

## Aula 1.0 - Termodinâmica

Mecânica:

Conceitos fundamentais: Posição, tempo

Observamos: Movimento

Definimos: velocidade, aceleração

Deduzimos: massa, momento, Força, energia,  
potência

⇒ Processos reversíveis!

---

Conceitos fundamentais - Temperatura, Calor

⇒ Termodinâmica

Consequência: descrição macroscópica de processos  
microscópicos

descrição de processos irreversíveis

Exemplos?

Teoria cinética dos gases:

- Leis empíricas, grandezas extensivas  
Pressão, Temperatura, Volume
- Hipótese atômica  $\rightarrow$  partículas seguindo a mecânica
- $N$  partículas, 3 graus de liberdade cada  
 $3N$  variáveis
- Cálculo impossível  $\rightarrow$  avaliação de médias

Mecânica Estatística

- Demonstração da equação geral dos gases ideais

---

Consequências:

1<sup>ª</sup> lei da termodinâmica: Conservação de Energia estendida, incluindo o calor

2<sup>ª</sup> lei da termodinâmica:

Definição de Entropia.

Aparecimento de um sentido no tempo  
Reversibilidade e informação

Começamos pela Lei Zero  $\rightarrow$  Equilíbrio

---

# Lei Zero da Termodinâmica

Modelo: matéria + recipiente

Mais simples  $\rightarrow$  fluido (exemplo)



$\rightarrow$  paredes isolantes

ou adiabáticas

não conduzem calor



$\rightarrow$  parede diatérmica

transparente ao calor

Conceitos teóricos  $\rightarrow$  na prática não existem  
isolantes ou condutores perfeitos, mas  
boas aproximações

Exemplos:

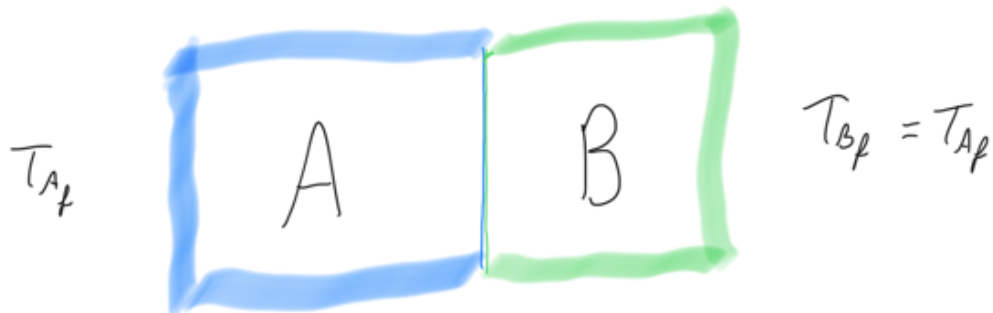
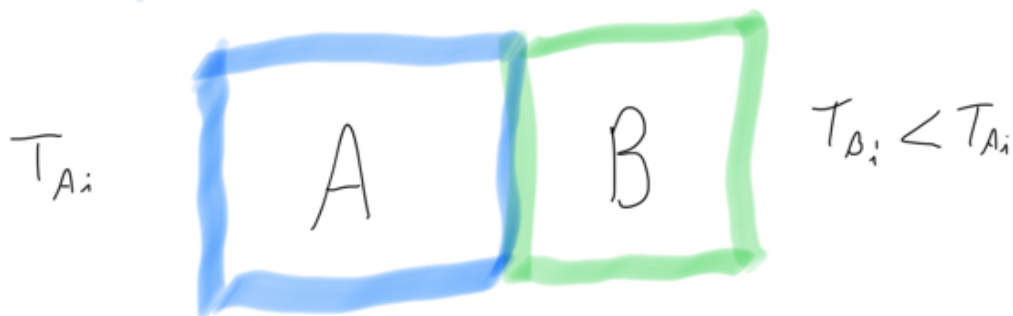
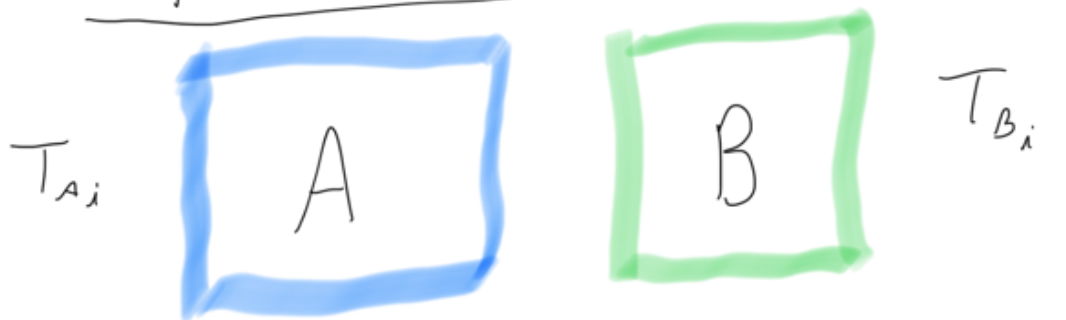
---

