre de resfriamento com corrente de ar forçada.



Torres de Resfriamento

Tipos

Há dois modos principais para se caracterizar uma torre de resfriamento, conforme o tipo de tiragem ou conforme as direções dos fluxos de ar e água.

Conforme o tipo de tiragem:

1. Tiragem natural;
2. Tiragem mecânica, que pode ser induzida ou forçada.

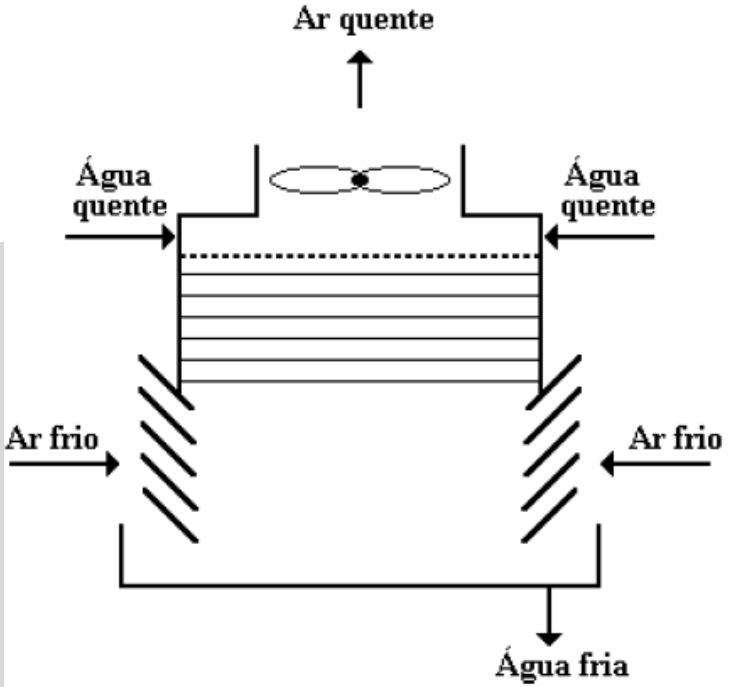
Conforme as direções dos fluxos de ar e água:

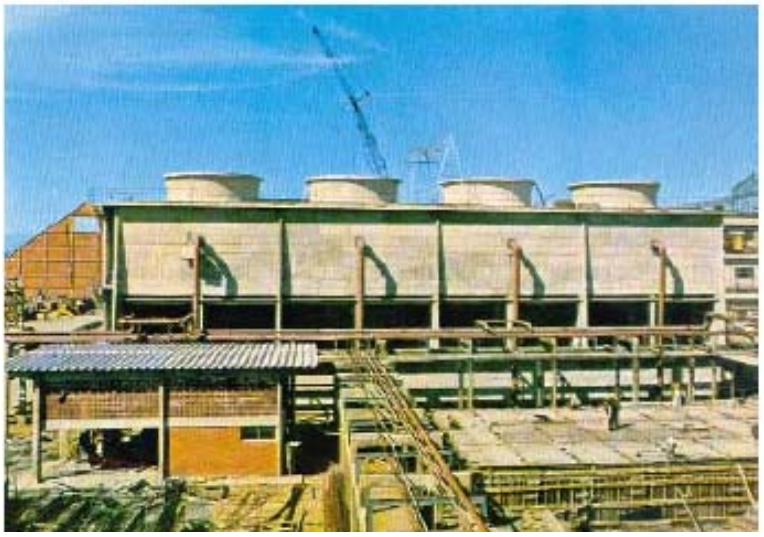
1. Contra corrente;
2. Correntes cruzadas.

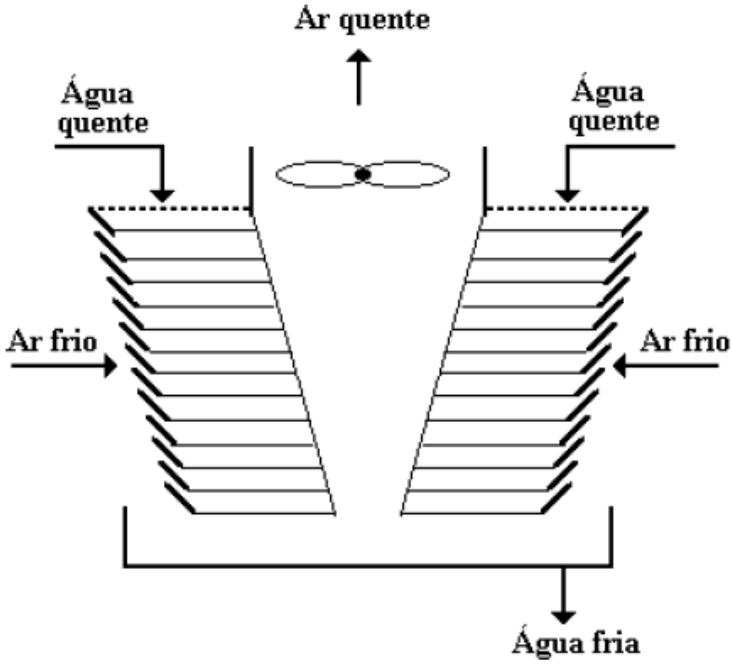
Nota: Nas torres de tiragem natural, a movimentação do ar é proporcionada pela diferença das densidades do ar úmido no interior da torre e do ar ambiente. Como este efeito é pouco acentuado em regiões onde as temperaturas ambiente são mais elevadas, as torres de tiragem natural são raramente utilizadas no Brasil.

Torres de Resfriamento (Tipos)

Arranjo geral de uma torre de contra corrente





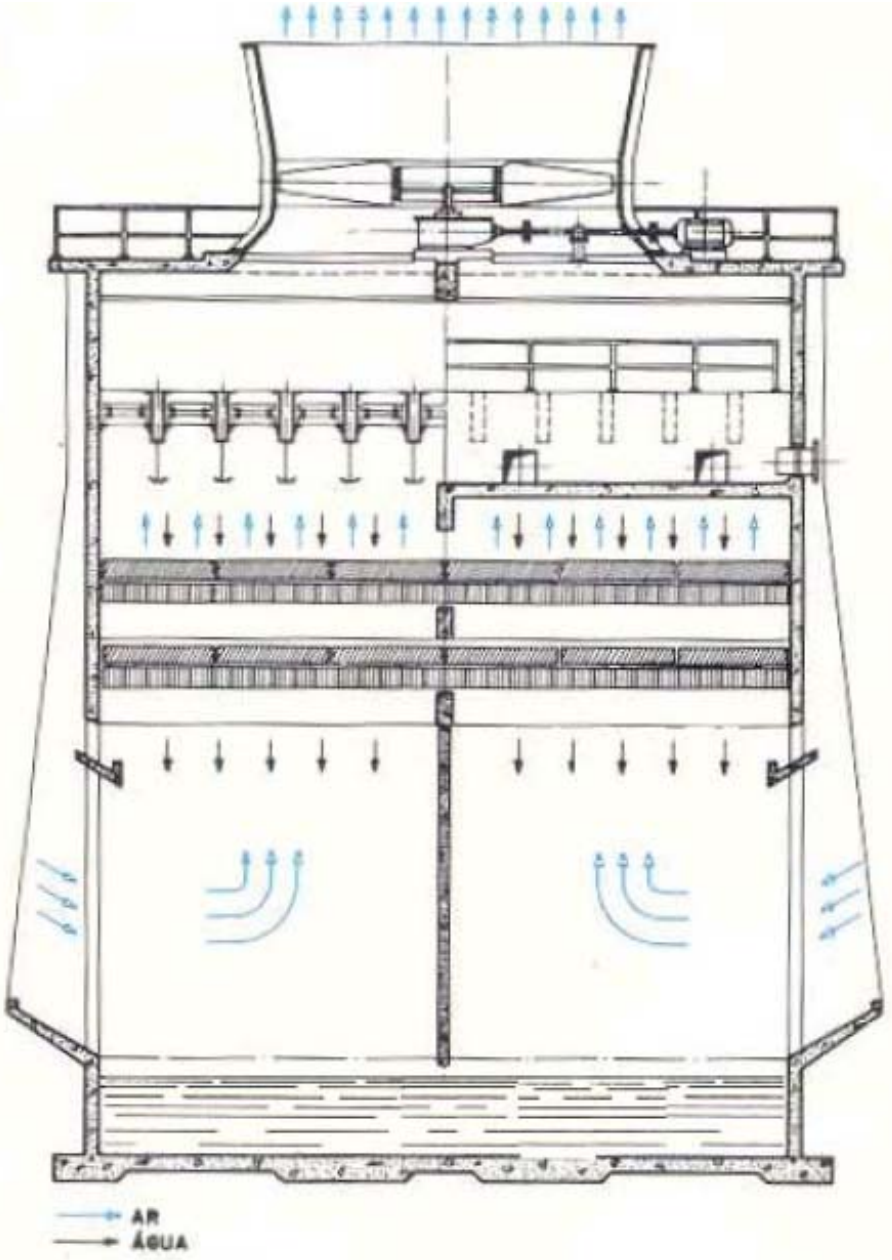


Arranjo geral de uma torre de Correntes cruzadas

Torres de Resfriamento
Tipo Contra-corrente

A torre de contra corrente é dividida em células independentes, cada uma com seu ventilador, permitindo maior flexibilidade operacional. Os distribuidores de água quente ficam um pouco acima do **enchimento** e dos **eliminadores de gotas**, ocupando toda a área transversal da torre.

Entre os distribuidores e a plataforma onde estão os ventiladores existe um espaço vazio, denominado câmara de plenum. A principal finalidade deste espaço vazio é equalizar a pressão de sucção dos ventiladores por toda a área do enchimento, garantindo um fluxo de ar uniforme na torre. A água é coletada e acumulada na bacia de água fria, na base da torre

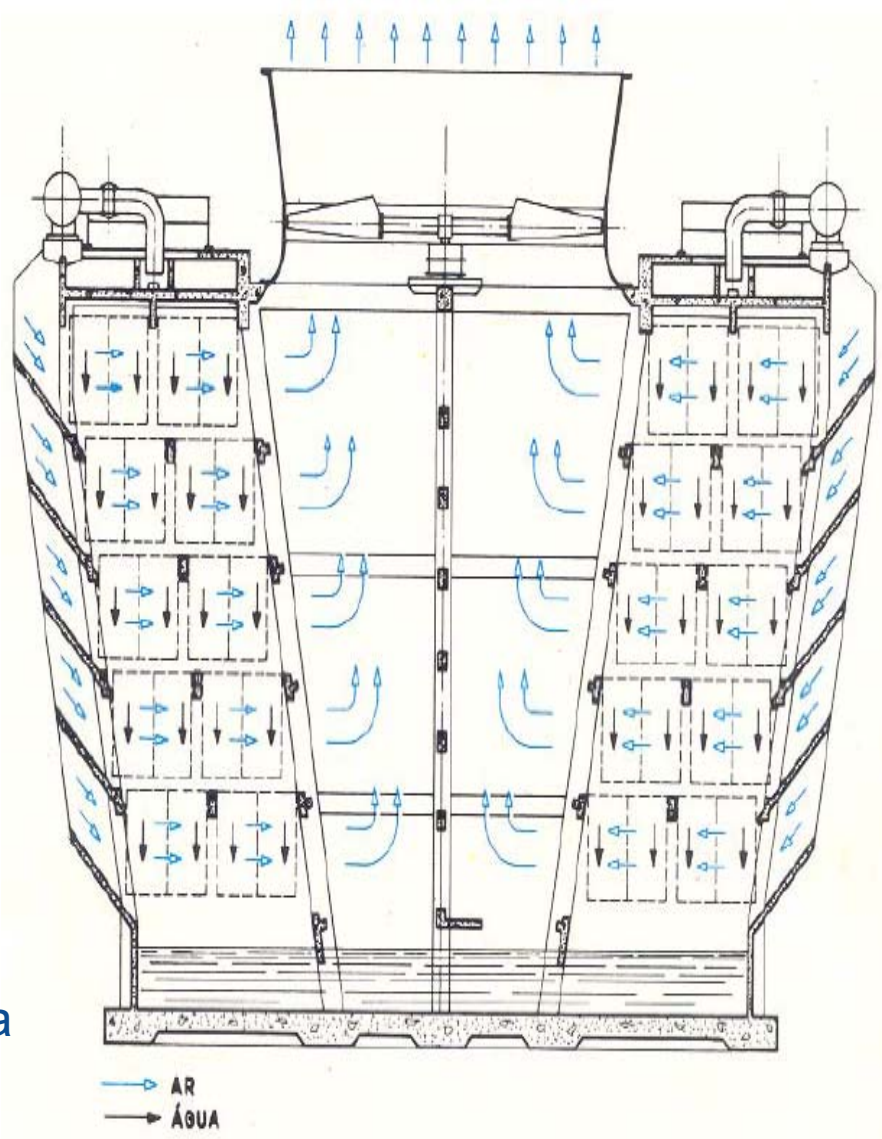


Torres de Resfriamento

Tipo Corrente Cruzada

A torre de correntes cruzadas são de maior porte e são divididas em células independentes, cada uma com seu ventilador, para maior flexibilidade operacional. A parte central da plataforma é ocupada pelos ventiladores. As bacias de distribuição de água quente, com orifícios, ficam à esquerda e à direita dos ventiladores, na altura da plataforma e um pouco acima do enchimento.

Os eliminadores de gotas, ficam ao longo de toda a superfície do enchimento, do lado da saída de ar. O espaço vazio, na parte central, entre os dois lados do enchimento, é a câmara de *plenum* que, como nas torres de contra corrente, serve para equalizar a pressão de sucção dos ventiladores no enchimento. A água é coletada e acumulada na bacia de água fria, na base da torre, de onde é bombeada para os pontos de utilização.



Torres de Resfriamento
Modo Tiragem Natural

Outro tipo conhecido de torre de resfriamento é a torre de resfriamento com corrente de ar natural, a qual se parece com uma grande chaminé e funciona como uma chaminé comum.

O ar da torre tem um conteúdo alto de vapor de água e, portanto, é mais leve do que o ar exterior. Consequentemente, o ar leve da torre sobe, e o ar externo mais pesado preenche o espaço vazio, criando um fluxo de ar da parte inferior da torre para cima.

As torres de resfriamento com corrente natural não exigem nenhuma potência externa para induzir o ar, mas sua construção é muito mais cara do que a das torres com circulação forçada.

FIGURA 14–32 Três torres de resfriamento com corrente de ar natural em uma estrada.

© Copyright 1997 IMS Communications/Ltd/ Capstone Design. Todos os direitos reservados.

Torres de Resfriamento
Modo Tiragem Natural

As torres de resfriamento com corrente de ar natural têm perfil hiperbólico, como mostra a figura ao lado, e algumas têm mais de 100 m de altura.

Por que o perfil hiperbólico?

O perfil hiperbólico é usado por questões estruturais, ou seja, para dar maior força estrutural, e não por razões termodinâmicas.

FIGURA 14–32 Três torres de resfriamento com corrente de ar natural em uma estrada.

© *Copyright 1997 IMS Communications/Ltd/ Capstone Design. Todos os direitos reservados.*

Torres de Resfriamento
Conceito análogo (Lagoa de Resfriamento)

A ideia de uma torre de resfriamento começou com a lagoa de resfriamento de água por pulverização, na qual água é pulverizada no ar e resfriada pelo ar à medida que cai no lago, como mostrado na figura ao lado.

Algumas lagoas ainda são utilizadas atualmente.

FIGURA 14–33 Uma lagoa de resfriamento de água por pulverização.

Problema: as lagoas exigem de **25 a 50 vezes a área de uma torre de resfriamento**, além disso a perda de água em virtude da corrente de ar é alta, e elas não têm proteção contra poeira e sujeira.

Poderíamos **despejar** o calor rejeitado em um lago artificial, mas a transferência de calor seria muito lenta, precisaríamos de cerca de **20 vezes a área de uma lagoa de resfriamento de água por pulverização** para atingir o mesmo resfriamento.

Torres de Resfriamento

Componentes de uma Torre Resfriamento

ventilador

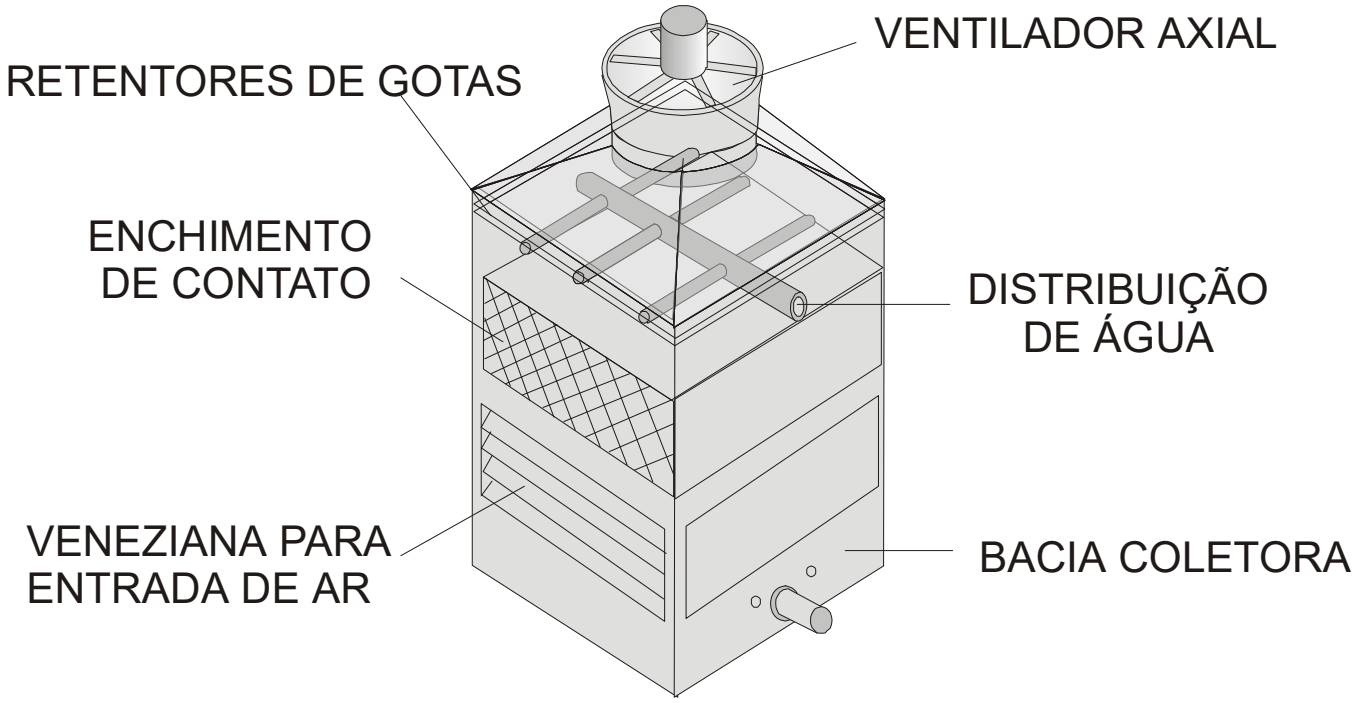
motor do ventilador

borrifador de água

enchimento

filtro

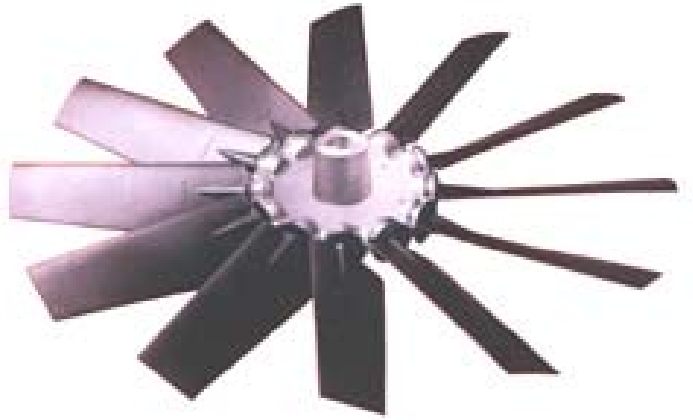
tanque de água



Torres de Resfriamento

Ventilador

Os ventiladores movimentam o ar através da torre. Quando a tiragem é induzida, os ventiladores estão instalados na horizontal, na parte superior da torre. Quando a tiragem é forçada, os ventiladores estão instalados na vertical e a localização é na base da torre, um pouco acima da bacia de água fria.

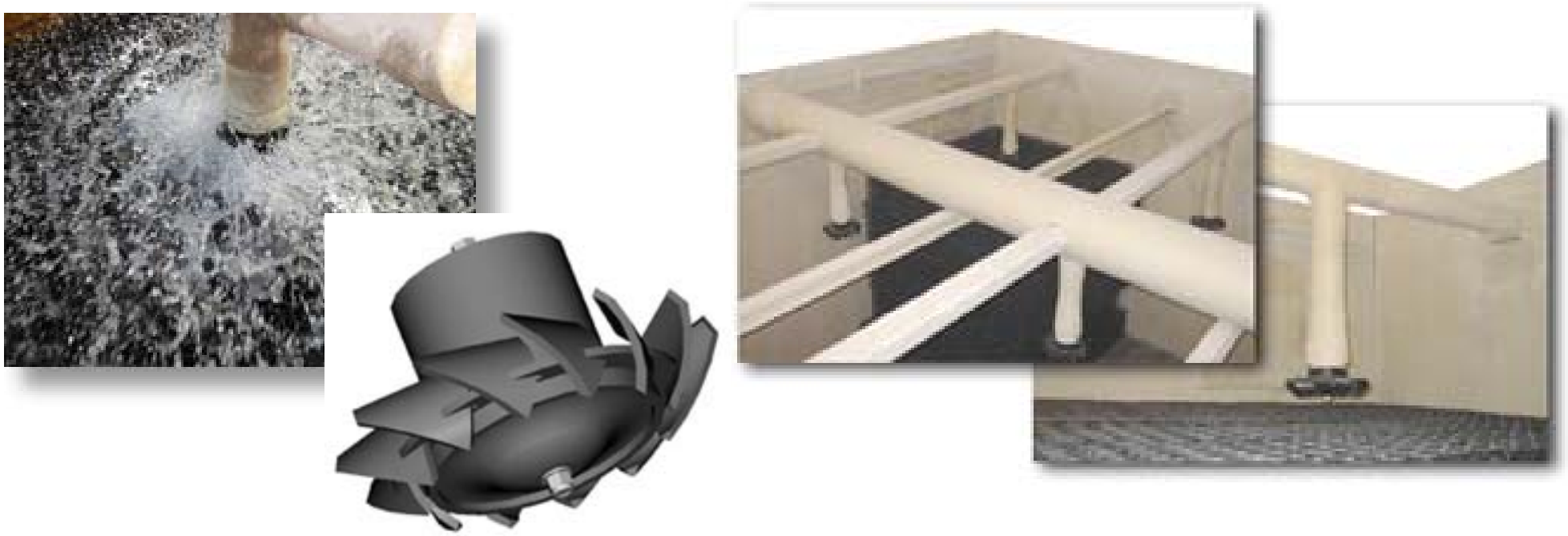


Torres de Resfriamento

Borrifador de água

Nas torres de contra corrente podem ser empregados distribuidores por gravidade, ou de borrifo. Nota-se que, embora a distribuição por borrifos seja mais eficiente que a por gravidade, tem a desvantagem de exigir maior demanda de potência de bombeamento, devido à perda de carga nos bicos.

Nas torres de correntes cruzadas, a distribuição é feita pelas bacias de água quente. A válvula serve para ajustar a vazão de água, distribuindo-a igualmente entre as células.



Torres de Resfriamento

Enchimento

A função do enchimento é promover o contato entre o ar e a água, facilitando a transferência de massa e de calor. Dependendo do modo como é feito este contato, os enchimentos são classificados como **formadores de gotas** (respingamento) ou de **película**.

Entre os principais requisitos para um enchimento destacam-se:

1. Facilidade para instalação;
2. Boa eficiência na promoção do contato entre o ar e a água;
3. Baixa resistência ao fluxo de ar;
4. Durabilidade e resistência à água e às possíveis contaminações.

Torres de Resfriamento

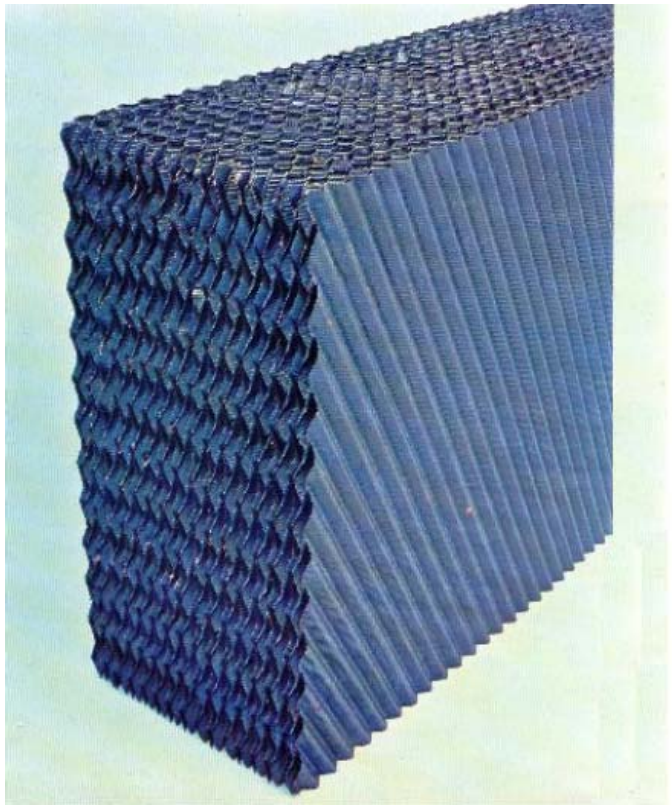
Enchimento de Película

Este tipo de enchimento, mais usado em torres de contra corrente, forma uma película de água em sua superfície, aumentando a área de contato com o ar.

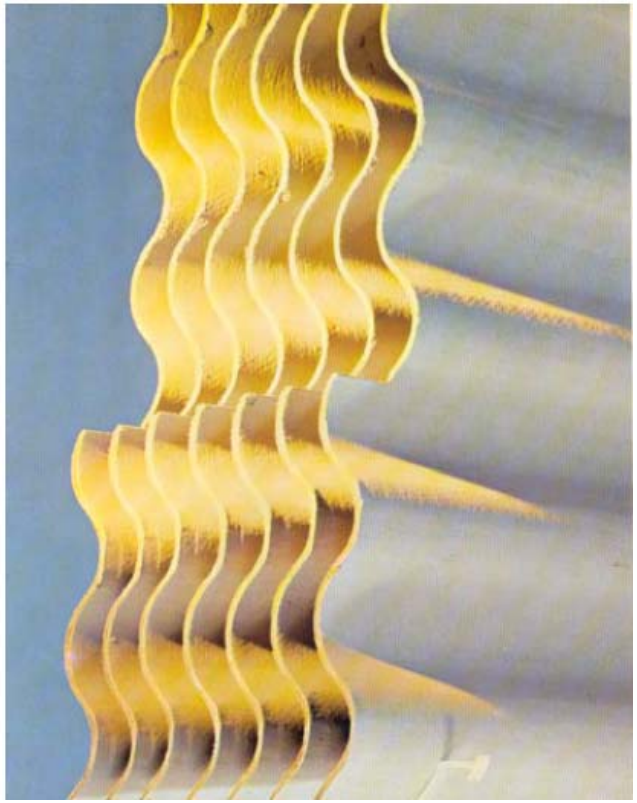
Atualmente, nas torres de contra corrente, são utilizados enchimentos tipo colmeia, de alta eficiência e ocupando pouco espaço, permitindo construir torres com menor altura total. Os enchimentos **tipo colmeia**, são bastante compactos. Por este motivo, é importante terem uma configuração que evite o acúmulo de depósitos, causadores de obstruções à passagem do ar e da água.

Nas torres de correntes cruzadas, podem ser utilizados enchimentos de película, formados por placas paralelas, lisas ou corrugadas, dispostas verticalmente, na mesma direção que o fluxo de ar (**tipo placas corrugadas**) .

Torres de Resfriamento
Enchimento de Película



Enchimento tipo colmeia



Enchimento tipo placas corrugadas

Torres de Resfriamento

Enchimento de Respingamento

Neste tipo de enchimento, mais usado em torres de correntes cruzadas, a área de contato se deve à formação de gotículas.

O formato em “L” dos perfis e os orifícios, aumentam a eficiência do enchimento. Nota-se que, como este enchimento é apropriado para torres de correntes cruzadas, o arranjo minimiza as perdas de carga do fluxo horizontal de ar que o atravessa.

Enchimento tipo respingamento em grade perfil rígido

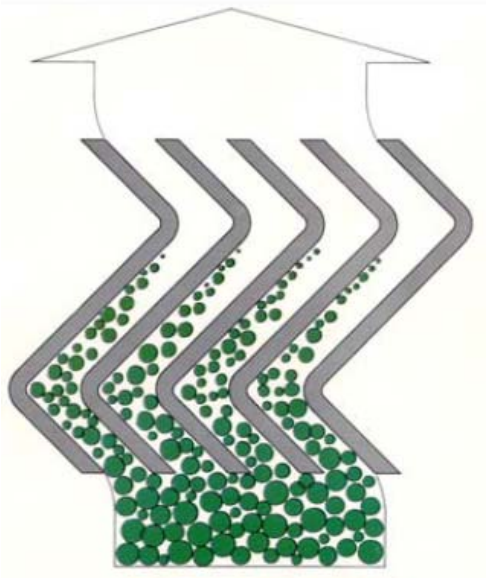
Torres de Resfriamento
Enchimento de Respingamento

Enchimento tipo respingo em grade

Torres de Resfriamento

Eliminadores de gotas

Tanto nas torres de contra corrente quanto nas de correntes cruzadas, o fluxo de ar que atravessa o enchimento arrasta água na forma de gotículas. Este arraste, além de constituir uma perda adicional de água, carreia também uma parcela dos produtos químicos utilizados no condicionamento da água circulante. Tem ainda o inconveniente de causar uma chuva nas imediações da torre. Para minimizar o arraste são utilizados, justapostos ao enchimento e do lado da saída do ar, eliminares de gotas, que limitam estas perdas a valores entre 0,001% e 0,1% da água circulante, sendo usual perdas em torno de 0,05%.

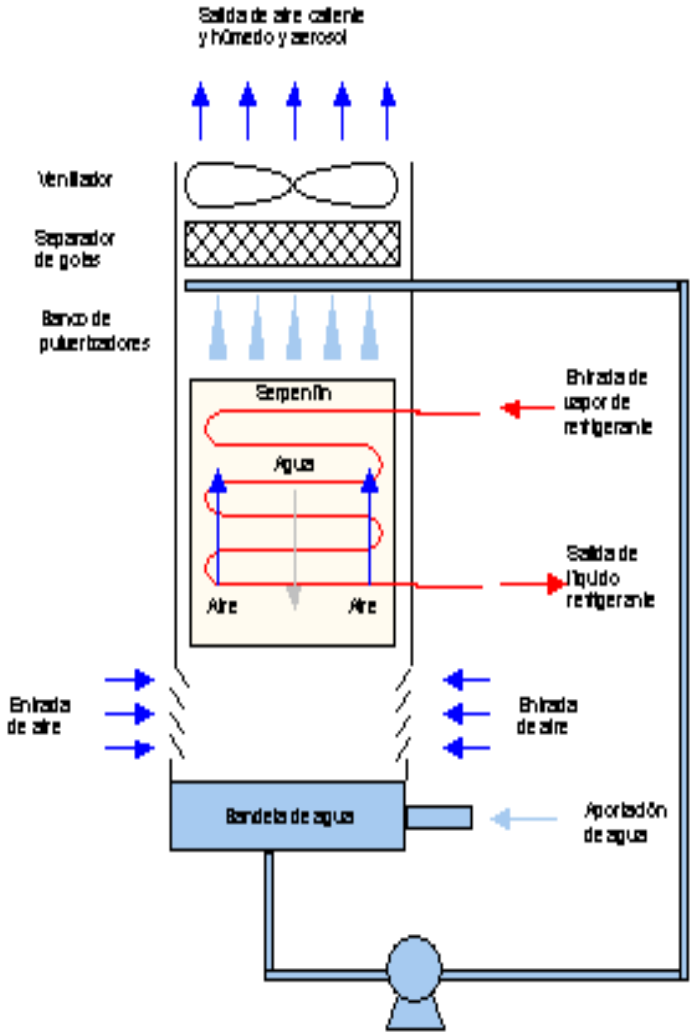


Eliminador de gota

Condensadores Evaporativos

Uma instalação com condensador evaporativo dispensa condensador normal. É uma composição de um condensador e torre numa só peça.

É constituído por uma carcaça, serpentina de condensação, ventiladores, motor dos ventiladores, bomba d'água e motor, distribuidor de água e borrifadores, bandeja de água, torneira de bóia, abertura de entrada e saída de ar, entrada de gás quente, receptor de refrigerante, saída de refrigerante líquido e dreno.

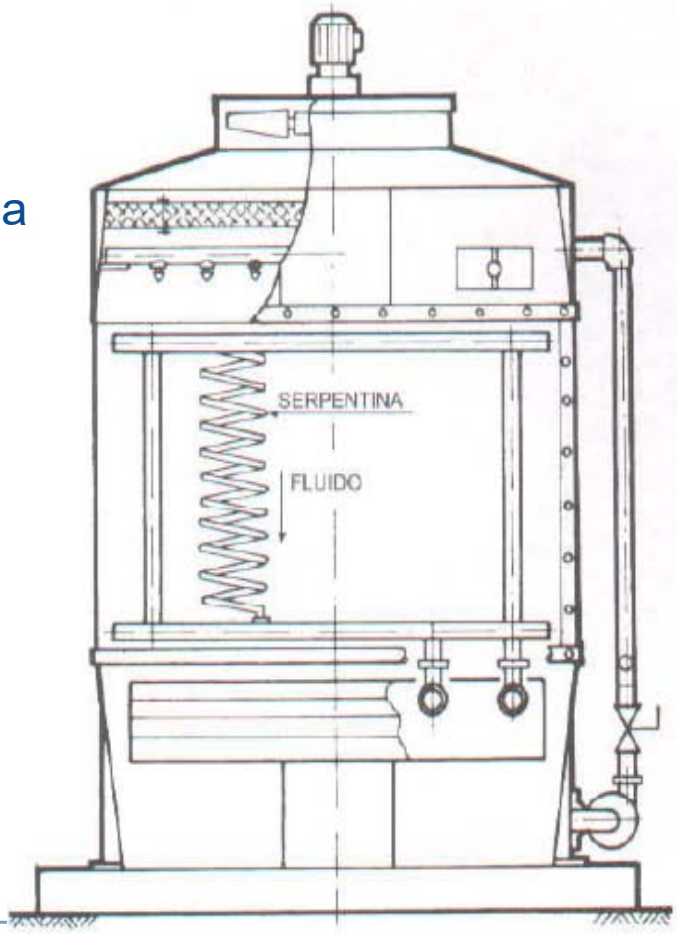


Obs. A capacidade do condensador evaporativo é função da temperatura de bulbo úmido do ambiente enquanto que a capacidade de um condensador a ar é função da temperatura de bulbo seco.

Condensadores Evaporativos

Economia de energia:
Condensadores Evaporativos oferecem economia de energia quando comparados com outros processos nas seguintes proporções:
Condensador x Resfriador a ar: 30% de economia;
Condensador x Torre de Resfriamento/trocador de calor: 15% de economia.

Princípio de funcionamento:
Fluído a ser resfriado (gás a ser condensado) circula internamente pela serpentina de troca térmica. A água circula pelo lado externo. O ar é aspirado em contra corrente resfriando a água por evaporação, que resfria os tubos.



Baixo custo de operação:
• custo de implantação de um condensador é menor do que outros tipos de equipamentos
• condensador evaporativo já incorpora bombas, tubos, válvulas e serpentinas de troca térmica.
• "É de fácil manutenção" pois a carcaça é de fiberglass desmontável e de fácil acesso aos internos.

Exemplo
Torre de Resfriamento

Uma torre de resfriamento de uma central de potência resfria água líquida a 45°C. A torre é alimentada com ar a 19,5°C, ϕ=30% e 100kPa e na seção de descarga de mistura ar-vapor d'água a temperatura é 25°C e a umidade relativa é igual a 70%. O líquido volta para o condensador da central a 30°C. Sabendo que a taxa de variação de entalpia da água líquida na torre é igual a 1MW, determine a vazão em massa de ar seco na torre e a quantidade de água evaporada no equipamento.

