

# Termodinâmica Olímpica

**João C. Carvalho**

Departamento de Física

**2026**



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Albert Einstein (1949):

Uma teoria tem tanto mais impacto quanto maior for a **simplicidade** das suas premissas, quanto mais diversas forem as coisas relacionadas e quanto maior for a sua área de **aplicabilidade**. Daí a impressão profunda que a **Termodinâmica clássica** me causou. É a única teoria física de conteúdo universal a respeito da qual estou convencido que, no quadro da aplicabilidade dos seus conceitos básicos, nunca será ultrapassada. Somente por estas razões é uma **parte muito importante da formação de um físico**.



# Leis da termodinâmica

**Lei Zero:** Dois corpos em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si e, por definição de temperatura, os três corpos estão à mesma temperatura

**Primeira Lei:** Existe uma propriedade dos sistemas, chamada energia interna, que se conserva em sistemas isolados

**Segunda Lei:** Existe uma propriedade dos sistemas, chamada entropia, que não pode diminuir em sistemas isolados termicamente

**Terceira Lei:** No zero absoluto a entropia é nula

## Questão

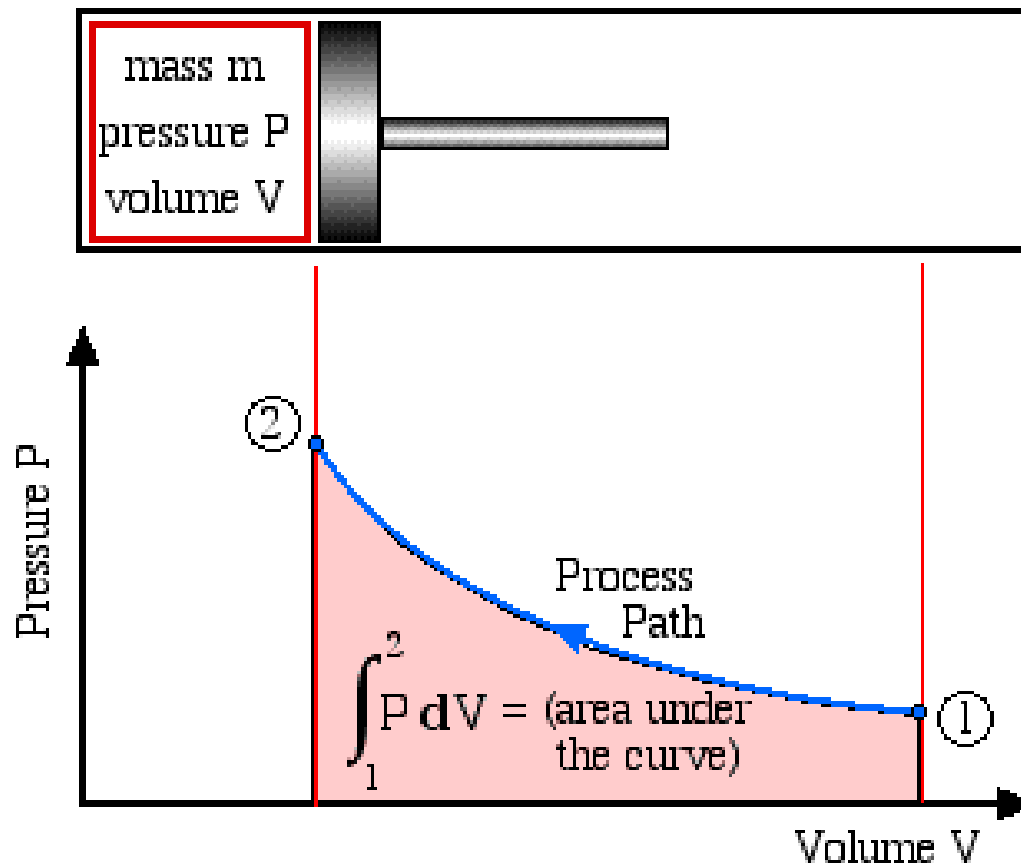
**Termodinâmica** é o estudo de quê?

- a) Transferência de energia
- b) Criação de energia
- c) Aquecimento global
- d) Velocidade das reações químicas
- e) Efeito do calor na velocidade de uma reação
- f) Propriedades da roupa quentinha de inverno

# Sistema hidrostático

Sistema simples, pedagógico (mas aplicável a muitos outros sistemas apenas aparentemente muito diferentes), geralmente aplicado a gases

Variáveis termodinâmicas: **Pressão**, **Volume** e **Temperatura**



# Ponto de vista microscópico

A energia cinética média das moléculas é proporcional à **temperatura**

$$\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} k_B T$$

Na teoria cinética as moléculas comportam-se como partículas que **não interagem** (esferas rígidas)

A **velocidade quadrática média** das moléculas do gás (M=massa molar)

