

Introdução à Engenharia Química e Bioquímica

Aula 5
MIEQB
ano lectivo de 2020/2021

Sumário da aula

Processo e variáveis de um processo

- Massa e volume. Densidade
- Caudal
- Composição química
- Pressão. Altura hidrostática. Manómetros
- Temperatura. Escala de temperaturas. Métodos de medição.

Composição química

A **concentração mássica** de um componente de uma mistura ou solução é a massa desse componente por unidade de volume da mistura (g/cm^3 , etc.)

A **concentração molar** de um componente de uma mistura ou solução é o número de moles desse componente por unidade de volume da mistura (mol/cm^3 , etc.)

A **molaridade** de uma solução é o valor da concentração molar do soluto expressa em moles/litro de solução

As unidades **partes por milhão** (ppm) e **partes por bilião** (ppb) são usadas normalmente para exprimir concentrações de espécies presentes em quantidades vestigiais (*trace species*) em misturas gasosas ou líquidas.

Definem-se em unidades mássicas (usualmente para líquidos) ou molares (típico para gases).

Indica quantas partes (g, mol) da espécie estão presentes por milhão ou bilião de partes (g, mol) da mistura.

$$ppm_i = y_i \times 10^6$$

$$ppb_i = y_i \times 10^9$$

2.5) Concentrações

Uma solução aquosa de ácido sulfúrico (concentração 0.5 mol/l) tem um caudal volumétrico de $1.25 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Sabendo que a densidade da solução aquosa é de $1030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e que a massa molar do ácido sulfúrico é igual a $98 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, determine:

- a) A concentração de ácido sulfúrico em unidades de $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- b) O caudal mássico da solução aquosa, em $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- c) A fracção mássica de ácido sulfúrico na solução.

2.5)

a) Concentração de ácido sulfúrico em kg/m^3

$$C = 0.5 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \longrightarrow C = X \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98 \text{ g} / \text{mol}$$

$$C = 0.5 \text{ mol.l}^{-1}$$

$$Q_v = 1.25 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$$

$$\rho_{\text{solução aq.}} = 1030 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98 \text{ g.mol}^{-1}$$

2.5)

a) Concentração de ácido sulfúrico em kg/m^3

$$C = 0.5 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \longrightarrow C = X \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98 \text{ g} / \text{mol}$$

$$C = 0.5 \text{ mol.l}^{-1}$$

$$Q_v = 1.25 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$$

$$\rho_{\text{solução aq.}} = 1030 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$C = 0.5 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} \frac{10^3 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^3} \frac{98 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} = 49 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

2.5)

a) Concentração de ácido sulfúrico em kg/m^3

$$C = 0.5 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \longrightarrow C = X \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98 \text{ g} / \text{mol}$$

$$C = 0.5 \text{ mol.l}^{-1}$$

$$Q_v = 1.25 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$$

$$\rho_{\text{solução aq.}} = 1030 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$C = 0.5 \frac{\cancel{\text{mol}}}{\cancel{\text{dm}^3}} \frac{10^3 \cancel{\text{dm}^3}}{1 \text{ m}^3} \frac{98 \cancel{\text{g}}}{1 \cancel{\text{mol}}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \cancel{\text{g}}} = 49 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

2.5)

b) Caudal mássico da solução aquosa em kg/s

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}}$$

$$C = 0.5 \text{ mol.l}^{-1} = 49 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$Q_v = 1.25 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$$

$$\rho_{\text{solução aq.}} = 1030 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98 \text{ g.mol}^{-1}$$

2.5)

b) Caudal mássico da solução aquosa em kg/s

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}}$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

$$\dot{m} = \dot{V} \rho$$

$$C = 0.5 \text{ mol.l}^{-1} = 49 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$Q_v = 1.25 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$$

$$\rho_{\text{solução aq.}} = 1030 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98 \text{ g.mol}^{-1}$$

2.5)

b) Caudal mássico da solução aquosa em kg/s

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}}$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

$$\dot{m} = \dot{V} \rho$$

$$C = 0.5 \text{ mol.l}^{-1} = 49 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$Q_v = 1.25 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$$

$$\rho_{\text{solução aq.}} = 1030 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$\dot{m} = 1.25 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times 1030 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 21.5 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

2.5)

c) Fracção mássica de ácido sulfúrico (SI)

$$C = 0.5 \text{ mol.l}^{-1} = 49 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$Q_v = 1.25 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$$

$$\rho_{\text{solução aq.}} = 1030 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$\frac{49 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{\text{m}^3_{\text{solução}}}$$



$$\frac{49 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{1030 \text{ kg}_{\text{solução}}}$$

 $\%(\text{p} / \text{p})$ $\times 100$ $4.76\% \text{ H}_2\text{SO}_4$

2.6) Composição molar em base seca e molhada

Uma mistura gasosa contém 60.0% molar N_2 , 15.0% molar CO_2 , 10.0% molar O_2 , e o restante vapor de água.

Calcule a composição molar da mistura gasosa numa **base seca***.

***Matéria seca, peso seco ou extracto seco** é a parte que resta do peso de um material após a perda de toda a água que é possível extrair através de um aquecimento feito em condições controladas de laboratório.