Continuity Eq. for water in air: $w_{in} + \dot{m}_{evap}/\dot{m}_a = w_{ex}$

Energy Eq.: $\dot{m}_a \tilde{h}_{in} + \dot{m}_1 h_{45} = \dot{m}_a \tilde{h}_{ex} + (\dot{m}_1 - \dot{m}_{evap}) h_{30}$

Inlet: 19.5°C, 30% rel hum => $w_{in} = 0.0041$, $\tilde{h}_{in} = 50$

Exit : 25°C, 70% rel hum => $w_{ex} = 0.0138$, $\tilde{h}_{ex} = 80$

Take the two water flow difference to mean the 1 MW

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 h_{45} - (\dot{m}_1 - \dot{m}_{evap}) h_{30} = 1 \text{ MW}$$

$\dot{m}_a(\tilde{h}_{ex} - \tilde{h}_{in}) = \dot{m}_a(80 - 50) = 1000$ kW => $\dot{m}_a = \mathbf{33.33\ kg/s}$

$\dot{m}_{evap} = (w_{ex} - w_{in})\, \dot{m}_a = 0.0097 \times 33.33 = \mathbf{0.323\ kg/s}$

Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar
Aquecimento com Umidificação (análise computacional)

A água de resfriamento sai de uma planta de potência a 38°C e entra em uma torre de resfriamento com um fluxo mássico de $4{,}5x10^7$kg/h. A corrente de água resfriada retorna da torre de resfriamento para o condensador com a temperature de 30°C com a mesma vazão. A água de reposição (make-up) é adicionanada em uma corrente separada a 20°C. O ar atmosférico entra na torre de resfriamento a 25°C e 35%UR. O ar úmido sai da torre a 35°C e 90%UR. Determine:

1. A vazão mássica de ar seco e água de reposição (make-up) do processo em kg/h

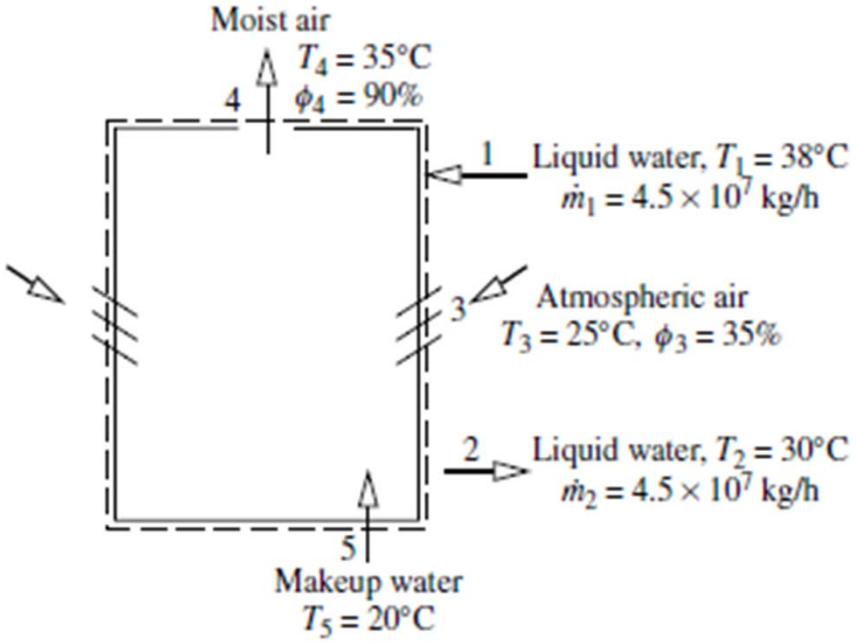
Hipóteses:

1. A torre de resfriamento opera em regime permanente
2. A taxa de transferência de calor com a vizinhança e a potência do ventilador da torre podem ser desprezadas assim como as mudanças de energia cinética e potencial; $W_{cv}=0$
3. A pressão se mantém constante em 1atm

Exemplo

Processos Básicos Condicionamento de Ar

Aquecimento com Umidificação (análise computacional)



Balanço de massa:

$$\dot{m}_{a3} = \dot{m}_{a4}$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_5 + \dot{m}_{v3} = \dot{m}_2 + \dot{m}_{v4}$$

→como $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ → então $\dot{m}_5 = \dot{m}_{v4} - \dot{m}_{v3}$

$$\begin{cases} \dot{m}_{v3} = w_3\, \dot{m}_a \\ \dot{m}_{v4} = w_4\, \dot{m}_a \end{cases}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_a\,(w_4 - w_3)$$

Balanço de Energia:

$$0 = \dot{m}_1 h_{w1} + (\dot{m}_a h_{a3} + \dot{m}_{v3} h_{v3}) + \dot{m}_5 h_{w5} - \dot{m}_2 h_{w2} - (\dot{m}_a h_{a4} + \dot{m}_{v4} h_{v4})$$

$$\boldsymbol{m_a = 2,03 \times 10^7 kg/h} \quad // \quad \boldsymbol{m_5 = 5,24 \times 10^5 kg/h}$$

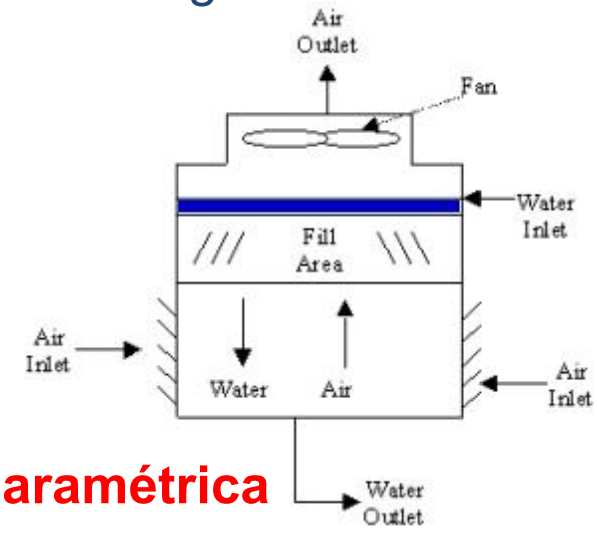
Proposta: Solução computacional e análise paramétrica

Exemplo
Torre de Resfriamento
Ciclo de Refrigeração

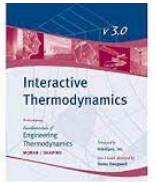
Um torre de resfriamento é utilizada para resfriar a água utilizada no condensador de uma central de potência de grande porte. Esse processo é similar ao processo de resfriamento evaporativo adiabático. Assim, uma parte da água será perdida para a atmosfera e deverá ser resposta (*água de make-up*). Pela parte superior da torre entram 1000kg/s de água a 32°C (condensador) e a água resfriada deixa a torre pela parte inferior a 20°C. A mistura ar-vapor d'água entra por baixo da torre a 100kPa com uma temperatura de bulbo seco igual a 18°C e bulbo úmido igual a 10°C. A mistura ar-vapor deixa a torre a 95kPa, 30°C e ϕ=85%.

Determine:

1. a vazão em massa de ar seco necessária
2. a parcela de água que evapora e é perdida

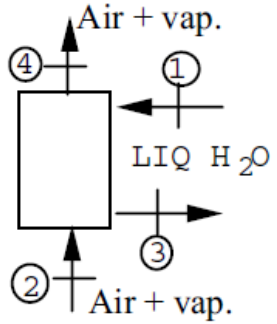


Proposta: Solução computacional e análise paramétrica



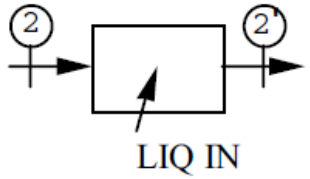
Exemplo
Torre de Resfriamento
Ciclo de Refrigeração

$P_4 = 95$ kPa
$T_4 = 30\ ^oC$
$\phi_4 = 0.85$
$P_2 = 100$ kPa
$T_2 = 18\ ^oC$
$WBT_2 = 10\ ^oC$



$T_1 = 32\ ^oC$
$\dot{m}_1 = 1000$ kg/s
$T_3 = 20\ ^oC$

18 °C



$T_{2'} = 10\ ^oC, \quad \phi_{2'} = 1.0$

$$w_{2'} = 0.622 \times \frac{1.2276}{100\text{-}1.2276} = 0.00773$$

$$w_2 = \frac{(h_{a2'}\text{-}h_{a2}) + w_{2'}\, h_{FG2'}}{h_{v2} - h_{F2'}} = \frac{1.0035(10\text{-}18) + 0.00773 \times 2477.7}{2534.4 - 42.0} = 0.00446$$

$$P_{v4} = 0.85 \times 4.246 = 3.609, \quad w_4 = 0.622 \times \frac{3.609}{95\text{-}3.609} = 0.02456$$

Cons. mass: $\dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a4} = \dot{m}_a, \quad \dot{m}_1 + \dot{m}_{v2} = \dot{m}_3 + \dot{m}_{v4}$

or $\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_a(w_2\text{-}w_4)$ and set $r = \dot{m}_1/\dot{m}_a$

1st law: $\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2} = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_a h_{a4} + \dot{m}_{v4} h_{v4}$

or $r\, h_1 + (h_{a2}\text{-}h_{a4}) + w_2 h_{v2} = (r + w_2 - w_4) h_3 + w_4 h_{v4}$

$r(h_1\text{-}h_3) = h_{a4} - h_{a2} + w_4 h_{v4} - w_2 h_{v2} - (w_4\text{-}w_2) h_3$

$r(134.15\text{-}83.96) = 1.004(30\text{-}18) + 0.024\ 56 \times 2556.3$
$- 0.004\ 46 \times 2534.4 - 0.0201 \times 83.96$

$r = \dot{m}_1/\dot{m}_a = 1.232 \quad \rightarrow \quad \dot{m}_a = \mathbf{811.7\ kg/s}$

$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_a(w_2\text{-}w_4) = 1000 - 811.7 \times 0.0201 = 983.7$

$\Delta\dot{m}/\dot{m}_1 = \mathbf{0.0163}$

Este problema ilustra a vazão necessária a ar necessária para o projeto do ventilador da torre de Resfriamento e a bomba para a vazão de água de make-up (consumo da torre + projeto da casa de bombas)

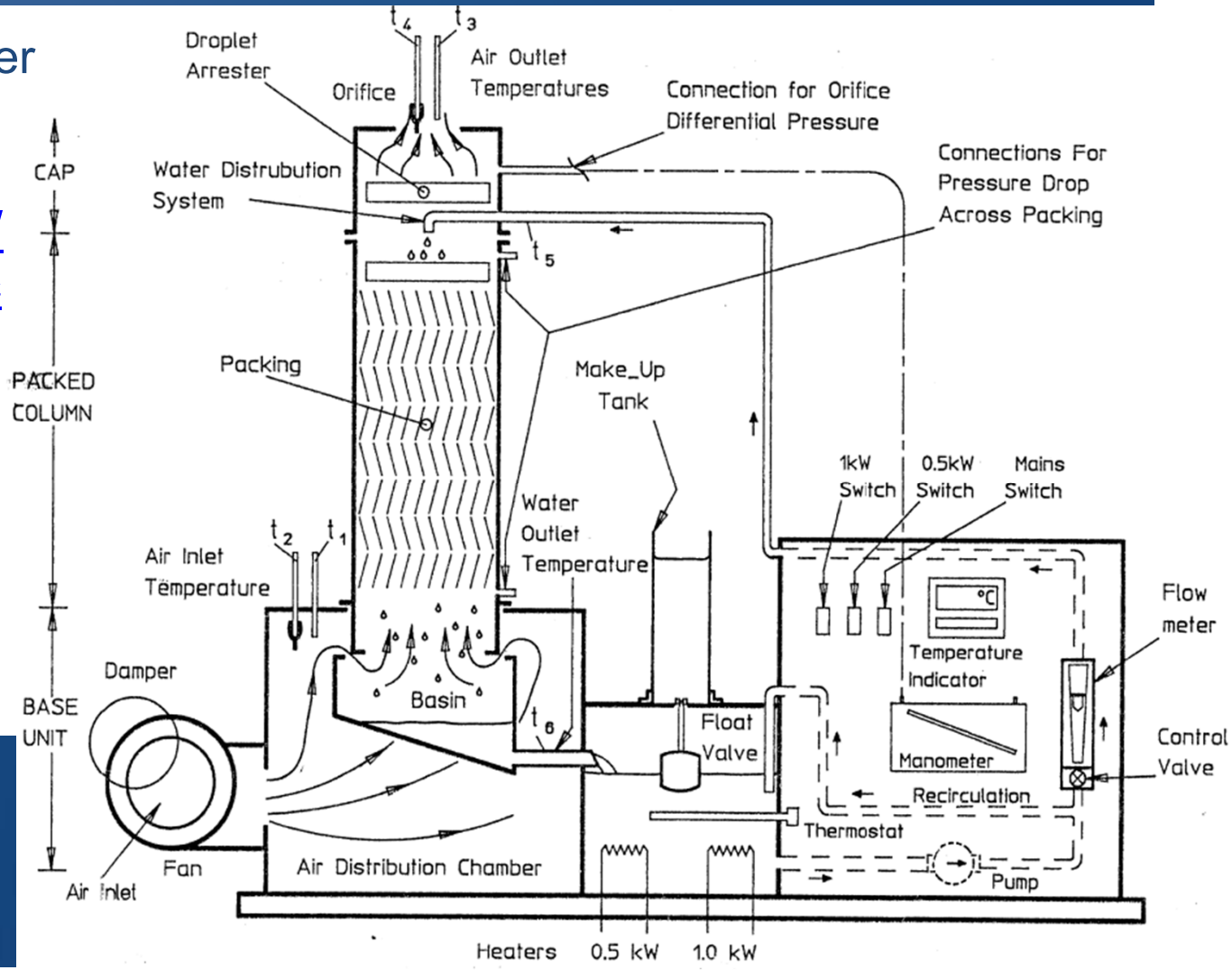
Laboratório
Atividade Experimental
Hilton Water Cooling Tower

Hilton Water Cooling Tower

https://www.youtube.com/watch?v=mWHOkXP0fVc

VEJA "Roteiro Prático de Aprendizagem"

(Atividade experimental na bancada didática de Torre de Resfriamento)



Importante!
Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

Exercícios Van Wylen - 6ed								
Capítulo 12								
Comp. e Prop.das Misturas	12.21	12.23	12.25	12.26	12.27	12.28	12.29	12.30
Processos Simples	12.31	12.34	12.35	12.37	12.43	12.50	12.57	
Misturas-Ar-Vapor D'água	12.75	12.77	12.79	12.80	12.81	12.90	12.92	12.95
Processos Combinados	12.100	12.101	12.102	12.103	12.104	12.110	12.113	

Capítulo 5 – Conforto Térmico

- Introdução
- Balanço Energético do Corpo Humano
- Dados de Engenharia e Medições
- Parâmetros Ambientais
- Índices Ambientais
- Previsão do Conforto Térmico
- Parâmetros de Projeto

Importante!

Verificar Material de Apoio:
Notas de Aula (em anexo)

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Obter o conforto é algo que exige uma luta constante contra fatores que causam desconforto, como **temperaturas altas ou baixas** e **umidade alta ou baixa**.

Nosso dever como engenheiros é ajudar as pessoas a se sentirem confortáveis (além do que, isso nos mantêm empregados).

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Não foi preciso muito tempo para que as pessoas percebessem que não poderiam mudar o clima de uma área. Tudo o que elas podem fazer é alterá-lo em um espaço confinado, como uma casa ou um local de trabalho;

No passado, isso era parcialmente realizado com fogo e sistemas simples de aquecimento interno. **Hoje modernos sistemas de condicionamento de ar** podem **aquecer, resfriar, umidificar, desumidificar, limpar e até mesmo desodorizar o ar**, em outras palavras, **condicionar** o ar de acordo com o desejo das pessoas.

Os sistemas de condicionamento de ar foram criados para satisfazer as necessidades do corpo humano, portanto é essencial entendermos os **aspectos termodinâmicos do corpo**.

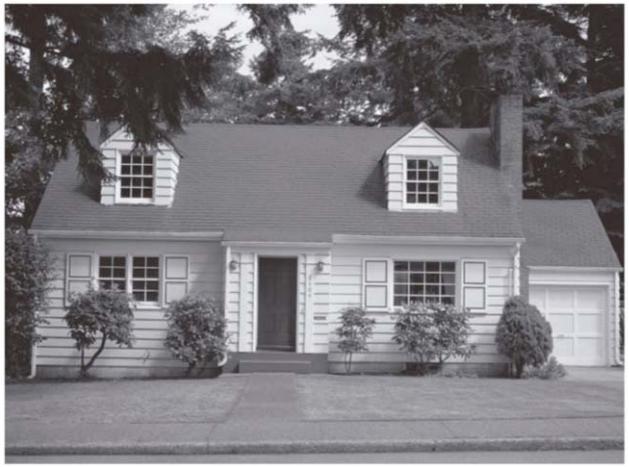


FIGURA 14–17 Não podemos alterar as condições climáticas, mas podemos alterar o clima de um espaço confinado pelo condicionamento de ar.

© Vol. 77/PhotoDisc/Getty RF.

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Modelagem termodinâmica do corpo humano

O corpo humano pode ser visto como uma máquina de calor cuja entrada de energia é o alimento.

Assim como qualquer outra máquina térmica, o corpo humano libera calor que deve ser rejeitado para o ambiente para que o corpo continue operando.

A taxa de geração de calor depende do nível da atividade.

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Taxas típicas de geração de calor:

Homem adulto:

- ~ 87 W quando está dormindo
- ~ 115 W quando está em repouso ou trabalhando no escritório
- ~ 230 W quando está jogando boliche
- ~ 440 W quando está realizando trabalho físico pesado

- Os números correspondentes para uma mulher adulta são cerca de 15% menores

  (a diferença acima deve-se ao tamanho do corpo, à temperatura do corpo ou a ambos?)

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Temperatura corporal profunda de uma pessoa saudável: ~37°C

FIGURA 14–18 Um corpo se sente confortável quando pode dissipar livremente seu calor rejeitado e nada mais.

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

A transferência de calor é proporcional à diferença de temperatura.

Por que as pessoas, em geral, sentem desconforto em locais frios, do ponto de vista termodinâmico?

Em ambientes frios, um corpo perde mais calor do que normalmente gera, o que resulta em uma sensação de desconforto.

Por que a pessoa fica pálida nessas situações?

O corpo tenta minimizar o déficit de energia cortando a circulação sanguínea próxima à pele (causando uma aparência pálida).

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Qual o resultado obtido ao cortar a circulação sanguínea?

Isso diminui a temperatura da pele (que é ~ 34°C para uma pessoa média) e, consequentemente.

Qual o efeito energético?

Diminuição da taxa de transferência de calor.

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Por outro lado, uma temperatura de pele baixa causa desconforto. As mãos, por exemplo, ficam doloridamente frias quando a temperatura da pele atinge 10°C.

Como reduzir a perda de calor do corpo?

Podemos reduzir a perda de calor do corpo colocando barreiras (roupas adicionais, cobertores, etc.) ou aumentando a taxa de geração de calor dentro do corpo por meio de exercícios.

Por exemplo, o nível de conforto de uma pessoa em repouso vestida com roupas quentes de inverno em uma sala a 10°C é aproximadamente igual ao nível de conforto de uma pessoa com as mesmas características que realiza trabalho moderado em uma sala a cerca de -23°C.

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Ou então, podemos simplesmente nos encolher para reduzir a área da superfície de troca de calor.

Em ambientes quentes temos o problema oposto – parece que não dissipamos calor suficiente de nossos corpos. Portanto, usamos roupas leves para facilitar a fuga do calor de nossos corpos, e reduzimos o nível de atividade para minimizar a geração de calor desperdiçado do corpo.

Por que na situação acima ligamos o ventilador?

Para substituir continuamente a camada de ar quente que se forma ao redor de nossos corpos, como resultado do calor do corpo, pelo ar mais frio das outras partes da sala.

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Ao realizar trabalhos leves ou caminhar lentamente, **cerca de metade do calor** rejeitado pelo **corpo se dissipa** por meio da **transpiração** como **calor latente**, enquanto a **outra metade** é dissipada por meio de **convecção** e **radiação** como calor sensível.

Dissipação como função da atividade:

≡ Em repouso ou trabalho no escritório: ~70% do calor é dissipado na forma de calor sensível

≡ Trabalho físico pesado, a maioria (~60%) do calor se dissipa na forma de calor latente

O corpo ajuda transpirando ou suando mais, e à medida que o suor evapora ele absorve calor latente do corpo e o resfria

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

≡ A transpiração é favorável para uma umidade relativa de 100%?

≡ O suor prolongado sem nenhuma entrada de fluido pode causar desidratação e redução do suor, o que pode levar a uma elevação da temperatura do corpo e à insolação.

≡ Radiação: outro fator que afeta o corpo humano.

≡ É possível se aquecer na frente de uma lareira mesmo que o ar entre você e a lareira esteja bastante frio?

Sim

≡ Da mesma maneira, em uma sala aquecida você se sente gelado se o teto ou a superfície das paredes estão a uma temperatura consideravelmente mais baixa.

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Conforto humano depende de três fatores:

- A temperatura (bulbo seco);
- A umidade relativa;
- Movimento do ar.

- A temperatura do ambiente é o índice mais importante do conforto.

- A maioria das pessoas se sente confortável entre 22 e 27°C

- A umidade relativa

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

A **umidade relativa** também tem um efeito considerável sobre o conforto, uma vez que **ela afeta a quantidade de calor que um corpo pode dissipar por meio da evaporação**.

A umidade relativa é uma medida da capacidade do ar em absorver mais umidade.

Umidade relativa alta: diminui a rejeição de calor pela evaporação

Umidade relativa baixa: aumenta a rejeição de calor pela evaporação

A maioria das pessoas prefere uma umidade relativa de 40 a 60%

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

O movimento do ar também tem um papel importante para o conforto humano.

Ele remove o ar quente e úmido que se acumula ao redor do corpo e o substitui por ar fresco. Assim o movimento do ar melhora a rejeição de calor por convecção e evaporação. ➔

O movimento do ar deve ser suficientemente forte para remover o calor e a umidade da vizinhança do corpo, mas suficientemente fraco para não ser notado.

A maioria das pessoas se sente confortável com uma velocidade do ar de 15 m/min (0,9 km/h).

Conforto Humano e Condicionamento de Ar

Um movimento de ar a uma velocidade muito alta causa desconforto em vez de conforto:

Por exemplo, um ambiente a 10°C com ventos de 48 km/h é tão frio quanto um ambiente a -7°C com ventos de 3 km/h (efeito de resfriamento sobre um corpo).

Outros fatores que afetam o conforto do ar:

- Poluição
- Odores
- Ruídos
- Efeito da radiação

Apêndice A

Propriedades Gerais

Tabela A.1
Fatores de Conversão

Aceleração da gravidade	
$g = 9{,}806\ 65\ m/s^2$	$g = 32{,}174\ 05\ ft/s^2$
Área (A)	
$1\ mm^2 = 1{,}0 \times 10^{-6}\ m^2$	$1\ ft^2 = 144\ in^2$
$1\ cm^2 = 1{,}0 \times 10^{-4}\ m^2 = 0{,}1550\ in^2$	$1\ in^2 = 6{,}4516\ cm^2 = 6.4516 \times 10^{-4}\ m^2$
$1\ m^2 = 10{,}7639\ ft^2$	$1\ ft^2 = 0{,}092\ 903\ m^2$
Calor específico (C_p, C_v, C), entropia específica(s)	
$1\ kJ/(kg\text{-}K) = 0{,}238\ 846\ Btu/lbm\text{-}°R$	$1\ Btu/lbm\text{-}°R) = 4{,}1868\ kJ/kg\text{-}K$
Coeficiente de transferência de calor	
$1\ W/m^2\text{-}K = 0{,}176\ 11\ Btu/h\text{-}ft^2\text{-}°R$	$1\ Btu/h\text{-}ft^2\text{-}°R) = 5{,}678\ 26\ W/m^2\text{-}K$
Comprimento	
1 mm = 0,001 m = 0,1 cm	1 ft = 12 in
1 cm = 0,01 = 10 mm = 0,3970 in	1 in = 2,54 cm = 0,0254 m
1 m = 3,280 84 ft = 39,370 in	1 ft = 0,3048 m
1 km = 0,621 371 mi	1 mi = 1,609 344 km
1 mi = 1609,3 m (US statute)	1 yd = 0,9144 m
Condutividade térmica	
$1\ W/m\text{-}K = 1\ J/s\text{-}m\text{-}K = 0{,}577\ 789\ Btu/h\text{-}ft\text{-}°R$	$1\ Btu/h\text{-}ft\text{-}R) = 1{,}730\ 735\ W/m\text{-}K$
Constante universal dos gases	
$\bar{R} = N_0 k = 8{,}314\ 51\ kJ/kmol\text{-}K$	$\bar{R} = 1.985\ 89\ Btu/lbmol\text{-}R$
$= 1{,}985\ 89\ kcal/kmol\text{-}K$	$= 1545{,}36\ lbg\text{-}ft/lbmol\text{-}R$
$= 82{,}0578\ atm\text{-}L/kmol\text{-}K$	$= 0{,}730\ 24\ atm\text{-}ft^3/lbmol\text{-}R$
	$= 10{,}7317\ (lbg/in^2)\text{-}ft^3/lbmol\text{-}R$

Energia	
$1\ J = 1\ N\text{-}m = 1\ kg\text{-}m^2/s^2$	$1\ lbf\text{-}ft = 1{,}355818$
$1\ J = 0{,}737\ 562\ lbf\text{-}ft$	$J = 1{,}285\ 07 \times 10^{-3}\ Btu$
$1\ cal\ (Int.) = 4{,}186\ 81\ J$	
$1\ erg = 1{,}0 \times 10^{-7}\ J$	$1\ Btu\ (Int.) = 1{,}055\ 056\ kJ$
$1\ eV = 1{,}602\ 177\ 33 \times 10^{-19}\ J$	$= 778{,}1693\ lbf\text{-}ft$
Energia específica (e, u)	
$1\ kJ/kg = 0{,}429\ 92\ Btu/lbm$	$1\ Btu/lbm = 2{,}326\ kJ/kg$
$= 334{,}55\ lbf\text{-}ft/lbm$	$1\ lbf\text{-}ft/lbm = 2{,}989\ 07 \times 10^{-3}\ kJ/kg$
	$= 1{,}285\ 07 \times 10^{-3}\ Btu/lbm$
Energia cinética específica ($1/2\ V^2$)	
$1\ m^2/s^2 = 0{,}001\ kJ/kg$	$1\ ft^2/s^2 = 3{,}9941 \times 10^{-5}\ Btu/lbm$
$1\ kJ/kg = 1000\ m^2/s^2$	$1\ Btu/lbm = 250\ 37\ ft^2/s^2$
Energia potencial específica (Zg)	
$1\ m - gstd = 9{,}806\ 65 \times 10^{-3}\ kJ/kg$	$1\ ft - gstd = 1{,}0\ lbf\text{-}ft/lbm$
$= 4{,}216\ 07 \times 10^{-3}\ Btu/lbm$	$= 0{,}001\ 285\ Btu/lbm$
	$= 0{,}002\ 989\ kJ/kg$
Fluxo de calor	
$1\ W/m^2 = 0{,}316\ 998\ Btu/h\text{-}ft^2$	$1\ Btu/h\text{-}ft^2 = 3{,}154\ 59\ W/m^2$
Força (F)	
$1\ N = 0{,}224\ 809\ lbf$	$1\ lbf = 4{,}448\ 222\ N$
$1\ kgf = 9{,}806\ 65\ N\ (1\ kgf)$	
Massa	
$1\ kg = 2{,}204\ 623\ lbm$	$1\ lbm = 0{,}453\ 592\ kg$
$1\ ton = 1000\ kg$	$1\ slug = 14{,}5939\ kg$
$1\ grain = 6{,}479\ 89 \times 10^{-5}\ kg$	$1\ ton = 2000\ lbm$
Massa específica	
$1\ kg/m^3 = 0{,}062\ 427\ 97\ lbm/ft^3$	$1\ lbm/ft^3 = 16{,}018\ 46\ kg/m^3$
$1\ g/cm^3 = 1000\ kg/m^3$	
$1\ g/cm^3\ 1\ kg/L$	
Momento (Torque, T)	
$1\ N\text{-}m = 0{,}737\ 562\ lbm\text{-}ft$	$1\ lbm\text{-}ft = 1{,}355\ 818\ N\text{-}m$
Potência ($\dot{Q}$, $\dot{W}$)	
$1\ W = 1\ J/s = 1\ N\text{-}m/s$	$1\ lbf\text{-}ft/s = 1{,}355\ 818\ W$
$= 0{,}737\ 562\ lbf\text{-}ft/s$	$= 4{,}626\ 24\ Btu/h$
$1\ kW = 3412{,}14\ Btu/h$	$1\ Btu/s = 1{,}055\ 056\ kW$
$1\ hp\ (métrico) = 0{,}735\ 499\ kW$	$1\ hp\ (UK) = 0{,}7457\ kW$
$1\ ton\ de\ refrigeração = 3{,}516\ 85\ kW$	$= 550\ lbf\text{-}ft/s$
	$= 2544{,}43\ Btu/h$
	$1\ ton\ de\ refrigeração = 12\ 000\ Btu/h$

Pressão (P)	
1 Pa = 1 N/m^2 = 1 kg/m-s^2	1 lbf/in^2 = 6,894 757 kPa
1 bar = 1,0 × 105 Pa = 100 kPa	
1 atm = 101,325 kPa	1 atm = 14,695 94 lbf/in^2
= 1,013 25 bar	= 29 921 in Hg [32 °F]
= 760 mm Hg [0 °C]	= 33.8995 ft H_2O [4 °C]
= 10,332 56 m H_2O [4 °C]	
1 torr = 1 mm Hg [0 °C]	
1 mm Hg [0 °C] = 0,133 322 kPa	1 in Hg [0 °C] = 0,491 15 lbf/in^2
1 m H_2O [4 °C] = 9,806 38 kPa	1 in H_2O [4 °C] = 0,0361 26 lbf/in^2
Quantidade de movimento (mV)	
1 kg-m/s = 7,232 94 lbm-ft/s	1 lbm-ft/s = 0,138 256 kg-m/s
= 0,224 809 lbf-s	
Temperatura (T)	
1 K = 1 °C = 1,8 R = 1,8 F	1 R = (5/9) K
TC = TK – 273,15	TF = TR – 459,67
= (TF – 32)/1,8	= 1,8 TC + 32
TK = TR/1,8	TR = 1,8 TK
Velocidade (V)	
1 m/s = 3,6 km/h	1 ft/s = 0,681 818 mi/h
= 3,280 84 ft/s	= 0,3048 m/s
= 2,236 94 mi/h	= 1,097 28 km/h
1 km/h = 0,277 78 m/s	1 mi/h = 1,466 67 ft/s
= 0,911 34 ft/s	= 0,447 04 m/s
= 0,621 37 mi/h	= 1,609 344 km/h
Volume específico (V)	
1 cm^3/g = 0,001 m^3/kg	
1 cm^3/g = 1 L/kg	
1 m^3/kg = 161 846 ft^3/lbm	1 ft^3/lbm = 0,062 428 m^3/kg
Volume (V)	
1 m^3 = 35,3147 ft^3	1 ft^3 = 2,831 685 × 10^{-2} m^3
1 L = 1 dm^3 = 0,001 m^3	1 in.^{3} = 1,6387 × 10^{-5} m^3
1 Gal (US) = 3,785 412 L	1 Gal (UK) = 4,546 090 L
= 3,785 412 × 10^{-3} m^3	1 Gal (US) = 231,00 in.^{3}

Tabela A.2
Constantes críticas

Substância	Fórmula	Peso molecular	Temperatura K	Pressão MPa	Volume m^3/kg
Amônia	NH_3	117,031	405,5	11,35	0,00426
Argônio	Ar	139,948	150,8	4,87	0,00188
Bromo	Br_2	159,808	588	10,30	0,000796
Dióxido de carbono	CO_2	144,01	304,1	7,38	0,00212
Monóxido de carbono	CO	128,01	132,9	3,50	0,00333
Cloro	Cl_2	70,906	416,9	7,98	0,00175
Flúor	F_2	37,997	144,3	5,22	0,00174
Hélio	He	34,003	145,19	0,227	0,0143
Hidrogênio (normal)	H_2	122,016	33,2	1,30	0,0323
Criptônio	Kr	83,80	209,4	5,50	0,00109
Neônio	Ne	20,183	44,4	2,76	0,00206
Óxido nítrico	NO	30,006	180	6,48	0,00192
Nitrogênio	N_2	28,013	126,2	3,39	0,0032
Dióxido de nitrogênio	NO_2	46,006	431	10,1	0,00365
Óxido nitroso	N_2O	44,013	309,6	7,24	0,00221
Oxigênio	O_2	31,999	154,6	5,04	0,00229
Dióxido de enxofre	SO_2	64,063	430,8	7,88	0,00191
Água	H_2O	18,015	647,3	22,12	0,00317
Xenônio	Xe	131,30	289,7	5,84	0,000902
Acetileno	C_2H_2	26,038	308,3	6,14	0,00433
Benzeno	C_6H_6	78,114	562,2	4,89	0,00332
n-Butano	C_4H_{10}	58,124	425,2	3,80	0,00439
Difluorcloroetano (142b)	CH_3CClF_2	100,495	410,3	4,25	0,00230
Difluorclorometano (22)	$CHClF_2$	86,469	369,3	4,97	0,00191
Diclorofluoretano (141)	CH_3CCl_2F	116,95	481,5	4,54	0,00215
Diclorotrifluoretano (123)	$CHCl_2CF_3$	152,93	456,9	3,66	0,00182
Difluoretano (152a)	CHF_2CH_3	66,05	386,4	4,52	0,00272
Difluormetano (32)	CF_2H_2	52,024	351,3	5,78	0,00236
Etano	C_2H_6	30,070	305,4	4,88	0,00493
Álcool etílico (etanol)	C_2H_5OH	46,069	513,9	6,14	0,00363
Etileno	C_2H_4	28,054	282,4	5,04	0,00465
n-Heptano	C_7H_{16}	100,205	540,3	2,74	0,00431
n-Hexano	C_6H_{14}	86,178	507,5	3,01	0,00429
Metano	CH_4	16,043	190,4	4,60	0,00615
Álcool metílico (metanol)	CH_3OH	32,042	512,6	8,09	0,00368
n-Octano	C_8H_{18}	114,232	568,8	2,49	0,00431
Pentafluoretano (125)	CHF_2CF_3	120,022	339,2	3,62	0,00176
n-Pentano	C_5H_{12}	72,151	469,7	3,37	0,00421
Propano	C_3H_8	44,094	369,8	4,25	0,00454
Propeno	C_3H_6	42,081	364,9	4,60	0,00430
Refrigerante misto	R-410a	72,585	344,5	4,90	0,00218
Tetrafluoretano (134a)	CF_3CH_2F	102,03	374,2	4,06	0,00197

Tabela A.3
Propriedades de alguns sólidos a 25 °C

Sólido	ρ, (kg/m^3)	C_p, (kJ/kg K)
Acrílico	1180	1,44
Areia (seca)	1500	0,8
Asfalto	2120	0,92
Borracha (macia)	1100	1,67
Carbono, diamante	3250	0,51
Carbono, grafite	2000-2500	0,61
Carvão	1200-1500	1,26
Concreto	2200	0,88
Gelo (0 °C)	917	2,04
Granito	2750	0,89
Lã	100	1,72
Lã de vidro	20	0,66
Madeira dura	720	1,26
Madeira mole (pinho)	510	1,38
Neve, firme	560	2,1
Papel	700	1,2
Poliestireno	920	2,3
PVC	1380	0,96
Sal, rocha	2100-2500	0,92
Silício	2330	0,70
Tijolo (comum)	1800	0,84
Vidro	2500	0,80
Metais		
Aço (AISI304)	7820	0,46
Alumínio	2700	0,90
Chumbo	113 40	0,13
Cobre comercial	8300	0,42
Estanho	7304	0,22
Ferro fundido	7272	0,42
Latão, 60-40	8400	0,38
Magnésio, 2% Mn	1778	1,00
Níquel, 10% Cr	8666	0,44
Ouro	193 00	0,13
Prata, 99,9% Ag	105 24	0,24
Sódio	971	1,21
Tungstênio	193 00	0,13
Zinco	7144	0,39

Tabela A.4
Propriedades de alguns líquidos a 25 °C

Líquido	ρ, kg/m^3	C_p, kJ/kg K
Água	4,18	997
Amônia	4,84	604
Benzeno	1,72	879
Butano	2,47	556
CCl_4	0,83	1584
CO_2	2,9	680
Etanol	2,46	783
Gasolina	2,08	750
Glicerina	2,42	1260
Metanol	2,55	787
n-Octano	2,23	692
Óleo (leve)	1,8	910
Óleo de motor	1,9	885
Propano	2,54	510
Querosene	2,0	815
R-12	0,97	1310
R-125	1,41	1191
R-134a	1,43	1206
R-22	1,26	1190
R-32	1,94	961
R-410a	1,69	1059
Metais líquidos		
Bismuto, Bi	100 40	0,14
Chumbo, Pb	106 60	0,16
Estanho, Sn	6950	0,24
Mercúrio, Hg	135 80	0,14
Na K (56/44)	887	1,13
Potássio, K	828	0,81
Sódio, Na	929	1,38
Zinco, Zn	6570	0,50

* Ou à temperatura de fusão, caso seja maior que 25 °C.

Tabela A.5
Propriedades de vários gases ideais a 25 °C e 100 kPa*

Gás	Fórmula química	Peso molecular	R kJ/kg K	ρ (kg/m³)	c_{p0} kJ/kg K	c_{v0} kJ/kg K	$k = c_p/c_v$
Acetileno	C_2H_2	26,038	0,3193	1,05	1,699	1,380	1,231
Água (vapor)	H_2O	18,015	0,4615	0,0231	1,872	1,410	1,327
Ar		28,97	0,287	1,169	1,004	0,717	1,400
Amônia	NH_3	17,031	0,4882	0,694	2,130	1,642	1,297
Argônio	Ar	39,948	0,2081	1,613	0,520	0,312	1,667
Butano	C_4H_{10}	58,124	0,1430	2,407	1,716	1,573	1,091
Dióxido de Carbono	CO_2	44,01	0,1889	1,775	0,842	0,653	1,289
Monóxido de Carbono	CO	28,01	0,2968	1,13	1,041	0,744	1,399
Etano	C_2H_6	30,07	0,2765	1,222	1,766	1,490	1,186
Etanol	C_2H_5OH	46,069	0,1805	1,883	1,427	1,246	1,145
Etileno	C_2H_4	28,054	0,2964	1,138	1,548	1,252	1,237
Hélio	He	4,003	2,0771	0,1615	5,193	3,116	1,667
Hidrogênio	H_2	2,016	4,1243	0,0813	14,209	10,085	1,409
Metano	CH_4	16,043	0,5183	0,648	2,254	1,736	1,299
Metanol	CH_3OH	32,042	0,2595	1,31	1,405	1,146	1,227
Neônio	Ne	20,183	0,4120	0,814	1,03	0,618	1,667
Nitrogênio	N_2	28,013	0,2968	1,13	1,042	0,745	1,400
Óxido nítrico	NO	30,006	0,2771	1,21	0,993	0,716	1,387
Óxido nitroso	N_2O	44,013	0,1889	1,775	0,879	0,690	1,274
n-Octano	C_8H_{18}	114,23	0,07279	0,092	1,711	1,638	1,044
Oxigênio	O_2	31,999	0,2598	1,292	0,922	0,662	1,393
Propano	C_3H_8	44,094	0,1886	1,808	1,679	1,490	1,126
R-12	CCl_2F_2	120,914	0,06876	4,98	0,616	0,547	1,126
R-22	$CHClF_2$	86,469	0,09616	3,54	0,658	0,562	1,171
R-32	CF_2H_2	52,024	0,1598	2,125	0,822	0,662	1,242
R-125	CHF_2CF_3	120,022	0,06927	4,918	0,791	0,722	1,097
R-134a	CF_3CH_2F	102,03	0,08149	4,20	0,852	0,771	1,106
R-410a		72,585	0,114 55	2,967	0,809	0,694	1,165
Dióxido de enxofre	SO_2	64,059	0,1298	2,618	0,624	0,494	1,263
Trióxido de enxofre	SO_3	80,053	0,10386	3,272	0,635	0,531	1,196

* Ou na pressão de saturação, se esta for menor que 100 kPa.