Termodinâmica tradicional  $\rightarrow$  sistemas em equilíbrio

$\rightarrow$  Área de pesquisa ativa: sistemas fora do equilíbrio

Podemos entender a termodinâmica a eles?

### Temperatura e lei zero

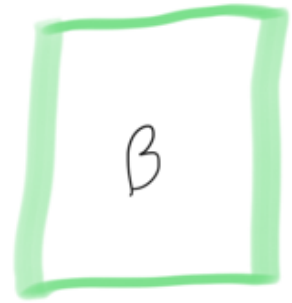


$$T_{A_i} > T_{A_f} = T_{B_f} > T_{B_i}$$

Sistemas A e B em equilíbrio térmico

---

Se A está em  
equilíbrio térmico  
com C,  
e B em .eq.term.  
com C



$\Rightarrow T_A = T_B$ , i.e.  
estão em equilíbrio  
térmico

$\Rightarrow$  Indicador de equilíbrio térmico  
Temperatura  $\nabla$

---

## Aula 1.2 - Temperatura

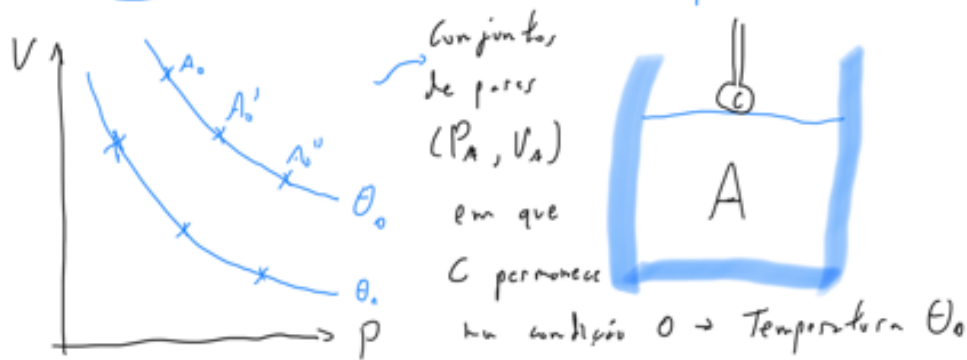
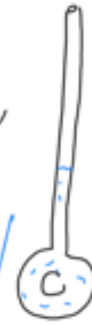
# Temperatura e termômetros

Construir uma escala para a grandeza:

Um sistema de referência C

Recipiente com fluido, volume  $V_C$ ,  
pressão  $P_C$

$\Rightarrow$  isto basta para caracterizar  
termodinamicamente o fluido



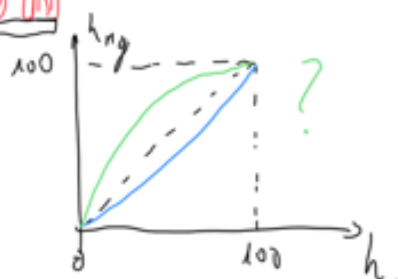
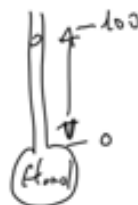
Distintos isoterms:  $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n, \dots$

$\Rightarrow$  Definem uma função  $f(P_A, V_A) = 0$

Equação de estado do sistema A

Podemos calibrar nosso medidor com sistemas em equilíbrio:

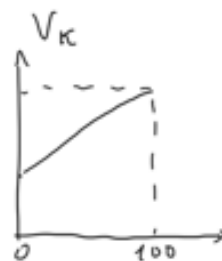
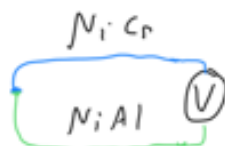
Ex:   $\equiv 0$  ;   $\equiv 100$



(diferença da ordem de 91 div)

Práticos no uso

Termopar:



Apenas um entre vários tipos?