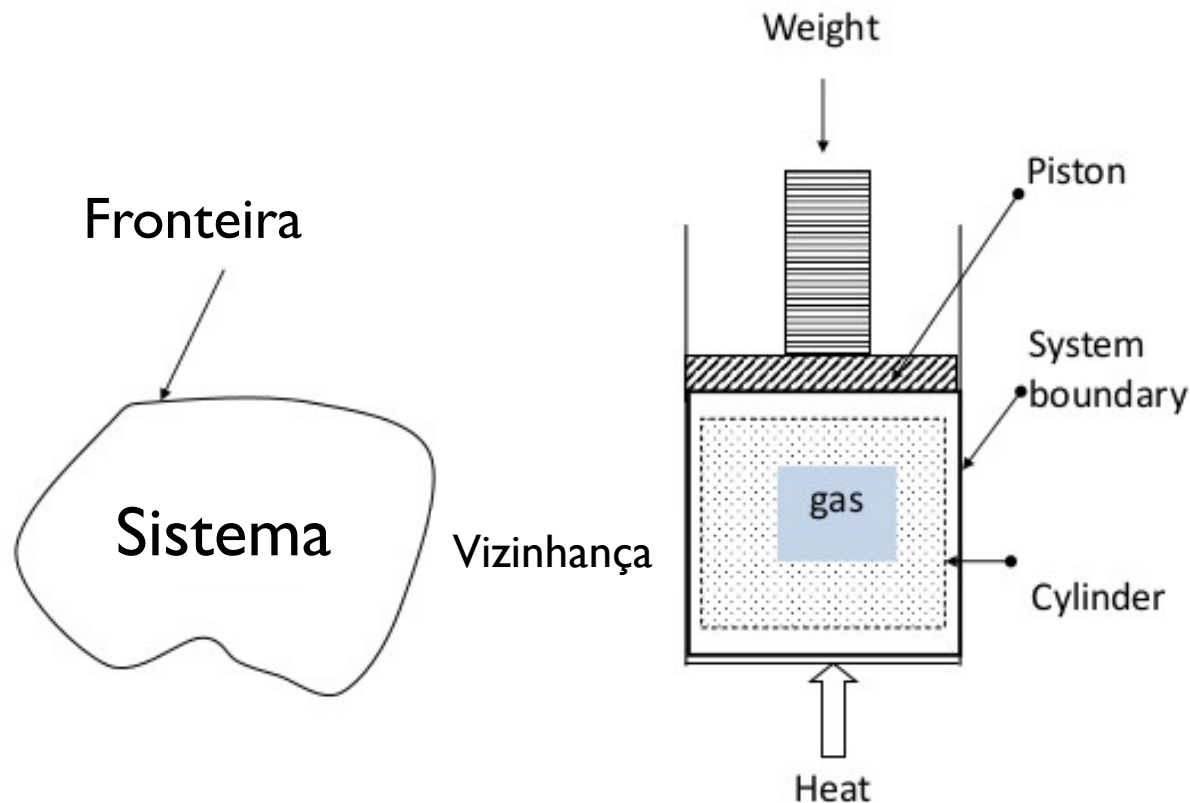
$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad R = N_A k_B$$

**Pressão**: efeito dos **choques** das moléculas com as paredes do recipiente e entre si

**Sistema aberto:** com troca de massa e de energia com a vizinhança

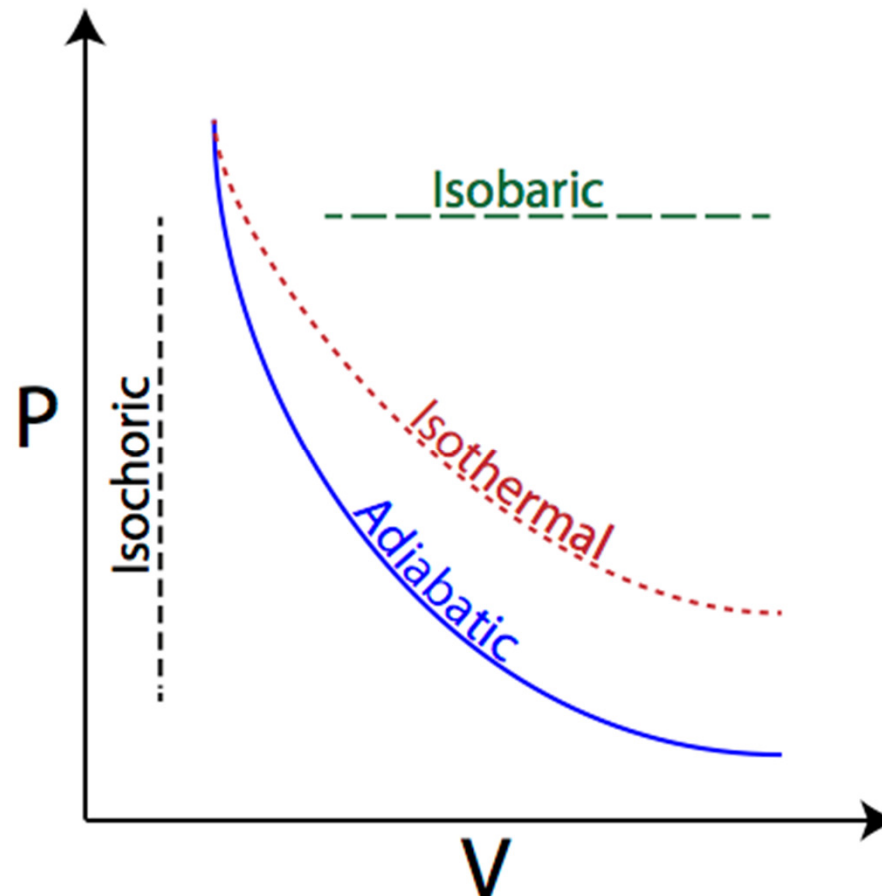
**Sistema fechado:** sem troca de massa mas que pode trocar energia com a vizinhança