Tabela A.6
Calor específico a pressão constante de vários gases ideais em função da temperatura*

$c_{p0} = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3$ (kJ/kg K) $\theta = T$ (Kelvin)/1000

Gás	Fórmula	C0	C1	C2	C3
Acetileno	C_2H_2	1,03	2,91	−1,92	0,54
Água (vapor)	H_2O	1,79	0,107	0,586	−0,20
Amônia	NH_3	1,60	1,4	1,0	−0,7
Ar		1,05	−0,365	0,85	−0,39
Argônio	Ar	0,52	0	0	0
Butano	C_4H_{10}	0,163	5,70	−1,906	−0,049
Dióxido de carbono	CO_2	0,45	1,67	−1,27	0,39
Dióxido de enxofre	SO_2	0,37	1,05	−0,77	0,21
Etano	C_2H_6	0,18	5,92	−2,31	0,29
Etanol	C_2H_5OH	0,2	4,65	−1,82	0,03
Etileno	C_2H_4	0,136	5,58	−3,0	0,63
Hélio	He	5,193	0	0	0
Hidrogênio	H_2	13,46	4,6	−6,85	3,79
Metano	CH_4	1,2	3,25	0,75	−0,71
Metanol	CH_3OH	0,66	2,21	0,81	−0,89
Monóxido de carbono	CO	1,10	−0,46	1,0	-0,454
Neônio	Ne	1,03	0	0	0
Nitrogênio	N_2	1,11	−0,48	0,96	−0,42
n-Octano	C_8H_{18}	−0,053	6,75	−3,67	0,775
Óxido nítrico	NO	0,98	−0,031	0,325	−0,14
Óxido nitroso	N_2O	0,49	1,65	−1,31	0,42
Oxigênio	O_2	0,88	−0,0001	0,54	−0,33
Propano	C_3H_8	−0,096	6,95	−3,6	0,73
R-12†	CCl_2F_2	0,26	1,47	−1,25	0,36
R-22†	$CHClF_2$	0,2	1,87	−1,35	0,35
R-32†	CF_2H_2	0,227	2,27	−0,93	0,041
R-125†	CHF_2CF_3	0,305	1,68	−0,284	0
R-134a†	CF_3CH_2F	0,165	2,81	−2,23	1,11
Trióxido de enxofre	SO_3	0,24	1,7	−1,5	0,46

* Equações proporcionam resultados válidos na faixa de 250 K a 1200 K.
† Equações aplicáveis para temperaturas de, no máximo, 500 K.

Tabela A.7.1
Propriedades termodinâmicas do ar (gás ideal; pressão de referência para a entropia é 0,1 MPa ou 1 bar)

T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s^0 (kJ/kg × K)
200	142,77	200,17	6,46260
220	157,07	220,22	6,55812
240	171,38	240,27	6,64535
260	185,70	260,32	6,72562
280	200,02	280,39	6,79998
290	207,19	290,43	6,83521
298,15	213,04	298,62	6,86305
300	214,36	300,47	6,86926
320	228,73	320,58	6,93413
340	243,11	340,70	6,99515
360	257,53	360,86	7,05276
380	271,99	381,06	7,10735
400	286,49	401,30	7,15926
420	301,04	421,59	7,20875
440	315,64	441,93	7,25607
460	330,31	462,34	7,30142
480	345,04	482,81	7,34499
500	359,84	503,36	7,38692
520	374,73	523,98	7,42736
540	389,69	544,69	7,46642
560	404,74	565,47	7,50422
580	419,87	586,35	7,54084
600	435,10	607,32	7,57638
620	450,42	628,38	7,61090
640	465,83	649,53	7,64448
660	481,34	670,78	7,67717
680	496,94	692,12	7,70903
700	512,64	713,56	7,74010
720	528,44	735,10	7,77044
740	544,33	756,73	7,80008
760	560,32	778,46	7,82905
780	576,40	800,28	7,85740
800	592,58	822,20	7,88514
850	633,42	877,40	7,95207
900	674,82	933,15	8,01581
950	716,76	989,44	8,07667
1000	759,19	1046,22	8,13493
1050	802,10	1103,48	8,19081

Tabela A.7
Propriedades termodinâmicas do ar (*continuação*)

T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s^0 (kJ/kg × K)
1100	845,45	1161,18	8,24449
1150	889,21	1219,30	8,29616
1200	933,37	1277,81	8,34596
1250	977,89	1336,68	8,39402
1300	1022,75	1395,89	8,44046
1350	1067,94	1455,43	8,48539
1400	1113,43	1515,27	8,52891
1450	1159,20	1575,40	8,57111
1500	1205,25	1635,80	8,61208
1550	1251,55	1696,45	8,65185
1600	1298,08	1757,33	8,69051
1650	1344,83	1818,44	8,72811
1700	1391,80	1879,76	8,76472
1750	1438,97	1941,28	8,80039
1800	1486,33	2002,99	8,83516
1850	1533,87	2064,88	8,86908
1900	1581,59	2126,95	8,90219
1950	1629,47	2189,19	8,93452
2000	1677,52	2251,58	8,96611
2050	1725,71	2314,13	8,99699
2100	1774,06	2376,82	9,02721
2150	1822,54	2439,66	9,05678
2200	1871,16	2502,63	9,08573
2250	1919,91	2565,73	9,11409
2300	1968,79	2628,96	9,14189
2350	2017,79	2692,31	9,16913
2400	2066,91	2755,78	9,19586
2450	2116,14	2819,37	9,22208
2500	2165,48	2883,06	9,24781
2550	2214,93	2946,86	9,27308
2600	2264,48	3010,76	9,29790
2650	2314,13	3074,77	9,32228
2700	2363,88	3138,87	9,34625
2750	2413,73	3203,06	9,36980
2800	2463,66	3267,35	9,39297
2850	2513,69	3331,73	9,41576
2900	2563,80	3396,19	9,43818
2950	2613,99	3460,73	9,46025
3000	2664,27	3525,36	9,48198

Tabela A.7.2
Pressões e volumes relativos em função da pressão em processos isotrópicos

T (K)	P_r	v_r	T (K)	P_r	v_r	T (K)	P_r	v_r
200	0,2703	493,47	680	20,784	21,818	1800	1051,05	1,14204
220	0,3770	389,15	700	23,160	20,155	1850	1182,9	1.04294
240	0,5109	313,27	720	25,742	18,652	1900	1327,5	0,95445
260	0,6757	256,58	740	28,542	17,289	1950	1485,8	0,87521
280	0,8756	213,26	760	31,573	16,052	2000	1658,6	0,80410
290	0,9899	195,36	780	34,851	14,925	2050	1847,1	0,74012
298,15	1,0907	182,29	800	38,388	13,897	2100	2052,1	0,68242
300	1,1146	179,49	850	48,468	11,695	2150	2274,8	0,63027
320	1,3972	152,73	900	60,520	9,9169	2200	2516,2	0,58305
340	1,7281	131,20	950	74,815	8,4677	2250	2777,5	0,54020
360	2,1123	113,65	1000	91,651	7,2760	2300	3059,9	0,50124
380	2,5548	99,188	1050	111,35	6,2885	2350	3364,6	0,46576
400	3,0612	87,137	1100	134,25	5,4641	2400	3693,0	0,43338
420	3,6373	77,003	1150	160,73	4,7714	2450	4046,2	0,40378
440	4,2892	68,409	1200	191,17	4,1859	2500	4425,8	0,37669
460	5,0233	61,066	1250	226,02	3,6880	2550	4833,0	0,35185
480	5,8466	54,748	1300	265,72	3,2626	2600	5269,5	0,32903
500	6,7663	49,278	1350	310,74	2,8971	2650	5736,7	0,30805
520	7,7900	44,514	1400	361,62	2,5817	2700	6236,2	0,28872
540	8,9257	40,344	1450	418,89	2,3083	2750	6769,7	0,27089
560	10,182	36,676	1500	483,16	2,0703	2800	7338,7	0,25443
580	11,568	33.436	1550	554,96	1,8625	2850	7945,1	0,23921
600	13,092	30,561	1600	634,97	1,6804	2900	8590,7	0,22511
620	14,766	28,001	1650	723,86	1,52007	2950	9277,2	0,21205
640	16,598	25,713	1700	822.33	1,37858	3000	10007	0,19992
660	18,600	23,662	1750	931,14	1,25330			

Tabela A.8
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base mássica

	Nitrogênio, Diatômico (N_2) $R = 0{,}2968$ kJ/kg × K $M = 28{,}013$ kg/kmol			Oxigênio, Diatômico (O_2) $R = 0{,}2598$ kJ/kg × K $M = 31{,}999$ kg/kmol		
T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S^0_T (kJ/kg × K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S^0_T (kJ/kg × K)
200	148,39	207,75	6,4250	129,84	181,81	6,0466
250	185,50	259,70	6,6568	162,41	227,37	6,2499
300	222,63	311,67	6,8463	195,20	273,15	6,4168
350	259,80	363,68	7,0067	228,37	319,31	6,5590
400	297,09	415,81	7,1459	262,10	366,03	6,6838
450	334,57	468,13	7,2692	296,52	413,45	6,7954
500	372,35	520,75	7,3800	331,72	461,63	6,8969
550	410,52	573,76	7,4811	367,70	510,61	6,9903
600	449,16	627,24	7,5741	404,46	560,36	7,0768
650	488,34	681,26	7,6606	441,97	610,86	7,1577
700	528,09	735,86	7,7415	480,18	662,05	7,2336
750	568,45	791,05	7,8176	519,02	713,90	7,3051
800	609,41	846,85	7,8897	558,46	766,33	7,3728
850	650,98	903,26	7,9581	598,44	819,30	7,4370
900	693,13	960,25	8,0232	638,90	872,75	7,4981
950	735,85	1017,81	8,0855	679,80	926,65	7,5564
1000	779,11	1075,91	8,1451	721,11	980,95	7,6121
1100	867,14	1193,62	8,2572	804,80	1090,62	7,7166
1200	957,00	1313,16	8,3612	889,72	1201,53	7,8131
1300	1048,46	1434,31	8,4582	975,72	1313,51	7,9027
1400	1141,35	1556,87	8,5490	1062,67	1426,44	7,9864
1500	1235,50	1680,70	8,6345	1150,48	1540,23	8,0649
1600	1330,72	1805,60	8,7151	1239,10	1654,83	8,1389
1700	1426,89	1931,45	8,7914	1328,49	1770,21	8,2088
1800	1523,90	2058,15	8,8638	1418,63	1886,33	8,2752
1900	1621,66	2185,58	8,9327	1509,50	2003,19	8,3384
2000	1720,07	2313,68	8,9984	1601,10	2120,77	8,3987
2100	1819,08	2442,36	9,0612	1693,41	2239,07	8,4564
2200	1918,62	2571,58	9,1213	1786,44	2358,08	8,5117
2300	2018,63	2701,28	9,1789	1880,17	2477,79	8,5650
2400	2119,08	2831,41	9,2343	1974,60	2598,20	8,6162
2500	2219,93	2961,93	9,2876	2069,71	2719,30	8,6656
2600	2321,13	3092,81	9,3389	2165,50	2841,07	8,7134
2700	2422,66	3224,03	9,3884	2261,94	2963,49	8,7596
2800	2524,50	3355,54	9,4363	2359,01	3086,55	8,8044
2900	2626,62	3487,34	9,4825	2546,70	3210,22	8,8478
3000	2729,00	3619,41	9,5273	2554,97	3334,48	8,8899

Tabela A.8 (continuação)
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base mássica

	Dióxido de carbono (CO_2) $R = 0{,}1889$ kJ/kg × K $M = 44{,}010$ kg/kmol			Água (H_2O) $R = 0{,}4615$ kJ/kg × K $M = 18{,}015$ kg/kmol		
T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S^0_T (kJ/kg × K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S^0_T (kJ/kg × K)
200	97,49	135,28	4,5439	276,38	368,69	9,7412
250	126,21	173,44	4,7139	345,98	461,36	10,1547
300	157,70	214,38	4,8631	415,87	554,32	10,4936
350	191,78	257,90	4,9972	486,37	647,90	10,7821
400	228,19	303,76	5,1196	557,79	742,40	11,0345
450	266,69	351,70	5,2325	630,40	838,09	11,2600
500	307,06	401,52	5,3375	704,36	935,12	11,4644
550	349,12	453,03	5,4356	779,79	1033,63	11,6522
600	392,72	506,07	5,5279	856,75	1133,67	11,8263
650	437,71	560,51	5,6151	935,31	1235,30	11,9890
700	483,97	616,22	5,6976	1015,49	1338,56	12,1421
750	531,40	673,09	5,7761	1097,35	1443,49	12,2868
800	579,89	731,02	5,8508	1180,90	1550,13	12,4244
850	629,35	789,93	5,9223	1266,19	1658,49	12,5558
900	679,69	849,72	5,9906	1353,23	1768,60	12,6817
950	730,85	910,33	6,0561	1442,03	1880,48	12,8026
1000	782,75	971,67	6,1190	1532,61	1994,13	12,9192
1100	888,55	1096,36	6,2379	1719,05	2226,73	13,1408
1200	996,64	1223,34	6,3483	1912,42	2466,25	13,3492
1300	1106,68	1352,28	6,4515	2112,47	2712,46	13,5462
1400	1218,38	1482,87	6,5483	2318,89	2965,03	13,7334
1500	1331,50	1614,88	6,6394	2531,28	3223,57	13,9117
1600	1445,85	1748,12	6,7254	2749,24	3487,69	14,0822
1700	1561,26	1882,43	6,8068	2972,35	3756,95	14,2454
1800	1677,61	2017,67	6,8841	3200,17	4030,92	14,4020
1900	1794,78	2153,73	6,9577	3432,28	4309,18	14,5524
2000	1912,67	2290,51	7,0278	3668,24	4591,30	14,6971
2100	2031,21	2427,95	7,0949	3908,08	4877,29	14,8366
2200	2150,34	2565,97	7,1591	4151,28	5166,64	14,9712
2300	2270,00	2704,52	7,2206	4397,56	5459,08	15,1012
2400	2390,14	2843,55	7,2798	4646,71	5754,37	15,2269
2500	2510,74	2983,04	7,3368	4898,49	6052,31	15,3485
2600	2631,73	3122,93	7,3917	5152,73	6352,70	15,4663
2700	2753,10	3263,19	7,4446	5409,24	6655,36	15,5805
2800	2874,81	3403,79	7,4957	5667,86	6960,13	15,6914
2900	2996,84	3544,71	7,5452	5928,44	7266,87	15,7990
3000	3119,18	3685,95	7,5931	6190,86	7575,44	15,9036

Tabela A.9
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

	Nitrogênio diatômico (N_2) $\bar{h}^o_{f,298} = 0$ kJ/kmol $M = 28{,}013$ kg/kmol		Nitrogênio monatômico (N) $\bar{h}^o_{f,298} = 472\,680$ kJ/kmol $M = 14{,}007$ kg/kmol	
T (K)	$(\bar{h}-\bar{h}^o_{f,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^o$ kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}^o_{f,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^o$ kJ/kmol K
0	−8670	0	−6197	0
100	−5768	159,812	−4119	130,593
200	−2857	179,985	−2040	145,001
298	0	191,609	0	153,300
300	54	191,789	38	153,429
400	2971	200,181	2117	159,409
500	5911	206,740	4196	164,047
600	8894	212,177	6274	167,837
700	11937	216,865	8353	171,041
800	15046	221,016	10431	173,816
900	18223	224,757	12510	176,265
1000	21463	228,171	14589	178,455
1100	24760	231,314	16667	180,436
1200	28109	234,227	18746	182,244
1300	31503	236,943	20825	183,908
1400	34936	239,487	22903	185,448
1500	38405	241,881	24982	186,883
1600	41904	244,139	27060	188,224
1700	45430	246,276	29139	189,484
1800	48979	248,304	31218	190,672
1900	52549	250,234	33296	191,796
2000	56137	252,075	35375	192,863
2200	63362	255,518	39534	194,845
2400	70640	258,684	43695	196,655
2600	77963	261,615	47860	198,322
2800	85323	264,342	52033	199,868
3000	92715	266,892	56218	201,311
3200	100134	269,286	60420	202,667
3400	107577	271,542	64646	203,948
3600	115042	273,675	68902	205,164
3800	122526	275,698	73194	206,325
4000	130027	277,622	77532	207,437
4400	145078	281,209	86367	209,542
4800	160188	284,495	95457	211,519
5200	175352	287,530	104843	213,397
5600	190572	290,349	114550	215,195
6000	205848	292,984	124590	216,926

Tabela A.9 (continuação)
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

	Oxigênio diatômico (O_2) $\bar{h}^o_{f,298} = 0$ kJ/kmol $M = 21{,}999$ kg/kmol		Oxigênio monatômico (O) $\bar{h}^o_{f,298} = 249\,170$ kJ/kmol $M = 16{,}00$ kg/kmol	
T (K)	$(\bar{h}-\bar{h}^o_{f,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^o$ kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}^o_{f,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^o$ kJ/kmol K
0	−8683	0	−6725	0
100	−5777	173,308	−4518	135,947
200	−2868	193,483	−2186	152,153
298	0	205,148	0	161,059
300	54	205,329	41	161,194
400	3027	213,873	2207	167,431
500	6086	220,693	4343	172,198
600	9245	226,450	6462	176,060
700	12499	231,465	8570	179,310
800	15836	235,920	10671	182,116
900	19241	239,931	12767	184,585
1000	22703	243,579	14860	186,790
1100	26212	246,923	16950	188,783
1200	29761	250,011	19039	190,600
1300	33345	252,878	21126	192,270
1400	36958	255,556	23212	193,816
1500	40600	258,068	25296	195,254
1600	44267	260,434	27381	196,599
1700	47959	262,673	29464	197,862
1800	51674	264,797	31547	199,053
1900	55414	266,819	33630	200,179
2000	59176	268,748	35713	201,247
2200	66770	272,366	39878	203,232
2400	74453	275,708	44045	205,045
2600	82225	278,818	48216	206,714
2800	90080	281,729	52391	208,262
3000	98013	284,466	56574	209,705
3200	106022	287,050	60767	211,058
3400	114101	289,499	64971	212,332
3600	122245	291,826	69190	213,538
3800	130447	294,043	73424	214,682
4000	138705	296,161	77675	215,773
4400	155374	300,133	86234	217,812
4800	172240	303,801	94873	219,691
5200	189312	307,217	103592	221,435
5600	206618	310,423	112391	223,066
6000	224210	313,457	121264	224,597

Tabela A.9 (continuação)
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

	Dióxido de carbono (CO_2) $\bar{h}^o_{f,298} = -393\,522$ kJ/kmol $M = 44{,}01$ kg/kmol		Monóxido de carbono (CO) $\bar{h}^o_{f,298} = 110\,527$ kJ/kmol $M = 28{,}01$ kg/kmol	
T (K)	$(\bar{h}-\bar{h}^o_{f,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^o$ kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}^o_{f,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^o$ kJ/kmol K
0	−9364	0	−8671	0
100	−6457	179,010	−5772	165,852
200	−3413	199,976	−2860	186,024
298	0	213,794	0	197,651
300	69	214,024	54	197,831
400	4003	225,314	2977	206,240
500	8305	234,902	5932	212,833
600	12906	243,284	8942	218,321
700	17754	250,752	12021	223,067
800	22806	257,496	15174	227,277
900	28030	263,646	18397	231,074
1000	33397	269,299	21686	234,538
1100	38885	274,528	25031	237,726
1200	44473	279,390	28427	240,679
1300	50148	283,931	31867	243,431
1400	55895	288,190	35343	246,006
1500	61705	292,199	38852	248,426
1600	67569	295,984	42388	250,707
1700	73480	299,567	45948	252,866
1800	79432	302,969	49529	254,913
1900	85420	306,207	53128	256,860
2000	91439	309,294	56743	258,716
2200	103562	315,070	64012	262,182
2400	115779	320,384	71326	265,361
2600	128074	325,307	78679	268,302
2800	140435	329,887	86070	271,044
3000	152853	334,170	93504	273,607
3200	165321	338,194	100962	276,012
3400	177836	341,988	108440	278,279
3600	190394	345,576	115938	280,422
3800	202990	348,981	123454	282,454
4000	215624	352,221	130989	284,387
4400	240992	358,266	146108	287,989
4800	266488	363,812	161285	291,290
5200	292112	368,939	176510	294,337
5600	317870	373,711	191782	297,167
6000	343782	378,180	207105	299,809

Tabela A.9 (continuação)
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

	Água (H_2O) $\bar{h}^o_{f,298} = -241\,826$ kJ/kmol $M = 18.015$ kg/kmol		Hidroxila (OH) $\bar{h}^o_{f,298} = 38\,987$ kJ/kmol $M = 17{,}007$ kg/kmol	
T (K)	$(\bar{h}-\bar{h}^o_{f,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^o$ kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}^o_{f,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^o$ kJ/kmol K
0	−9904	0	−9172	0
100	−6617	152,386	−6140	149,591
200	−3282	175,488	−2975	171,592
298	0	188,835	0	183,709
300	62	189,043	55	183,894
400	3450	198,787	3034	192,466
500	6922	206,532	5991	199,066
600	10499	213,051	8943	204,448
700	14190	218,739	11902	209,008
800	18002	223,826	14881	212,984
900	21937	228,460	17889	216,526
1000	26000	232,739	20935	219,735
1100	30190	236,732	24024	222,680
1200	34506	240,485	27159	225,408
1300	38941	244,035	30340	227,955
1400	43491	247,406	33567	230,347
1500	48149	250,620	36838	232,604
1600	52907	253,690	40151	234,741
1700	57757	256,631	43502	236,772
1800	62693	259,452	46890	238,707
1900	67706	262,162	50311	240,556
2000	72788	264,769	53763	242,328
2200	83153	269,706	60751	245,659
2400	93741	274,312	67840	248,743
2600	104520	278,625	75018	251,614
2800	115463	282,680	82268	254,301
3000	126548	286,504	89585	256,825
3200	137756	290,120	96960	259,205
3400	149073	293,550	104388	261,456
3600	160484	296,812	111864	263,592
3800	171981	299,919	119382	265,625
4000	183552	302,887	126940	267,563
4400	206892	308,448	142165	271,191
4800	230456	313,573	157522	274,531
5200	254216	318,328	173002	277,629
5600	278161	322,764	188598	280,518
6000	302295	326,926	204309	283,227

Tabela A.9 (continuação)
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a O,1 × MPa) base molar

	Hidrogênio (H_2) $\bar{h}^\circ_{f\,298} = 0$ kJ/kmol $M = 2.016$ kg/kmol		Hidrogênio monatômico (H) $\bar{h}^\circ_{f\,298} = 217\,999$ kJ/kmol $M = 1,008$ kg/kmol	
T (K)	$(\bar{h}-\bar{h}^\circ_{f\,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}^\circ_{f\,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol K
0	−8467	0	−6197	0
100	−5467	100,727	−4119	92,009
200	−2774	119,410	−2040	106,417
298	0	130,678	0	114,716
300	53	130,856	38	114,845
400	2961	139,219	2117	120,825
500	5883	145,738	4196	125,463
600	8799	151,078	6274	129,253
700	11730	155,609	8353	132,457
800	14681	159,554	10431	135,233
900	17657	163,060	12510	137,681
1000	20663	166,225	14589	139,871
1100	23704	169,121	16667	141,852
1200	26785	171,798	18746	143,661
1300	29907	174,294	20825	145,324
1400	33073	176,637	22903	146,865
1500	36281	178,849	24982	148,299
1600	39533	180,946	27060	149,640
1700	42826	182,941	29139	150,900
1800	46160	184,846	31218	152,089
1900	49532	186,670	33296	153,212
2000	52942	188,419	35375	154,279
2200	59865	191,719	39532	156,260
2400	66915	194,789	43689	158,069
2600	74082	197,659	47847	159,732
2800	81355	200,355	52004	161,273
3000	88725	202,898	56161	162,707
3200	96187	205,306	60318	164,048
3400	103736	207,593	64475	165,308
3600	111367	209,773	68633	166,497
3800	119077	211,856	72790	167,620
4000	126864	213,851	76947	168,687
4400	142658	217,612	85261	170,668
4800	158730	221,109	93576	172,476
5200	175057	224,379	101890	174,140
5600	191607	227,447	110205	175,681
6000	208332	230,322	118519	177,114

Tabela A.9 (continuação)
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a O,1 × MPa) base molar

	Óxido nítrico (NO) $\bar{h}^\circ_{f\,298} = 90\,291$ kJ/kmol $M = 30,006$ kg/kmol		Dióxido de nitrogênio (NO_2) $\bar{h}^\circ_{f\,298} = 33\,100$ kJ/kmol $M = 46,005$ kg/kmol	
T (K)	$(\bar{h}-\bar{h}^\circ_{f\,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}^\circ_{f\,298})$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol K
0	−9192	0	−10186	0
100	−6073	177,031	−6861	202,563
200	−2951	198,747	−3495	225,852
298	0	210,759	0	240,034
300	55	210,943	68	240,263
400	3040	219,529	3927	251,342
500	6059	226,263	8099	260,638
600	9144	231,886	12555	268,755
700	12308	236,762	17250	275,988
800	15548	241,088	22138	282,513
900	18858	244,985	27180	288,450
1000	22229	248,536	32344	293,889
1100	25653	251,799	37606	298,904
1200	29120	254,816	42946	303,551
1300	32626	257,621	48351	307,876
1400	36164	260,243	53808	311,920
1500	39729	262,703	59309	315,715
1600	43319	265,019	64846	319,289
1700	46929	267,208	70414	322,664
1800	50557	269,282	76008	325,861
1900	54201	271,252	81624	328,898
2000	57859	273,128	87259	331,788
2200	65212	276,632	98578	337,182
2400	72606	279,849	109948	342,128
2600	80034	282,822	121358	346,695
2800	87491	285,585	132800	350,934
3000	94973	288,165	144267	354,890
3200	102477	290,587	155756	358,597
3400	110000	292,867	167262	362,085
3600	117541	295,022	178783	365,378
3800	125099	297,065	190316	368,495
4000	132671	299,007	201860	371,456
4400	147857	302,626	224973	376,963
4800	163094	305,940	248114	381,997
5200	178377	308,998	271276	386,632
5600	193703	311,838	294455	390,926
6000	209070	314,488	317648	394,926

Tabela A.10
Entalpia de formação e entropia absoluta de várias substâncias a 25 °C e 100 kPa

Substância	Fórmula	M	Estado	$\bar{h}^\circ_f$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ_f$ kJ/kmol K
Acetileno	C_2H_2	26,038	gás	+226 731	200,958
Água	H_2O	18,015	gás	−241 826	188,834
Água	H_2O	18,015	líquido	−285 830	69,950
Amônia	NH_3	17,031	gás	−45 720	192,572
Benzeno	C_6H_6	78,114	gás	+82 980	269,562
n-Butano	C_4H_{10}	58,124	gás	−126 200	306,647
Carbono (grafita)	C	12,011	sólido	0	5,740
Dióxido de carbono	CO_2	44,010	gás	−393 522	213,795
Dióxido de enxofre	SO_2	64,059	gás	−296 842	248,212
Enxofre	S	32,06	sólido	0	32,056
Etano	C_2H_6	30,070	gás	−84 740	229,597
Etanol	C_2H_5OH	46,069	gás	−235 000	282,444
Etanol	C_2H_5OH	46,069	líquido	−277 380	160,554
Eteno	C_2H_4	28,054	gás	+52 467	219,330
Heptano	C_7H_{16}	100,205	gás	−187 900	427,805
Hexano	C_6H_{14}	86,178	gás	−167 300	387,979
Metano	CH_4	16,043	gás	−74 873	186,251
Metanol	CH_3OH	32,042	gás	−201 300	239,709
Metanol	CH_3OH	32,042	líquido	−239 220	126,809
Monóxido de carbono	CO	28,011	gás	−110 527	197,653
Nitrometano	CH_3NO_2	61,04	líquido	−113 100	171,80
n-Octano	C_8H_{18}	114,232	gás	−208 600	466,514
n-Octano	C_8H_{18}	114,232	líquido	−250 105	360,575
Óxido de Nitrogênio	N_2O	44,013	gás	+82 050	219,957
Ozônio	O_3	47,998	gás	+142 674	238,932
Pentano	C_5H_{12}	72,151	gás	−146 500	348,945
Peróxido de hidrogênio	H_2O_2	34,015	gás	−136 106	232,991
Propano	C_3H_8	44,094	gás	−103 900	269,917
Propeno	C_3H_6	42,081	gás	+20 430	267,066
Trióxido de enxofre	SO_3	80,058	gás	−395 765	256,769
T-T-Diesel	$C_{14,4}H_{24,9}$	198,06	líquido	−174 000	525,90

Tabela A.11
Logaritmos na base *e* da constante de equilíbrio *K*

Para a reação $\nu_A A + \nu_B B \rightleftharpoons \nu_C C + \nu_D D$, a constante de equilíbrio K é definida por: $K = \frac{y_C^{\nu_C} y_D^{\nu_D}}{y_A^{\nu_A} y_B^{\nu_B}} \left(\frac{P}{P^0}\right)^{\nu_C+\nu_D-\nu_A-\nu_B}$, $P^0 = 0{,}1$ MPa

Temp K	$H_2 \rightleftharpoons 2H$	$O_2 \rightleftharpoons 2O$	$N_2 \rightleftharpoons 2N$	$2H_2O \rightleftharpoons 2H_2 + O_2$	$2H_2O \rightleftharpoons H_2 + 2OH$	$2CO_2 \rightleftharpoons 2CO + O_2$	$N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2NO$	$N_2 + 2O_2 \rightleftharpoons 2NO_2$
298	−164,003	−186,963	−367,528	−184,420	−212,075	−207,529	−69,868	−41,355
500	−92,830	−105,623	−213,405	−105,385	−120,331	−115,234	−40,449	−30,725
1000	−39,810	−45,146	−99,146	−46,321	−51,951	−47,052	−18,709	−23,039
1200	−30,878	−35,003	−80,025	−36,363	−40,467	−35,736	−15,082	−21,752
1400	−24,467	−27,741	−66,345	−29,222	−32,244	−27,679	−12,491	−20,826
1600	−19,638	−22,282	−56,069	−23,849	−26,067	−21,656	−10,547	−20,126
1800	−15,868	−18,028	−48,066	−19,658	−21,258	−16,987	−9,035	−19,577
2000	−12,841	−14,619	−41,655	−16,299	−17,406	−13,266	−7,825	−19,136
2200	−10,356	−11,826	−36,404	−13,546	−14,253	−10,232	−6,836	−18,773
2400	−8,280	−9,495	−32,023	−11,249	−11,625	−7,715	−6,012	−18,470
2600	−6,519	−7,520	−28,313	−9,303	−9,402	−5,594	−5,316	−18,214
2800	−5,005	−5,826	−25,129	−7,633	−7,496	−3,781	−4,720	−17,994
3000	−3,690	−4,356	−22,367	−6,184	−5,845	−2,217	−4,205	−17,805
3200	−2,538	−3,069	−19,947	−4,916	−4,401	−0,853	−3,755	−17,640
3400	−1,519	−1,932	−17,810	−3,795	−3,128	0,346	−3,359	−17,496
3600	−0,611	−0,922	−15,909	−2,799	−1,996	1,408	−3,008	−17,369
3800	0,201	−0,017	−14,205	−1,906	−0,984	2,355	−2,694	−17,257
4000	0,934	0,795	−12,671	−1,101	−0,074	3,204	−2,413	−17,157
4500	2,483	2,520	−9,423	0,602	1,847	4,985	−1,824	−16,953
5000	3,724	3,898	−6,816	1,972	3,383	6,397	−1,358	−16,797
5500	4,739	5,027	−4,672	3,098	4,639	7,542	−0,980	−16,678
6000	5,587	5,969	−2,876	4,040	5,684	8,488	−0,671	−16,588

Fonte: Consistente com *JANAF Thermochemical Tables*, 3. ed., Thermal Group, Dow Chemical U.S.A., Mid., MI, 1985.

Apêndice B

Propriedades Termodinâmicas

Tabela B.1 — Propriedades Termodinâmicas da Água

Tabela B.1.1 — Água saturada: tabela em função da temperatura

		Volume específico (m^3/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
Temp. °C	Pressão kPa	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0	2375,33	2375,33	0	2501,35	2501,35	0	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3593	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8932	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,56835	230,19	2219,89	2450,08	230,20	2370,66	2600,86	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,67071	251,09	2205,54	2456,63	251,11	2358,48	2609,59	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,03	0,001020	6,19656	272,00	2191,12	2463,12	272,03	2346,21	2618,24	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,19	0,001023	5,04217	292,93	2176,62	2469,55	292,96	2333,85	2626,80	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,58	0,001026	4,13123	313,87	2162,03	2475,91	313,91	2321,37	2635,28	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,39	0,001029	3,40715	334,84	2147,36	2482,19	334,88	2308,77	2643,66	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,83	0,001032	2,82757	355,82	2132,58	2488,40	355,88	2296,05	2651,93	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,14	0,001036	2,36056	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2668,13	1,2500	6,1659	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	419,02	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958
110	143,3	0,001052	1,21014	461,12	2056,96	2518,09	461,27	2230,20	2691,47	1,4184	5,8202	7,2386
115	169,1	0,001056	1,03658	482,28	2041,44	2523,72	482,46	2216,50	2698,96	1,4733	5,7100	7,1832
120	198,5	0,001060	0,89186	503,48	2025,76	2529,24	503,69	2202,61	2706,30	1,5275	5,6020	7,1295
125	232,1	0,001065	0,77059	524,72	2009,91	2534,63	524,96	2188,50	2713,46	1,5812	5,4962	7,0774
130	270,1	0,001070	0,66850	546,00	1993,90	2539,90	546,29	2174,16	2720,46	1,6343	5,3925	7,0269
135	313,0	0,001075	0,58217	567,34	1977,69	2545,03	567,67	2159,59	2727,26	1,6869	5,2907	6,9777
140	361,3	0,001080	0,50885	588,72	1961,30	2550,02	589,11	2144,75	2733,87	1,7390	5,1908	6,9298
145	415,4	0,001085	0,44632	610,16	1944,69	2554,86	610,61	2129,65	2740,26	1,7906	5,0926	6,8832
150	475,9	0,001090	0,39278	631,66	1927,87	2559,54	632,18	2114,26	2746,44	1,8417	4,9960	6,8378
155	543,1	0,001096	0,34676	653,23	1910,82	2564,04	653,82	2098,56	2752,39	1,8924	4,9010	6,7934
160	617,8	0,001102	0,30706	674,85	1893,52	2568,37	675,53	2082,55	2758,09	1,9426	4,8075	6,7501
165	700,5	0,001108	0,27269	696,55	1875,97	2572,51	697,32	2066,20	2763,53	1,9924	4,7153	6,7078
170	791,7	0,001114	0,24283	718,31	1858,14	2576,46	719,20	2049,50	2768,70	2,0418	4,6244	6,6663
175	892,0	0,001121	0,21680	740,16	1840,03	2580,19	741,16	2032,42	2773,58	2,0909	4,5347	6,6256
180	1002,2	0,001127	0,19405	762,08	1821,62	2583,70	763,21	2014,96	2778,16	2,1395	4,4461	6,5857

Tabela B.1.1 (continuação)
Água saturada: tabela em função da temperatura

		Volume específico (m^3/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
Temp. °C	Pressão kPa	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
185	1122,7	0,001134	0,17409	784,08	1802,90	2586,98	785,36	1997,07	2782,43	2,1878	4,3586	6,5464
190	1254,4	0,001141	0,15654	806,17	1783,84	2590,01	807,61	1978,76	2786,37	2,2358	4,2720	6,5078
195	1397,8	0,001149	0,14105	828,36	1764,43	2592,79	829,96	1959,99	2789,96	2,2835	4,1863	6,4697
200	1553,8	0,001156	0,12736	850,64	1744,66	2595,29	852,43	1940,75	2793,18	2,3308	4,1014	6,4322
205	1723,0	0,001164	0,11521	873,02	1724,49	2597,52	875,03	1921,00	2796,03	2,3779	4,0172	6,3951
210	1906,3	0,001173	0,10441	895,51	1703,93	2599,44	897,75	1900,73	2798,48	2,4247	3,9337	6,3584
215	2104,2	0,001181	0,09479	918,12	1682,94	2601,06	920,61	1879,91	2800,51	2,4713	3,8507	6,3221
220	2317,8	0,001190	0,08619	940,85	1661,49	2602,35	943,61	1858,51	2802,12	2,5177	3,7683	6,2860
225	2547,7	0,001199	0,07849	963,72	1639,58	2603,30	966,77	1836,50	2803,27	2,5639	3,6863	6,2502
230	2794,9	0,001209	0,07158	986,72	1617,17	2603,89	990,10	1813,85	2803,95	2,6099	3,6047	6,2146
235	3060,1	0,001219	0,06536	1009,88	1594,24	2604,11	1013,61	1790,53	2804,13	2,6557	3,5233	6,1791
240	3344,2	0,001229	0,05976	1033,19	1570,75	2603,95	1037,31	1766,50	2803,81	2,7015	3,4422	6,1436
245	3648,2	0,001240	0,05470	1056,69	1546,68	2603,37	1061,21	1741,73	2802,95	2,7471	3,3612	6,1083
250	3973,0	0,001251	0,05013	1080,37	1522,00	2602,37	1085,34	1716,18	2801,52	2,7927	3,2802	6,0729
255	4319,5	0,001263	0,04598	1104,26	1496,66	2600,93	1109,72	1689,80	2799,51	2,8382	3,1992	6,0374
260	4688,6	0,001276	0,04220	1128,37	1470,64	2599,01	1134,35	1662,54	2796,89	2,8837	3,1181	6,0018
265	5081,3	0,001289	0,03877	1152,72	1443,87	2596,60	1159,27	1634,34	2793,61	2,9293	3,0368	5,9661
270	5498,7	0,001302	0,03564	1177,33	1416,33	2593,66	1184,49	1605,16	2789,65	2,9750	2,9551	5,9301
275	5941,8	0,001317	0,03279	1202,23	1387,94	2590,17	1210,05	1574,92	2784,97	3,0208	2,8730	5,8937
280	6411,7	0,001332	0,03017	1227,43	1358,66	2586,09	1235,97	1543,55	2779,53	3,0667	2,7903	5,8570
285	6909,4	0,001348	0,02777	1252,98	1328,41	2581,38	1262,29	1510,97	2773,27	3,1129	2,7069	5,8198
290	7436,0	0,001366	0,02557	1278,89	1297,11	2575,99	1289,04	1477,08	2766,13	3,1593	2,6227	5,7821
295	7992,8	0,001384	0,02354	1305,21	1264,67	2569,87	1316,27	1441,78	2758,05	3,2061	2,5375	5,7436
300	8581,0	0,001404	0,02167	1331,97	1230,99	2562,96	1344,01	1404,93	2748,94	3,2533	2,4511	5,7044
305	9201,8	0,001425	0,01995	1359,22	1195,94	2555,16	1372,33	1366,38	2738,72	3,3009	2,3633	5,6642
310	9856,6	0,001447	0,01835	1387,03	1159,37	2546,40	1401,29	1325,97	2727,27	3,3492	2,2737	5,6229
315	10547	0,001472	0,01687	1415,44	1121,11	2536,55	1430,97	1283,48	2714,44	3,3981	2,1821	5,5803
320	11274	0,001499	0,01549	1444,55	1080,93	2525,48	1461,45	1238,64	2700,08	3,4479	2,0882	5,5361
325	12040	0,001528	0,01420	1474,44	1038,57	2513,01	1492,84	1191,13	2683,97	3,4987	1,9913	5,4900
330	12845	0,001561	0,01300	1505,24	993,66	2498,91	1525,29	1140,56	2665,85	3,5506	1,8909	5,4416
335	13694	0,001597	0,01186	1537,11	945,77	2482,88	1558,98	1086,37	2645,35	3,6040	1,7863	5,3903
340	14586	0,001638	0,01080	1570,26	894,26	2464,53	1594,15	1027,86	2622,01	3,6593	1,6763	5,3356
345	15525	0,001685	0,00978	1605,01	838,29	2443,30	1631,17	964,02	2595,19	3,7169	1,5594	5,2763
350	16514	0,001740	0,00881	1641,81	776,58	2418,39	1670,54	893,38	2563,92	3,7776	1,4336	5,2111
355	17554	0,001807	0,00787	1681,41	707,11	2388,52	1713,13	813,59	2526,72	3,8427	1,2951	5,1378
360	18651	0,001892	0,00694	1725,19	626,29	2351,47	1760,48	720,52	2481,00	3,9146	1,1379	5,0525
365	19807	0,002011	0,00599	1776,13	526,54	2302,67	1815,96	605,44	2421,40	3,9983	0,9487	4,9470
370	21028	0,002213	0,00493	1843,84	384,69	2228,53	1890,37	441,75	2332,12	4,1104	0,6868	4,7972
374,1	22089	0,003155	0,00315	2029,58	0	2029,58	2099,26	0	2099,26	4,4297	0	4,4297