2.6) Composição molar em base seca e molhada

Base: 100 moles de gás molhado

60 mol N_2
15 mol CO_2
10 mol O_2

85 mol **gás seco**

+

15 mol vapor de água



$$\frac{60}{85} = 0.706 \text{ mol } N_2 / \text{mol gás seco}$$

$$\frac{15}{85} = 0.176 \text{ mol } CO_2 / \text{mol gás seco}$$

$$\frac{10}{85} = 0.118 \text{ mol } O_2 / \text{mol gás seco}$$



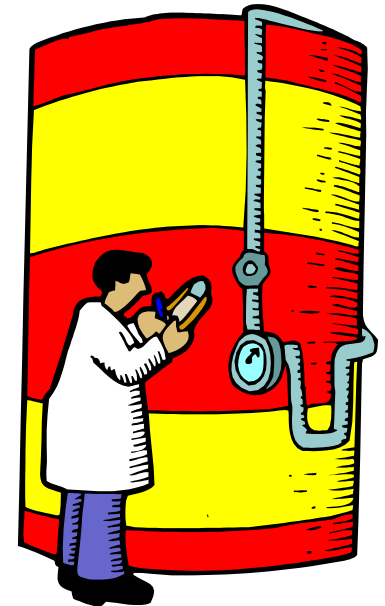
70.6% N_2
17.6% CO_2
11.8% O_2

Variáveis de um processo

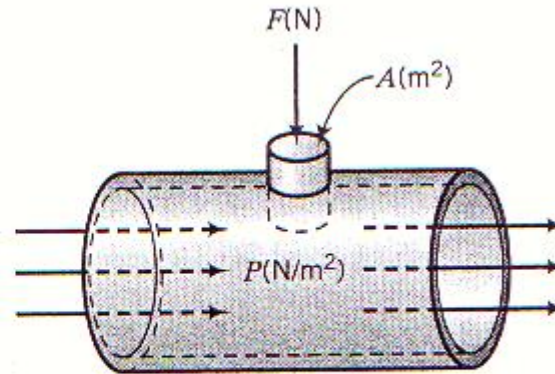
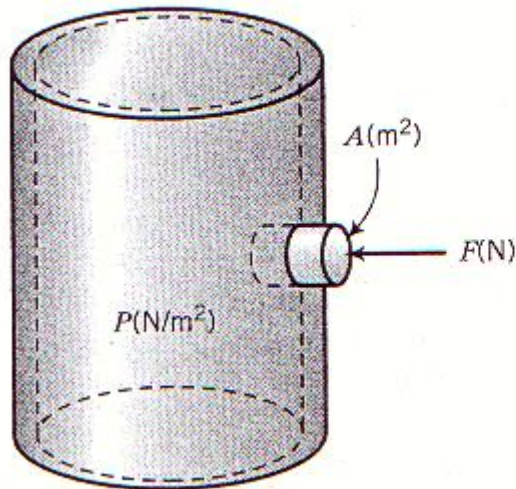
- Pressão. Altura hidrostática. Manómetros
 - Temperatura. Escala de temperaturas. Métodos de medição.
-

Pressão

- Força por unidade de área
- Unidades:
 - Pascal ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2 = \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$)
 - Atmosfera (atm)
 - Libras por polegada quadrada (psi)

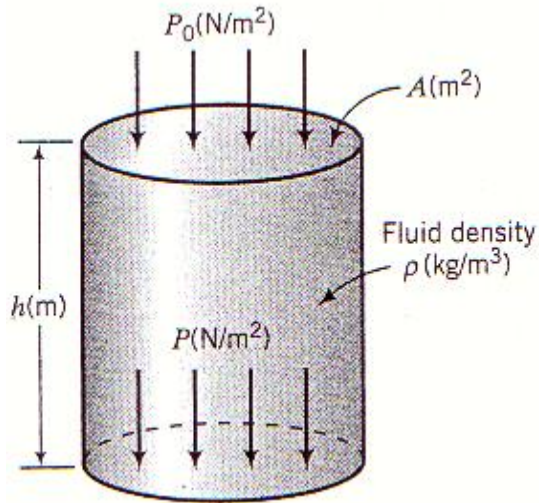


Definição



P = Força a exercer no tampão, de área A , para evitar a saída do fluido de um tanque ou conduta

Pressão hidrostática:



Força na base da coluna =
= Força no topo + peso de fluido

$$\frac{F}{A} = \frac{F_0}{A} + \frac{\text{Peso de fluido}}{A}$$

$$P = P_0 + \frac{mg}{A}$$

$$P = P_0 + \frac{\rho V g}{A} = P_0 + \frac{\rho h A g}{A}$$

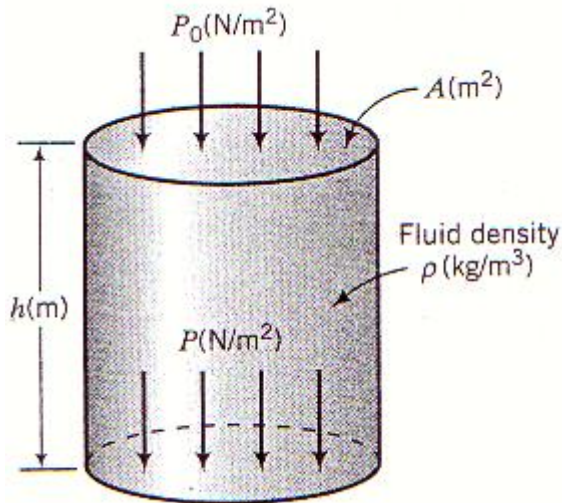
P é independente de A!



$$P = P_0 + \rho g h$$

Se $P_0 = 0 \Rightarrow \dots$

Carga hidrostática de um fluido



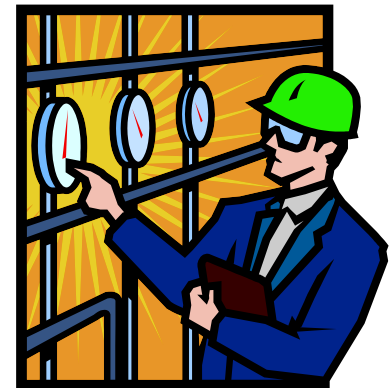
$$P = \rho_{\text{fluido}} g h$$

Altura de uma hipotética coluna cheia de fluido que exerceria a pressão P na base se P_0 fosse zero.

1 atm \Leftrightarrow

- 76 cm H_g**
- 10.3 m H₂O**
- ...**

$$\rho_{\text{Hg}} = 13.6 \text{ g/cm}^3$$



- **Pressão atmosférica (1 atm = 760 mmHg = 14.7 psi)**
(Pressão de fluido ao nível do mar)