Qualquer parâmetro dependente da temperatura serve?

Por que não outros escalas?

Celsius (1742):  $0^{\circ}\text{C} \rightarrow 100^{\circ}\text{C}$

Réaumur (1730):  $0^{\circ}\text{Ré}$  (gelo em fusão)  
 $80^{\circ}\text{Ré}$  (ebulição)

Fahrenheit (1724):  $32^{\circ}\text{F} \rightarrow$  fusão ;  $212^{\circ}\text{F}$  (ebulição)  
 $100^{\circ}\text{F} \rightarrow 38^{\circ}\text{C}$  ( $1^{\circ}\text{C} = 1.8^{\circ}\text{F}$ )

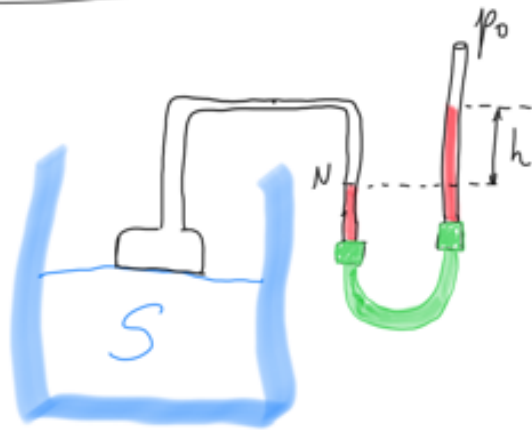
Rankine (1859)  
 $451^{\circ}\text{F} \rightarrow 233^{\circ}\text{C}$   
 $\hookrightarrow \text{F} - 459.67$  (o cômulo da teimosia)

Podemos construir uma referência absoluta?

# Termômetro a gás em volume constante

Pressão:  $P = p_0 + \rho g h$

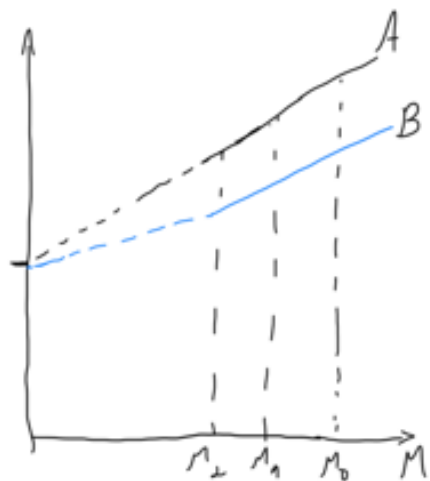
$V \rightarrow$  Fixo (marca  $N$  ajustada pelo tubo flexível)



A medida de  $P_v$  (ebulição, ou ponto de vapor) e  $P_g$  (fusão, ou ponto do gelo) é obtida para massas distintas de gás

Cada gás usado dá uma resposta, mas todos extrapolam para o mesmo ponto  
No limite  $M \rightarrow 0$ , podemos definir

$$\lim_{M \rightarrow 0} \left( \frac{P_v}{P_g} \right) \equiv \frac{T_v}{T_g} \approx 1,3661$$



Adotando  $T_v - T_g = 100 [u]$

$$\Rightarrow T_v - T_g = (1,3661 - 1) \cdot T_g = 0,3661 \cdot T_g = 100$$

$$\Rightarrow T_g \approx 273,15 [u]$$

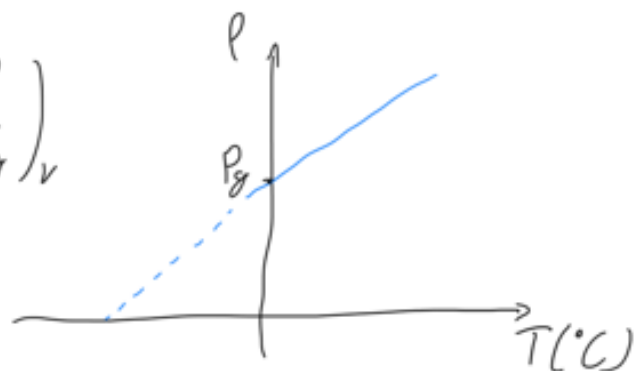
Unidade  $[u] \rightarrow$  Kelvin  $K$

não grau Kelvin  $^\circ$

$\cancel{^\circ} K$



$$\frac{T}{T_g} = \lim_{P \rightarrow 0} \left( \frac{P}{P_g} \right)_v$$



Não há pressão negativa!