Tabela B.1.2
Água saturada: tabela em função da pressão

		Volume específico (m^3/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
Pressão kPa	Temp. °C	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
P	T	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0	2375,3	2375,3	0,00	2501,30	2501,30	0	9,1562	9,1562
1	6,98	0,001000	129,20802	29,29	2355,69	2384,98	29,29	2484,89	2514,18	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98013	54,70	2338,63	2393,32	54,70	2470,59	2525,30	0,1956	8,6322	8,8278
2	17,50	0,001001	67,00385	73,47	2326,02	2399,48	73,47	2460,02	2533,49	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,25385	88,47	2315,93	2404,40	88,47	2451,56	2540,03	0,3120	8,3311	8,6431
3	24,08	0,001003	45,66502	101,03	2307,48	2408,51	101,03	2444,47	2545,50	0,3545	8,2231	8,5775
4	28,96	0,001004	34,80015	121,44	2293,73	2415,17	121,44	2432,93	2554,37	0,4226	8,0520	8,4746
5	32,88	0,001005	28,19251	137,79	2282,70	2420,49	137,79	2423,66	2561,45	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,23775	168,76	2261,74	2430,50	168,77	2406,02	2574,79	0,5763	7,6751	8,2514
10	45,81	0,001010	14,67355	191,79	2246,10	2437,89	191,81	2392,82	2584,63	0,6492	7,5010	8,1501
15	53,97	0,001014	10,02218	225,90	2222,83	2448,73	225,91	2373,14	2599,06	0,7548	7,2536	8,0084
20	60,06	0,001017	7,64937	251,35	2205,36	2456,71	251,38	2358,33	2609,70	0,8319	7,0766	7,9085
25	64,97	0,001020	6,20424	271,88	2191,21	2463,08	271,90	2346,29	2618,19	0,8930	6,9383	7,8313
30	69,10	0,001022	5,22918	289,18	2179,22	2468,40	289,21	2336,07	2625,28	0,9439	6,8247	7,7686
40	75,87	0,001026	3,99345	317,51	2159,49	2477,00	317,55	2319,19	2636,74	1,0258	6,6441	7,6700
50	81,33	0,001030	3,24034	340,42	2143,43	2483,85	340,47	2305,40	2645,87	1,0910	6,5029	7,5939
75	91,77	0,001037	2,21711	394,29	2112,39	2496,67	384,36	2278,59	2662,96	1,2129	6,2434	7,4563
100	99,62	0,001043	1,69400	417,33	2088,72	2506,06	417,44	2258,02	2675,46	1,3025	6,0568	7,3593
125	105,99	0,001048	1,37490	444,16	2069,32	2513,48	444,30	2241,05	2685,35	1,3739	5,9104	7,2843
150	111,37	0,001053	1,15933	466,92	2052,72	2519,64	467,08	2226,46	2693,54	1,4335	5,7897	7,2232
175	116,06	0,001057	1,00363	486,78	2038,12	2524,90	486,97	2213,57	2700,53	1,4848	5,6868	7,1717
200	120,23	0,001061	0,88573	504,47	2025,02	2529,49	504,68	2201,96	2706,63	1,5300	5,5970	7,1271
225	124,00	0,001064	0,79325	520,45	2013,10	2533,56	520,69	2191,35	2712,04	1,5705	5,5173	7,0878
250	127,43	0,001067	0,71871	535,08	2002,14	2537,21	535,34	2181,55	2716,89	1,6072	5,4455	7,0526
275	130,60	0,001070	0,65731	548,57	1991,95	2540,53	548,87	2172,42	2721,29	1,6407	5,3801	7,0208
300	133,55	0,001073	0,60582	561,13	1982,43	2543,55	561,45	2163,85	2725,30	1,6717	5,3201	6,9918
325	136,30	0,001076	0,56201	572,88	1973,46	2546,34	573,23	2155,76	2728,99	1,7005	5,2646	6,9651
350	138,88	0,001079	0,52425	583,93	1964,98	2548,92	584,31	2148,10	2732,40	1,7274	5,2130	6,9404
375	141,32	0,001081	0,49137	594,38	1956,93	2551,31	594,79	2140,79	2735,58	1,7527	5,1647	6,9174
400	143,63	0,001084	0,46246	604,29	1949,26	2553,55	604,73	2133,81	2738,53	1,7766	5,1193	6,8958
450	147,93	0,001088	0,41398	622,75	1934,87	2557,62	623,24	2120,67	2743,91	1,8206	5,0359	6,8565
500	151,86	0,001093	0,37489	639,66	1921,57	2561,23	640,21	2108,47	2748,67	1,8606	4,9606	6,8212
550	155,48	0,001097	0,34268	655,30	1909,17	2564,47	655,91	2097,04	2752,94	1,8972	4,8920	6,7892
600	158,85	0,001101	0,31567	669,88	1897,52	2567,40	670,54	2086,26	2756,80	1,9311	4,8289	6,7600
650	162,01	0,001104	0,29268	683,55	1886,51	2570,06	684,26	2076,04	2760,30	1,9627	4,7704	6,7330
700	164,97	0,001108	0,27286	696,43	1876,07	2572,49	697,20	2066,30	2763,50	1,9922	4,7158	6,7080
750	167,77	0,001111	0,25560	708,62	1866,11	2574,73	709,45	2056,98	2766,43	2,0199	4,6647	6,6846
800	170,43	0,001115	0,24043	720,20	1856,58	2576,79	721,10	2048,04	2769,13	2,0461	4,6166	6,6627

Tabela B.1.2 (continuação)
Água saturada: tabela em função da pressão

		Volume específico (m^3/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
Pressão kPa	Temp. °C	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
P	T	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
850	172,96	0,001118	0,22698	731,25	1847,45	2578,69	732,20	2039,43	2771,63	2,0709	4,5711	6,6421
900	175,38	0,001121	0,21497	741,81	1838,65	2580,46	742,82	2031,12	2773,94	2,0946	4,5280	6,6225
950	177,69	0,001124	0,20419	751,94	1830,17	2582,11	753,00	2023,08	2776,08	2,1171	4,4869	6,6040
1000	179,91	0,001127	0,19444	761,67	1821,97	2583,64	762,79	2015,29	2778,08	2,1386	4,4478	6,5864
1100	184,09	0,001133	0,17753	780,08	1806,32	2586,40	781,32	2000,36	2781,68	2,1791	4,3744	6,5535
1200	187,99	0,001139	0,16333	797,27	1791,55	2588,82	798,64	1986,19	2784,82	2,2165	4,3067	6,5233
1300	191,64	0,001144	0,15125	813,42	1777,53	2590,95	814,91	1972,67	2787,58	2,2514	4,2438	6,4953
1400	195,07	0,001149	0,14084	828,68	1764,15	2592,83	830,29	1959,72	2790,00	2,2842	4,1850	6,4692
1500	198,32	0,001154	0,13177	843,14	1751,30	2594,50	844,87	1947,28	2792,15	2,3150	4,1298	6,4448
1750	205,76	0,001166	0,11349	876,44	1721,39	2597,83	878,48	1917,95	2796,43	2,3851	4,0044	6,3895
2000	212,42	0,001177	0,09963	906,42	1693,84	2600,26	908,77	1890,74	2799,51	2,4473	3,8935	6,3408
2250	218,45	0,001187	0,08875	933,81	1668,18	2601,98	936,48	1865,19	2801,67	2,5034	3,7938	6,2971
2500	223,99	0,001197	0,07998	959,09	1644,04	2603,13	962,09	1840,98	2803,07	2,5546	3,7028	6,2574
2750	229,12	0,001207	0,07275	982,65	1621,16	2603,81	985,97	1817,89	2803,86	2,6018	3,6190	6,2208
3000	233,90	0,001216	0,06668	1004,76	1599,34	2604,10	1008,41	1795,73	2804,14	2,6456	3,5412	6,1869
3250	238,38	0,001226	0,06152	1025,62	1578,43	2604,04	1029,60	1774,37	2803,97	2,6866	3,4685	6,1551
3500	242,60	0,001235	0,05707	1045,41	1558,29	2603,70	1049,73	1753,70	2803,43	2,7252	3,4000	6,1252
4000	250,40	0,001252	0,04978	1082,28	1519,99	2602,27	1087,29	1714,09	2801,38	2,7963	3,2737	6,0700
5000	263,99	0,001286	0,03944	1147,78	1449,34	2597,12	1154,21	1640,12	2794,33	2,9201	3,0532	5,9733
6000	275,64	0,001319	0,03244	1205,41	1384,27	2589,69	1213,32	1571,00	2784,33	3,0266	2,8625	5,8891
7000	285,88	0,001351	0,02737	1257,51	1322,97	2580,48	1266,97	1505,10	2772,07	3,1210	2,6922	5,8132
8000	295,06	0,001384	0,02352	1305,54	1264,25	2569,79	1316,61	1441,33	2757,94	3,2067	2,5365	5,7431
9000	303,40	0,001418	0,02048	1350,47	1207,28	2557,75	1363,23	1378,88	2742,11	3,2857	2,3915	5,6771
10000	311,06	0,001452	0,01803	1393,00	1151,40	2544,41	1407,53	1317,14	2724,67	3,3595	2,2545	5,6140
11000	318,15	0,001489	0,01599	1433,68	1096,06	2529,74	1450,05	1255,55	2705,60	3,4294	2,1233	5,5527
12000	324,75	0,001527	0,01426	1472,92	1040,76	2513,67	1491,24	1193,59	2684,83	3,4961	1,9962	5,4923
13000	330,93	0,001567	0,01278	1511,09	984,99	2496,08	1531,46	1130,76	2662,22	3,5604	1,8718	5,4323
14000	336,75	0,001611	0,01149	1548,53	928,23	2476,76	1571,08	1066,47	2637,55	3,6231	1,7485	5,3716
15000	342,24	0,001658	0,01034	1585,58	869,85	2455,43	1610,45	1000,04	2610,49	3,6847	1,6250	5,3097
16000	347,43	0,001711	0,00931	1622,63	809,07	2431,70	1650,00	930,59	2580,59	3,7460	1,4995	5,2454
17000	352,37	0,001770	0,00836	1660,16	744,80	2404,96	1690,25	856,90	2547,15	3,8078	1,3698	5,1776
18000	357,06	0,001840	0,00749	1698,86	675,42	2374,28	1731,97	777,13	2509,09	3,8713	1,2330	5,1044
19000	361,54	0,001924	0,00666	1739,87	598,18	2338,05	1776,43	688,11	2464,54	3,9387	1,0841	5,0227
20000	365,81	0,002035	0,00583	1785,47	507,58	2293,05	1826,18	583,56	2409,74	4,0137	0,9132	4,9269
21000	369,89	0,002206	0,00495	1841,97	388,74	2230,71	1888,30	446,42	2334,72	4,1073	0,6942	4,8015
22000	373,80	0,002808	0,00353	1973,16	108,24	2081,39	2034,92	124,04	2158,97	4,3307	0,1917	4,5224
22089	374,14	0,003155	0,00315	2029,58	0	2029,58	2099,26	0	2099,26	4,4297	0	4,4297

Tabela B.1.3
Vapor d'água superaquecido

T	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	P = 10 kPa (45,81 °C)				P = 50 kPa (81,33 °C)				P = 100 kPa (99,62 °C)			
Sat.	14,67355	2437,89	2584,63	8,1501	3,24034	2483,85	2645,87	7,5939	1,69400	2506,06	2675,46	7,3593
50	14,86920	2443,87	2592,56	8,1749	-	-	-	-	-	-	-	-
100	17,19561	2515,50	2687,46	8,4479	3,41833	2511,61	2682,52	7,6947	-	-	-	-
150	19,51251	2587,86	2782,99	8,6881	3,88937	2585,61	2780,08	7,9400	1,93636	2582,75	2776,38	7,6133
200	21,82507	2661,27	2879,52	8,9037	4,35595	2659,85	2877,64	8,1579	2,17226	2658,05	2875,27	7,8342
250	24,13559	2735,95	2977,31	9,1002	4,82045	2734,97	2975,99	8,3555	2,40604	2733,73	2974,33	8,0332
300	26,44508	2812,06	3076,51	9,2812	5,28391	2811,33	3075,52	8,5372	2,63876	2810,41	3074,28	8,2157
400	31,06252	2968,89	3279,51	9,6076	6,20929	2968,43	3278,89	8,8641	3,10263	2967,85	3278,11	8,5434
500	35,67896	3132,26	3489,05	9,8977	7,13364	3131,94	3488,62	9,1545	3,56547	3131,54	3488,09	8,8341
600	40,29488	3302,45	3705,40	10,1608	8,05748	3302,22	3705,10	9,4177	4,02781	3301,94	3704,72	9,0975
700	44,91052	3479,63	3928,73	10,4028	8,98104	3479,45	3928,51	9,6599	4,48986	3479,24	3928,23	9,3398
800	49,52599	3663,84	4159,10	10,6281	9,90444	3663,70	4158,92	9,8852	4,95174	3663,53	4158,71	9,5652
900	54,14137	3855,03	4396,44	10,8395	10,82773	3854,91	4396,30	10,0967	5,41353	3854,77	4396,12	9,7767
1000	58,75669	4053,01	4640,58	11,0392	11,75097	4052,91	4640,46	10,2964	5,87526	4052,78	4640,31	9,9764
1100	63,37198	4257,47	4891,19	11,2287	12,67418	4257,37	4891,08	10,4858	6,33696	4257,25	4890,95	10,1658
1200	67,98724	4467,91	5147,78	11,4090	13,59737	4467,82	5147,69	10,6662	6,79863	4467,70	5147,56	10,3462
1300	72,60250	4683,68	5409,70	14,5810	14,52054	4683,58	5409,61	10,8382	7,26030	4683,47	5409,49	10,5182
	P = 200 kPa (120,23 °C)				P = 300 kPa (133,55 °C)				P = 400 kPa (143,63 °C)			
Sat.	0,88573	2529,49	2706,63	7,1271	0,60582	2543,55	2725,30	6,9918	0,46246	2553,55	2738,53	6,8958
150	0,95964	2576,87	2768,80	7,2795	0,63388	2570,79	2760,95	7,0778	0,47084	2564,48	2752,82	6,9299
200	1,08034	2654,39	2870,46	7,5066	0,71629	2650,65	2865,54	7,3115	0,53422	2646,83	2860,51	7,1706
250	1,19880	2731,22	2970,98	7,7085	0,79636	2728,69	2967,59	7,5165	0,59512	2726,11	2964,16	7,3788
300	1,31616	2808,55	3071,79	7,8926	0,87529	2806,69	3069,28	7,7022	0,65484	2804,81	3066,75	7,5661
400	1,54930	2966,69	3276,55	8,2217	1,03151	2965,53	3274,98	8,0329	0,77262	2964,36	3273,41	7,8984
500	1,78139	3130,75	3487,03	8,5132	1,18669	3129,95	3485,96	8,3250	0,88934	3129,15	3484,89	8,1912
600	2,01297	3301,36	3703,96	8,7769	1,34136	3300,79	3703,20	8,5892	1,00555	3300,22	3702,44	8,4557
700	2,24426	3478,81	3927,66	9,0194	1,49573	3478,38	3927,10	8,8319	1,12147	3477,95	3926,53	8,6987
800	2,47539	3663,19	4158,27	9,2450	1,64994	3662,85	4157,83	9,0575	1,23722	3662,51	4157,40	8,9244
900	2,70643	3854,49	4395,77	9,4565	1,80406	3854,20	4395,42	9,2691	1,35288	3853,91	4395,06	9,1361
1000	2,93740	4052,53	4640,01	9,6563	1,95812	4052,27	4639,71	9,4689	1,46847	4052,02	4639,41	9,3360
1100	3,16834	4257,01	4890,68	9,8458	2,11214	4256,77	4890,41	9,6585	1,58404	4256,53	4890,15	9,5255
1200	3,39927	4467,46	5147,32	10,0262	2,26614	4467,23	5147,07	9,8389	1,69958	4466,99	5146,83	9,7059
1300	3,63018	4683,23	5409,26	10,1982	2,42013	4682,99	5409,03	10,0109	1,81511	4682,75	5408,80	9,8780
	P = 500 kPa (151,86 °C)				P = 600 kPa (158,85 °C)				P = 800 kPa (170,43 °C)			
Sat.	0,37489	2561,23	2748,67	6,8212	0,31567	2567,40	2756,80	6,7600	0,24043	2576,79	2769,13	6,6627
200	0,42492	2642,91	2855,37	7,0592	0,35202	2638,91	2850,12	6,9665	0,26080	2630,61	2839,25	6,8158
250	0,47436	2723,50	2960,68	7,2708	0,39383	2720,86	2957,16	7,1816	0,29314	2715,46	2949,97	7,0384
300	0,52256	2802,91	3064,20	7,4598	0,43437	2801,00	3061,63	7,3723	0,32411	2797,14	3056,43	7,2327
350	0,57012	2882,59	3167,65	7,6328	0,47424	2881,12	3165,66	7,5463	0,35439	2878,16	3161,68	7,4088
400	0,61728	2963,19	3271,83	7,7937	0,51372	2962,02	3270,25	7,7078	0,38426	2959,66	3267,07	7,5715
500	0,71093	3128,35	3483,82	8,0872	0,59199	3127,55	3482,75	8,0020	0,44331	3125,95	3480,60	7,8672
600	0,80406	3299,64	3701,67	8,3521	0,66974	3299,07	3700,91	8,2673	0,50184	3297,91	3699,38	8,1332
700	0,89691	3477,52	3925,97	8,5952	0,74720	3477,08	3925,41	8,5107	0,56007	3476,22	3924,27	8,3770
800	0,98959	3662,17	4156,96	8,8211	0,82450	3661,83	4156,52	8,7367	0,61813	3661,14	4155,65	8,6033
900	1,08217	3853,63	4394,71	9,0329	0,90169	3853,34	4394,36	8,9485	0,67610	3852,77	4393,65	8,8153
1000	1,17469	4051,76	4639,11	9,2328	0,97883	4051,51	4638,81	9,1484	0,73401	4051,00	4638,20	9,0153
1100	1,26718	4256,29	4889,88	9,4224	1,05594	4256,05	4889,61	9,3381	0,79188	4255,57	4889,08	9,2049
1200	1,35964	4466,76	5146,58	9,6028	1,13302	4466,52	5146,34	9,5185	0,84974	4466,05	5145,85	9,3854
1300	1,45210	4682,52	5408,57	9,7749	1,21009	4682,28	5408,34	9,6906	0,90758	4681,81	5407,87	9,5575

Tabela B.1.3 (continuação)
Vapor d'água superaquecido

T	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	P = 1000 kPa (179,91 °C)				P = 1200 kPa (187,99 °C)				P = 1400 kPa (195,07 °C)			
Sat.	0,19444	2583,64	2778,08	6,5864	0,16333	2588,82	2784,82	6,5233	0,14084	2592,83	2790,00	6,4692
200	0,20596	2621,90	2827,86	6,6939	0,16930	2612,74	2815,90	6,5898	0,14302	2603,09	2803,32	6,4975
250	0,23268	2709,91	2942,59	6,9246	0,19235	2704,20	2935,01	6,8293	0,16350	2698,32	2927,22	6,7467
300	0,25794	2793,21	3051,15	7,1228	0,21382	2789,22	3045,80	7,0316	0,18228	2785,16	3040,35	6,9533
350	0,28247	2875,18	3157,65	7,3010	0,23452	2872,16	3153,59	7,2120	0,20026	2869,12	3149,49	7,1359
400	0,30659	2957,29	3263,88	7,4650	0,25480	2954,90	3260,66	7,3773	0,21780	2952,50	3257,42	7,3025
500	0,35411	3124,34	3478,44	7,7621	0,29463	3122,72	3476,28	7,6758	0,25215	3121,10	3474,11	7,6026
600	0,40109	3296,76	3697,85	8,0289	0,33393	3295,60	3696,32	7,9434	0,28596	3294,44	3694,78	7,8710
700	0,44779	3475,35	3923,14	8,2731	0,37294	3474,48	3922,01	8,1881	0,31947	3473,61	3920,87	8,1160
800	0,49432	3660,46	4154,78	8,4996	0,41177	3659,77	4153,90	8,4149	0,35281	3659,09	4153,03	8,3431
900	0,54075	3852,19	4392,94	8,7118	0,45051	3851,62	4392,23	8,6272	0,38606	3851,05	4391,53	8,5555
1000	0,58712	4050,49	4637,60	8,9119	0,48919	4049,98	4637,00	8,8274	0,41924	4049,47	4636,41	8,7558
1100	0,63345	4255,09	4888,55	9,1016	0,52783	4254,61	4888,02	9,0171	0,45239	4254,14	4887,49	8,9456
1200	0,67977	4465,58	5145,36	9,2821	0,56646	4465,12	5144,87	9,1977	0,48552	4464,65	5144,38	9,1262
1300	0,72608	4681,33	5407,41	9,4542	0,60507	4680,86	5406,95	9,3698	0,51864	4680,39	5406,49	9,2983
	P = 1600 kPa (201,40 °C)				P = 1800 kPa (207,15 °C)				P = 2000 kPa (212,42 °C)			
Sat.	0,12380	2595,95	2794,02	6,4217	0,11042	2598,38	2797,13	6,3793	0,09963	2600,26	2799,51	6,3408
250	0,14184	2692,26	2919,20	6,6732	0,12497	2686,02	2910,96	6,6066	0,11144	2679,58	2902,46	6,5452
300	0,15862	2781,03	3034,83	6,8844	0,14021	2776,83	3029,21	6,8226	0,12547	2772,56	3023,50	6,7663
350	0,17456	2866,05	3145,35	7,0693	0,15457	2862,95	3141,18	7,0099	0,13857	2859,81	3136,96	6,9562
400	0,19005	2950,09	3254,17	7,2373	0,16847	2947,66	3250,90	7,1793	0,15120	2945,21	3247,60	7,1270
450	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16353	3030,41	3357,48	7,2844
500	0,22029	3119,47	3471,93	7,5389	0,19550	3117,84	3469,75	7,4824	0,17568	3116,20	3467,55	7,4316
600	0,24998	3293,27	3693,23	7,8080	0,22199	3292,10	3691,69	7,7523	0,19960	3290,93	3690,14	7,7023
700	0,27937	3472,74	3919,73	8,0535	0,24818	3471,87	3918,59	7,9983	0,22323	3470,99	3917,45	7,9487
800	0,30859	3658,40	4152,15	8,2808	0,27420	3657,71	4151,27	8,2258	0,24668	3657,03	4150,40	8,1766
900	0,33772	3850,47	4390,82	8,4934	0,30012	3849,90	4390,11	8,4386	0,27004	3849,33	4389,40	8,3895
1000	0,36678	4048,96	4635,81	8,6938	0,32598	4048,45	4635,21	8,6390	0,29333	4047,94	4634,61	8,5900
1100	0,39581	4253,66	4886,95	8,8837	0,35180	4253,18	4886,42	8,8290	0,31659	4252,71	4885,89	8,7800
1200	0,42482	4464,18	5143,89	9,0642	0,37761	4463,71	5143,40	9,0096	0,33984	4463,25	5142,92	8,9606
1300	0,45382	4679,92	5406,02	9,2364	0,40340	4679,44	5405,56	9,1817	0,36306	4678,97	5405,10	9,1328
	P = 2500 kPa (223,99 °C)				P = 3000 kPa (233,90 °C)				P = 4000 kPa (250,40 °C)			
Sat.	0,07998	2603,13	2803,07	6,2574	0,06668	2604,10	2804,14	6,1869	0,04978	2602,27	2801,38	6,0700
250	0,08700	2662,55	2880,06	6,4084	0,07058	2644,00	2855,75	6,2871	-	-	-	-
300	0,09890	2761,56	3008,81	6,6437	0,08114	2750,05	2993,48	6,5389	0,05884	2725,33	2960,68	6,3614
350	0,10976	2851,84	3126,24	6,8402	0,09053	2843,66	3115,25	6,7427	0,06645	2826,65	3092,43	6,5820
400	0,12010	2939,03	3239,28	7,0147	0,09936	2932,75	3230,82	6,9211	0,07341	2919,88	3213,51	6,7689
450	0,13014	3025,43	3350,77	7,1745	0,10787	3020,38	3344,00	7,0833	0,08003	3010,13	3330,23	6,9362
500	0,13998	3112,08	3462,04	7,3233	0,11619	3107,92	3456,48	7,2337	0,08643	3099,49	3445,21	7,0900
600	0,15930	3287,99	3686,25	7,5960	0,13243	3285,03	3682,34	7,5084	0,09885	3279,06	3674,44	7,3688
700	0,17832	3468,80	3914,59	7,8435	0,14838	3466,59	3911,72	7,7571	0,11095	3462,15	3905,94	7,6198
800	0,19716	3655,30	4148,20	8,0720	0,16414	3653,58	4146,00	7,9862	0,12287	3650,11	4141,59	7,8502
900	0,21590	3847,89	4387,64	8,2853	0,17980	3846,46	4385,87	8,1999	0,13469	3843,59	4382,34	8,0647
1000	0,23458	4046,67	4633,12	8,4860	0,19541	4045,40	4631,63	8,4009	0,14645	4042,87	4628,65	8,2661
1100	0,25322	4251,52	4884,57	8,6761	0,21098	4250,33	4883,26	8,5911	0,15817	4247,96	4880,63	8,4566
1200	0,27185	4462,08	5141,70	8,8569	0,22652	4460,92	5140,49	8,7719	0,16987	4458,60	5138,07	8,6376
1300	0,29046	4677,80	5403,95	9,0291	0,24206	4676,63	5402,81	8,9442	0,18156	4674,29	5400,52	8,8099

Tabela B.1.3 (continuação)
Vapor d'água superaquecido

T	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	P = 5000 kPa (263,99 °C)				P = 6000 kPa (275,64 °C)				P = 8000 kPa (295,06 °C)			
Sat.	0,03944	2597,12	2794,33	5,9733	0,03244	2589,69	2784,33	5,8891	0,02352	2569,79	2757,94	5,7431
300	0,04532	2697,94	2924,53	6,2083	0,03616	2667,22	2884,19	6,0673	0,02426	2590,93	2784,98	5,7905
350	0,05194	2808,67	3068,39	6,4492	0,04223	2789,61	3042,97	6,3334	0,02995	2747,67	2987,30	6,1300
400	0,05781	2906,58	3195,64	6,6458	0,04739	2892,81	3177,17	6,5407	0,03432	2863,75	3138,28	6,3633
450	0,06330	2999,64	3316,15	6,8185	0,05214	2988,90	3301,76	6,7192	0,03817	2966,66	3271,99	6,5550
500	0,06857	3090,92	3433,76	6,9758	0,05665	3082,20	3422,12	6,8802	0,04175	3064,30	3398,27	6,7239
550	0,07368	3181,82	3550,23	7,1217	0,06101	3174,57	3540,62	7,0287	0,04516	3159,76	3521,01	6,8778
600	0,07869	3273,01	3666,47	7,2588	0,06525	3266,89	3658,40	7,1676	0,04845	3254,43	3642,03	7,0205
700	0,08849	3457,67	3900,13	7,5122	0,07352	3453,15	3894,28	7,4234	0,05481	3444,00	3882,47	7,2812
800	0,09811	3646,62	4137,17	7,7440	0,08160	3643,12	4132,74	7,6566	0,06097	3636,08	4123,84	7,5173
900	0,10762	3840,71	4378,82	7,9593	0,08958	3837,84	4375,29	7,8727	0,06702	3832,08	4368,26	7,7350
1000	0,11707	4040,35	4625,69	8,1612	0,09749	4037,83	4622,74	8,0751	0,07301	4032,81	4616,87	7,9384
1100	0,12648	4245,61	4878,02	8,3519	0,10536	4243,26	4875,42	8,2661	0,07896	4238,60	4870,25	8,1299
1200	0,13587	4456,30	5135,67	8,5330	0,11321	4454,00	5133,28	8,4473	0,08489	4449,45	5128,54	8,3115
1300	0,14526	4671,96	5398,24	8,7055	0,12106	4669,64	5395,97	8,6199	0,09080	4665,02	5391,46	8,4842
	P = 10 000 kPa (311,06 °C)				P = 15 000 kPa (342,24 °C)				P = 20 000 kPa (365,81 °C)			
Sat.	0,01803	2544,41	2724,67	5,6140	0,01034	2455,43	2610,49	5,3097	0,00583	2293,05	2409,74	4,9269
350	0,02242	2699,16	2923,39	5,9442	0,01147	2520,36	2692,41	5,4420	-	-	-	-
400	0,02641	2832,38	3096,46	6,2119	0,01565	2740,70	2975,44	5,8810	0,00994	2619,22	2818,07	5,5539
450	0,02975	2943,32	3240,83	6,4189	0,01845	2879,47	3156,15	6,1403	0,01270	2806,16	3060,06	5,9016
500	0,03279	3045,77	3373,63	6,5965	0,02080	2996,52	3308,53	6,3442	0,01477	2942,82	3238,18	6,1400
550	0,03564	3144,54	3500,92	6,7561	0,02293	3104,71	3448,61	6,5198	0,01656	3062,34	3393,45	6,3347
600	0,03837	3241,68	3625,34	6,9028	0,02491	3208,64	3582,30	6,6775	0,01818	3174,00	3537,57	6,5048
650	-	-	-	-	0,02680	3310,37	3712,32	6,8223	0,01969	3281,46	3675,32	6,6582
700	0,04358	3434,72	3870,52	7,1687	0,02861	3410,94	3840,12	6,9572	0,02113	3386,46	3809,09	6,7993
800	0,04859	3628,97	4114,91	7,4077	0,03210	3610,99	4092,43	7,2040	0,02385	3592,73	4069,80	7,0544
900	0,05349	3826,32	4361,24	7,6272	0,03546	3811,89	4343,75	7,4279	0,02645	3797,44	4326,37	7,2830
1000	0,05832	4027,81	4611,04	7,8315	0,03875	4015,41	4596,63	7,6347	0,02897	4003,12	4582,45	7,4925
1100	0,06312	4233,97	4865,14	8,0236	0,04200	4222,55	4852,56	7,8282	0,03145	4211,30	4840,24	7,6874
1200	0,06789	4444,93	5123,84	8,2054	0,04523	4433,78	5112,27	8,0108	0,03391	4422,81	5100,96	7,8706
1300	0,07265	4660,44	5386,99	8,3783	0,04845	4649,12	5375,94	8,1839	0,03636	4637,95	5365,10	8,0441
	P = 30 000 kPa				P = 40 000 kPa							
375	0,001789	1737,75	1791,43	3,9303	0,001641	1677,09	1742,71	3,8289				
400	0,002790	2067,34	2151,04	4,4728	0,001908	1854,52	1930,83	4,1134				
425	0,005304	2455,06	2614,17	5,1503	0,002532	2096,83	2198,11	4,5028				
450	0,006735	2619,30	2821,35	5,4423	0,003693	2365,07	2512,79	4,9459				
500	0,008679	2820,67	3081,03	5,7904	0,005623	2678,36	2903,26	5,4699				
550	0,010168	2970,31	3275,36	6,0342	0,006984	2869,69	3149,05	5,7784				
600	0,011446	3100,53	3443,91	6,2330	0,008094	3022,61	3346,38	6,0113				
650	0,012596	3221,04	3598,93	6,4057	0,009064	3158,04	3520,58	6,2054				
700	0,013661	3335,84	3745,67	6,5606	0,009942	3283,63	3681,29	6,3750				
800	0,015623	3555,60	4024,31	6,8332	0,011523	3517,89	3978,80	6,6662				
900	0,017448	3768,48	4291,93	7,0717	0,012963	3739,42	4257,93	6,9150				
1000	0,019196	3978,79	4554,68	7,2867	0,014324	3954,64	4527,59	7,1356				
1100	0,020903	4189,18	4816,28	7,4845	0,015643	4167,38	4793,08	7,3364				
1200	0,022589	4401,29	5078,97	7,6691	0,016940	4380,11	5057,72	7,5224				
1300	0,024266	4615,96	5343,95	7,8432	0,018229	4594,28	5323,45	7,6969				

Tabela B.1.4
Água líquida comprimida

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	P = 500 kPa (151,86 °C)				P = 2000 kPa (212,42 °C)				P = 5000 kPa (263,99 °C)			
Sat.	0,001093	639,66	640,21	1,8606	0,001177	906,42	908,77	2,4473	0,001286	1147,78	1154,21	2,9201
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0,000998	0,03	5,02	0,0001
0,01	0,000999	0,01	0,51	0,0000	0,000999	0,03	2,03	0,0001	-	-	-	
20	0,001002	83,91	84,41	0,2965	0,001001	83,82	85,92	0,2962	0,001000	83,64	88,64	0,2955
40	0,001008	167,47	167,98	0,5722	0,001007	167,29	169,30	0,5716	0,001006	166,93	171,95	0,5705
60	0,001017	251,00	251,51	0,8308	0,001016	250,73	252,77	0,8300	0,001015	250,21	255,28	0,8284
80	0,001029	334,73	335,24	1,0749	0,001028	334,38	336,44	1,0739	0,001027	333,69	338,83	1,0719
100	0,001043	418,80	419,32	1,3065	0,001043	418,36	420,45	1,3053	0,001041	417,50	422,71	1,3030
120	0,001060	503,37	503,90	1,5273	0,001059	502,84	504,96	1,5259	0,001058	501,79	507,07	1,5232
140	0,001080	588,66	589,20	1,7389	0,001079	588,02	590,18	1,7373	0,001077	586,74	592,13	1,7342
160	-	-	-	-	0,001101	674,14	676,34	1,9410	0,001099	672,61	678,10	1,9374
180	-	-	-	-	0,001127	761,46	763,71	2,1392	0,001124	759,62	765,24	2,1341
200	-	-	-	-	0,001156	850,30	852,61	2,3301	0,001153	848,08	853,85	2,3254
220	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001187	938,43	944,36	2,5128
240	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001226	1031,34	1037,47	2,6978
260	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001275	1127,92	1134,30	2,8829
	P = 10 000 kPa (311,06 °C)				P = 15 000 kPa (342,24 °C)				P = 20 000 kPa (365,81 °C)			
Sat.	0,001452	1393,00	1407,53	3,3595	0,001658	1585,58	1610,45	3,6847	0,002035	1785,47	1826,18	4,0137
0	0,000995	0,10	10,05	0,0003	0,000993	0,15	15,04	0,0004	0,000990	0,20	20,00	0,0004
20	0,000997	83,35	93,32	0,2945	0,000995	83,05	97,97	0,2934	0,000993	82,75	102,61	0,2922
40	0,001003	166,33	176,36	0,5685	0,001001	165,73	180,75	0,5665	0,000999	165,15	185,14	0,5646
60	0,001013	249,34	259,47	0,8258	0,001011	248,49	263,65	0,8231	0,001009	247,66	267,82	0,8205
80	0,001025	332,56	342,81	1,0687	0,001022	331,46	346,79	1,0655	0,001020	330,38	350,78	1,0623
100	0,001039	416,09	426,48	1,2992	0,001036	414,72	430,26	1,2954	0,001034	413,37	434,04	1,2917
120	0,001055	500,07	510,61	1,5188	0,001052	498,39	514,17	1,5144	0,001050	496,75	517,74	1,5101
140	0,001074	584,67	595,40	1,7291	0,001071	582,64	598,70	1,7241	0,001068	580,67	602,03	1,7192
160	0,001195	670,11	681,07	1,9316	0,001092	667,69	684,07	1,9259	0,001089	665,34	687,11	1,9203
180	0,001120	756,63	767,83	2,1274	0,001116	753,74	770,48	2,1209	0,001112	750,94	773,18	2,1146
200	0,001148	844,49	855,97	2,3178	0,001143	841,04	858,18	2,3103	0,001139	837,70	860,47	2,3031
220	0,001181	934,07	945,88	2,5038	0,001175	929,89	947,52	2,4952	0,001169	925,89	949,27	2,4869
240	0,001219	1025,94	1038,13	2,6872	0,001211	1020,82	1038,99	2,6770	0,001205	1015,94	1040,04	2,6673
260	0,001265	1121,03	1133,68	2,8698	0,001255	1114,59	1133,41	2,8575	0,001246	1108,53	1133,45	2,8459
280	0,001322	1220,90	1234,11	3,0547	0,001308	1212,47	1232,09	3,0392	0,001297	1204,69	1230,62	3,0249
300	0,001397	1328,34	1342,31	3,2468	0,001377	1316,58	1337,23	3,2259	0,001360	1306,10	1333,29	3,2071
320	-	-	-	-	0,001472	1431,05	1453,13	3,4246	0,001444	1415,66	1444,53	3,3978
340	-	-	-	-	0,001631	1567,42	1591,88	3,6545	0,001568	1539,64	1571,01	3,6074
360	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001823	1702,78	1739,23	3,8770

Tabela B.1.4 (continuação)
Água líquida comprimida

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	P = 30 000 kPa				P = 50 000 kPa			
0	0,000986	0,25	29,82	0,0001	0,000977	0,20	49,03	–0,0014
20	0,000989	82,16	111,82	0,2898	0,000980	80,98	130,00	0,2847
40	0,000995	164,01	193,87	0,5606	0,000987	161,84	211,20	0,5526
60	0,001004	246,03	276,16	0,8153	0,000996	242,96	292,77	0,8051
80	0,001016	328,28	358,75	1,0561	0,001007	324,32	374,68	1,0439
100	0,001029	410,76	441,63	1,2844	0,001020	405,86	456,87	1,2703
120	0,001044	493,58	524,91	1,5017	0,001035	487,63	539,37	1,4857
140	0,001062	576,86	608,73	1,7097	0,001052	569,76	622,33	1,6915
160	0,001082	660,81	693,27	1,9095	0,001070	652,39	705,91	1,8890
180	0,001105	745,57	778,71	2,1024	0,001091	735,68	790,24	2,0793
200	0,001130	831,34	865,24	2,2892	0,001115	819,73	875,46	2,2634
220	0,001159	918,32	953,09	2,4710	0,001141	904,67	961,71	2,4419
240	0,001192	1006,84	1042,60	2,6489	0,001170	990,69	1049,20	2,6158
260	0,001230	1097,38	1134,29	2,8242	0,001203	1078,06	1138,23	2,7860
280	0,001275	1190,69	1228,96	2,9985	0,001242	1167,19	1229,26	2,9536
300	0,001330	1287,89	1327,80	3,1740	0,001286	1258,66	1322,95	3,1200
320	0,001400	1390,64	1432,63	3,3538	0,001339	1353,23	1420,17	3,2867
340	0,001492	1501,71	1546,47	3,5425	0,001403	1451,91	1522,07	3,4556
360	0,001627	1626,57	1675,36	3,7492	0,001484	1555,97	1630,16	3,6290
380	0,001869	1781,35	1837,43	4,0010	0,001588	1667,13	1746,54	3,8100

Tabela B.1.5
Saturação sólido – vapor

	Volume específico (m³/kg)				Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
Temp. T °C	Pressão p kPa	Sólido sat.[1] $v_s \times 10^3$	Evap. v_{sv}	Vapor sat. v_v	Sólido sat. u_s	Subl. u_{sv}	Vapor sat. u_v	Sólido sat. h_s	Subl. h_{sv}	Vapor sat. h_v	Sólido sat. s_s	Subl. s_{sv}	Vapor sat. s_v
0,01	0,6113	0,0010908	206,152	206,153	–333,40	2708,7	2375,3	–333,40	2834,7	2501,3	–1,2210	10,3772	9,1562
0	0,6108	0,0010908	206,314	206,315	–333,42	2708,7	2375,3	–333,42	2834,8	2501,3	–1,2211	10,3776	9,1565
–2	0,5177	0,0010905	241,662	241,663	–337,61	2710,2	2372,5	–337,61	2835,3	2497,6	–1,2369	10,4562	9,2193
–4	0,4376	0,0010901	283,798	283,799	–341,78	2711,5	2369,8	–341,78	2835,7	2494,0	–1,2526	10,5358	9,2832
–6	0,3689	0,0010898	334,138	334,139	–345,91	2712,9	2367,0	–345,91	2836,2	2490,3	–1,2683	10,6165	9,3482
–8	0,3102	0,0010894	394,413	394,414	–350,02	2714,2	2364,2	–350,02	2836,6	2486,6	–1,2839	10,6982	9,4143
–10	0,2601	0,0010891	466,756	466,757	–354,09	2715,5	2361,4	–354,09	2837,0	2482,9	–1,2995	10,7809	9,4815
–12	0,2176	0,0010888	553,802	553,803	–358,14	2716,8	2358,7	–358,14	2837,3	2479,2	–1,3150	10,8648	9,5498
–14	0,1815	0,0010884	658,824	658,824	–362,16	2718,0	2355,9	–362,16	2837,6	2475,5	–1,3306	10,9498	9,6192
–16	0,1510	0,0010881	785,906	785,907	–366,14	2719,2	2353,1	–366,14	2837,9	2471,8	–1,3461	11,0359	9,6898
–18	0,1252	0,0010878	940,182	940,183	–370,10	2720,4	2350,3	–370,10	2838,2	2468,1	–1,3617	11,1233	9,7616
–20	0,10355	0,0010874	1128,112	1128,113	–374,03	2721,6	2347,5	–374,03	2838,4	2464,3	–1,3772	11,2120	9,8348
–22	0,08535	0,0010871	1357,863	1357,864	–377,93	2722,7	2344,7	–377,93	2838,6	2460,6	–1,3928	11,3020	9,9093
–24	0,07012	0,0010868	1639,752	1639,753	–381,80	2723,7	2342,0	–381,80	2838,7	2456,9	–1,4083	11,3935	9,9852
–26	0,05741	0,0010864	1986,775	1986,776	–385,64	2724,8	2339,2	–385,64	2838,9	2453,2	–1,4239	11,4864	10,0625
–28	0,04684	0,0010861	2415,200	2415,201	–389,45	2725,8	2336,4	–389,45	2839,0	2449,5	–1,4394	11,5808	10,1413
–30	0,03810	0,0010858	2945,227	2945,228	–393,23	2726,8	2333,6	–393,23	2839,0	2445,8	–1,4550	11,6765	10,2215
–32	0,03090	0,0010854	3601,822	3601,823	–396,98	2727,8	2330,8	–396,98	2839,1	2442,1	–1,4705	11,7733	10,3028
–34	0,02499	0,0010851	4416,252	4416,253	–400,71	2728,7	2328,0	–400,71	2839,1	2438,4	–1,4860	11,8713	10,3853
–36	0,02016	0,0010848	5430,115	5430,116	–404,40	2729,6	2325,2	–404,40	2839,1	2434,7	–1,5014	11,9704	10,4690
–38	0,01618	0,0010844	6707,021	6707,022	–408,06	2730,5	2322,4	–408,06	2839,0	2431,0	–1,5168	12,0714	10,5546
–40	0,01286	0,0010841	8366,395	8366,396	–411,70	2731,3	2319,6	–411,70	2838,9	2427,2	–1,5321	12,1768	10,6447

Os valores tabelados de v_s estão multiplicados por 1000. Por exemplo, a –6 °C: $v_s \times 10^3 = 1,0898$. Portanto, $v_s = 0,0010898$ m³/kg. (N.T.)