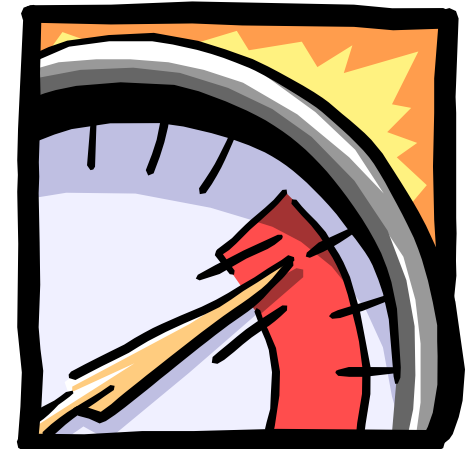
- **Pressão absoluta**

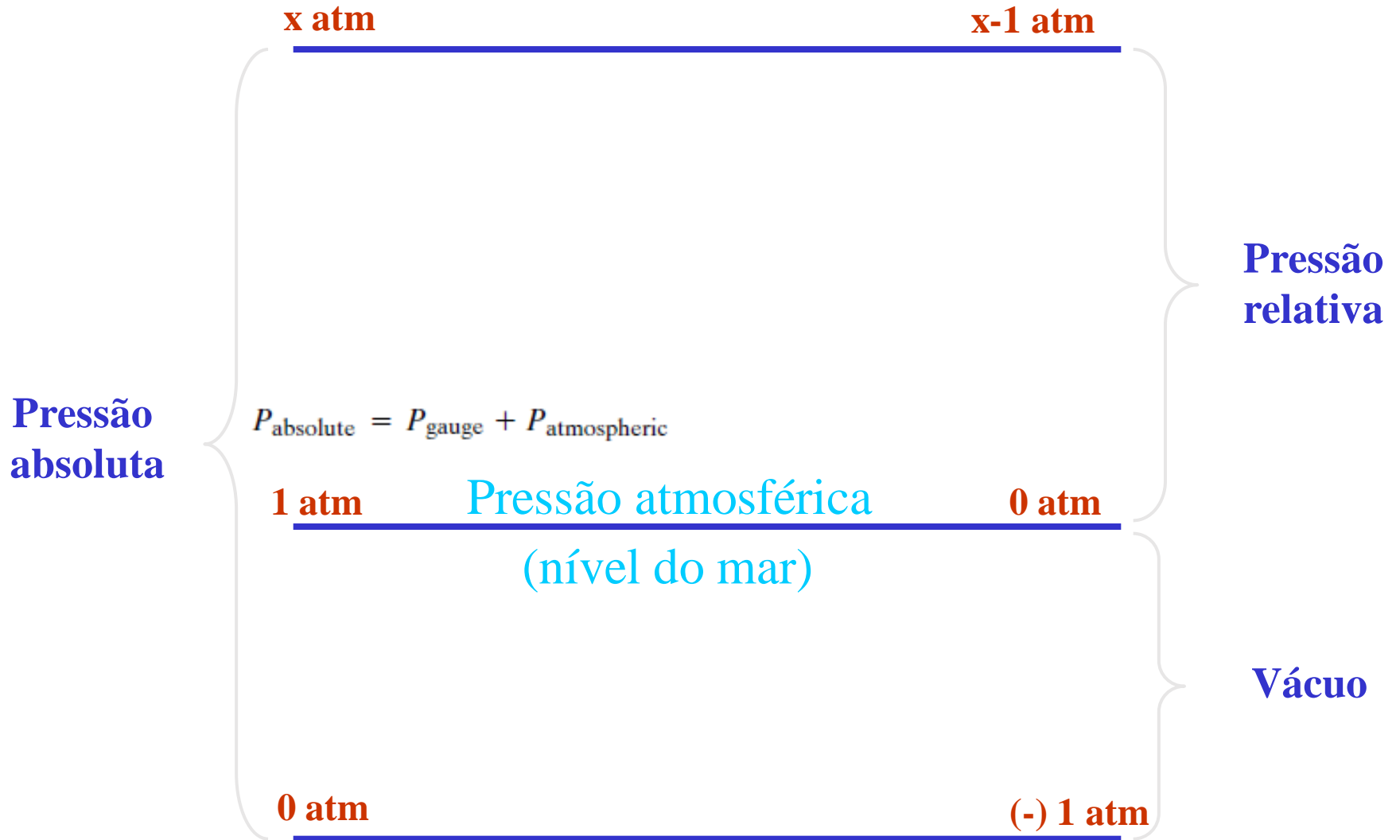
- **Pressão relativa**

$$P_{\text{relativa}} = P_{\text{absoluta}} - P_{\text{atmosférica}}$$

- **Pressão de vácuo**

$$P_{\text{vácuo}} = P_{\text{atmosférica}} - P_{\text{absoluta}}$$





Problema 2.7

Qual é a pressão no fundo de um lago, a 30 m de profundidade?

Considere que a pressão atmosférica (isto é, a pressão à superfície do lago) é de 10.4 m H₂O, a densidade da água é de 1000 kg/m³ e a aceleração da gravidade 9.807 m/s².

Problema 2.7

Qual é a pressão no fundo de um lago, a 30 m de profundidade?

Considere que a pressão atmosférica (isto é, a pressão à superfície do lago) é de 10.4 m H₂O, a densidade da água é de 1000 kg/m³ e a aceleração da gravidade 9.807 m/s².

$$P = P_0 + \rho gh$$

$$1 \text{ atm} = 10.33 \text{ m H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$P = 10.4 \text{ m H}_2\text{O} \times \frac{1.013 \times 10^5 \text{ Pa}}{10.33 \text{ m H}_2\text{O}} + 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.807 \text{ m/s}^2 \times 30 \text{ m}$$

$$P = 3.96 \times 10^5 \text{ Pa} = 3.96 \text{ bar}$$

ou

$$P_h = 10.4 \text{ m H}_2\text{O} + 30.0 \text{ m H}_2\text{O}$$

$$P_h = 40.4 \text{ m H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ bar} = 0.987 \text{ atm}$$

$$1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$$

$$1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar}$$

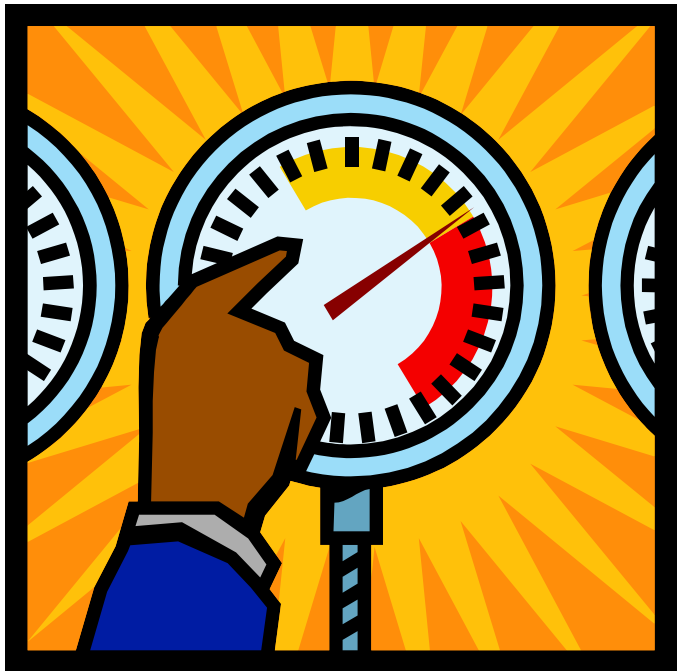
$$P_h(\text{mm Hg}) = P_0(\text{mm Hg}) + h(\text{mm Hg})$$