→  $T = 0 \text{ K}$  é a temperatura mínima →

Por quê? Origem microscópica da temperatura

Para efeito de padronização ( $T_v, T_g$  dependem de  $P$ ).

Ponto triplo da água:  $(P_{tr}) = 4,58 \text{ mmHg}$ ,  $\theta_{tr} = 0,01^\circ \text{C}$

Coexistência de gás, gelo e líquido

$$T_r \equiv 273,16 \text{ K}$$

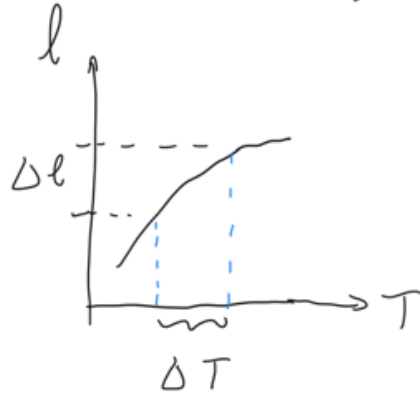
$$T = 273,16 \text{ K} \cdot \lim_{P \rightarrow 0} \left( \frac{P}{P_{tr}} \right)$$

## Aula 1.3 - Dilatação térmica

### Efeitos da Variação Térmica

---

Dilatação:  $l(T)$



$$l(T) = l_0 + \frac{\partial l}{\partial T} \cdot \Delta T + O(\Delta T^2)$$

$$\Delta l \approx \Delta T \cdot \frac{\partial l}{\partial T}$$

$$\Rightarrow \Delta l \propto \Delta T \text{ (em 1ª ordem)}$$

Como  $\Delta l$  é maior quanto maior for  $l_0$

$$\Delta l \propto l_0$$

$$\therefore \Delta l \propto l_0 \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$$

$\alpha \rightarrow$  Coeficiente de dilatação linear

$$\alpha = \frac{(\Delta l / l_0)}{\Delta T} \rightarrow \frac{\text{variação percentual de comprimento}}{\text{variação de temperatura}}$$

$\alpha = \alpha(T)$ , mas é razoavelmente constante longe do ponto de fusão

$$\alpha \sim 10^{-5} \cdot \text{C}^{-1}$$

$$\text{aço} \rightarrow 1,1 \times 10^{-5} \cdot \text{C}^{-1}$$

$$\text{Al} \rightarrow 2,3$$

$$\text{Cu} \rightarrow 1,7$$

$$\text{vidro} \rightarrow 4 \sim 9$$

$$\text{Invar (36\%Ni, 64\%Fe)} \quad 0,15$$

Quartzo

$$\text{Fundido} \quad 0,06$$

$$\text{Zerodur} \quad 0,001 \text{ (cerâmica)}$$

Dilatação superficial

$$\Delta A = A(T) - A(T_0)$$

Para um elemento de superfície de aresta  $l$

$$\Delta A = l^2(T) - l_0^2 = [l_0 + \alpha l_0 \Delta T + O(\Delta T^2)]^2 - l_0^2$$

$$= l_0^2 + 2\alpha l_0^2 \Delta T + \alpha^2 l_0^2 \Delta T^2 - l_0^2 + O(\Delta T^2)$$

$$= l_0^2 2\alpha \Delta T (1 + \frac{\alpha}{2} \Delta T) + O(\Delta T^2)$$

Tomando somente a parte linear

$$\Delta A = A_0 \cdot 2\alpha \cdot \Delta T$$

## Dilatação volumétrica

$$\begin{aligned}\Delta V &= V(T) - V_0 = (l_0 + \alpha l_0 \Delta T)^3 - l_0^3 \\ &= l_0^3 + 3\alpha l_0^3 \Delta T + 3\alpha^2 l_0^3 \Delta T^2 + \alpha^3 l_0^3 \Delta T^3 - l_0^3\end{aligned}$$

$$\Delta V = V_0 \cdot 3\alpha \cdot \Delta T = V_0 \underset{\substack{\downarrow \\ \text{líquidos}}}{\beta} \Delta T$$