Tabela B.2 — Propriedades Termodinâmicas da Amônia

Tabela B.2.1 — Amônia saturada

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m^3/kg) Líquido saturado v_l	Volume específico (m^3/kg) Evap. v_{lv}	Volume específico (m^3/kg) Vapor saturado v_v	Energia interna (kJ/kg) Líquido saturado u_l	Energia interna (kJ/kg) Evap. u_{lv}	Energia interna (kJ/kg) Vapor saturado u_v	Entalpia (kJ/kg) Líquido saturado h_l	Entalpia (kJ/kg) Evap. h_{lv}	Entalpia (kJ/kg) Vapor saturado h_v	Entropia (kJ/kg K) Líquido saturado s_l	Entropia (kJ/kg K) Evap. s_{lv}	Entropia (kJ/kg K) Vapor saturado s_v
–50	40,9	0,001424	2,62557	2,62700	–43,82	1309,1	1265,2	–43,76	1416,3	1372,6	–0,1916	6,3470	6,1554
–45	54,5	0,001437	2,00489	2,00632	–22,01	1293,5	1271,4	–21,94	1402,8	1380,8	–0,0950	6,1484	6,0534
–40	71,7	0,001450	1,55111	1,55256	–0,10	1277,6	1277,4	0	1388,8	1388,8	0	5,9567	5,9567
–35	93,2	0,001463	1,21466	1,21613	21,93	1261,3	1283,3	22,06	1374,5	1396,5	0,0935	5,7715	5,8650
–30	119,5	0,001476	0,96192	0,96339	44,08	1244,8	1288,9	44,26	1359,8	1404,0	0,1856	5,5922	5,7778
–25	151,6	0,001490	0,76970	0,77119	66,36	1227,9	1294,3	66,58	1344,6	1411,2	0,2763	5,4185	5,6947
–20	190,2	0,001504	0,62184	0,62334	88,76	1210,7	1299,5	89,05	1329,0	1418,0	0,3657	5,2498	5,6155
–15	236,3	0,001519	0,50686	0,50838	111,30	1193,2	1304,5	111,66	1312,9	1424,6	0,4538	5,0859	5,5397
–10	290,9	0,001534	0,41655	0,41808	133,96	1175,2	1309,2	134,41	1296,4	1430,8	0,5408	4,9265	5,4673
–5	354,9	0,001550	0,34493	0,34648	156,76	1157,0	1313,7	157,31	1279,4	1436,7	0,6266	4,7711	5,3977
0	429,6	0,001566	0,28763	0,28920	179,69	1138,3	1318,0	180,36	1261,8	1442,2	0,7114	4,6195	5,3309
5	515,9	0,001583	0,24140	0,24299	202,77	1119,2	1322,0	203,58	1243,7	1447,3	0,7951	4,4715	5,2666
10	615,2	0,001600	0,20381	0,20541	225,99	1099,7	1325,7	226,97	1225,1	1452,0	0,8779	4,3266	5,2045
15	728,6	0,001619	0,17300	0,17462	249,36	1079,7	1329,1	250,54	1205,8	1456,3	0,9598	4,1846	5,1444
20	857,5	0,001638	0,14758	0,14922	272,89	1059,3	1332,2	274,30	1185,9	1460,2	1,0408	4,0452	5,0860
25	1003,2	0,001658	0,12647	0,12813	296,59	1038,4	1335,0	298,25	1165,2	1463,5	1,1210	3,9083	5,0293
30	1167,0	0,001680	0,10881	0,11049	320,46	1016,9	1337,4	322,42	1143,9	1466,3	1,2005	3,7734	4,9738
35	1350,4	0,001702	0,09397	0,09567	344,50	994,9	1339,4	346,80	1121,8	1468,6	1,2792	3,6403	4,9196
40	1554,9	0,001725	0,08141	0,08313	368,74	972,2	1341,0	371,43	1098,8	1470,2	1,3574	3,5088	4,8662
45	1782,0	0,001750	0,07073	0,07248	393,19	948,9	1342,1	396,31	1074,9	1471,2	1,4350	3,3786	4,8136
50	2033,1	0,001777	0,06159	0,06337	417,87	924,8	1342,7	421,48	1050,0	1471,5	1,5121	3,2493	4,7614
55	2310,1	0,001804	0,05375	0,05555	442,79	899,9	1342,7	446,96	1024,1	1471,0	1,5888	3,1208	4,7095
60	2614,4	0,001834	0,04697	0,04880	467,99	874,2	1342,1	472,79	997,0	1469,7	1,6652	2,9925	4,6577
65	2947,8	0,001866	0,04109	0,04296	493,51	847,4	1340,9	499,01	968,5	1467,5	1,7415	2,8642	4,6057
70	3312,0	0,001900	0,03597	0,03787	519,39	819,5	1338,9	525,69	938,7	1464,4	1,8178	2,7354	4,3533
75	3709,0	0,001937	0,03148	0,03341	545,70	790,4	1336,1	552,88	907,2	1460,1	1,8943	2,6058	4,5001
80	4140,5	0,001978	0,02753	0,02951	572,50	759,9	1332,4	580,69	873,9	1454,6	1,9712	2,4746	4,4458
85	4608,6	0,002022	0,02404	0,02606	599,90	727,8	1327,7	609,21	838,6	1447,8	2,0488	2,3413	4,3901
90	5115,3	0,002071	0,02093	0,02300	627,99	693,7	1321,7	638,59	800,8	1439,4	2,1273	2,2051	4,3325
95	5662,9	0,002126	0,01815	0,02028	656,95	657,4	1314,4	668,99	760,2	1429,2	2,2073	2,0650	4,2723
100	6253,7	0,002188	0,01565	0,01784	686,96	618,4	1305,3	700,64	716,2	1416,9	2,2893	1,9195	4,2088
105	6890,4	0,002261	0,01337	0,01564	718,30	575,9	1294,2	733,87	668,1	1402,0	2,3740	1,7667	4,1407
110	7575,7	0,002347	0,01128	0,01363	751,37	529,1	1280,5	769,15	614,6	1383,7	2,4625	1,6040	4,0665
115	8313,3	0,002452	0,00933	0,01178	786,82	476,2	1263,1	807,21	553,8	1361,0	2,5566	1,4267	3,9833
120	9107,2	0,002589	0,00744	0,01003	825,77	414,5	1240,3	849,36	482,3	1331,7	2,6593	1,2268	3,8861
125	9963,5	0,002783	0,00554	0,00833	870,69	337,7	1208,4	898,42	393,0	1291,4	2,7775	0,9870	3,7645
130	10891,6	0,003122	0,00337	0,00649	929,29	226,9	1156,2	963,29	263,7	1227,0	2,9326	0,6540	3,5866
132,3	11333,2	0,004255	0	0,00426	1037,62	0	1037,6	1085,85	0	1085,9	3,2316	0	3,2316

Tabela B.2.2

Amônia superaquecida

T °C	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	50 kPa (–46,53 °C)				100 kPa (–33,60 °C)				150 kPa (–25,22 °C)			
Sat.	2,1752	1269,6	1378,3	6,0839	1,1381	1284,9	1398,7	5,8401	0,7787	1294,1	1410,9	5,6983
–30	2,3448	1296,2	1413,4	6,2333	1,1573	1291,0	1406,7	5,8734	-	-	-	-
–20	2,4463	1312,3	1434,6	6,3187	1,2101	1307,8	1428,8	5,9626	0,7977	1303,3	1422,9	5,7465
–10	2,5471	1328,4	1455,7	6,4006	1,2621	1324,6	1450,8	6,0477	0,8336	1320,7	1445,7	5,8349
0	2,6474	1344,5	1476,9	6,4795	1,3136	1341,3	1472,6	6,1291	0,8689	1337,9	1468,3	5,9189
10	2,7472	1360,7	1498,1	6,5556	1,3647	1357,9	1494,4	6,2073	0,9037	1355,0	1490,6	5,9992
20	2,8466	1377,0	1519,3	6,6293	1,4153	1374,5	1516,1	6,2826	0,9382	1372,0	1512,8	6,0761
30	2,9458	1393,3	1540,6	6,7008	1,4657	1391,2	1537,7	6,3553	0,9723	1389,0	1534,9	6,1502
40	3,0447	1409,8	1562,0	6,7703	1,5158	1407,9	1559,5	6,4258	1,0062	1406,0	1556,9	6,2217
50	3,1435	1426,3	1583,5	6,8379	1,5658	1424,7	1581,2	6,4943	1,0398	1423,0	1578,9	6,2910
60	3,2421	1443,0	1605,1	6,9038	1,6156	1441,5	1603,1	6,5609	1,0734	1440,0	1601,0	6,3583
70	3,3406	1459,9	1626,9	6,9682	1,6653	1458,5	1625,1	6,6258	1,1068	1457,2	1623,2	6,4238
80	3,4390	1476,9	1648,8	7,0312	1,7148	1475,6	1647,1	6,6892	1,1401	1474,4	1645,4	6,4877
100	3,6355	1511,4	1693,2	7,1533	1,8137	1510,3	1691,7	6,8120	1,2065	1509,3	1690,2	6,6112
120	3,8318	1546,6	1738,2	7,2708	1,9124	1545,7	1736,9	6,9300	1,2726	1544,8	1735,6	6,7297
140	4,0280	1582,5	1783,9	7,3842	2,0109	1581,7	1782,8	7,0439	1,3386	1580,9	1781,7	6,8439
160	4,2240	1619,2	1830,4	7,4941	2,1093	1618,5	1829,4	7,1540	1,4044	1617,8	1828,4	6,9544
180	4,4199	1656,7	1877,7	7,6008	2,2075	1656,0	1876,8	7,2609	1,4701	1655,4	1875,9	7,0615
200	4,6157	1694,9	1925,7	7,7045	2,3057	1694,3	1924,9	7,3648	1,5357	1693,7	1924,1	7,1656
220	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6013	1732,9	1973,1	7,2670
	200 kPa (–18,86 °C)				300 kPa (–9,24 °C)				400 kPa (–1,89 °C)			
Sat.	0,5946	1300,6	1419,6	5,5979	0,40607	1309,9	1431,7	5,4565	0,30942	1316,4	1440,2	5,3559
–10	0,6193	1316,7	1440,6	5,6791	-	-	-	-	-	-	-	-
0	0,6465	1334,5	1463,8	5,7659	0,42382	1327,5	1454,7	5,5420	0,31227	1320,2	1445,1	5,3741
10	0,6732	1352,1	1486,8	5,8484	0,44251	1346,1	1478,9	5,6290	0,32701	1339,9	1470,7	5,4663
20	0,6995	1369,5	1509,4	5,9270	0,46077	1364,4	1502,6	5,7113	0,34129	1359,1	1495,6	5,5525
30	0,7255	1386,8	1531,9	6,0025	0,47870	1382,3	1526,0	5,7896	0,35520	1377,7	1519,8	5,6338
40	0,7513	1404,0	1554,3	6,0751	0,49636	1400,1	1549,0	5,8645	0,36884	1396,1	1543,6	5,7111
50	0,7769	1421,3	1576,6	6,1453	0,51382	1417,8	1571,9	5,9365	0,38226	1414,2	1567,1	5,7850
60	0,8023	1438,5	1598,9	6,2133	0,53111	1435,4	1594,7	6,0060	0,39550	1432,2	1590,4	5,8560
70	0,8275	1455,8	1621,3	6,2794	0,54827	1453,0	1617,5	6,0732	0,40860	1450,1	1613,6	5,9244
80	0,8527	1473,1	1643,7	6,3437	0,56532	1470,6	1640,2	6,1385	0,42160	1468,0	1636,7	5,9907
100	0,9028	1508,2	1688,8	6,4679	0,59916	1506,1	1685,8	6,2642	0,44732	1503,9	1682,8	6,1179
120	0,9527	1543,8	1734,4	6,5869	0,63276	1542,0	1731,8	6,3842	0,47279	1540,1	1729,2	6,2390
140	1,0024	1580,1	1780,6	6,7015	0,66618	1578,5	1778,3	6,4996	0,49808	1576,8	1776,0	6,3552
160	1,0519	1617,0	1827,4	6,8123	0,69946	1615,6	1825,4	6,6109	0,52323	1614,1	1823,4	6,4671
180	1,1014	1654,7	1875,0	6,9196	0,73263	1653,4	1873,2	6,7188	0,54827	1652,1	1871,4	6,5755
200	1,1507	1693,2	1923,3	7,0239	0,76572	1692,0	1921,7	6,8235	0,57321	1690,8	1920,1	6,6806
220	1,2000	1732,4	1972,4	7,1255	0,79872	1731,3	1970,9	6,9254	0,59809	1730,3	1969,5	6,7828
240	-	-	-	-	0,83167	1771,4	2020,9	7,0247	0,62289	1770,5	2019,6	6,8825
260	-	-	-	-	0,86455	1812,2	2071,6	7,1217	0,64764	1811,4	2070,5	6,9797

Tabela B.2.2 (continuação)
Amônia superaquecida

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	500 kPa (4,13 °C)				600 kPa (9,28 °C)				800 kPa (17,85 °C)			
Sat.	0,25035	1321,3	1446,5	5,2776	0,21038	1325,2	1451,4	5,2133	0,15958	1330,9	1458,6	5,1110
10	0,25757	1333,5	1462,3	5,3340	0,21115	1326,7	1453,4	5,2205	-	-	-	-
20	0,26949	1353,6	1488,3	5,4244	0,22154	1347,9	1480,8	5,3156	0,16138	1335,8	1464,9	5,1328
30	0,28103	1373,0	1513,5	5,5090	0,23152	1368,2	1507,1	5,4037	0,16947	1358,0	1493,5	5,2287
40	0,29227	1392,0	1538,1	5,5889	0,24118	1387,8	1532,5	5,4862	0,17720	1379,0	1520,8	5,3171
50	0,30328	1410,6	1562,2	5,6647	0,25059	1406,9	1557,3	5,5641	0,18465	1399,3	1547,0	5,3996
60	0,31410	1429,0	1586,1	5,7373	0,25981	1425,7	1581,6	5,6383	0,19189	1419,0	1572,5	5,4774
70	0,32478	1447,3	1609,6	5,8070	0,26888	1444,3	1605,7	5,7094	0,19896	1438,3	1597,5	5,5513
80	0,33535	1465,4	1633,1	5,8744	0,27783	1462,8	1629,5	5,7778	0,20590	1457,4	1622,1	5,6219
100	0,35621	1501,7	1679,8	6,0031	0,29545	1499,5	1676,8	5,9081	0,21949	1495,0	1670,6	5,7555
120	0,37681	1538,2	1726,6	6,1253	0,31281	1536,3	1724,0	6,0314	0,23280	1532,5	1718,7	5,8811
140	0,39722	1575,2	1773,8	6,2422	0,32997	1573,5	1771,5	6,1491	0,24590	1570,1	1766,9	6,0006
160	0,41748	1612,7	1821,4	6,3548	0,34699	1611,2	1819,4	6,2623	0,25886	1608,2	1815,3	6,1150
180	0,43764	1650,8	1869,6	6,4636	0,36389	1649,5	1867,8	6,3717	0,27170	1646,8	1864,2	6,2254
200	0,45771	1689,6	1918,5	6,5691	0,38071	1688,5	1916,9	6,4776	0,28445	1686,1	1913,6	6,3322
220	0,47770	1729,2	1968,1	6,6717	0,39745	1728,2	1966,6	6,5806	0,29712	1726,0	1963,7	6,4358
240	0,49763	1769,5	2018,3	6,7717	0,41412	1768,6	2017,0	6,6808	0,30973	1766,7	2014,5	6,5367
260	0,51749	1810,6	2069,3	6,8692	0,43073	1809,8	2068,2	6,7786	0,32228	1808,1	2065,9	6,6350
280	-	-	-	-	-	-	-	-	0,33477	1850,2	2118,0	6,7310
300	-	-	-	-	-	-	-	-	0,34722	1893,1	2170,9	6,8248
	1000 kPa (24,90 °C)				1200 kPa (30,94 °C)				1400 kPa (36,26 °C)			
Sat.	0,12852	1334,9	1463,4	5,0304	0,10751	1337,8	1466,8	4,9635	0,09231	1339,8	1469,0	4,9060
30	0,13206	1347,1	1479,1	5,0826	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0,13868	1369,8	1508,5	5,1778	0,11287	1360,0	1495,4	5,0564	0,09432	1349,5	1481,6	4,9463
50	0,14499	1391,3	1536,3	5,2654	0,11846	1383,0	1525,1	5,1497	0,09942	1374,2	1513,4	5,0462
60	0,15106	1412,1	1563,1	5,3471	0,12378	1404,8	1553,3	5,2357	0,10423	1397,2	1543,1	5,1370
70	0,15695	1432,2	1589,1	5,4240	0,12890	1425,8	1580,5	5,3159	0,10882	1419,2	1571,5	5,2209
80	0,16270	1451,9	1614,6	5,4971	0,13387	1446,2	1606,8	5,3916	0,11324	1440,3	1598,8	5,2994
100	0,17389	1490,5	1664,3	5,6342	0,14347	1485,8	1658,0	5,5325	0,12172	1481,0	1651,4	5,4443
120	0,18477	1528,6	1713,4	5,7622	0,15275	1524,7	1708,0	5,6631	0,12986	1520,7	1702,5	5,5775
140	0,19545	1566,8	1762,2	5,8834	0,16181	1563,3	1757,5	5,7860	0,13777	1559,9	1752,8	5,7023
160	0,20597	1605,2	1811,2	5,9992	0,17071	1602,2	1807,1	5,9031	0,14552	1599,2	1802,9	5,8208
180	0,21638	1644,2	1860,5	6,1105	0,17950	1641,5	1856,9	6,0156	0,15315	1638,8	1853,2	5,9343
200	0,22669	1683,7	1910,4	6,2182	0,18819	1681,3	1907,1	6,1241	0,16068	1678,9	1903,8	6,0437
220	0,23693	1723,9	1960,8	6,3226	0,19680	1721,8	1957,9	6,2292	0,16813	1719,6	1955,0	6,1495
240	0,24710	1764,8	2011,9	6,4241	0,20534	1762,9	2009,3	6,3313	0,17551	1761,0	2006,7	6,2523
260	0,25720	1806,4	2063,6	6,5229	0,21382	1804,7	2061,3	6,4308	0,18283	1803,0	2059,0	6,3523
280	0,26726	1848,8	2116,0	6,6194	0,22225	1847,3	2114,0	6,5278	0,19010	1845,8	2111,9	6,4498
300	0,27726	1891,8	2169,1	6,7137	0,23063	1890,6	2167,3	6,6225	0,19732	1889,3	2165,5	6,5450
320	-	-	-	-	0,23897	1934,6	2221,3	6,7151	0,20450	1933,5	2219,8	6,6380

Tabela B.2.2 (continuação)
Amônia superaquecida

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	1600 kPa (41,03 °C)				2000 kPa (49,37 °C)			
Sat.	0,08079	1341,2	1470,5	4,8553	0,06444	1342,6	1471,5	4,7680
50	0,08506	1364,9	1501,0	4,9510	0,06471	1344,5	1473,9	4,7754
60	0,08951	1389,3	1532,5	5,0472	0,06875	1372,3	1509,8	4,8848
70	0,09372	1412,3	1562,3	5,1351	0,07246	1397,8	1542,7	4,9821
80	0,09774	1434,3	1590,6	5,2167	0,07595	1421,6	1573,5	5,0707
100	0,10539	1476,2	1644,8	5,3659	0,08248	1466,1	1631,1	5,2294
120	0,11268	1516,6	1696,9	5,5018	0,08861	1508,3	1685,5	5,3714
140	0,11974	1556,4	1748,0	5,6286	0,09447	1549,3	1738,2	5,5022
160	0,12662	1596,1	1798,7	5,7485	0,10016	1589,9	1790,2	5,6251
180	0,13339	1636,1	1849,5	5,8631	0,10571	1630,6	1842,0	5,7420
200	0,14005	1676,5	1900,5	5,9734	0,11116	1671,6	1893,9	5,8540
220	0,14663	1717,4	1952,0	6,0800	0,11652	1713,1	1946,1	5,9621
240	0,15314	1759,0	2004,1	6,1834	0,12182	1755,2	1998,8	6,0668
260	0,15959	1801,3	2056,7	6,2839	0,12705	1797,9	2052,0	6,1685
280	0,16599	1844,3	2109,9	6,3819	0,13224	1841,3	2105,8	6,2675
300	0,17234	1888,0	2163,7	6,4775	0,13737	1885,4	2160,1	6,3641
320	0,17865	1932,4	2218,2	6,5710	0,14246	1930,2	2215,1	6,4583
340	0,18492	1977,5	2273,4	6,6624	0,14751	1975,6	2270,7	6,5505
360	0,19115	2023,3	2329,1	6,7519	0,15253	2021,8	2326,8	6,6406
	5000 kPa (88,90 °C)				10 000 kPa (125,20 °C)			
Sat.	0,02365	1323,2	1441,4	4,3454	0,00826	1206,8	1289,4	3,7587
100	0,02636	1369,7	1501,5	4,5091	-	-	-	-
120	0,03024	1435,1	1586,3	4,7306	-	-	-	-
140	0,03350	1489,8	1657,3	4,9068	0,01195	1341,8	1461,3	4,1839
160	0,03643	1539,5	1721,7	5,0591	0,01461	1432,2	1578,3	4,4610
180	0,03916	1586,9	1782,7	5,1968	0,01666	1500,6	1667,2	4,6617
200	0,04174	1633,1	1841,8	5,3245	0,01842	1560,3	1744,5	4,8287
220	0,04422	1678,9	1900,0	5,4450	0,02001	1615,8	1816,0	4,9767
240	0,04662	1724,8	1957,9	5,5600	0,02150	1669,2	1884,2	5,1123
260	0,04895	1770,9	2015,6	5,6704	0,02290	1721,6	1950,6	5,2392
280	0,05123	1817,4	2073,6	5,7771	0,02424	1773,6	2015,9	5,3596
300	0,05346	1864,5	2131,8	5,8805	0,02552	1825,5	2080,7	5,4746
320	0,05565	1912,1	2190,3	5,9809	0,02676	1877,6	2145,2	5,5852
340	0,05779	1960,3	2249,2	6,0786	0,02796	1930,0	2209,6	5,6921
360	0,05990	2009,1	2308,6	6,1738	0,02913	1982,8	2274,1	5,7955
380	0,06198	2058,5	2368,4	6,2668	0,03026	2036,1	2338,7	5,8960
400	0,06403	2108,4	2428,6	6,3576	0,03137	2089,8	2403,5	5,9937
420	0,06606	2159,0	2489,3	6,4464	0,03245	2143,9	2468,5	6,0888
440	0,06806	2210,1	2550,4	6,5334	0,03351	2198,5	2533,7	6,1815

Tabela B.3 – Propriedades Termodinâmicas do Dióxido de Carbono

Tabela B.3.1 — Dióxido de carbono saturado

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m^3/kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado	Evap.	Vapor saturado	Líquido saturado	Evap.	Vapor saturado	Líquido saturado	Evap.	Vapor saturado	Líquido saturado	Evap.	Vapor saturado
		v_l	v_{lv}	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
–50,0	682,3	0,000866	0,05492	0,05579	–20,55	302,26	281,71	–19,96	339,73	319,77	–0,0863	1,5224	1,4362
–48	739,5	0,000872	0,05075	0,05162	–16,64	298,86	282,21	–16,00	336,38	320,38	–0,0688	1,4940	1,4252
–46	800,2	0,000878	0,04694	0,04782	–12,72	295,42	282,69	–12,02	332,98	320,96	–0,0515	1,4659	1,4144
–44	864,4	0,000883	0,04347	0,04435	–8,80	291,94	283,15	–8,03	329,52	321,49	–0,0342	1,4380	1,4038
–42	932,5	0,000889	0,04029	0,04118	–4,85	288,42	283,57	–4,02	326,00	321,97	–0,0171	1,4103	1,3933
–40	1004,5	0,000896	0,03739	0,03828	–0,90	284,86	283,96	0	322,42	322,42	0	1,3829	1,3829
–38	1080,5	0,000902	0,03472	0,03562	3,07	281,26	284,33	4,04	318,78	322,82	0,0170	1,3556	1,3726
–36	1160,7	0,000909	0,03227	0,03318	7,05	277,60	284,66	8,11	315,06	323,17	0,0339	1,3285	1,3624
–34	1245,2	0,000915	0,03002	0,03093	11,05	273,90	284,95	12,19	311,28	323,47	0,0507	1,3016	1,3523
–32	1334,2	0,000922	0,02794	0,02886	15,07	270,14	285,21	16,30	307,42	323,72	0,0675	1,2748	1,3423
–30	1427,8	0,000930	0,02603	0,02696	19,11	266,32	285,43	20,43	303,48	323,92	0,0842	1,2481	1,3323
–28	1526,1	0,000937	0,02425	0,02519	23,17	262,45	285,61	24,60	299,46	324,06	0,1009	1,2215	1,3224
–26	1629,3	0,000945	0,02261	0,02356	27,25	258,51	285,75	28,78	295,35	324,14	0,1175	1,1950	1,3125
–24	1737,5	0,000953	0,02110	0,02205	31,35	254,50	285,85	33,00	291,15	324,15	0,1341	1,1686	1,3026
–22	1850,9	0,000961	0,01968	0,02065	35,48	250,41	285,89	37,26	286,85	324,11	0,1506	1,1421	1,2928
–20	1969,6	0,000969	0,01837	0,01934	39,64	246,25	285,89	41,55	282,44	323,99	0,1672	1,1157	1,2829
–18	2093,8	0,000978	0,01715	0,01813	43,82	242,01	285,84	45,87	277,93	323,80	0,1837	1,0893	1,2730
–16	2223,7	0,000987	0,01601	0,01700	48,04	237,68	285,73	50,24	273,30	323,53	0,2003	1,0628	1,2631
–14	2359,3	0,000997	0,01495	0,01595	52,30	233,26	285,56	54,65	268,54	323,19	0,2169	1,0362	1,2531
–12	2501,0	0,001007	0,01396	0,01497	56,59	228,73	285,32	59,11	263,65	322,76	0,2334	1,0096	1,2430
–10	2648,7	0,001017	0,01303	0,01405	60,92	224,10	285,02	63,62	258,61	322,23	0,2501	0,9828	1,2328
–8	2802,7	0,001028	0,01216	0,01319	65,30	219,35	284,65	68,18	253,43	321,61	0,2668	0,9558	1,2226
–6	2963,2	0,001040	0,01134	0,01238	69,73	214,47	284,20	72,81	248,08	320,89	0,2835	0,9286	1,2121
–4	3130,3	0,001052	0,01057	0,01162	74,20	209,46	283,66	77,50	242,55	320,05	0,3003	0,9012	1,2015
–2	3304,2	0,001065	0,00985	0,01091	78,74	204,29	283,03	82,26	236,83	319,09	0,3173	0,8734	1,1907
0	3485,1	0,001078	0,00916	0,01024	83,34	198,96	282,30	87,10	230,89	317,99	0,3344	0,8453	1,1797
2	3673,3	0,001093	0,00852	0,00961	88,01	193,44	281,46	92,02	224,73	316,75	0,3516	0,8167	1,1683
4	3868,8	0,001108	0,00790	0,00901	92,76	187,73	280,49	97,05	218,30	315,35	0,3690	0,7877	1,1567
6	4072,0	0,001124	0,00732	0,00845	97,60	181,78	279,38	102,18	211,59	313,77	0,3866	0,7580	1,1446
8	4283,1	0,001142	0,00677	0,00791	102,54	175,57	278,11	107,43	204,56	311,99	0,4045	0,7276	1,1321
10	4502,2	0,001161	0,00624	0,00740	107,60	169,07	276,67	112,83	197,15	309,98	0,4228	0,6963	1,1190
12	4729,7	0,001182	0,00573	0,00691	112,79	162,23	275,02	118,38	189,33	307,72	0,4414	0,6640	1,1053
14	4965,8	0,001205	0,00524	0,00645	118,14	154,99	273,13	124,13	181,02	305,15	0,4605	0,6304	1,0909
16	5210,8	0,001231	0,00477	0,00600	123,69	147,26	270,95	130,11	172,12	302,22	0,4802	0,5952	1,0754
18	5465,1	0,001260	0,00431	0,00557	129,48	138,95	268,43	136,36	162,50	298,86	0,5006	0,5581	1,0588
20	5729,1	0,001293	0,00386	0,00515	135,56	129,90	265,46	142,97	152,00	294,96	0,5221	0,5185	1,0406
22	6003,1	0,001332	0,00341	0,00474	142,03	119,89	261,92	150,02	140,34	290,36	0,5449	0,4755	1,0203
24	6287,7	0,001379	0,00295	0,00433	149,04	108,55	257,59	157,71	127,09	284,80	0,5695	0,4277	0,9972
26	6583,7	0,001440	0,00247	0,00391	156,88	95,20	252,07	166,36	111,45	277,80	0,5971	0,3726	0,9697
28	6891,8	0,001526	0,00193	0,00346	166,20	78,26	244,46	176,72	91,58	268,30	0,6301	0,3041	0,9342
30	7213,7	0,001685	0,00121	0,00290	179,49	51,83	231,32	191,65	60,58	252,23	0,6778	0,1998	0,8776
31,0	7377,3	0,002139	0	0,00214	203,56	0	203,56	219,34	0	219,34	0,7680	0	0,7680

Tabela B.3.2

Dióxido de carbono superaquecido

T °C	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	400 kPa (NA)				800 kPa (–46,00 °C)			
Sat.	-	-	-	-	0,04783	282,69	320,95	1,4145
–40	0,10499	292,46	334,46	1,5947	0,04966	287,05	326,78	1,4398
–20	0,11538	305,30	351,46	1,6646	0,05546	301,13	345,49	1,5168
0	0,12552	318,31	368,51	1,7295	0,06094	314,92	363,67	1,5859
20	0,13551	331,57	385,77	1,7904	0,06623	328,73	381,72	1,6497
40	0,14538	345,14	403,29	1,8482	0,07140	342,70	399,82	1,7094
60	0,15518	359,03	421,10	1,9033	0,07648	356,90	418,09	1,7660
80	0,16491	373,25	439,21	1,9561	0,08150	371,37	436,57	1,8199
100	0,17460	387,80	457,64	2,0069	0,08647	386,11	455,29	1,8714
120	0,18425	402,67	476,37	2,0558	0,09141	401,15	474,27	1,9210
140	0,19388	417,86	495,41	2,1030	0,09631	416,47	493,52	1,9687
160	0,20348	433,35	514,74	2,1487	0,10119	432,07	513,03	2,0148
180	0,21307	449,13	534,36	2,1930	0,10606	447,95	532,80	2,0594
200	0,22264	465,20	554,26	2,2359	0,11090	464,11	552,83	2,1027
220	0,23219	481,55	574,42	2,2777	0,11573	480,52	573,11	2,1447
240	0,24173	498,16	594,85	2,3183	0,12056	497,20	593,64	2,1855
260	0,25127	515,02	615,53	2,3578	0,12537	514,12	614,41	2,2252
	1000 kPa (–40,12 °C)				1400 kPa (–30,58 °C)			
Sat.	0,03845	283,94	322,39	1,3835	0,02750	285,37	323,87	1,3352
–20	0,04342	298,89	342,31	1,4655	0,02957	294,04	335,44	1,3819
0	0,04799	313,15	361,14	1,5371	0,03315	309,42	355,83	1,4595
20	0,05236	327,27	379,63	1,6025	0,03648	324,23	375,30	1,5283
40	0,05660	341,46	398,05	1,6633	0,03966	338,90	394,42	1,5914
60	0,06074	355,82	416,56	1,7206	0,04274	353,62	413,45	1,6503
80	0,06482	370,42	435,23	1,7750	0,04575	368,48	432,52	1,7059
100	0,06885	385,26	454,11	1,8270	0,04870	383,54	451,72	1,7588
120	0,07284	400,38	473,22	1,8768	0,05161	398,83	471,09	1,8093
140	0,07680	415,77	492,57	1,9249	0,05450	414,36	490,66	1,8579
160	0,08074	431,43	512,17	1,9712	0,05736	430,14	510,44	1,9046
180	0,08465	447,36	532,02	2,0160	0,06020	446,17	530,45	1,9498
200	0,08856	463,56	552,11	2,0594	0,06302	462,45	550,68	1,9935
220	0,09244	480,01	572,46	2,1015	0,06583	478,98	571,14	2,0358
240	0,09632	496,72	593,04	2,1424	0,06863	495,76	591,83	2,0770
260	0,10019	513,67	613,86	2,1822	0,07141	512,77	612,74	2,1169
280	0,10405	530,86	634,90	2,2209	0,07419	530,01	633,88	2,1558

Tabela B.3.2 (continuação)
Dióxido de carbono superaquecido

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	2000 kPa (–19,50 °C)				3000 kPa (–5,55 °C)			
Sat.	0,01903	285,88	323,95	1,2804	0,01221	284,09	320,71	1,2098
0	0,02193	303,24	347,09	1,3684	0,01293	290,52	329,32	1,2416
20	0,02453	319,37	368,42	1,4438	0,01512	310,21	355,56	1,3344
40	0,02693	334,88	388,75	1,5109	0,01698	327,61	378,55	1,4104
60	0,02922	350,19	408,64	1,5725	0,01868	344,14	400,19	1,4773
80	0,03143	365,49	428,36	1,6300	0,02029	360,30	421,16	1,5385
100	0,03359	380,90	448,07	1,6843	0,02182	376,35	441,82	1,5954
120	0,03570	396,46	467,85	1,7359	0,02331	392,42	462,35	1,6490
140	0,03777	412,22	487,76	1,7853	0,02477	408,57	482,87	1,6999
160	0,03982	428,18	507,83	1,8327	0,02619	424,87	503,44	1,7485
180	0,04186	444,37	528,08	1,8784	0,02759	441,34	524,12	1,7952
200	0,04387	460,79	548,53	1,9226	0,02898	457,99	544,92	1,8401
220	0,04587	477,43	569,17	1,9653	0,03035	474,83	565,88	1,8835
240	0,04786	494,31	590,02	2,0068	0,03171	491,88	587,01	1,9255
260	0,04983	511,41	611,08	2,0470	0,03306	509,13	608,30	1,9662
280	0,05180	528,73	632,34	2,0862	0,03440	526,59	629,78	2,0057
300	0,05377	546,26	653,80	2,1243	0,03573	544,25	651,43	2,0442
	6000 kPa (21,98 °C)				10 000 kPa			
Sat.	0,00474	261,97	290,42	1,0206	-	-	-	-
20	-	-	-	-	0,00117	118,12	129,80	0,4594
40	0,00670	298,62	338,82	1,1806	0,00159	184,23	200,14	0,6906
60	0,00801	322,51	370,54	1,2789	0,00345	277,63	312,11	1,0389
80	0,00908	342,74	397,21	1,3567	0,00451	312,82	357,95	1,1728
100	0,01004	361,47	421,69	1,4241	0,00530	338,20	391,24	1,2646
120	0,01092	379,47	445,02	1,4850	0,00598	360,19	419,96	1,3396
140	0,01176	397,10	467,68	1,5413	0,00658	380,54	446,38	1,4051
160	0,01257	414,56	489,97	1,5939	0,00715	399,99	471,46	1,4644
180	0,01335	431,97	512,06	1,6438	0,00768	418,94	495,73	1,5192
200	0,01411	449,40	534,04	1,6913	0,00819	437,61	519,49	1,5705
220	0,01485	466,91	556,01	1,7367	0,00868	456,12	542,91	1,6190
240	0,01558	484,52	578,00	1,7804	0,00916	474,58	566,14	1,6652
260	0,01630	502,27	600,05	1,8226	0,00962	493,03	589,26	1,7094
280	0,01701	520,15	622,19	1,8634	0,01008	511,53	612,32	1,7518
300	0,01771	538,18	644,44	1,9029	0,01053	530,11	635,37	1,7928
320	0,01840	556,37	666,80	1,9412	0,01097	548,77	658,46	1,8324