Para qualquer espécie ou
unidade de comprimento

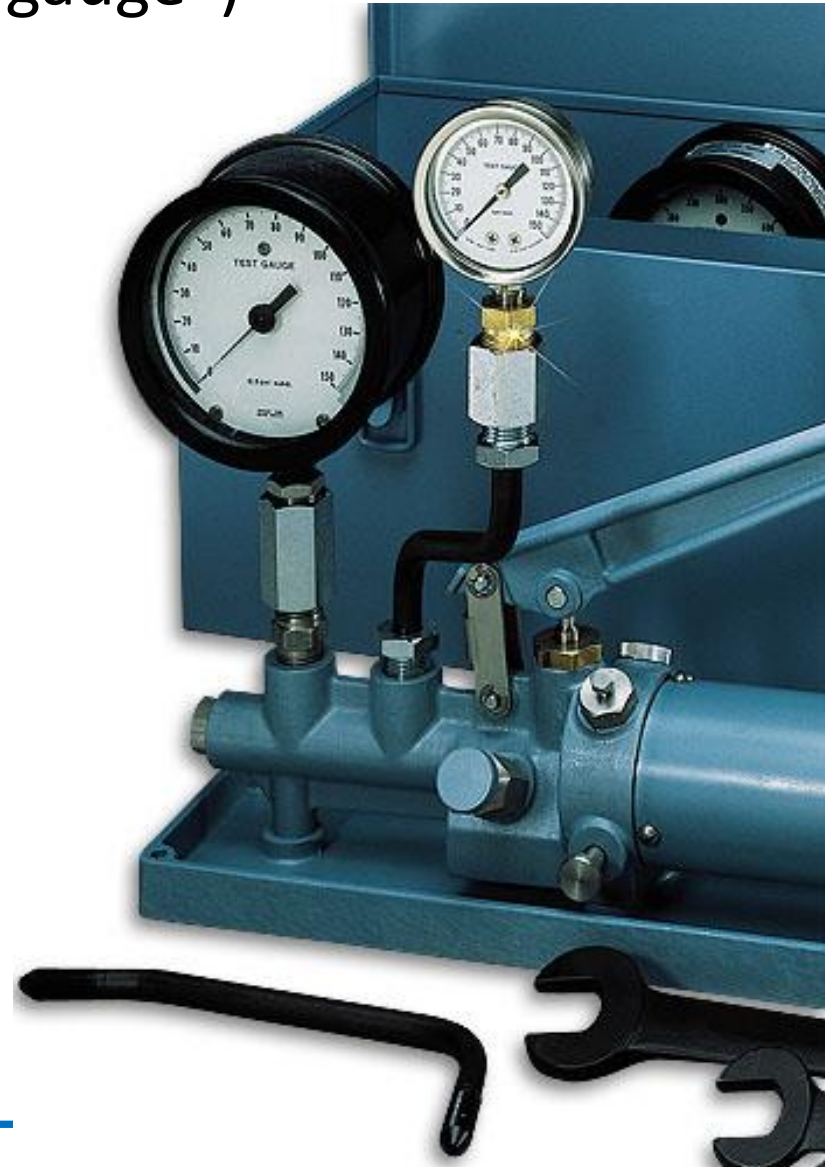
Sensores de pressão

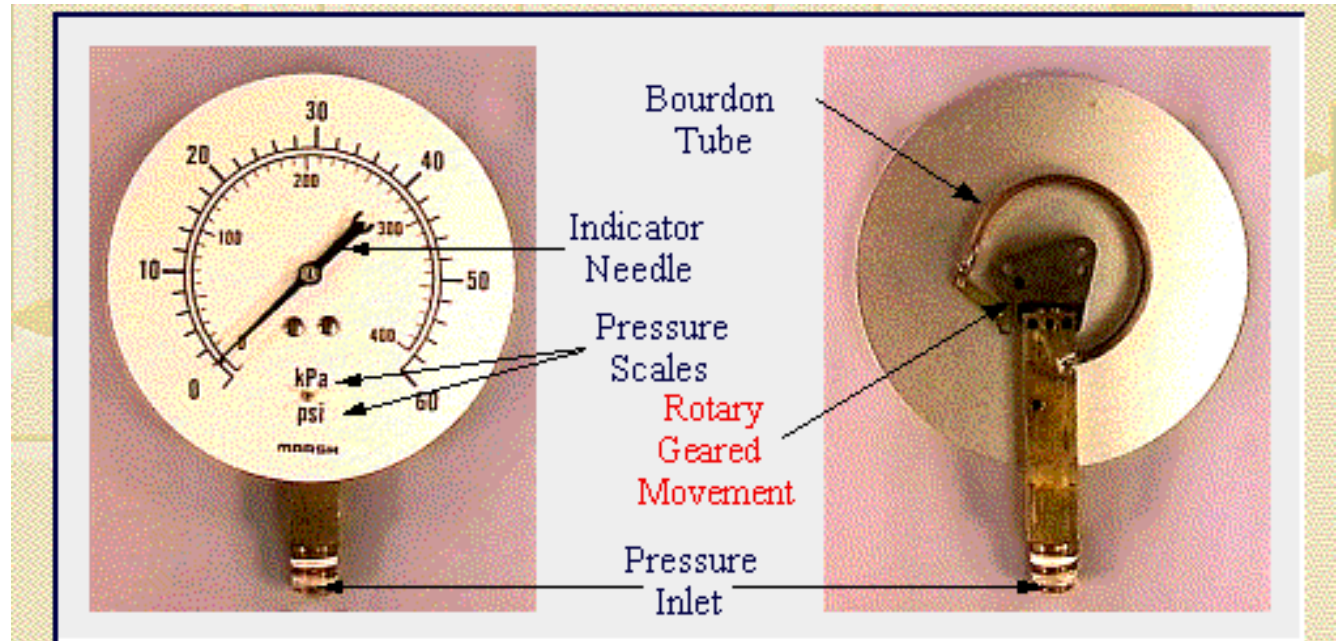
Instrumentação

- Medidor de Bourdon
- Manómetros



Medidor de Bourdon (“Bourdon gauge”)





The Bourdon gauge consists of a hollow tube closed at one end and bent into a configuration. The open end of the tube is exposed to the fluid whose pressure is to be measured. As the pressure increases, the tube tends to straighten, causing a pointer attached to the tube to rotate. The position of the pointer on a calibrated dial gives the pressure of the fluid.

Manómetros

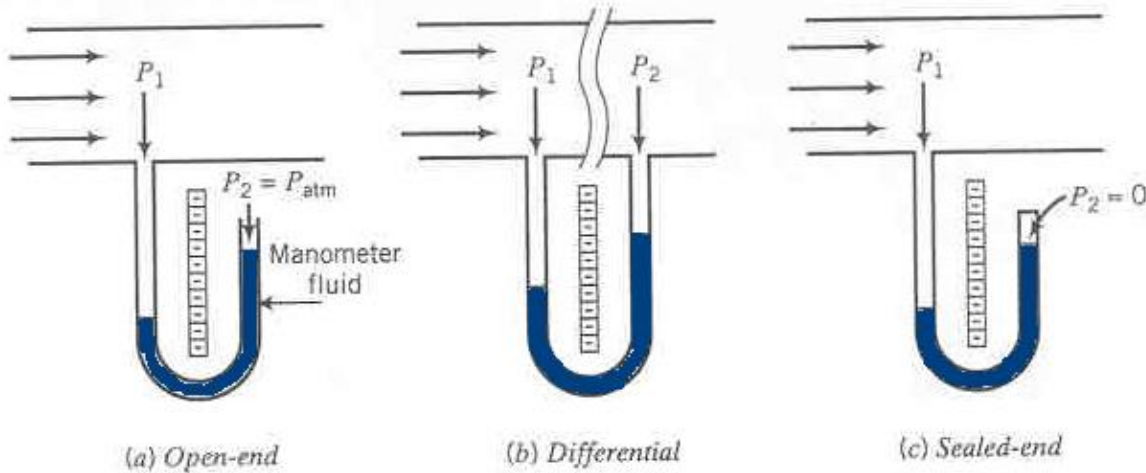
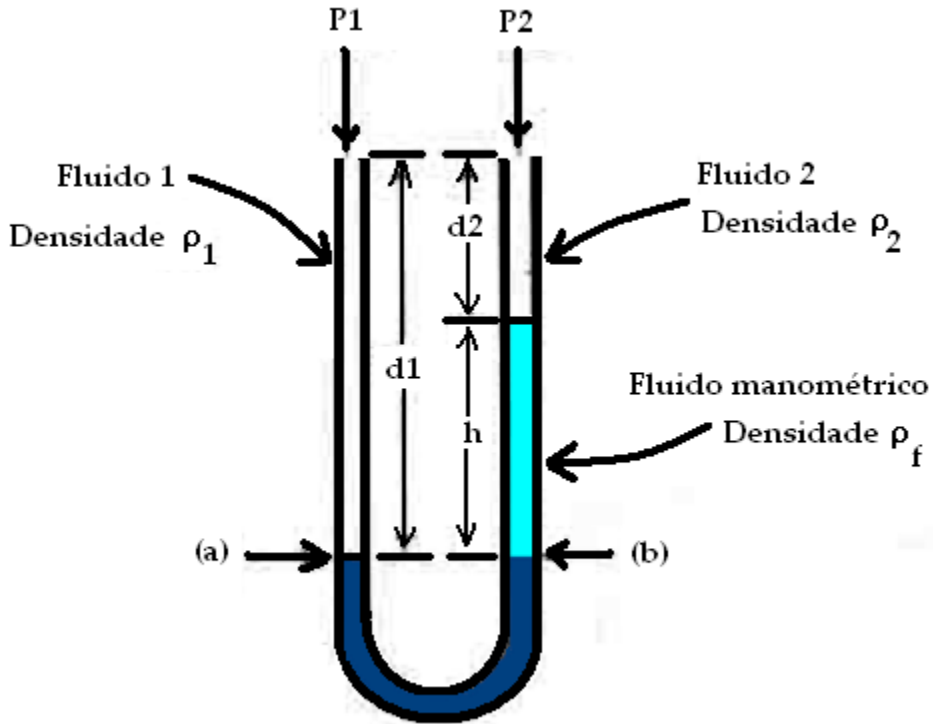


FIGURE 3.4-4 Manometers.