Tabela B.4 – Propriedades Termodinâmicas de R-410a
Tabela B.4.1 — R-410a saturado

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado v_l	Evap. v_{lv}	Vapor saturado v_v	Líquido saturado u_l	Evap. u_{lv}	Vapor saturado u_v	Líquido saturado h_l	Evap. h_{lv}	Vapor saturado h_v	Líquido saturado s_l	Evap. s_{lv}	Vapor saturado s_v
–60	64,1	0,000727	0,36772	0,36845	–27,50	256,41	228,91	–27,45	279,96	252,51	–0,1227	1,3135	1,1907
–55	84,0	0,000735	0,28484	0,28558	–20,70	251,89	231,19	–20,64	275,83	255,19	–0,0912	1,2644	1,1732
–51,4	101,3	0,000741	0,23875	0,23949	–15,78	248,59	232,81	–15,70	272,78	257,08	–0,0688	1,2301	1,1613
–50	108,7	0,000743	0,22344	0,22418	–13,88	247,31	233,43	–13,80	271,60	257,80	–0,0603	1,2171	1,1568
–45	138,8	0,000752	0,17729	0,17804	–7,02	242,67	235,64	–6,92	267,27	260,35	–0,0299	1,1715	1,1416
–40	175,0	0,000762	0,14215	0,14291	–0,13	237,95	237,81	0	262,83	262,83	0	1,1273	1,1273
–35	218,4	0,000771	0,11505	0,11582	6,80	233,14	239,94	6,97	258,26	265,23	0,0294	1,0844	1,1139
–30	269,6	0,000781	0,09392	0,09470	13,78	228,23	242,01	13,99	253,55	267,54	0,0585	1,0428	1,1012
–25	329,7	0,000792	0,07726	0,07805	20,82	223,21	244,03	21,08	248,69	269,77	0,0871	1,0022	1,0893
–20	399,6	0,000803	0,06400	0,06480	27,92	218,07	245,99	28,24	243,65	271,89	0,1154	0,9625	1,0779
–15	480,4	0,000815	0,05334	0,05416	35,08	212,79	247,88	35,47	238,42	273,90	0,1435	0,9236	1,0671
–10	573,1	0,000827	0,04470	0,04553	42,32	207,36	249,69	42,80	232,98	275,78	0,1713	0,8854	1,0567
–5	678,9	0,000841	0,03764	0,03848	49,65	201,75	251,41	50,22	227,31	277,53	0,1989	0,8477	1,0466
0	798,7	0,000855	0,03182	0,03267	57,07	195,95	253,02	57,76	221,37	279,12	0,2264	0,8104	1,0368
5	933,9	0,000870	0,02699	0,02786	64,60	189,93	254,53	65,41	215,13	280,55	0,2537	0,7734	1,0272
10	1085,7	0,000886	0,02295	0,02383	72,24	183,66	255,90	73,21	208,57	281,78	0,2810	0,7366	1,0176
15	1255,4	0,000904	0,01955	0,02045	80,02	177,10	257,12	81,15	201,64	282,79	0,3083	0,6998	1,0081
20	1444,2	0,000923	0,01666	0,01758	87,94	170,21	258,16	89,27	194,28	283,55	0,3357	0,6627	0,9984
25	1653,6	0,000944	0,01420	0,01514	96,03	162,95	258,98	97,59	186,43	284,02	0,3631	0,6253	0,9884
30	1885,1	0,000968	0,01208	0,01305	104,32	155,24	259,56	106,14	178,02	284,16	0,3908	0,5872	0,9781
35	2140,2	0,000995	0,01025	0,01124	112,83	147,00	259,83	114,95	168,94	283,89	0,4189	0,5482	0,9671
40	2420,7	0,001025	0,00865	0,00967	121,61	138,11	259,72	124,09	159,04	283,13	0,4473	0,5079	0,9552
45	2728,3	0,001060	0,00723	0,00829	130,72	128,41	259,13	133,61	148,14	281,76	0,4765	0,4656	0,9421
50	3065,2	0,001103	0,00597	0,00707	140,27	117,63	257,90	143,65	135,93	279,58	0,5067	0,4206	0,9273
55	3433,7	0,001156	0,00482	0,00598	150,44	105,34	255,78	154,41	121,89	276,30	0,5384	0,3715	0,9099
60	3836,9	0,001227	0,00374	0,00497	161,57	90,70	252,27	166,28	105,04	271,33	0,5729	0,3153	0,8882
65	4278,3	0,001338	0,00265	0,00399	174,59	71,59	246,19	180,32	82,95	263,26	0,6130	0,2453	0,8583
70	4763,1	0,001619	0,00124	0,00286	194,53	37,47	232,01	202,24	43,40	245,64	0,6752	0,1265	0,8017
71,3	4901,2	0,00218	0	0,00218	215,78	0	215,78	226,46	0	226,46	0,7449	0	0,7449

Tabela B.4.2
R-410a superaquecido

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	50 kPa (–64,34 °C)				100 kPa (–51,65 °C)			
Sat.	0,46484	226,90	250,15	1,2070	0,24247	232,70	256,94	1,1621
–60	0,47585	229,60	253,40	1,2225	-	-	-	-
–40	0,52508	241,94	268,20	1,2888	0,25778	240,40	266,18	1,2027
–20	0,57295	254,51	283,16	1,3504	0,28289	253,44	281,73	1,2667
0	0,62016	267,52	298,53	1,4088	0,30723	266,72	297,44	1,3265
20	0,66698	281,05	314,40	1,4649	0,33116	280,42	313,54	1,3833
40	0,71355	295,15	330,83	1,5191	0,35483	294,64	330,12	1,4380
60	0,75995	309,84	347,83	1,5717	0,37833	309,40	347,24	1,4910
80	0,80623	325,11	365,43	1,6230	0,40171	324,75	364,92	1,5425
100	0,85243	340,99	383,61	1,6731	0,42500	340,67	383,17	1,5928
120	0,89857	357,46	402,38	1,7221	0,44822	357,17	401,99	1,6419
140	0,94465	374,50	421,74	1,7701	0,47140	374,25	421,39	1,6901
160	0,99070	392,12	441,65	1,8171	0,49453	391,89	441,34	1,7372
180	1,03671	410,28	462,12	1,8633	0,51764	410,07	461,84	1,7835
200	1,08270	428,98	483,11	1,9087	0,54072	428,79	482,86	1,8289
220	1,12867	448,19	504,63	1,9532	0,56378	448,02	504,40	1,8734
240	1,17462	467,90	526,63	1,9969	0,58682	467,74	526,42	1,9172
	150 kPa (–43,35 °C)				200 kPa (–37,01 °C)			
Sat.	0,16540	236,36	261,17	1,1368	0,12591	239,09	264,27	1,1192
–40	0,16851	238,72	263,99	1,1489				
–20	0,18613	252,34	280,26	1,2159	0,13771	251,18	278,72	1,1783
0	0,20289	265,90	296,33	1,2770	0,15070	265,06	295,20	1,2410
20	0,21921	279,78	312,66	1,3347	0,16322	279,13	311,78	1,2995
40	0,23525	294,12	329,40	1,3899	0,17545	293,59	328,68	1,3553
60	0,25112	308,97	346,64	1,4433	0,18750	308,53	346,03	1,4090
80	0,26686	324,37	364,40	1,4950	0,19943	324,00	363,89	1,4610
100	0,28251	340,35	382,72	1,5455	0,21127	340,02	382,28	1,5117
120	0,29810	356,89	401,60	1,5948	0,22305	356,60	401,21	1,5611
140	0,31364	374,00	421,04	1,6430	0,23477	373,74	420,70	1,6094
160	0,32915	391,66	441,03	1,6902	0,24645	391,43	440,72	1,6568
180	0,34462	409,87	461,56	1,7366	0,25810	409,66	461,28	1,7032
200	0,36006	428,60	482,61	1,7820	0,26973	428,41	482,35	1,7487
220	0,37548	447,84	504,16	1,8266	0,28134	447,67	503,93	1,7933
240	0,39089	467,58	526,21	1,8705	0,29293	467,41	526,00	1,8372
260	0,40628	487,78	548,73	1,9135	0,30450	487,63	549,53	1,8803

Tabela B.4.2 (continuação)
R-410a superaquecido

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	300 kPa (–27,37 °C)				400 kPa (–19,98 °C)			
Sat.	0,08548	243,08	268,72	1,0949	0,06475	246,00	271,90	1,0779
–20	0,08916	248,71	275,46	1,1219	-	-	-	-
0	0,09845	263,33	292,87	1,1881	0,07227	261,51	290,42	1,1483
20	0,10720	277,81	309,96	1,2485	0,07916	276,44	308,10	1,2108
40	0,11564	292,53	327,22	1,3054	0,08571	291,44	325,72	1,2689
60	0,12388	307,65	344,81	1,3599	0,09207	306,75	343,58	1,3242
80	0,13200	323,25	362,85	1,4125	0,09828	322,49	361,80	1,3773
100	0,14003	339,37	381,38	1,4635	0,10440	338,72	380,48	1,4288
120	0,14798	356,03	400,43	1,5132	0,11045	355,45	399,64	1,4788
140	0,15589	373,23	420,00	1,5617	0,11645	372,72	419,30	1,5276
160	0,16376	390,97	440,10	1,6093	0,12241	390,51	439,47	1,5752
180	0,17159	409,24	460,72	1,6558	0,12834	408,82	460,16	1,6219
200	0,17940	428,03	481,85	1,7014	0,13424	427,64	481,34	1,6676
220	0,18719	447,31	503,47	1,7462	0,14012	446,96	503,01	1,7125
240	0,19496	467,09	525,58	1,7901	0,14598	466,76	525,15	1,7565
260	0,20272	487,33	548,15	1,8332	0,15182	487,03	547,76	1,7997
280	0,21046	508,02	571,16	1,8756	0,15766	507,74	570,81	1,8422
	500 kPa (–13,89 °C)				600 kPa (–8,67 °C)			
Sat.	0,05208	248,29	274,33	1,0647	0,04351	250,15	276,26	1,0540
0	0,05651	259,59	287,84	1,1155	0,04595	257,54	285,12	1,0869
20	0,06231	275,02	306,18	1,1803	0,05106	273,56	304,20	1,1543
40	0,06775	290,32	324,20	1,2398	0,05576	289,19	322,64	1,2152
60	0,07297	305,84	342,32	1,2959	0,06023	304,91	341,05	1,2722
80	0,07804	321,72	360,74	1,3496	0,06455	320,94	359,67	1,3265
100	0,08302	338,05	379,56	1,4014	0,06877	337,38	378,65	1,3787
120	0,08793	354,87	398,84	1,4517	0,07292	354,29	398,04	1,4294
140	0,09279	372,20	418,60	1,5007	0,07701	371,68	417,89	1,4786
160	0,09760	390,05	438,85	1,5486	0,08106	389,58	438,22	1,5266
180	0,10238	408,40	459,59	1,5954	0,08508	407,98	459,03	1,5736
200	0,10714	427,26	480,83	1,6413	0,08907	426,88	480,32	1,6196
220	0,11187	446,61	502,55	1,6862	0,09304	446,26	502,08	1,6646
240	0,11659	466,44	524,73	1,7303	0,09700	466,11	524,31	1,7088
260	0,12129	486,73	547,37	1,7736	0,10093	486,42	546,98	1,7521
280	0,12598	507,46	570,45	1,8161	0,10486	507,18	570,09	1,7947
300	0,13066	528,62	593,95	1,8578	0,10877	528,36	593,62	1,8365

Tabela B.4.2 (continuação)
R-410a superaquecido

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	800 kPa (0,05 °C)				1000 kPa (7,25 °C)			
Sat.	0,03262	253,04	279,14	1,0367	0,02596	255,16	281,12	1,0229
20	0,03693	270,47	300,02	1,1105	0,02838	267,11	295,49	1,0730
40	0,04074	286,83	319,42	1,1746	0,03170	284,35	316,05	1,1409
60	0,04429	303,01	338,44	1,2334	0,03470	301,04	335,75	1,2019
80	0,04767	319,36	357,49	1,2890	0,03753	317,73	355,27	1,2588
100	0,05095	336,03	376,79	1,3421	0,04025	334,65	374,89	1,3128
120	0,05415	353,11	396,42	1,3934	0,04288	351,91	394,79	1,3648
140	0,05729	370,64	416,47	1,4431	0,04545	369,58	415,04	1,4150
160	0,06039	388,65	436,96	1,4915	0,04798	387,70	435,68	1,4638
180	0,06345	407,13	457,90	1,5388	0,05048	406,28	456,76	1,5113
200	0,06649	426,10	479,30	1,5850	0,05294	425,33	478,27	1,5578
220	0,06951	445,55	501,15	1,6302	0,05539	444,84	500,23	1,6032
240	0,07251	465,46	523,46	1,6746	0,05781	464,80	522,62	1,6477
260	0,07549	485,82	546,21	1,7181	0,06023	485,21	545,43	1,6914
280	0,07846	506,61	569,38	1,7607	0,06262	506,05	568,67	1,7341
300	0,08142	527,83	592,97	1,8026	0,06501	527,30	592,31	1,7761
	1200 kPa (13,43 °C)				1400 kPa (18,88 °C)			
Sat.	0,02145	256,75	282,50	1,0111	0,01819	257,94	283,40	1,0006
20	0,02260	263,39	290,51	1,0388	0,01838	259,18	284,90	1,0057
40	0,02563	281,72	312,48	1,1113	0,02127	278,93	308,71	1,0843
60	0,02830	299,00	332,96	1,1747	0,02371	296,88	330,07	1,1505
80	0,03077	316,06	352,98	1,2331	0,02593	314,35	350,64	1,2105
100	0,03311	333,24	372,97	1,2881	0,02801	331,80	371,01	1,2666
120	0,03537	350,69	393,13	1,3408	0,03000	349,46	391,46	1,3199
140	0,03756	368,51	413,59	1,3915	0,03192	367,43	412,13	1,3712
160	0,03971	386,75	434,40	1,4407	0,03380	385,79	433,12	1,4208
180	0,04183	405,43	455,62	1,4886	0,03565	404,56	454,47	1,4690
200	0,04391	424,55	477,24	1,5353	0,03746	423,77	476,21	1,5160
220	0,04597	444,12	499,29	1,5809	0,03925	443,41	498,36	1,5618
240	0,04802	464,14	521,77	1,6256	0,04102	463,49	520,92	1,6066
260	0,05005	484,60	544,66	1,6693	0,04278	483,99	543,88	1,6505
280	0,05207	505,48	567,96	1,7122	0,04452	504,91	567,25	1,6936
300	0,05407	526,77	591,66	1,7543	0,04626	526,25	591,01	1,7358
320	0,05607	548,47	615,75	1,7956	0,04798	547,97	615,14	1,7772

Tabela B.4.2 (continuação)
R-410a superaquecido

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	1800 kPa (28,22 °C)				2000 kPa (32,31 °C)			
Sat.	0,01376	259,38	284,15	0,9818	0,01218	259,72	284,09	0,9731
40	0,01534	272,67	300,29	1,0344	0,01321	269,07	295,49	1,0099
60	0,01754	292,34	323,92	1,1076	0,01536	289,90	320,62	1,0878
80	0,01945	310,76	345,77	1,1713	0,01717	308,88	343,22	1,1537
100	0,02119	328,84	366,98	1,2297	0,01880	327,30	364,91	1,2134
120	0,02283	346,93	388,03	1,2847	0,02032	345,64	386,29	1,2693
140	0,02441	365,24	409,17	1,3371	0,02177	364,12	407,66	1,3223
160	0,02593	383,85	430,51	1,3875	0,02317	382,86	429,20	1,3732
180	0,02741	402,82	452,16	1,4364	0,02452	401,94	450,99	1,4224
200	0,02886	422,19	474,14	1,4839	0,02585	421,40	473,10	1,4701
220	0,03029	441,97	496,49	1,5301	0,02715	441,25	495,55	1,5166
240	0,03170	462,16	519,22	1,5753	0,02844	461,50	518,37	1,5619
260	0,03309	482,77	542,34	1,6195	0,02970	482,16	541,56	1,6063
280	0,03447	503,78	565,83	1,6627	0,03095	503,21	565,12	1,6497
300	0,03584	525,19	589,70	1,7051	0,03220	524,66	589,05	1,6922
320	0,03720	546,98	613,94	1,7467	0,03343	546,49	613,35	1,7338
340	0,03855	569,15	638,54	1,7875	0,03465	568,69	637,99	1,7747
	3000 kPa (49,07 °C)				4000 kPa (61,90 °C)			
Sat.	0,00729	258,19	280,06	0,9303	0,00460	250,37	268,76	0,8782
60	0,00858	274,96	300,70	0,9933	-	-	-	-
80	0,01025	298,38	329,12	1,0762	0,00661	285,02	311,48	1,0028
100	0,01159	319,07	353,84	1,1443	0,00792	309,62	341,29	1,0850
120	0,01277	338,84	377,16	1,2052	0,00897	331,39	367,29	1,1529
140	0,01387	358,32	399,92	1,2617	0,00990	352,14	391,75	1,2136
160	0,01489	377,80	422,49	1,3150	0,01076	372,51	415,53	1,2698
180	0,01588	397,46	445,09	1,3661	0,01156	392,82	439,05	1,3229
200	0,01683	417,37	467,85	1,4152	0,01232	413,25	462,52	1,3736
220	0,01775	437,60	490,84	1,4628	0,01305	433,88	486,10	1,4224
240	0,01865	458,16	514,11	1,5091	0,01377	454,79	509,85	1,4696
260	0,01954	479,08	537,69	1,5541	0,01446	475,99	533,83	1,5155
280	0,02041	500,37	561,59	1,5981	0,01514	497,51	558,08	1,5601
300	0,02127	522,01	585,81	1,6411	0,01581	519,37	582,60	1,6037
320	0,02212	544,02	610,37	1,6833	0,01647	541,55	607,42	1,6462
340	0,02296	566,37	635,25	1,7245	0,01712	564,06	632,54	1,6879
360	0,02379	589,07	660,45	1,7650	0,01776	586,90	657,95	1,7286

Tabela B.5 — Propriedades Termodinâmicas de R-134a

Tabela B.5.1 — R-134a saturado

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado $v_{f,sat}$	Evap. v_{fg}	Vapor saturado v_g	Líquido saturado u_f	Evap. u_{fg}	Vapor saturado u_g	Líquido saturado h_f	Evap. h_{fg}	Vapor saturado h_g	Líquido saturado s_f	Evap. s_{fg}	Vapor saturado s_g
−70	8,3	0,000675	1,97207	1,97274	119,46	218,74	338,20	119,47	235,15	354,62	0,6645	1,1575	1,8220
−65	11,7	0,000679	1,42915	1,42983	123,18	217,76	340,94	123,18	234,55	357,73	0,6825	1,1268	1,8094
−60	16,3	0,000684	1,05199	1,05268	127,52	216,19	343,71	127,53	233,33	360,86	0,7031	1,0947	1,7978
−55	22,2	0,000689	0,78609	0,78678	132,36	214,14	346,50	132,37	231,63	364,00	0,7256	1,0618	1,7874
−50	29,9	0,000695	0,59587	0,59657	137,60	211,71	349,31	137,62	229,54	367,16	0,7493	1,0286	1,7780
−45	39,6	0,000701	0,45783	0,45853	143,15	208,99	352,15	143,18	227,14	370,32	0,7740	0,9956	1,7695
−40	51,8	0,000708	0,35625	0,35696	148,95	206,05	355,00	148,98	224,50	373,48	0,7991	0,9629	1,7620
−35	66,8	0,000715	0,28051	0,28122	154,93	202,93	357,86	154,98	221,67	376,64	0,8245	0,9308	1,7553
−30	85,1	0,000722	0,22330	0,22402	161,06	199,67	360,73	161,12	218,68	379,80	0,8499	0,8994	1,7493
−26,3	101,3	0,000728	0,18947	0,19020	165,73	197,16	362,89	165,80	216,36	382,16	0,8690	0,8763	1,7453
−25	107,2	0,000730	0,17957	0,18030	167,30	196,31	363,61	167,38	215,57	382,95	0,8754	0,8687	1,7441
−20	133,7	0,000738	0,14576	0,14649	173,65	192,85	366,50	173,74	212,34	386,08	0,9007	0,8388	1,7395
−15	165,0	0,000746	0,11932	0,12007	180,07	189,32	369,39	180,19	209,00	389,20	0,9258	0,8096	1,7354
−10	201,7	0,000755	0,09845	0,09921	186,57	185,70	372,27	186,72	205,56	392,28	0,9507	0,7812	1,7319
−5	244,5	0,000764	0,08181	0,08257	193,14	182,01	375,15	193,32	202,02	395,34	0,9755	0,7534	1,7288
0	294,0	0,000773	0,06842	0,06919	199,77	178,24	378,01	200,00	198,36	398,36	1,0000	0,7262	1,7262
5	350,9	0,000783	0,05755	0,05833	206,48	174,38	380,85	206,75	194,57	401,32	1,0243	0,6995	1,7239
10	415,8	0,000794	0,04866	0,04945	213,25	170,42	383,67	213,58	190,65	404,23	1,0485	0,6733	1,7218
15	489,5	0,000805	0,04133	0,04213	220,10	166,35	386,45	220,49	186,58	407,07	1,0725	0,6475	1,7200
20	572,8	0,000817	0,03524	0,03606	227,03	162,16	389,19	227,49	182,35	409,84	1,0963	0,6220	1,7183
25	666,3	0,000829	0,03015	0,03098	234,04	157,83	391,87	234,59	177,92	412,51	1,1201	0,5967	1,7168
30	771,0	0,000843	0,02587	0,02671	241,14	153,34	394,48	241,79	173,29	415,08	1,1437	0,5716	1,7153
35	887,6	0,000857	0,02224	0,02310	248,34	148,68	397,02	249,10	168,42	417,52	1,1673	0,5465	1,7139
40	1017,0	0,000873	0,01915	0,02002	255,65	143,81	399,46	256,54	163,28	419,82	1,1909	0,5214	1,7123
45	1160,2	0,000890	0,01650	0,01739	263,08	138,71	401,79	264,11	157,85	421,96	1,2145	0,4962	1,7106
50	1318,1	0,000908	0,01422	0,01512	270,63	133,35	403,98	271,83	152,08	423,91	1,2381	0,4706	1,7088
55	1491,6	0,000928	0,01224	0,01316	278,33	127,68	406,01	279,72	145,93	425,65	1,2619	0,4447	1,7066
60	1681,8	0,000951	0,01051	0,01146	286,19	121,66	407,85	287,79	139,33	427,13	1,2857	0,4182	1,7040
65	1889,9	0,000976	0,00899	0,00997	294,24	115,22	409,46	296,09	132,21	428,30	1,3099	0,3910	1,7008
70	2117,0	0,001005	0,00765	0,00866	302,51	108,27	410,78	304,64	124,47	429,11	1,3343	0,3627	1,6970
75	2364,4	0,001038	0,00645	0,00749	311,06	100,68	411,74	313,51	115,94	429,45	1,3592	0,3330	1,6923
80	2633,6	0,001078	0,00537	0,00645	319,96	92,26	412,22	322,79	106,40	429,19	1,3849	0,3013	1,6862
85	2926,2	0,001128	0,00437	0,00550	329,35	82,67	412,01	332,65	95,45	428,10	1,4117	0,2665	1,6782
90	3244,5	0,001195	0,00341	0,00461	339,51	71,24	410,75	343,38	82,31	425,70	1,4404	0,2267	1,6671
95	3591,5	0,001297	0,00243	0,00373	351,17	56,25	407,42	355,83	64,98	420,81	1,4733	0,1765	1,6498
100	3973,2	0,001557	0,00108	0,00264	368,55	28,19	396,74	374,74	32,47	407,21	1,5228	0,0870	1,6098
101,2	4064,0	0,001969	0	0,00197	382,97	0	382,97	390,98	0	390,98	1,5658	0	1,5658

Tabela B.5.2

R-134a superaquecido

Temp. °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	50 kPa (−40,67 °C)				100 kPa (−26,54 °C)				150 kPa (−17,29 °C)			
Sat.	0,36889	354,61	373,06	1,7629	0,19257	362,73	381,98	1,7456	0,13139	368,06	387,77	1,7372
−20	0,40507	368,57	388,82	1,8279	0,19860	367,36	387,22	1,7665				
−10	0,42222	375,53	396,64	1,8582	0,20765	374,51	395,27	1,7978	0,13602	373,44	393,84	1,7606
0	0,43921	382,63	404,59	1,8878	0,21652	381,76	403,41	1,8281	0,14222	380,85	402,19	1,7917
10	0,45608	389,90	412,70	1,9170	0,22527	389,14	411,67	1,8578	0,14828	388,36	410,60	1,8220
20	0,47287	397,32	420,96	1,9456	0,23392	396,66	420,05	1,8869	0,15424	395,98	419,11	1,8515
30	0,48958	404,90	429,38	1,9739	0,24250	404,31	428,56	1,9155	0,16011	403,71	427,73	1,8804
40	0,50623	412,64	437,96	2,0017	0,25101	412,12	437,22	1,9436	0,16592	411,59	436,47	1,9088
50	0,52284	420,55	446,70	2,0292	0,25948	420,08	446,03	1,9712	0,17168	419,60	445,35	1,9367
60	0,53941	428,63	455,60	2,0563	0,26791	428,20	454,99	1,9985	0,17740	427,76	454,37	1,9642
70	0,55595	436,86	464,66	2,0831	0,27631	436,47	464,10	2,0255	0,18308	436,06	463,53	1,9913
80	0,57247	445,26	473,88	2,1096	0,28468	444,89	473,36	2,0521	0,18874	444,52	472,83	2,0180
90	0,58896	453,82	483,26	2,1358	0,29302	453,47	482,78	2,0784	0,19437	453,13	482,28	2,0444
100	0,60544	462,53	492,81	2,1617	0,30135	462,21	492,35	2,1044	0,19999	461,89	491,89	2,0705
110	0,62190	471,41	502,50	2,1874	0,30967	471,11	502,07	2,1301	0,20559	470,80	501,64	2,0963
120	0,63835	480,44	512,36	2,2128	0,31797	480,16	511,95	2,1555	0,21117	479,87	511,54	2,1218
130	0,65479	489,63	522,37	2,2379	0,32626	489,36	521,98	2,1807	0,21675	489,08	521,60	2,1470
140	-	-	-	-	-	-	-	-	0,22231	498,45	531,80	2,1720
	200 kPa (−10,22 °C)				300 kPa (0,56 °C)				400 kPa (8,84 °C)			
Sat.	0,10002	372,15	392,15	1,7320	0,06787	378,33	398,69	1,7259	0,05136	383,02	403,56	1,7223
−10	0,10013	372,31	392,34	1,7328	-	-	-	-	-	-	-	-
0	0,10501	379,91	400,91	1,7647	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,10974	387,55	409,50	1,7956	0,07111	385,84	407,17	1,7564	0,05168	383,98	404,65	1,7261
20	0,11436	395,27	418,15	1,8256	0,07441	393,80	416,12	1,7874	0,05436	392,22	413,97	1,7584
30	0,11889	403,10	426,87	1,8549	0,07762	401,81	425,10	1,8175	0,05693	400,45	423,22	1,7895
40	0,12335	411,04	435,71	1,8836	0,08075	409,90	434,12	1,8468	0,05940	408,70	432,46	1,8195
50	0,12776	419,11	444,66	1,9117	0,08382	418,09	443,23	1,8755	0,06181	417,03	441,75	1,8487
60	0,13213	427,31	453,74	1,9394	0,08684	426,39	452,44	1,9035	0,06417	425,44	451,10	1,8772
70	0,13646	435,65	462,95	1,9666	0,08982	434,82	461,76	1,9311	0,06648	433,95	460,55	1,9051
80	0,14076	444,14	472,30	1,9935	0,09277	443,37	471,21	1,9582	0,06877	442,58	470,09	1,9325
90	0,14504	452,78	481,79	2,0200	0,09570	452,07	480,78	1,9850	0,07102	451,34	479,75	1,9595
100	0,14930	461,56	491,42	2,0461	0,09861	460,90	490,48	2,0113	0,07325	460,22	489,52	1,9860
110	0,15355	470,50	501,21	2,0720	0,10150	469,87	500,32	2,0373	0,07547	469,24	499,43	2,0122
120	0,15777	479,58	511,13	2,0976	0,10437	478,99	510,30	2,0631	0,07767	478,40	509,46	2,0381
130	0,16199	488,81	521,21	2,1229	0,10723	488,26	520,43	2,0885	0,07985	487,69	519,63	2,0636
140	0,16620	498,19	531,43	2,1479	0,11008	497,66	530,69	2,1136	0,08202	497,13	529,94	2,0889
150	-	-	-	-	0,11292	507,22	541,09	2,1385	0,08418	506,71	540,38	2,1139
160	-	-	-	-	0,11575	516,91	551,64	2,1631	0,08634	516,43	550,97	2,1386

Tabela B.5.2 (continuação)
R-134a superaquecido

Temp. °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	500 kPa (15,66 °C)				600 kPa (21,52 °C)				800 kPa (31,30 °C)			
Sat.	0,04126	386,82	407,45	1,7198	0,03442	390,01	410,66	1,7179	0,02571	395,15	415,72	1,7150
20	0,04226	390,52	411,65	1,7342	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0,04446	398,99	421,22	1,7663	0,03609	397,44	419,09	1,7461	-	-	-	-
40	0,04656	407,44	430,72	1,7971	0,03796	406,11	428,88	1,7779	0,02711	403,17	424,86	1,7446
50	0,04858	415,91	440,20	1,8270	0,03974	414,75	438,59	1,8084	0,02861	412,23	435,11	1,7768
60	0,05055	424,44	449,72	1,8560	0,04145	423,41	448,28	1,8379	0,03002	421,20	445,22	1,8076
70	0,05247	433,06	459,29	1,8843	0,04311	432,13	457,99	1,8666	0,03137	430,17	455,27	1,8373
80	0,05435	441,77	468,94	1,9120	0,04473	440,93	467,76	1,8947	0,03268	439,17	465,31	1,8662
90	0,05620	450,59	478,69	1,9392	0,04632	449,82	477,61	1,9222	0,03394	448,22	475,38	1,8943
100	0,05804	459,53	488,55	1,9660	0,04788	458,82	487,55	1,9492	0,03518	457,35	485,50	1,9218
110	0,05985	468,60	498,52	1,9924	0,04943	467,94	497,59	1,9758	0,03639	466,58	495,70	1,9487
120	0,06164	477,79	508,61	2,0184	0,05095	477,18	507,75	2,0019	0,03758	475,92	505,99	1,9753
130	0,06342	487,13	518,83	2,0440	0,05246	486,55	518,03	2,0277	0,03876	485,37	516,38	2,0014
140	0,06518	496,59	529,19	2,0694	0,05396	496,05	528,43	2,0532	0,03992	494,94	526,88	2,0271
150	0,06694	506,20	539,67	2,0945	0,05544	505,69	538,95	2,0784	0,04107	504,64	537,50	2,0525
160	0,06869	515,95	550,29	2,1193	0,05692	515,46	549,61	2,1033	0,04221	514,46	548,23	2,0775
170	0,07043	525,83	561,04	2,1438	0,05839	525,36	560,40	2,1279	0,04334	524,42	559,09	2,1023
180	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04446	534,51	570,08	2,1268
	1000 kPa (39,37 °C)				1200 kPa (46,31 °C)				1400 kPa (52,42 °C)			
Sat.	0,02038	399,16	419,54	1,7125	0,01676	402,37	422,49	1,7102	0,01414	404,98	424,78	1,7077
40	0,02047	399,78	420,25	1,7148	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,02185	409,39	431,24	1,7494	0,01724	406,15	426,84	1,7237	-	-	-	-
60	0,02311	418,78	441,89	1,7818	0,01844	416,08	438,21	1,7584	0,01503	413,03	434,08	1,7360
70	0,02429	428,05	452,34	1,8127	0,01953	425,74	449,18	1,7908	0,01608	423,20	445,72	1,7704
80	0,02542	437,29	462,70	1,8425	0,02055	435,27	459,92	1,8217	0,01704	433,09	456,94	1,8026
90	0,02650	446,53	473,03	1,8713	0,02151	444,74	470,55	1,8514	0,01793	442,83	467,93	1,8333
100	0,02754	455,82	483,36	1,8994	0,02244	454,20	481,13	1,8801	0,01878	452,50	478,79	1,8628
110	0,02856	465,18	493,74	1,9268	0,02333	463,71	491,70	1,9081	0,01958	462,17	489,59	1,8914
120	0,02956	474,62	504,17	1,9537	0,02420	473,27	502,31	1,9354	0,02036	471,87	500,38	1,9192
130	0,03053	484,16	514,69	1,9801	0,02504	482,91	512,97	1,9621	0,02112	481,63	511,19	1,9463
140	0,03150	493,81	525,30	2,0061	0,02587	492,65	523,70	1,9884	0,02186	491,46	522,05	1,9730
150	0,03244	503,57	536,02	2,0318	0,02669	502,48	534,51	2,0143	0,02258	501,37	532,98	1,9991
160	0,03338	513,46	546,84	2,0570	0,02750	512,43	545,43	2,0398	0,02329	511,39	543,99	2,0248
170	0,03431	523,46	557,77	2,0820	0,02829	522,50	556,44	2,0649	0,02399	521,51	555,10	2,0502
180	0,03523	533,60	568,83	2,1067	0,02907	532,68	567,57	2,0898	0,02468	531,75	566,30	2,0752

Tabela B.5.2 (continuação)
R-134a superaquecido

Temp. °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	1600 kPa (57,90 °C)				2000 kPa (67,48 °C)				3000 kPa (86,20 °C)			
Sat.	0,01215	407,11	426,54	1,7051	0,00930	410,15	428,75	1,6991	0,00528	411,83	427,67	1,6759
60	0,01239	409,49	429,32	1,7135	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0,01345	420,37	441,89	1,7507	0,00958	413,37	432,53	1,7101	-	-	-	-
80	0,01438	430,72	453,72	1,7847	0,01055	425,20	446,30	1,7497	-	-	-	-
90	0,01522	440,79	465,15	1,8166	0,01137	436,20	458,95	1,7850	0,00575	418,93	436,19	1,6995
100	0,01601	450,71	476,33	1,8469	0,01211	446,78	471,00	1,8177	0,00665	433,77	453,73	1,7472
110	0,01676	460,57	487,39	1,8762	0,01279	457,12	482,69	1,8487	0,00734	446,48	468,50	1,7862
120	0,01748	470,42	498,39	1,9045	0,01342	467,34	494,19	1,8783	0,00792	458,27	482,04	1,8211
130	0,01817	480,30	509,37	1,9321	0,01403	477,51	505,57	1,9069	0,00845	469,58	494,91	1,8535
140	0,01884	490,23	520,38	1,9591	0,01461	487,68	516,90	1,9346	0,00893	480,61	507,39	1,8840
150	0,01949	500,24	531,43	1,9855	0,01517	497,89	528,22	1,9617	0,00937	491,49	519,62	1,9133
160	0,02013	510,33	542,54	2,0115	0,01571	508,15	539,57	1,9882	0,00980	502,30	531,70	1,9415
170	0,02076	520,52	553,73	2,0370	0,01624	518,48	550,96	2,0142	0,01021	513,09	543,71	1,9689
180	0,02138	530,81	565,02	2,0622	0,01676	528,89	562,42	2,0398	0,01060	523,89	555,69	1,9956
	4000 kPa (100,33 °C)				6000 kPa				10 000 kPa			
Sat.	0,00252	394,86	404,94	1,6036	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	0,001059	328,34	334,70	1,4081	0,000991	320,72	330,62	1,3856
100	-	-	-	-	0,001150	346,71	353,61	1,4595	0,001040	336,45	346,85	1,4297
110	0,00428	429,74	446,84	1,7148	0,001307	368,06	375,90	1,5184	0,001100	352,74	363,73	1,4744
120	0,00500	445,97	465,99	1,7642	0,001698	396,59	406,78	1,5979	0,001175	369,69	381,44	1,5200
130	0,00556	459,63	481,87	1,8040	0,002396	426,81	441,18	1,6843	0,001272	387,44	400,16	1,5670
140	0,00603	472,19	496,29	1,8394	0,002985	448,34	466,25	1,7458	0,001400	405,97	419,98	1,6155
150	0,00644	484,15	509,92	1,8720	0,003439	465,19	485,82	1,7926	0,001564	424,99	440,63	1,6649
160	0,00683	495,77	523,07	1,9027	0,003814	479,89	502,77	1,8322	0,001758	443,77	461,34	1,7133
170	0,00718	507,19	535,92	1,9320	0,004141	493,45	518,30	1,8676	0,001965	461,65	481,30	1,7589
180	0,00752	518,51	548,57	1,9603	0,004435	506,35	532,96	1,9004	0,002172	478,40	500,12	1,8009