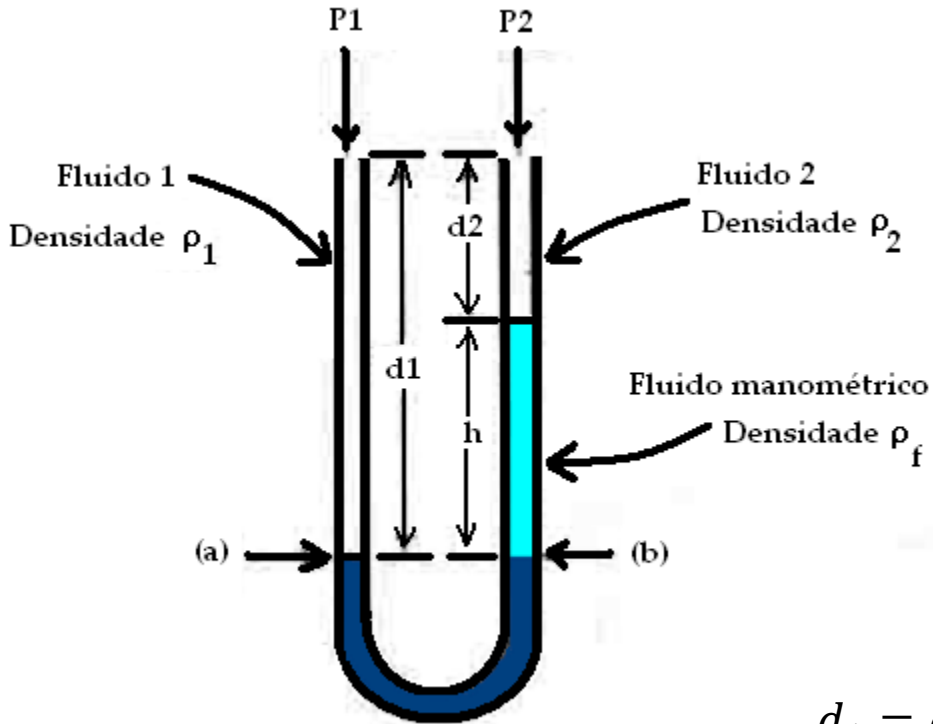
$$P_1 > P_2$$





$$P_{(a)} = P_{(b)}$$

$$P_1 + \rho_1 g d_1 = P_2 + \rho_2 g d_2 + \rho_f g h$$



$$P_{(a)} = P_{(b)}$$

$$P_1 + \rho_1 g d_1 = P_2 + \rho_2 g d_2 + \rho_f g h$$



$$P_1 - P_2 = \rho_2 g d_2 - \rho_1 g d_1 + \rho_f g h$$

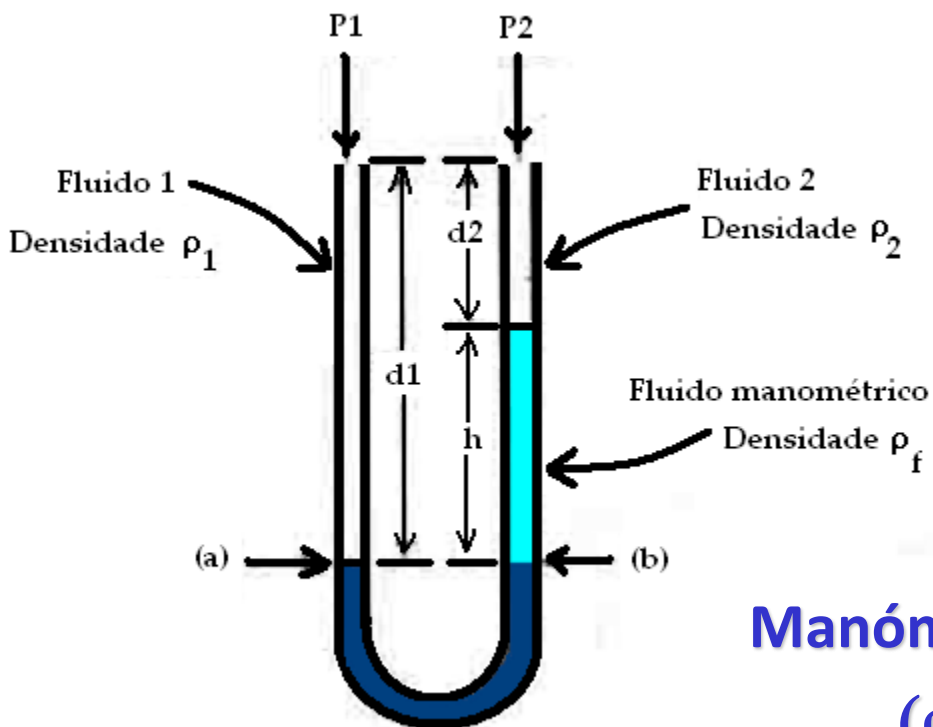


$$d_1 = d_2 + h$$

$$P_1 - P_2 = \rho_2 g d_2 - \rho_1 g d_2 - \rho_1 g h + \rho_f g h$$



$$P_1 - P_2 = g d_2 (\rho_2 - \rho_1) + g h (\rho_f - \rho_1)$$



$$P_1 - P_2 = g d_2 (\rho_2 - \rho_1) + g h (\rho_f - \rho_1)$$

Manómetro diferencial

$$(\rho_1 = \rho_2 = \rho)$$

$$P_1 - P_2 = (\rho_f - \rho) g h$$

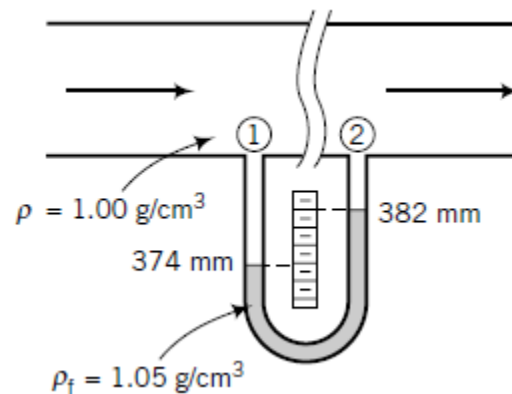
i.e. $\Delta P \leftrightarrow h$

$$P_1 - P_2 = \rho_f g h$$

se $\rho \ll \rho_f$

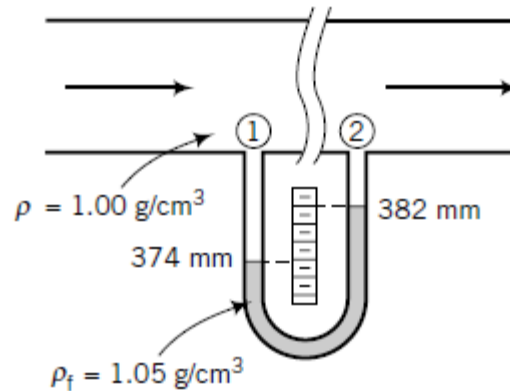
Problema 2.8

Um manómetro diferencial é usado para medir a queda de pressão entre dois pontos numa conduta de água. Calcule a queda de pressão entre os pontos 1 e 2, em dynes/cm².



Problema 2.8

Um manómetro diferencial é usado para medir a queda de pressão entre dois pontos numa conduta de água. Calcule a queda de pressão entre os pontos 1 e 2, em dynes/cm².



$$1 \text{ dyne} = 1 \text{ g.cm.s}^{-2}$$

$$P_1 - P_2 = (\rho_f - \rho)gh$$

$$h = (382 - 374) \text{ mm} = 8 \text{ mm} = 0.8 \text{ cm}$$

$$P_1 - P_2 = (1.05 - 1.00) \text{ g/cm}^3 \times 980.7 \text{ cm/s}^2 \times 0.8 \text{ cm}$$

$$P_1 - P_2 = 40 \text{ dyne/cm}^2$$

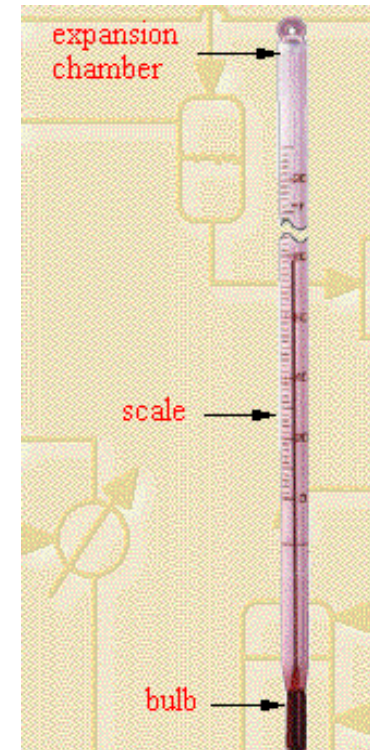
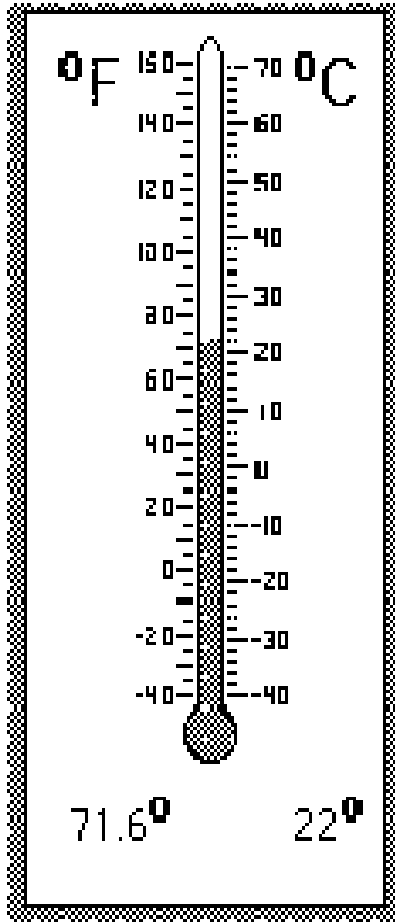
Temperatura

O que é a temperatura?

- Uma medida da energia interna contida por uma substância
- É determinada indirectamente!
- Como? Medindo uma propriedade física cujo valor dependa da temperatura de uma forma conhecida.

1. Termómetro

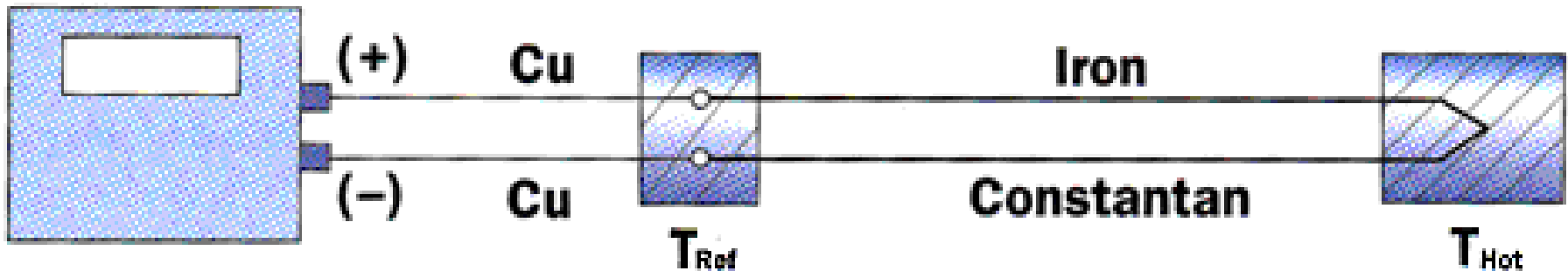
Expansão volumétrica de um líquido com a temperatura
($\rho \searrow$ com $T \nearrow$)



$$\hat{V}(T) = \hat{V}_0 (1 + 0.18182 \times 10^{-3} T + 0.0078 \times 10^{-6} T^2)$$

2. Termopares

Medição da voltagem na junção entre dois metais distintos, quando aquecidos



$$\Delta T (T_{\text{ref}} - T_{\text{hot}}) \Rightarrow \Delta V$$



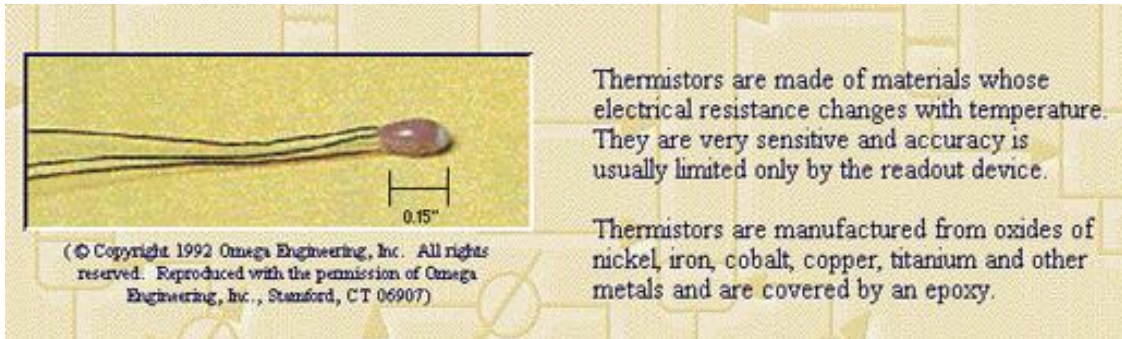
Tipo K (Cromel Ni 90% Cr 10% / Alumel Ni 95% Mn 2% Si 1% Al 2%): -270 °C a 1200 °C

Tipo E (Cromel Ni 90% Cr 10% / Constantan Cu 55% Ni 45%): -270 °C a 1000 °C

Tipo J (Ferro Fe 99,5% / Constantan Cu 55% Ni 45%): -210 °C a 760 °C

3. Termistores

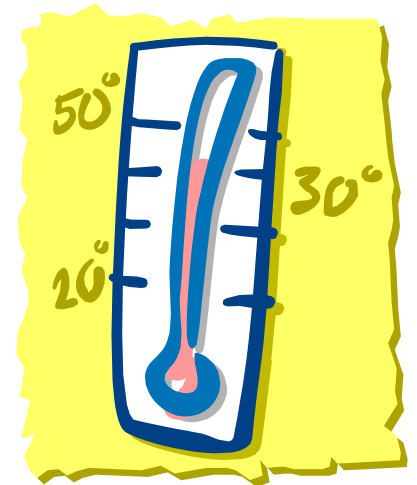
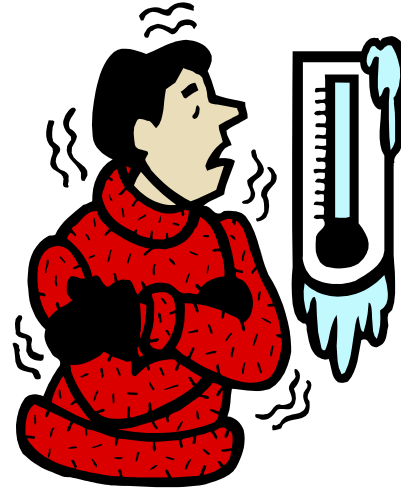
Resistência eléctrica de um condutor
(termómetro de resistência)



$$R_{\text{eléctrica}} = f(T)$$

Escala de temperaturas

- Escala relativa
 - Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$)
 - Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
- Escala absoluta
 - Rankine ($^{\circ}\text{R}$)
 - Kelvin (K)



Escala relativa

⇒ Fahrenheit (°F)

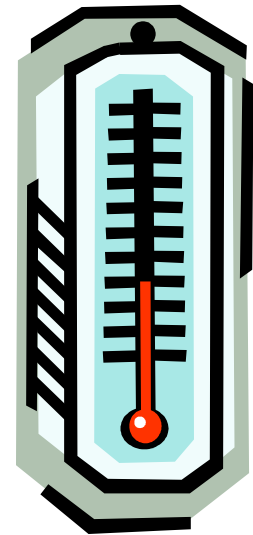
⇒ Celsius (°C)

Escala definida usando $T_{\text{fusão}}$ e $T_{\text{ebulição}}$ da água a 1atm!

- Celsius: $T_f = 0^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{eb}} = 100^{\circ}\text{C}$
- Fahrenheit: $T_f = 32^{\circ}\text{F}$; $T_{\text{eb}} = 212^{\circ}\text{F}$

Zero absoluto de temperatura:

- Celsius: -273.15°C
- Fahrenheit: -459.67°F



Relações matemáticas

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1.8 \times T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