Tabela B.6 — Propriedades Termodinâmicas do Nitrogênio

Tabela B.6.1 — Nitrogênio saturado

Temp. K	Pressão kPa	Volume específico (m^3/kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado v_l	Evap. v_{lv}	Vapor saturado v_v	Líquido saturado u_l	Evap. u_{lv}	Vapor saturado u_v	Líquido saturado h_l	Evap. h_{lv}	Vapor saturado h_v	Líquido saturado s_l	Evap. s_{lv}	Vapor saturado s_v
63,1	12,5	0,001150	1,48074	1,48189	–150,92	196,86	45,94	–150,91	215,39	64,48	2,4234	3,4109	5,8343
65	17,4	0,001160	1,09231	1,09347	–147,19	194,37	47,17	–147,17	213,38	66,21	2,4816	3,2828	5,7645
70	38,6	0,001191	0,52513	0,52632	–137,13	187,54	50,40	–137,09	207,79	70,70	2,6307	2,9684	5,5991
75	76,1	0,001223	0,28052	0,28174	–127,04	180,47	53,43	–126,95	201,82	74,87	2,7700	2,6909	5,4609
77,3	101,3	0,001240	0,21515	0,21639	–122,27	177,04	54,76	–122,15	198,84	76,69	2,8326	2,5707	5,4033
80	137,0	0,001259	0,16249	0,16375	–116,86	173,06	56,20	–116,69	195,32	78,63	2,9014	2,4415	5,3429
85	229,1	0,001299	0,10018	0,10148	–106,55	165,20	58,65	–106,25	188,15	81,90	3,0266	2,2135	5,2401
90	360,8	0,001343	0,06477	0,06611	–96,06	156,76	60,70	–95,58	180,13	84,55	3,1466	2,0015	5,1480
95	541,1	0,001393	0,04337	0,04476	–85,35	147,60	62,25	–84,59	171,07	86,47	3,2627	1,8007	5,0634
100	779,2	0,001452	0,02975	0,03120	–74,33	137,50	63,17	–73,20	160,68	87,48	3,3761	1,6068	4,9829
105	1084,6	0,001522	0,02066	0,02218	–62,89	126,18	63,29	–61,24	148,59	87,35	3,4883	1,4151	4,9034
110	1467,6	0,001610	0,01434	0,01595	–50,81	113,11	62,31	–48,45	134,15	85,71	3,6017	1,2196	4,8213
115	1939,3	0,001729	0,00971	0,01144	–37,66	97,36	59,70	–34,31	116,19	81,88	3,7204	1,0104	4,7307
120	2513,0	0,001915	0,00608	0,00799	–22,42	76,63	54,21	–17,61	91,91	74,30	3,8536	0,7659	4,6195
125	3208,0	0,002355	0,00254	0,00490	–0,83	40,73	39,90	6,73	48,88	55,60	4,0399	0,3910	4,4309
126,2	3397,8	0,003194	0	0,00319	18,94	0	18,94	29,79	0	29,79	4,2193	0	4,2193

Tabela B.6.2
Nitrogênio superaquecido

Temp. K	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	100 kPa (77,24 K)				200 kPa (83,62 K)				400 kPa (91,22 K)			
Sat.	0,21903	54,70	76,61	5,4059	0,11520	58,01	81,05	5,2673	0,05992	61,13	85,10	5,1268
100	0,29103	72,84	101,94	5,6944	0,14252	71,73	100,24	5,4775	0,06806	69,30	96,52	5,2466
120	0,35208	87,94	123,15	5,8878	0,17397	87,14	121,93	5,6753	0,08486	85,48	119,42	5,4556
140	0,41253	102,95	144,20	6,0501	0,20476	102,33	143,28	5,8399	0,10085	101,06	141,40	5,6250
160	0,47263	117,91	165,17	6,1901	0,23519	117,40	164,44	5,9812	0,11647	116,38	162,96	5,7690
180	0,53254	132,83	186,09	6,3132	0,26542	132,41	185,49	6,1052	0,13186	131,55	184,30	5,8947
200	0,59231	147,74	206,97	6,4232	0,29551	147,37	206,48	6,2157	0,14712	146,64	205,49	6,0063
220	0,65199	162,63	227,83	6,5227	0,32552	162,31	227,41	6,3155	0,16228	161,68	226,59	6,1069
240	0,71161	177,51	248,67	6,6133	0,35546	177,23	248,32	6,4064	0,17738	176,67	247,62	6,1984
260	0,77118	192,39	269,51	6,6967	0,38535	192,14	269,21	6,4900	0,19243	191,64	268,61	6,2824
280	0,83072	207,26	290,33	6,7739	0,41520	207,04	290,08	6,5674	0,20745	206,58	289,56	6,3600
300	0,89023	222,14	311,16	6,8457	0,44503	221,93	310,94	6,6393	0,22244	221,52	310,50	6,4322
350	1,03891	259,35	363,24	7,0063	0,51952	259,18	363,09	6,8001	0,25982	258,85	362,78	6,5934
400	1,18752	296,66	415,41	7,1456	0,59392	296,52	415,31	6,9396	0,29712	296,25	415,10	6,7331
450	1,33607	334,16	467,77	7,2690	0,66827	334,04	467,70	7,0630	0,33437	333,81	467,56	6,8567
500	1,48458	371,95	520,41	7,3799	0,74258	371,85	520,37	7,1740	0,37159	371,65	520,28	6,9678
600	1,78154	448,79	626,94	7,5741	0,89114	448,71	626,94	7,3682	0,44595	448,55	626,93	7,1622
700	2,07845	527,74	735,58	7,7415	1,03965	527,68	735,61	7,5357	0,52025	527,55	735,65	7,3298
800	2,37532	609,07	846,60	7,8897	1,18812	609,02	846,64	7,6839	0,59453	608,92	846,73	7,4781
900	2,67217	692,79	960,01	8,0232	1,33657	692,75	960,07	7,8175	0,66878	692,67	960,19	7,6117
1000	2,96900	778,78	1075,68	8,1451	1,48501	778,74	1075,75	7,9393	0,74302	778,68	1075,89	7,7335
	600 kPa (96,37 K)				800 kPa (100,38 K)				1000 kPa (103,73 K)			
Sat.	0,04046	62,57	86,85	5,0411	0,03038	63,21	87,52	4,9768	0,02416	63,35	87,51	4,9237
100	0,04299	66,41	92,20	5,0957	-	-	-	-	-	-	-	-
120	0,05510	83,73	116,79	5,3204	0,04017	81,88	114,02	5,2191	0,03117	79,91	111,08	5,1357
140	0,06620	99,75	139,47	5,4953	0,04886	98,41	137,50	5,4002	0,03845	97,02	135,47	5,3239
160	0,07689	115,34	161,47	5,6422	0,05710	114,28	159,95	5,5501	0,04522	113,20	158,42	5,4772
180	0,08734	130,69	183,10	5,7696	0,06509	129,82	181,89	5,6793	0,05173	128,94	180,67	5,6082
200	0,09766	145,91	204,50	5,8823	0,07293	145,17	203,51	5,7933	0,05809	144,43	202,52	5,7234
220	0,10788	161,04	225,76	5,9837	0,08067	160,40	224,94	5,8954	0,06436	159,76	224,11	5,8263
240	0,11803	176,11	246,92	6,0757	0,08835	175,54	246,23	5,9880	0,07055	174,98	245,53	5,9194
260	0,12813	191,13	268,01	6,1601	0,09599	190,63	267,42	6,0728	0,07670	190,13	266,83	6,0047
280	0,13820	206,13	289,05	6,2381	0,10358	205,68	288,54	6,1511	0,08281	205,23	288,04	6,0833
300	0,14824	221,11	310,06	6,3105	0,11115	220,70	309,62	6,2238	0,08889	220,29	309,18	6,1562
350	0,17326	258,52	362,48	6,4722	0,12998	258,19	362,17	6,3858	0,10401	257,86	361,87	6,3187
400	0,19819	295,97	414,89	6,6121	0,14873	295,69	414,68	6,5260	0,11905	295,42	414,47	6,4591
450	0,22308	333,57	467,42	6,7359	-	-	-	-	-	-	-	-
500	0,24792	371,45	520,20	6,8471	0,18609	371,25	520,12	6,7613	0,14899	371,04	520,04	6,6947
600	0,29755	448,40	626,93	7,0416	0,22335	448,24	626,93	6,9560	0,17883	448,09	626,92	6,8895
700	0,34712	527,43	735,70	7,2093	0,26056	527,31	735,76	7,1237	0,20862	527,19	735,81	7,0573
800	0,39666	608,82	846,82	7,3576	0,29773	608,73	846,91	7,2721	0,23837	608,63	847,00	7,2057
900	0,44618	692,59	960,30	7,4912	0,33488	692,52	960,42	7,4058	0,26810	692,44	960,54	7,3394
1000	0,49568	778,61	1076,02	7,6131	0,37202	778,55	1076,16	7,5277	0,29782	778,49	1076,30	7,4614

Tabela B.6.2 (continuação)
Nitrogênio superaquecido

T K	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	1500 kPa (110,38 K)				2000 kPa (115,58 K)			
Sat.	0,01555	62,17	85,51	4,8148	0,01100	59,25	81,25	4,7193
120	0,01899	74,26	102,75	4,9650	0,01260	66,90	92,10	4,8116
140	0,02452	93,36	130,15	5,1767	0,01752	89,37	124,40	5,0618
160	0,02937	110,44	154,50	5,3394	0,02144	107,55	150,43	5,2358
180	0,03393	126,71	177,60	5,4755	0,02503	124,42	174,48	5,3775
200	0,03832	142,56	200,03	5,5937	0,02844	140,66	197,53	5,4989
220	0,04260	158,14	222,05	5,6987	0,03174	156,52	219,99	5,6060
240	0,04682	173,57	243,80	5,7933	0,03496	172,15	242,08	5,7021
260	0,05099	188,87	265,36	5,8796	0,03814	187,62	263,90	5,7894
280	0,05512	204,10	286,78	5,9590	0,04128	202,97	285,53	5,8696
300	0,05922	219,27	308,10	6,0325	0,04440	218,24	307,03	5,9438
350	0,06940	257,03	361,13	6,1960	0,05209	256,21	360,39	6,1083
400	0,07949	294,73	413,96	6,3371	0,05971	294,05	413,47	6,2500
450	0,08953	332,53	466,82	6,4616	0,06727	331,95	466,49	6,3750
500	0,09953	370,54	519,84	6,5733	0,07480	370,05	519,65	6,4870
600	0,11948	447,71	626,92	6,7685	0,08980	447,33	626,93	6,6825
700	0,13937	526,89	735,94	6,9365	0,10474	526,59	736,07	6,8507
800	0,15923	608,39	847,22	7,0851	0,11965	608,14	847,45	6,9994
900	0,17906	692,24	960,83	7,2189	0,13454	692,04	961,13	7,1333
1000	0,19889	778,32	1076,65	7,3409	0,14942	778,16	1077,01	7,2553
	3000 kPa (123,61 K)				10 000 kPa			
Sat.	0,00582	46,03	63,47	4,5032	-	-	-	-
140	0,01038	79,98	111,13	4,8706	0,00200	0,84	20,87	4,0373
160	0,01350	101,35	141,85	5,0763	0,00291	47,44	76,52	4,4088
180	0,01614	119,68	168,09	5,2310	0,00402	82,44	122,65	4,6813
200	0,01857	136,78	192,49	5,3596	0,00501	108,21	158,35	4,8697
220	0,02088	153,24	215,88	5,4711	0,00590	129,86	188,88	5,0153
240	0,02312	169,30	238,66	5,5702	0,00672	149,42	216,64	5,1362
260	0,02531	185,10	261,02	5,6597	0,00749	167,77	242,72	5,2406
280	0,02746	200,72	283,09	5,7414	0,00824	185,34	267,69	5,3331
300	0,02958	216,21	304,94	5,8168	0,00895	202,38	291,90	5,4167
350	0,03480	254,57	358,96	5,9834	0,01067	243,57	350,26	5,5967
400	0,03993	292,70	412,50	6,1264	0,01232	283,59	406,79	5,7477
500	0,05008	369,06	519,29	6,3647	0,01551	362,42	517,48	5,9948
600	0,06013	446,57	626,95	6,5609	0,01861	441,47	627,58	6,1955
700	0,07012	525,99	736,35	6,7295	0,02167	521,96	738,65	6,3667
800	0,08008	607,67	847,92	6,8785	0,02470	604,42	851,43	6,5172
900	0,09003	691,65	961,73	7,0125	0,02771	689,02	966,15	6,6523
1000	0,09996	777,85	1077,72	7,1347	0,03072	775,68	1082,84	6,7753

Tabela B.7 – Propriedades Termodinâmicas do Metano

Tabela B.7.1 — Metano saturado

		Volume específico (m^3/kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
Temp. K	Pressão kPa	Líquido saturado v_l	Evap. v_{lv}	Vapor saturado v_v	Líquido saturado u_l	Evap. u_{lv}	Vapor saturado u_v	Líquido saturado h_l	Evap. h_{lv}	Vapor saturado h_v	Líquido saturado s_l	Evap. s_{lv}	Vapor saturado s_v
90,7	11,7	0,002215	3,97941	3,98163	–358,10	496,59	138,49	–358,07	543,12	185,05	4,2264	5,9891	10,2155
95	19,8	0,002243	2,44845	2,45069	–343,79	488,62	144,83	–343,75	537,18	193,43	4,3805	5,6545	10,0350
100	34,4	0,002278	1,47657	1,47885	–326,90	478,96	152,06	–326,83	529,77	202,94	4,5538	5,2977	9,8514
105	56,4	0,002315	0,93780	0,94012	–309,79	468,89	159,11	–309,66	521,82	212,16	4,7208	4,9697	9,6905
110	88,2	0,002353	0,62208	0,62443	–292,50	458,41	165,91	–292,29	513,29	221,00	4,8817	4,6663	9,5480
111,7	101,3	0,002367	0,54760	0,54997	–286,74	454,85	168,10	–286,50	510,33	223,83	4,9336	4,5706	9,5042
115	132,3	0,002395	0,42800	0,43040	–275,05	447,48	172,42	–274,74	504,12	229,38	5,0368	4,3836	9,4205
120	191,6	0,002439	0,30367	0,30610	–257,45	436,02	178,57	–256,98	494,20	237,23	5,1867	4,1184	9,3051
125	269,0	0,002486	0,22108	0,22357	–239,66	423,97	184,32	–238,99	483,44	244,45	5,3321	3,8675	9,1996
130	367,6	0,002537	0,16448	0,16701	–221,65	411,25	189,60	–220,72	471,72	251,00	5,4734	3,6286	9,1020
135	490,7	0,002592	0,12458	0,12717	–203,40	397,77	194,37	–202,13	458,90	256,77	5,6113	3,3993	9,0106
140	641,6	0,002653	0,09575	0,09841	–184,86	383,42	198,56	–183,16	444,85	261,69	5,7464	3,1775	8,9239
145	823,7	0,002719	0,07445	0,07717	–165,97	368,06	202,09	–163,73	429,38	265,66	5,8794	2,9613	8,8406
150	1040,5	0,002794	0,05839	0,06118	–146,65	351,53	204,88	–143,74	412,29	268,54	6,0108	2,7486	8,7594
155	1295,6	0,002877	0,04605	0,04892	–126,82	333,61	206,79	–123,09	393,27	270,18	6,1415	2,5372	8,6787
160	1592,8	0,002974	0,03638	0,03936	–106,35	314,01	207,66	–101,61	371,96	270,35	6,2724	2,3248	8,5971
165	1935,9	0,003086	0,02868	0,03177	–85,06	292,30	207,24	–79,08	347,82	268,74	6,4046	2,1080	8,5126
170	2329,3	0,003222	0,02241	0,02563	–62,67	267,81	205,14	–55,17	320,02	264,85	6,5399	1,8824	8,4224
175	2777,6	0,003393	0,01718	0,02058	–38,75	239,47	200,72	–29,33	287,20	257,87	6,6811	1,6411	8,3223
180	3286,4	0,003623	0,01266	0,01629	–12,43	205,16	192,73	–0,53	246,77	246,25	6,8333	1,3710	8,2043
185	3863,2	0,003977	0,00846	0,01243	18,47	159,49	177,96	33,83	192,16	226,00	7,0095	1,0387	8,0483
190	4520,5	0,004968	0,00300	0,00797	69,10	67,01	136,11	91,56	80,58	172,14	7,3015	0,4241	7,7256
190,6	4599,2	0,006148	0	0,00615	101,46	0	101,46	129,74	0	129,74	7,4999	0	7,4999

Tabela B.7.2
Metano superaquecido

Temp. K	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	100 kPa (111,50 K)				200 kPa (120,61 K)				400 kPa (131,42 k)			
Sat.	0,55665	167,90	223,56	9,5084	0,29422	179,30	238,14	9,2918	0,15427	191,01	252,72	9,0754
125	0,63126	190,21	253,33	9,7606	0,30695	186,80	248,19	9,3736	-	-	-	-
150	0,76586	230,18	306,77	10,1504	0,37700	227,91	303,31	9,7759	0,18233	223,16	296,09	9,3843
175	0,89840	269,72	359,56	10,4759	0,44486	268,05	357,02	10,1071	0,21799	264,61	351,81	9,7280
200	1,02994	309,20	412,19	10,7570	0,51165	307,88	410,21	10,3912	0,25246	305,19	406,18	10,0185
225	1,16092	348,90	464,99	11,0058	0,57786	347,81	463,38	10,6417	0,28631	345,61	460,13	10,2726
250	1,29154	389,12	518,27	11,2303	0,64370	388,19	516,93	10,8674	0,31978	386,32	514,23	10,5007
275	1,42193	430,17	572,36	11,4365	0,70931	429,36	571,22	11,0743	0,35301	427,74	568,94	10,7092
300	1,55215	472,36	627,58	11,6286	0,77475	471,65	626,60	11,2670	0,38606	470,23	624,65	10,9031
325	1,68225	516,00	684,23	11,8100	0,84008	515,37	683,38	11,4488	0,41899	514,10	681,69	11,0857
350	1,81226	561,34	742,57	11,9829	0,90530	560,77	741,83	11,6220	0,45183	559,63	740,36	11,2595
375	1,94220	608,58	802,80	12,1491	0,97046	608,07	802,16	11,7885	0,48460	607,03	800,87	11,4265
400	2,07209	657,89	865,10	12,3099	1,03557	657,41	864,53	11,9495	0,51731	656,47	863,39	11,5879
425	2,20193	709,36	929,55	12,4661	1,10062	708,92	929,05	12,1059	0,54997	708,05	928,04	11,7446
450	-	-	-	-	-	-	-	-	0,58260	761,85	994,89	11,8974
475	-	-	-	-	-	-	-	-	0,61520	817,89	1063,97	12,0468
500	-	-	-	-	-	-	-	-	0,64778	876,18	1135,29	12,1931
525	-	-	-	-	-	-	-	-	0,68033	936,67	1208,81	12,3366
	600 kPa (138,72 K)				800 kPa (144,40 K)				1000 kPa (149,13 K)			
Sat.	0,10496	197,54	260,51	8,9458	0,07941	201,70	265,23	8,8505	0,06367	204,45	268,12	8,7735
150	0,11717	218,08	288,38	9,1390	0,08434	212,53	280,00	8,9509	0,06434	206,28	270,62	8,7902
175	0,14227	261,03	346,39	9,4970	0,10433	257,30	340,76	9,3260	0,08149	253,38	334,87	9,1871
200	0,16603	302,44	402,06	9,7944	0,12278	299,62	397,85	9,6310	0,09681	296,73	393,53	9,5006
225	0,18911	343,37	456,84	10,0525	0,14050	341,10	453,50	9,8932	0,11132	338,79	450,11	9,7672
250	0,21180	384,44	511,52	10,2830	0,15781	382,53	508,78	10,1262	0,12541	380,61	506,01	10,0028
275	0,23424	426,11	566,66	10,4931	0,17485	424,47	564,35	10,3381	0,13922	422,82	562,04	10,2164
300	0,25650	468,80	622,69	10,6882	0,19172	467,36	620,73	10,5343	0,15285	465,91	618,76	10,4138
325	0,27863	512,82	680,00	10,8716	0,20845	511,55	678,31	10,7186	0,16635	510,26	676,61	10,5990
350	0,30067	558,48	738,88	11,0461	0,22510	557,33	737,41	10,8938	0,17976	556,18	735,94	10,7748
375	0,32264	605,99	799,57	11,2136	0,24167	604,95	798,28	11,0617	0,19309	603,91	797,00	10,9433
400	0,34456	655,52	862,25	11,3754	0,25818	654,57	861,12	11,2239	0,20636	653,62	859,98	11,1059
425	0,36643	707,18	927,04	11,5324	0,27465	706,31	926,03	11,3813	0,21959	705,44	925,03	11,2636
450	0,38826	761,05	994,00	11,6855	0,29109	760,24	993,11	11,5346	0,23279	759,44	992,23	11,4172
475	0,41006	817,15	1063,18	11,8351	0,30749	816,40	1062,40	11,6845	0,24595	815,66	1061,61	11,5672
500	0,43184	875,48	1134,59	11,9816	0,32387	874,79	1133,89	11,8311	0,25909	874,10	1133,19	11,7141
525	0,45360	936,03	1208,18	12,1252	0,34023	935,38	1207,56	11,9749	0,27221	934,73	1206,95	11,8580
550	-	-	-	-	0,35657	998,14	1283,45	12,1161	0,28531	997,53	1282,84	11,9992

Tabela B.7.2 (continuação)
Metano superaquecido

T K	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	1500 kPa (158,32 K)				2000 kPa (165,86 K)			
Sat.	0,04196	207,53	270,47	8,6215	0,03062	207,01	268,25	8,4975
175	0,05078	242,64	318,81	8,9121	0,03504	229,90	299,97	8,6839
200	0,06209	289,13	382,26	9,2514	0,04463	280,91	370,17	9,0596
225	0,07239	332,85	441,44	9,5303	0,05289	326,64	432,43	9,3532
250	0,08220	375,70	499,00	9,7730	0,06059	370,67	491,84	9,6036
275	0,09171	418,65	556,21	9,9911	0,06796	414,40	550,31	9,8266
300	0,10103	462,27	613,82	10,1916	0,07513	458,59	608,85	10,0303
325	0,11022	507,04	672,37	10,3790	0,08216	503,80	668,12	10,2200
350	0,11931	553,30	732,26	10,5565	0,08909	550,40	728,58	10,3992
375	0,12832	601,30	793,78	10,7263	0,09594	598,69	790,57	10,5703
400	0,13728	651,24	857,16	10,8899	0,10274	648,87	854,34	10,7349
425	0,14619	703,26	922,54	11,0484	0,10949	701,08	920,06	10,8942
450	0,15506	757,43	990,02	11,2027	0,11620	755,43	987,84	11,0491
475	0,16391	813,80	1059,66	11,3532	0,12289	811,94	1057,72	11,2003
500	0,17273	872,37	1131,46	11,5005	0,12955	870,64	1129,74	11,3480
525	0,18152	933,12	1205,41	11,6448	0,13619	931,51	1203,88	11,4927
550	0,19031	996,02	1281,48	11,7864	0,14281	994,51	1280,13	11,6346
	4000 kPa (186,10 K)				8000 kPa			
Sat.	0,01160	172,96	219,34	8,0035	-	-	-	-
200	0,01763	237,70	308,23	8,4675	0,00412	55,58	88,54	7,2069
225	0,02347	298,52	392,39	8,8653	0,00846	217,30	284,98	8,1344
250	0,02814	349,08	461,63	9,1574	0,01198	298,05	393,92	8,5954
275	0,03235	396,67	526,07	9,4031	0,01469	357,88	475,39	8,9064
300	0,03631	443,48	588,73	9,6212	0,01705	411,71	548,15	9,1598
325	0,04011	490,62	651,07	9,8208	0,01924	463,52	617,40	9,3815
350	0,04381	538,70	713,93	10,0071	0,02130	515,02	685,39	9,5831
375	0,04742	588,18	777,86	10,1835	0,02328	567,12	753,34	9,7706
400	0,05097	639,34	843,24	10,3523	0,02520	620,38	821,95	9,9477
425	0,05448	692,38	910,31	10,5149	0,02707	675,14	891,71	10,1169
450	0,05795	747,43	979,23	10,6725	0,02891	731,63	962,92	10,2796
475	0,06139	804,55	1050,12	10,8258	0,03072	789,99	1035,75	10,4372
500	0,06481	863,78	1123,01	10,9753	0,03251	850,28	1110,34	10,5902
525	0,06820	925,11	1197,93	11,1215	0,03428	912,54	1186,74	10,7393
550	0,07158	988,53	1274,86	11,2646	0,03603	976,77	1264,99	10,8849
575	0,07495	1053,98	1353,77	11,4049	0,03776	1042,96	1345,07	11,0272

Apêndice C

Equação de Estado

Tabela D.1
Equações de estado

Modelo	c	d	b_0	a_0
Gás ideal	0	0	0	0
Van der Waals	0	0	1/8	27/64
Redlich-Kwong	1	0	0,08664	$0{,}42748\,(T_r)^{-1/2}$
Soave	1	0	0,08664	$0{,}42748\,[1 + f(1 - T_r^{1/2})]^2$
Peng-Robinson	2	–1	0,0778	$0{,}45724\,[1 + f(1 - T_r^{1/2})]^2$

Tabela D.3
Fatores de compressibilidade na saturação líquido-vapor (fluido simples de Lee-Kesler)

T_r	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,85	0,90	0,95	1
P_r^{sat}	2,7E-4	4,6E-3	0,028	0,099	0,252	0,373	0,532	0,737	1
Z_f	6,5E-5	9,5E-4	0,0052	0,017	0,042	0,062	0,090	0,132	0,29
Z_f	0,999	0,988	0,957	0,897	0,807	0,747	0,673	0,569	0,29

Tabela D.4
Fatores acêntricos de algumas substâncias

Substância		ω	Substância		ω
Água	H_2O	0,344	Hélio	He	–0,365
Amônia	NH_3	0,25	Metano	CH_4	0,011
Argônio	Ar	0,001	Neônio	Ne	–0,029
Bromo	Br_2	0,108	Nitrogênio	N_2	0,039
n-Butano	C_4H_{10}	0,199	R-32	CF_2H_2	0,277
Etano	C_2H_6	0,099	R-125	CHF_2CF_3	0,305

Tabela D.2
Equação de estado de Lee-Kesler

A equação generalizada de estado de Lee-Kesler é:

$$Z = \frac{P_r v_r}{T_r} = 1 + \frac{B}{v_r} + \frac{C}{v_r^2} + \frac{D}{v_r^5} + \frac{c_4}{T_r^3 v_r^2}\left(\beta + \frac{\gamma}{v_r^2}\right)\exp\left(-\frac{\gamma}{v_r^2}\right)$$

$$B = b_1 - \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_3}{T_r^2} - \frac{b_4}{T_r^3}$$

$$C = c_1 - \frac{c_2}{T_r} + \frac{c_3}{T_r^3}$$

$$D = d_1 + \frac{d_2}{T_r}$$

Em que:

$$T_r = \frac{T}{T_c} \qquad P_r = \frac{P}{P_c} \qquad v_r = \frac{v}{RT_c/P_c}$$

Os valores das constantes são os seguintes:

Constante	Fluido simples	Constante	Fluido simples
b_1	0,1181193	c_3	0,0
b_2	0,265728	c_4	0,042724
b_3	0,154790	$d_1 \times 10^4$	0,155488
b_4	0,030323	$d_2 \times 10^4$	0,623689
c_1	0,0236744	β	0,65392
c_2	0,0186984	γ	0,060167

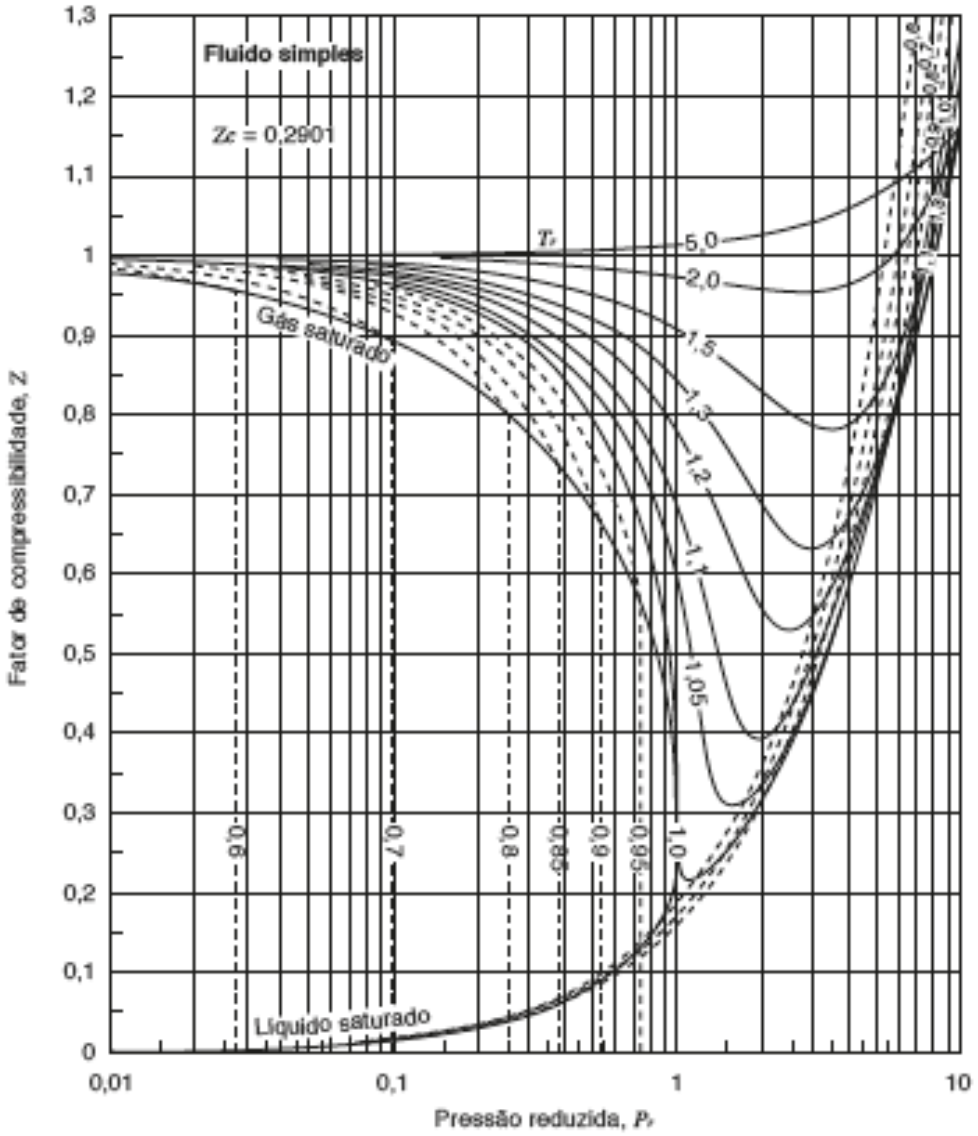


Figura D.1
Fator de compressibilidade para o fluido de Lee-Kesler simples.

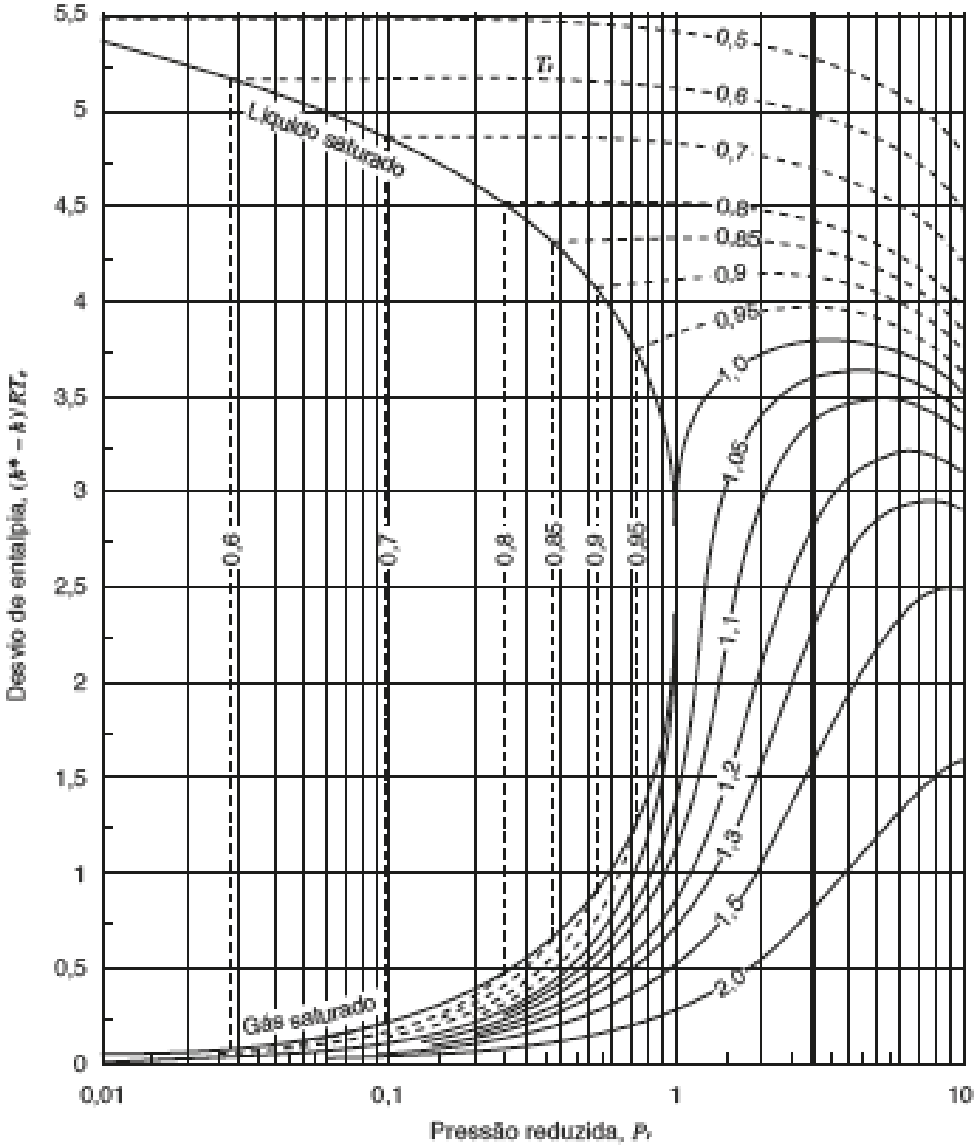


Figura D.2
Desvio de entalpia para o fluido de Lee-Kesler simples.

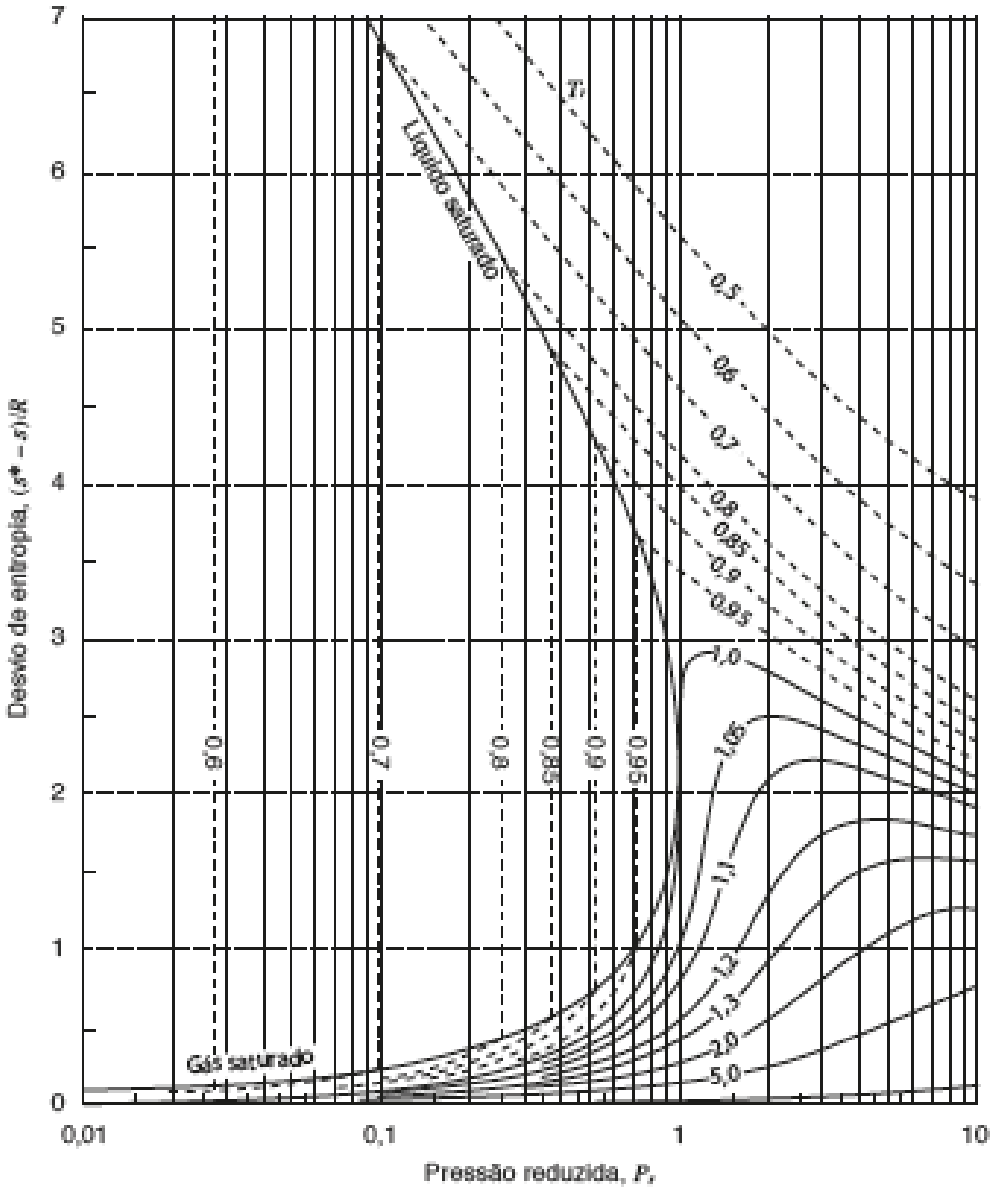


Figura D.3
Desvio de entropia para o fluido de Lee-Kesler simples.