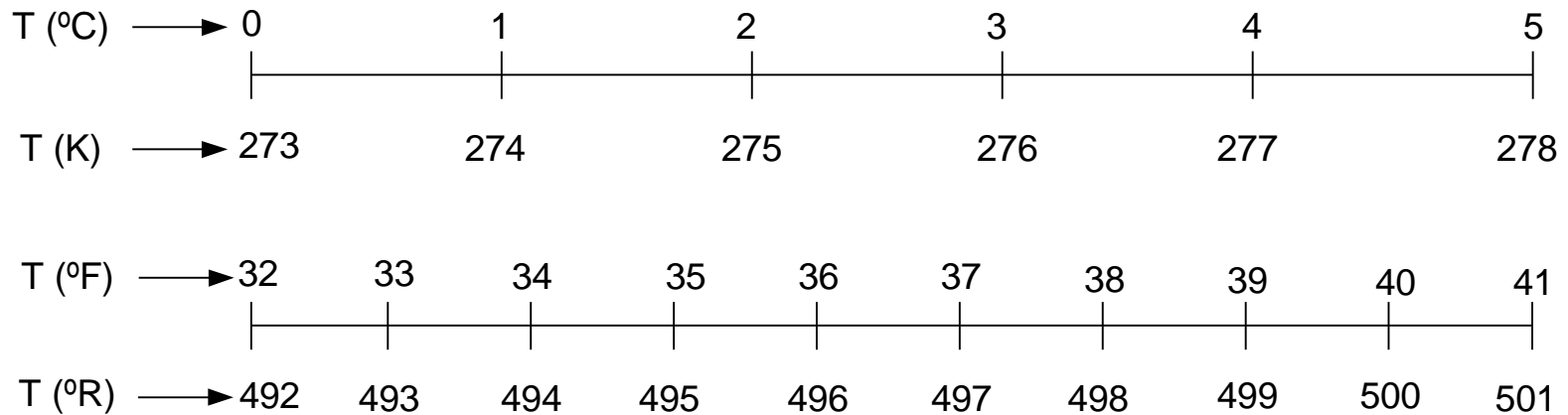
$$T(^{\circ}\text{C}) = [T(^{\circ}\text{F}) - 32] / 1.8$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$



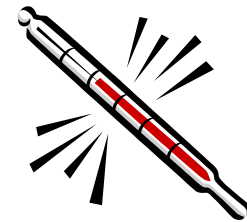
Intervalo de temperaturas:



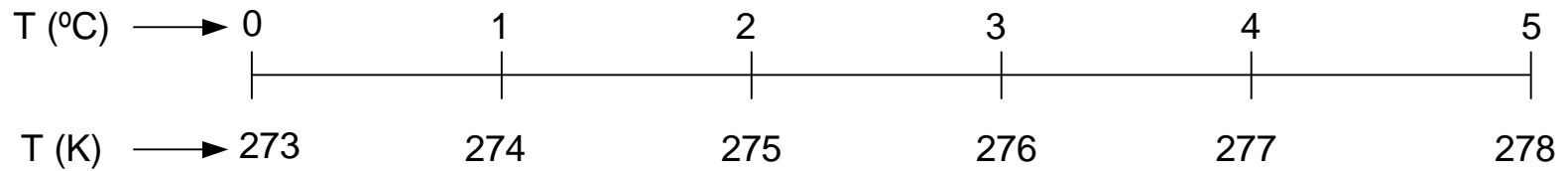
$$T(^{\circ}\text{F}) = 1.8 \times T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

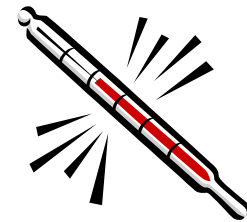


Intervalo de temperaturas:

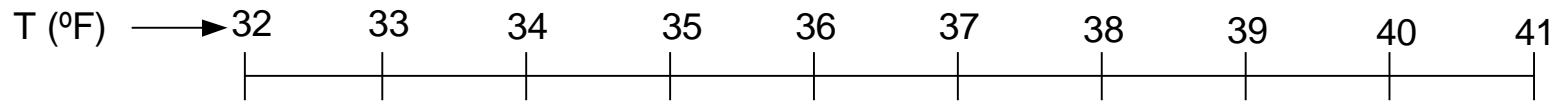
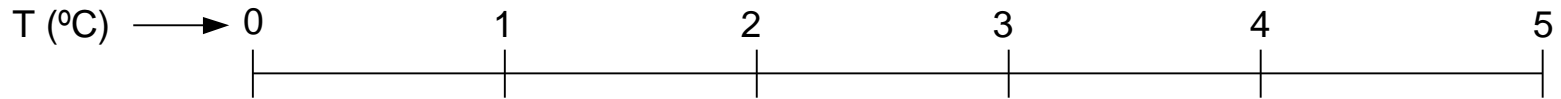


$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15$$

$$\Delta T(^{\circ}C) = \Delta T(K)$$

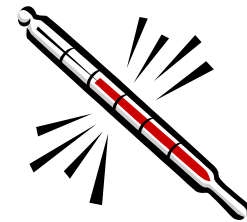


Intervalo de temperaturas:



$$T(^{\circ}\text{F}) = 1.8 \times T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = 1.8 \Delta T(^{\circ}\text{F})$$



Problema 2.9

A capacidade calorífica da amónia, definida pela quantidade de calor necessária para elevar de um grau a temperatura de uma unidade de massa de amónia, a pressão constante, é dada pela seguinte expressão, para uma gama limitada de temperaturas:

$$C_p \left(\frac{Btu}{lbm. ^\circ F} \right) = 0.487 + 2.29 \times 10^{-4} T(^{\circ}F)$$

Determine a expressão para C_p , em $J/(g.^{\circ}C)$, em função de T (em $^{\circ}C$)

$$Cp \left(\frac{Btu}{lbm \cdot ^\circ F} \right) = 0.487 + 2.29 \times 10^{-4} T(^{\circ}F)$$

1. Converter T(°F) em T(°C)

$$T(^{\circ}F) = 1.8 \times T(^{\circ}C) + 32$$

$$Cp \left(\frac{Btu}{lbm \cdot ^\circ F} \right) = 0.487 + 2.29 \times 10^{-4} [1.8 T(^{\circ}C) + 32]$$

$$\Delta T(^{\circ}C) = 1.8 \Delta T(^{\circ}F)$$

$$Cp \left(\frac{Btu}{lbm \cdot ^\circ F} \right) = 0.494 + 4.12 \times 10^{-4} T(^{\circ}C)$$

$$1 \text{ lbm} = 453.5 \text{ g}$$

$$1 \text{ Btu} = 1.055 \times 10^3 \text{ J}$$

2. Converter Btu/lbm.°F em J/g.°C

$$Cp \left(\frac{Btu}{lbm \cdot ^\circ F} \right) = [0.494 + 4.12 \times 10^{-4} T(^{\circ}C)] \times \frac{1.055 \times 10^3 \text{ J}}{1 \text{ Btu}} \frac{1 \text{ lbm}}{453.5 \text{ g}} \times \frac{1.8^{\circ}F}{1^{\circ}C}$$

quantidade de calor
necessária para
**eleva de um grau a
temperatura** de uma
unidade de massa.
É um ΔT .

$$Cp \left(\frac{J}{g \cdot ^\circ C} \right) = 2.07 + 1.72 \times 10^{-3} T(^{\circ}C)$$

Se fosse $\frac{Btu}{lbm \cdot K}$ era igual a $\frac{Btu}{lbm \cdot ^\circ C}$

$$\Delta T(^{\circ}C) = \Delta T(K)$$