Apêndice D

Diagramas

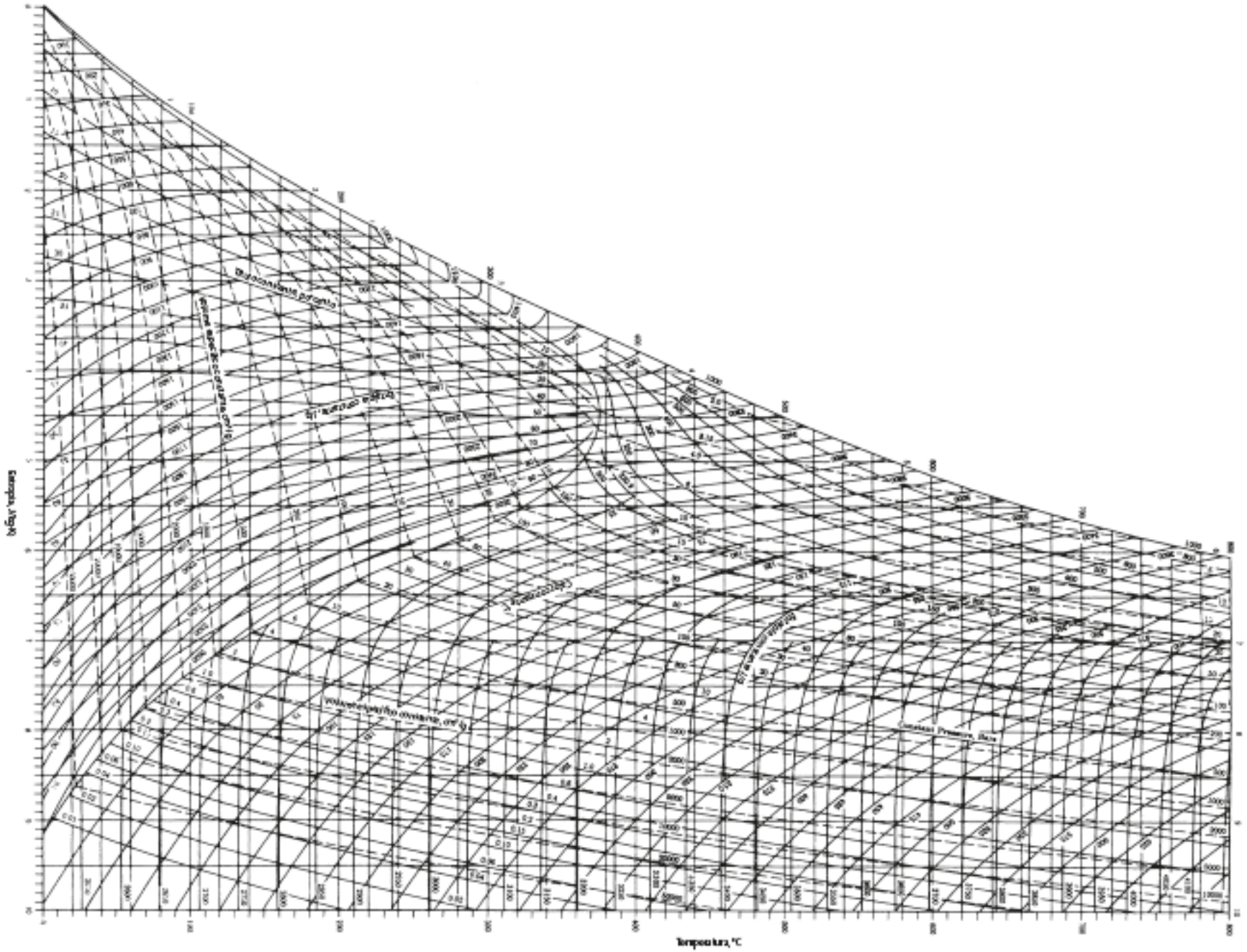


Figura E.1
Diagrama temperatura-entropia da água.
Keenan, Keyes, Hill e Moore. Steam Tables (International Edition – Metric Units). Copyrigth ©1969, John Wiley & Sons, Inc.

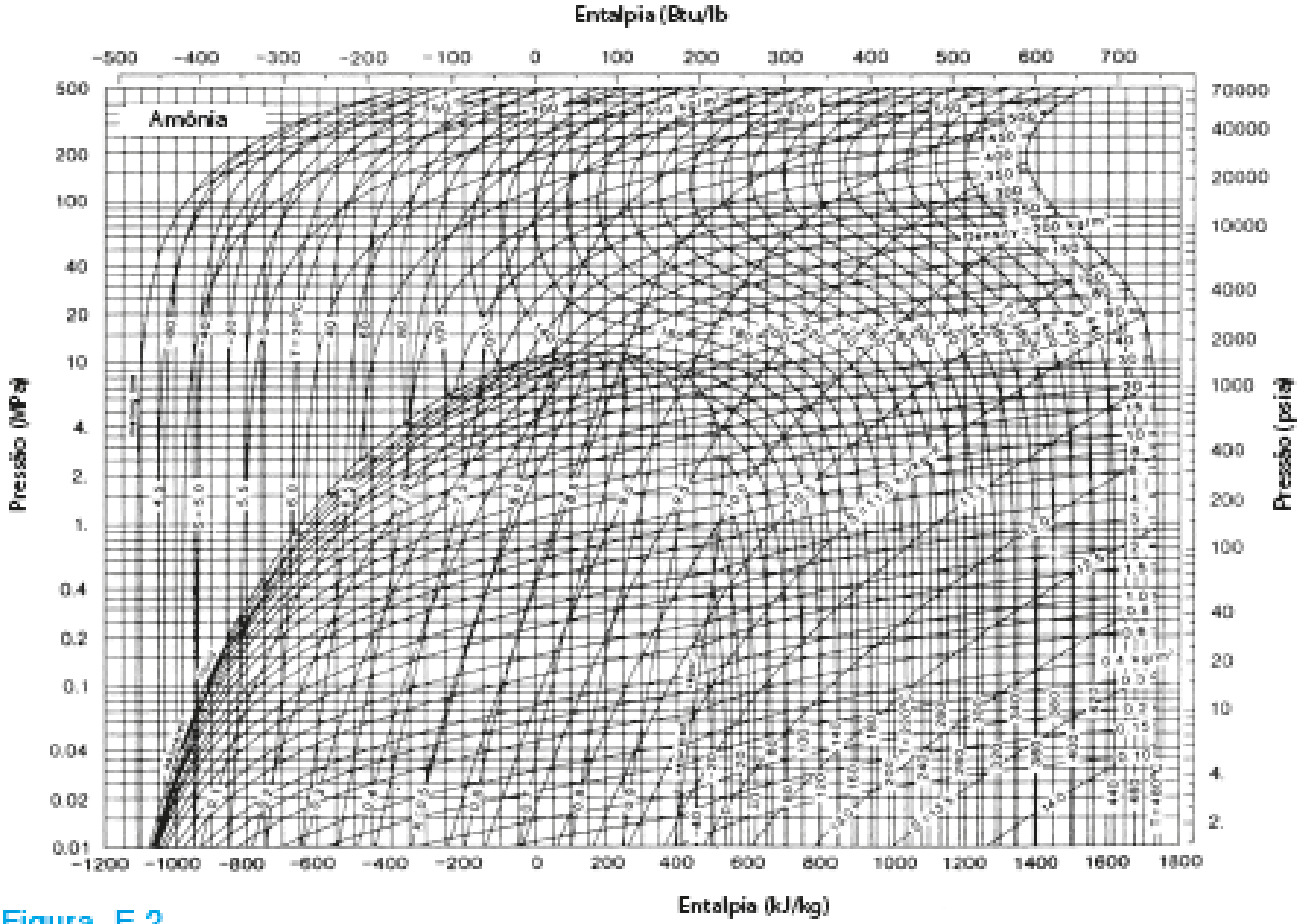


Figura E.2
Diagrama pressão-entalpia da amônia.

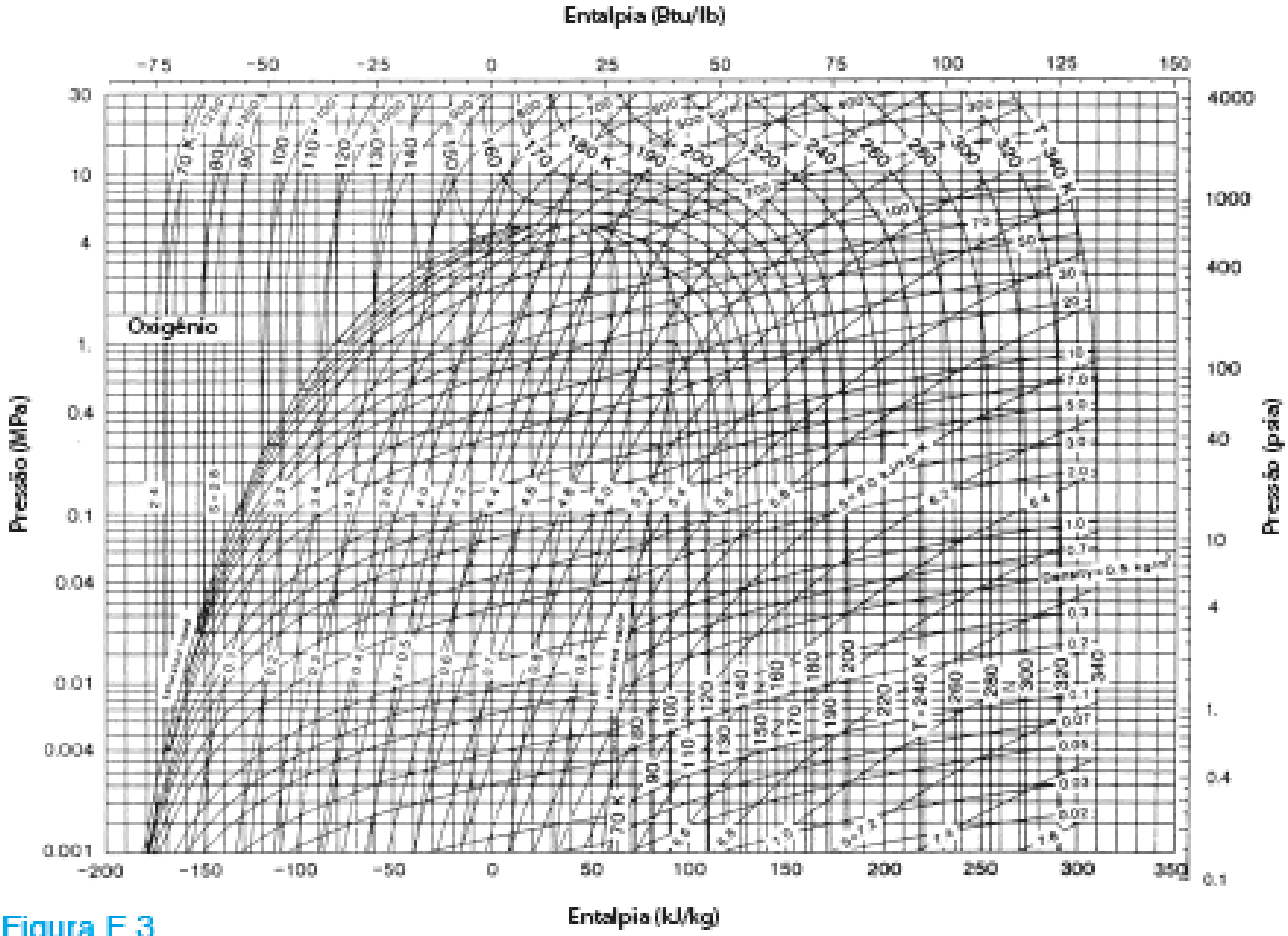


Figura E.3
Diagrama pressão-entalpia do oxigênio.

Carrier

CARTA PSICROMETRICA

Temperaturas normales

UNIDADES METRICAS SI

Presión barométrica 101.325 kPa

A NIVEL DEL MAR

Reproducida con permiso de Carrier Corporation

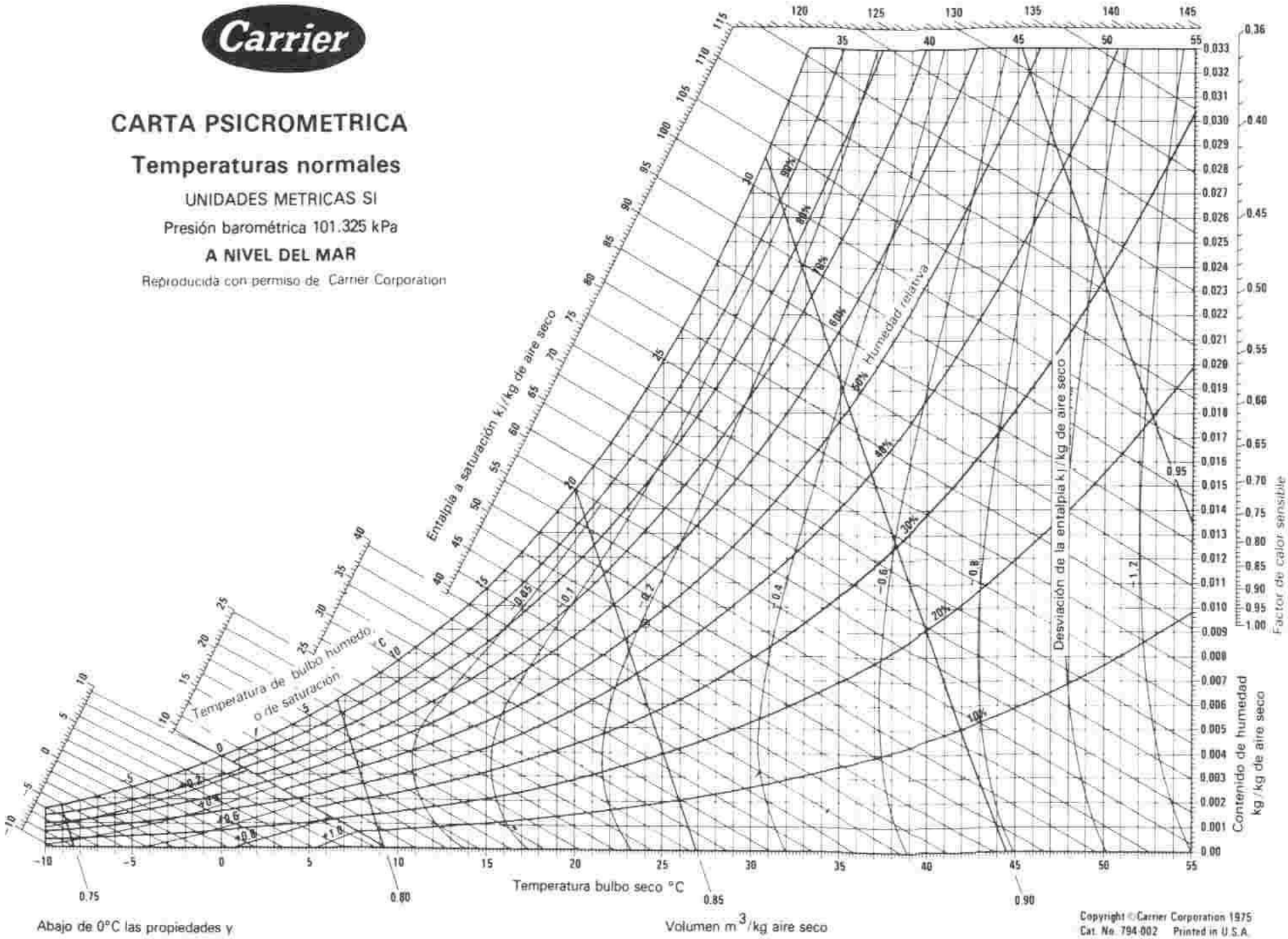
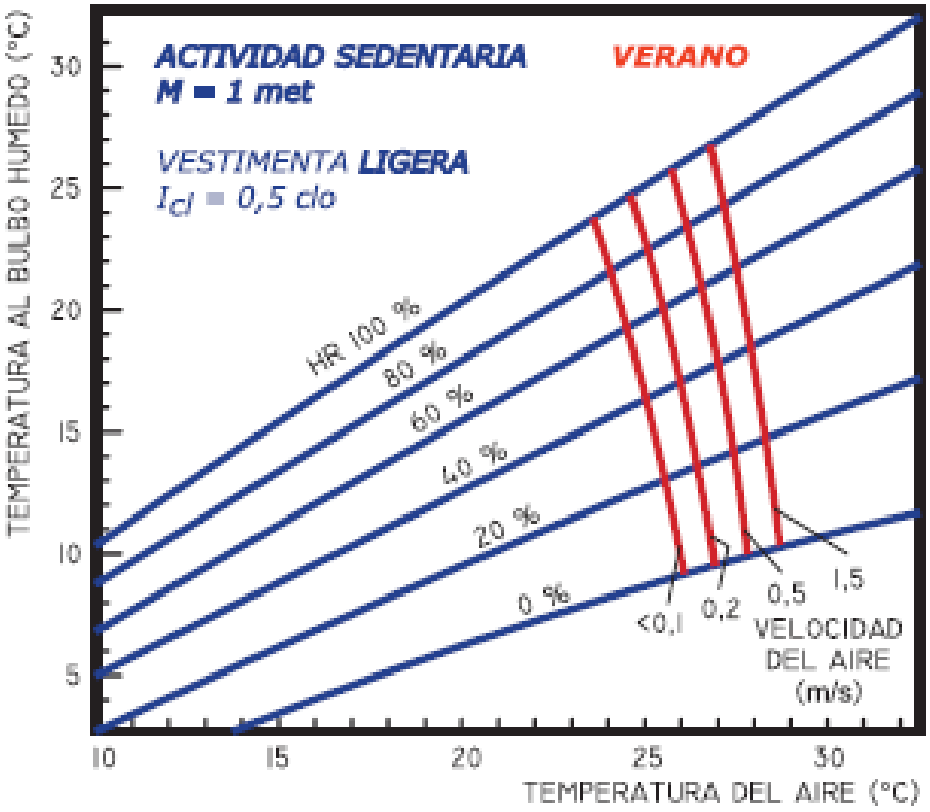


Fig. 5-11



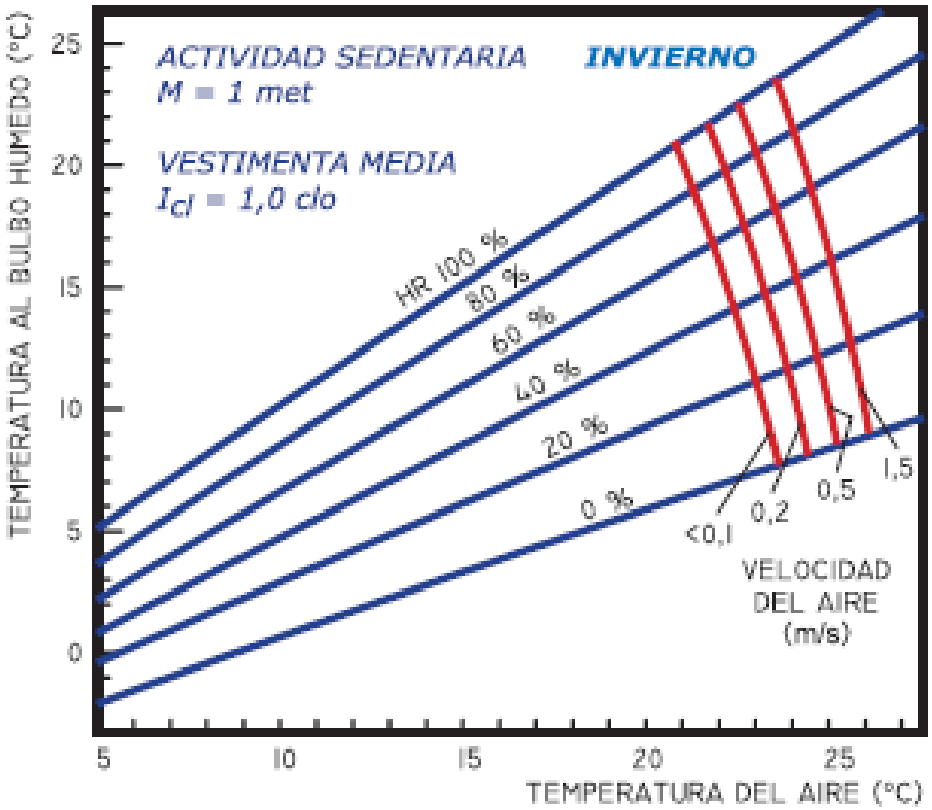
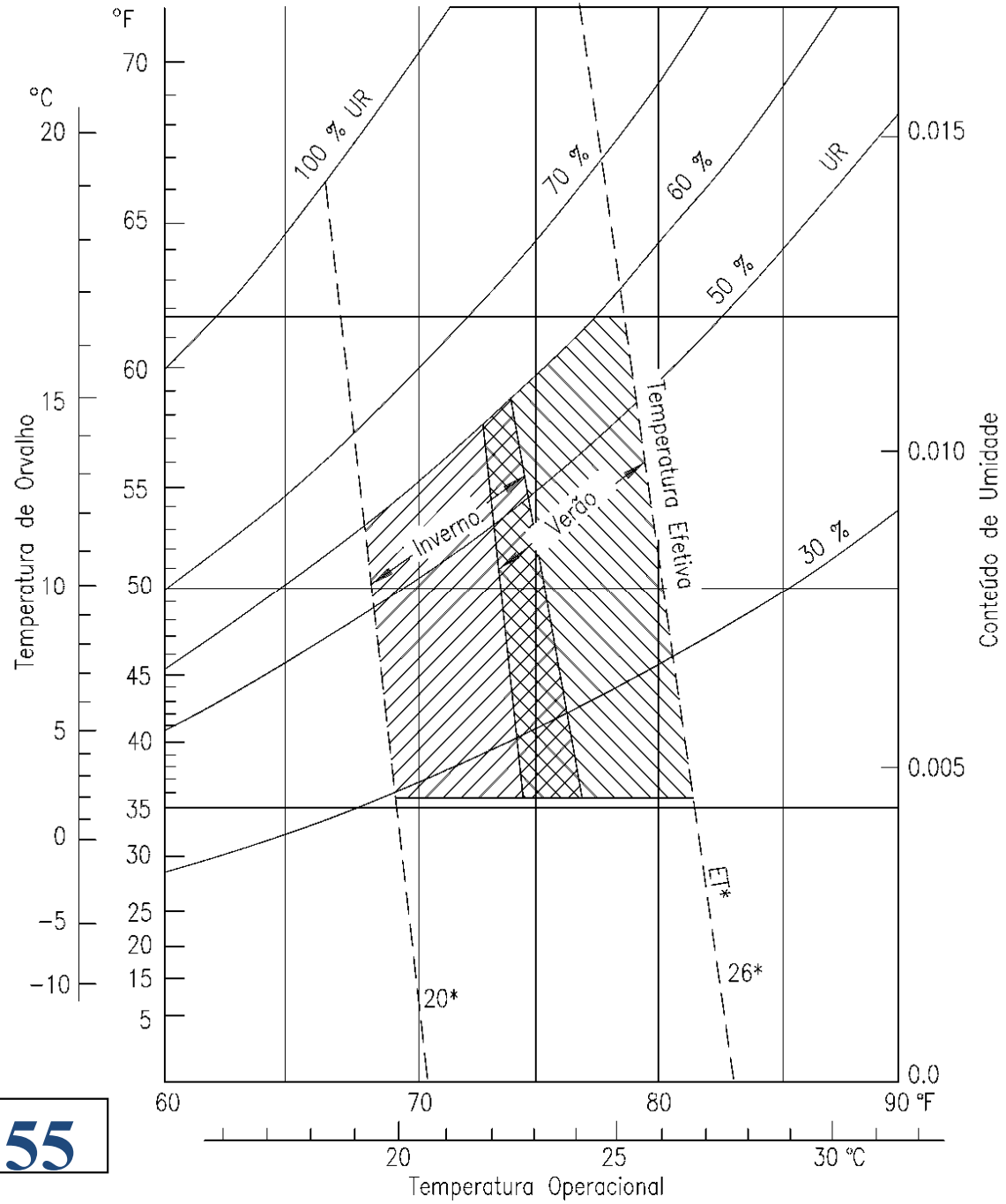
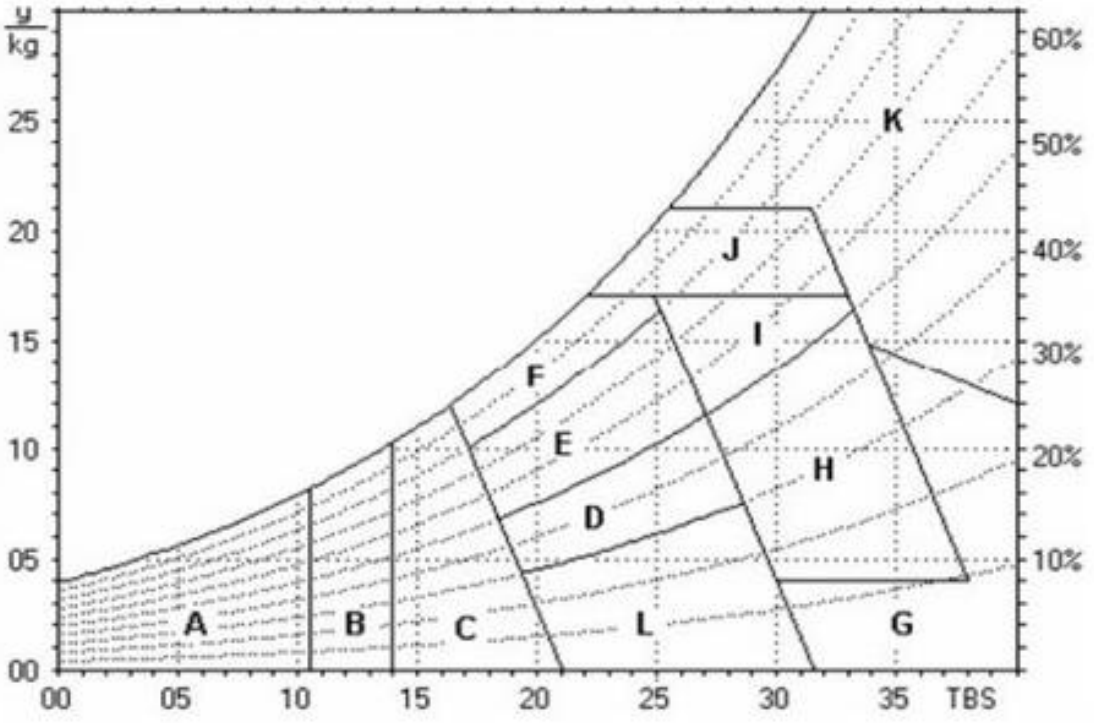


Fig. 2.2: Diagramas de confort para invierno y verano


°F
°C
100 % UR
70 %
60 %
UR
50 %
30 %
Temperatura de Orvalho
Conteúdo de Umidade
Temperatura Efetiva
Inverno
Verão
ET*
20*
26*
0.015
0.010
0.005
0.0
60
70
80
90 °F
20
25
30 °C
Temperatura Operacional

ASHRAE 55

Carta de Givoni



A – Zona de aquecimento artificial (calefação)

B – Zona de aquecimento solar da edificação

C – Zona de massa térmica para aquecimento

D – Zona de conforto térmico (baixa umidade)

E – Zona de Conforto térmico (Não precisa fazer nada)

F – Zona de desumidificação (renovação do ar)

G+H – Zona de resfriamento evaporativo

H+I – Zona de massa térmica de refrigeração

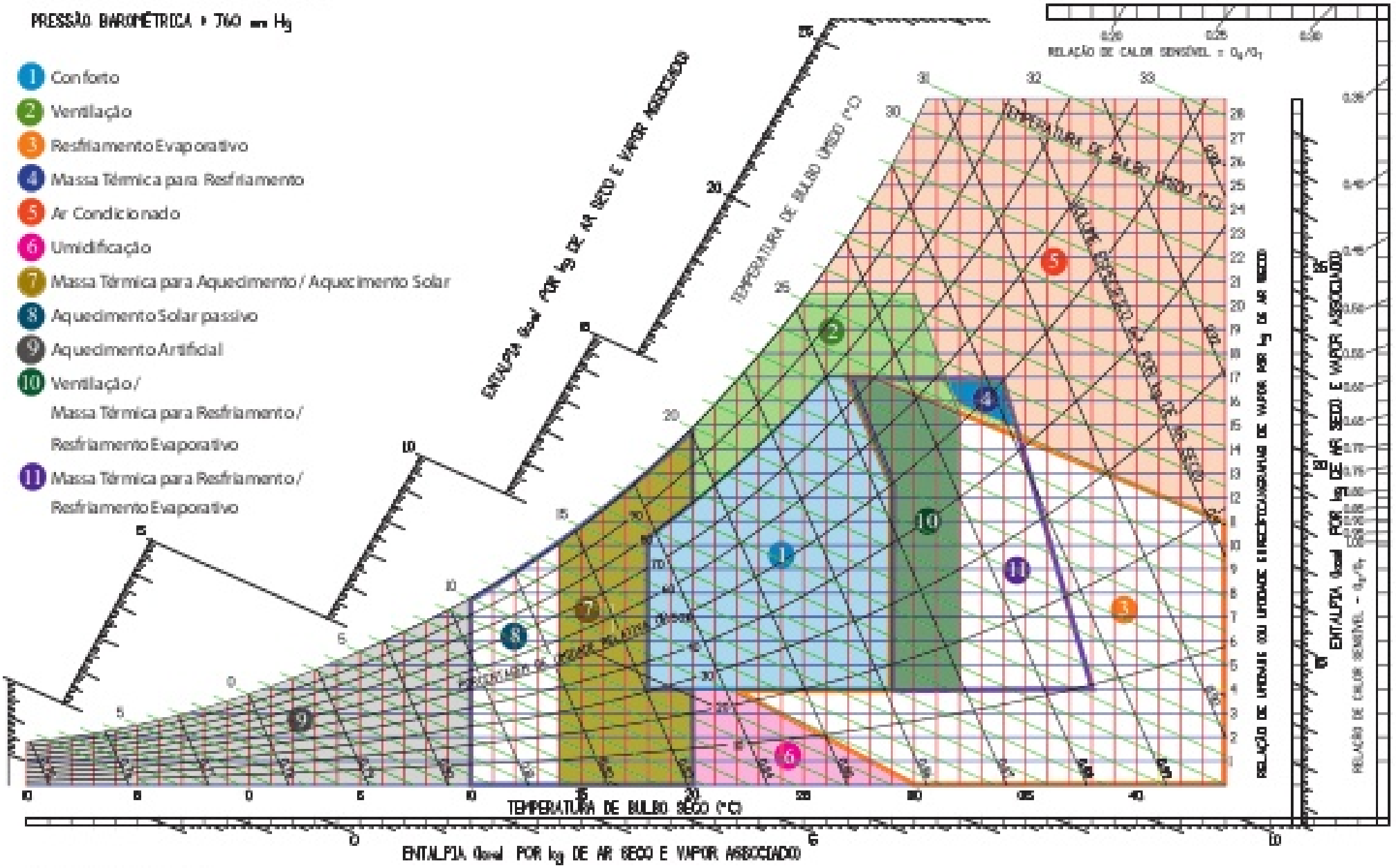
I+J – Zona de ventilação

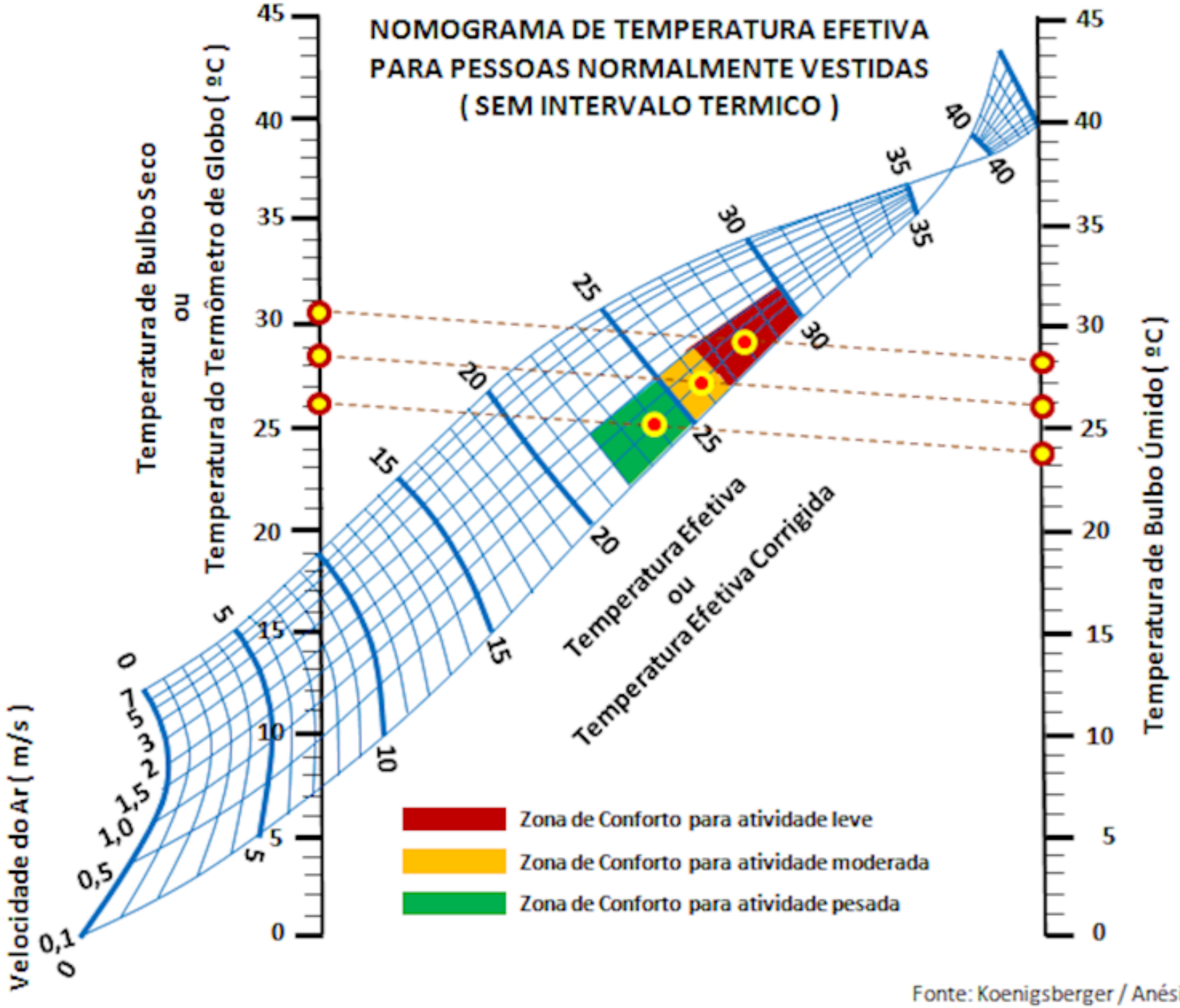
K – Zona de refrigeração artificial

L – Zona de umidificação do ar

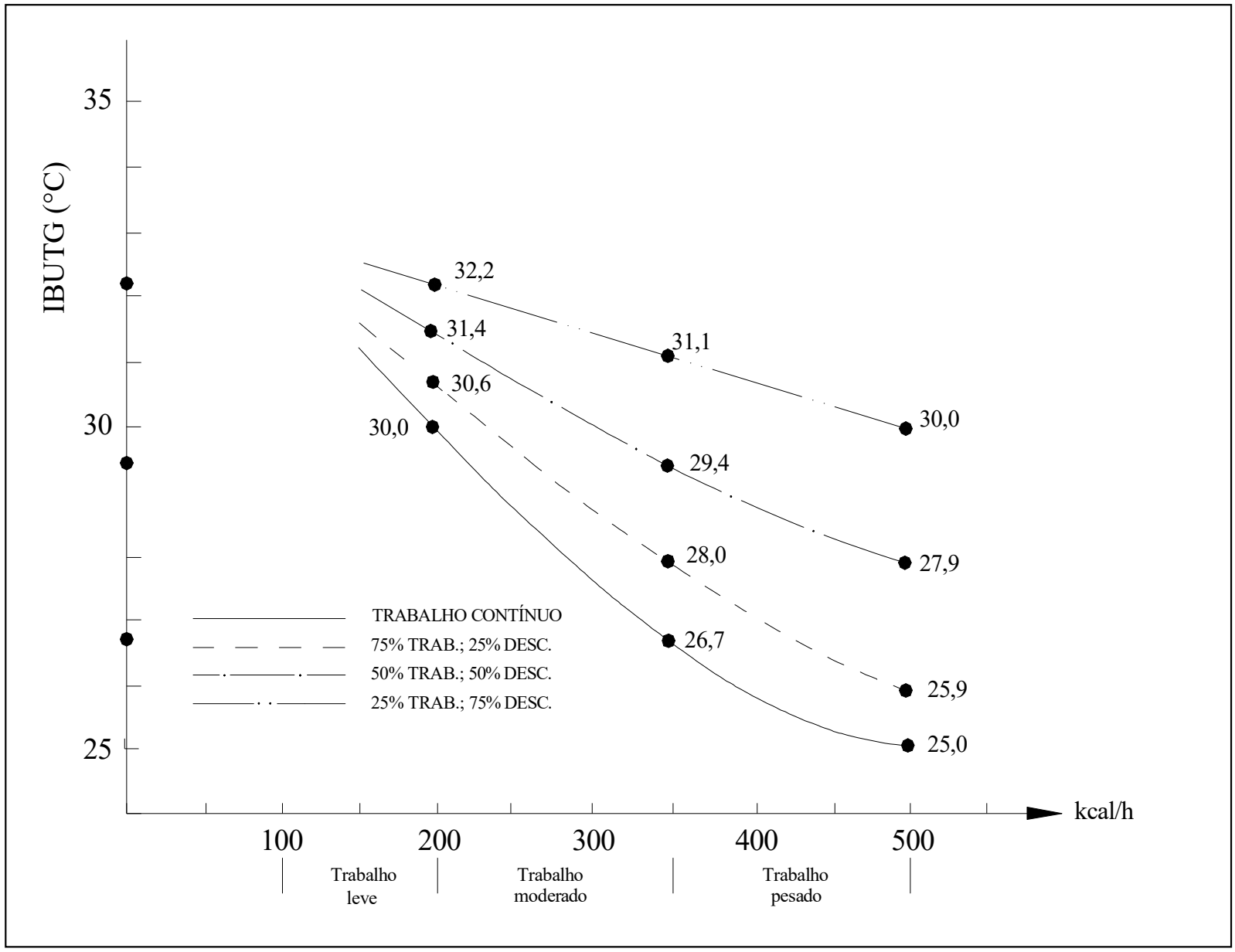
CARTA BIOCLIMÁTICA

PRESSÃO BAROMÉTRICA = 760 mm Hg





Fonte: Koenigsberger / Anésia



***Fonte:*Adaptado do ASHRAE Handbook – Fundamentals, 1997**

Zona de Conforto

para o clima tropical litorâneo quente e úmido, Recife –PE

(esses valores sofrem alterações dependendo da combinação de fatores orgânicos e climáticos, entre outros)

Qualidade do ambiente	Temperatura do ar (°C)	Umidade Relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)
Confortável	24 a 28	50 a 70	1,0 a 3,0
Intermediário	22 a 24 e 28 a 30	30 a 50 e 70 a 80	0,5 a 1,0 e 3,0 a 4,0
Desconfortável	< 22 e > 30	< 30 e > 80	< 0,5 e > 4,0

Classes	ICT (°C)	Característica
1	< ou = 5,9	Resfriamento muito elevado
2	6,0 - 8,9	Resfriamento elevado
3	9,0 - 11,9	Frio
4	12,0 - 14,9	Desconforto pelo frio
5	15,0 - 17,9	Leve desconforto pelo frio
6	18,0 - 20,9	Limite inferior da zona de conforto
7	21,0 - 23,9	Centro da zona de conforto
8	24,0 - 26,9	Limite superior da zona de conforto
9	27,0 - 29,9	Leve desconforto pelo calor
10	30,0 - 32,9	Desconforto pelo calor
11	> ou = 33,0	Aquecimento elevado

Perguntas?

Contato:

http://lattes.cnpq.br/9510794972870727

@carloscatunda

carlos.catunda@cefet-rj.br