**Sistema isolado:** não troca nem massa nem energia com a vizinhança



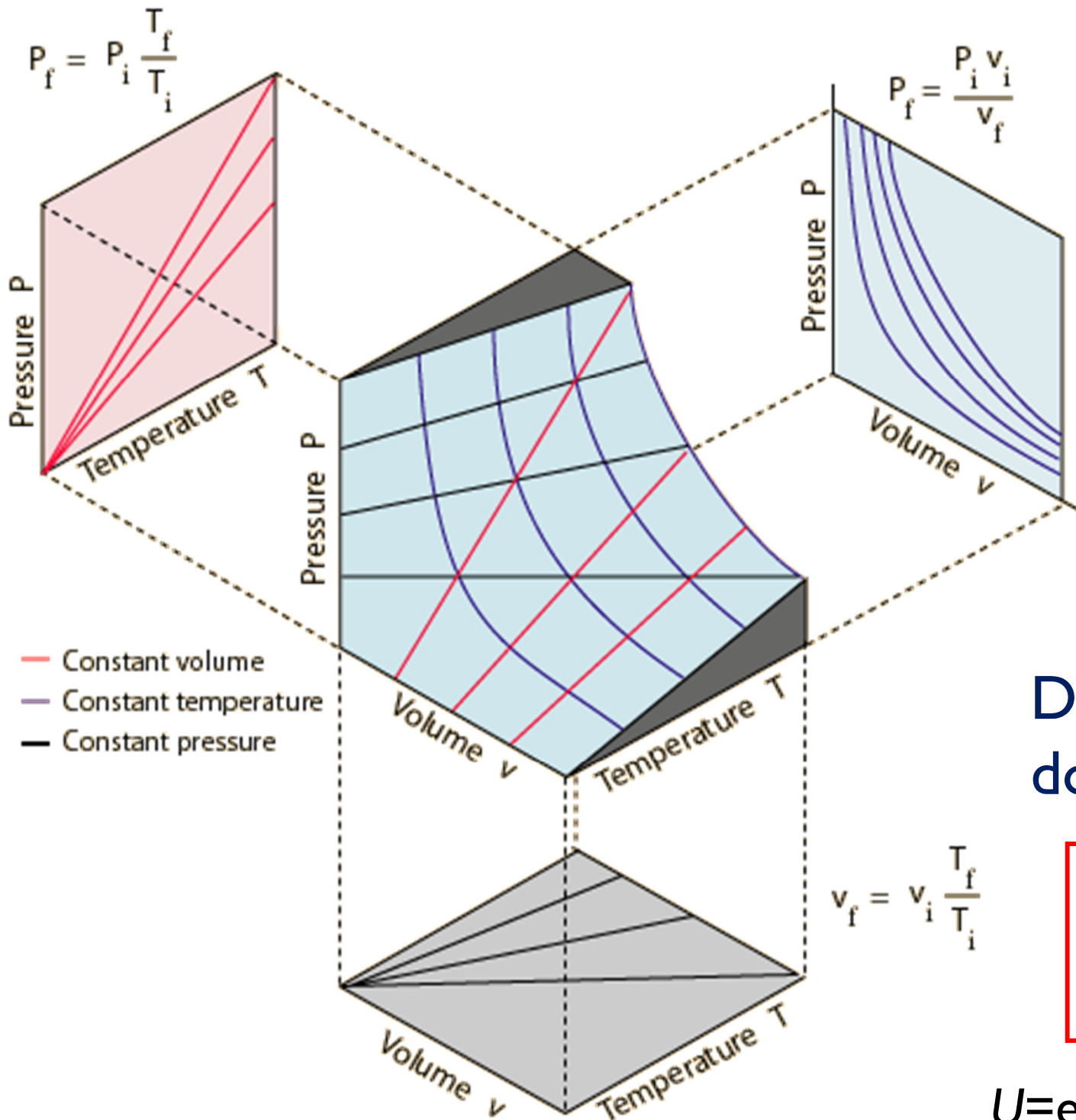
## Equilíbrio termodinâmico: mecânico, térmico e químico

Processo **isotérmico** (a temperatura constante), **isobárico** (a pressão constante), **isocórico** (a volume constante) e **adiabático** (sem troca de calor)



## **Equação de Estado**

Relaciona as variáveis termodinâmicas (podem ser muitas, dependendo das diferentes fases e intervalos de valores)



## Diagrama PVT do gás ideal

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

$U$ =energia interna

# Escalas Termométricas

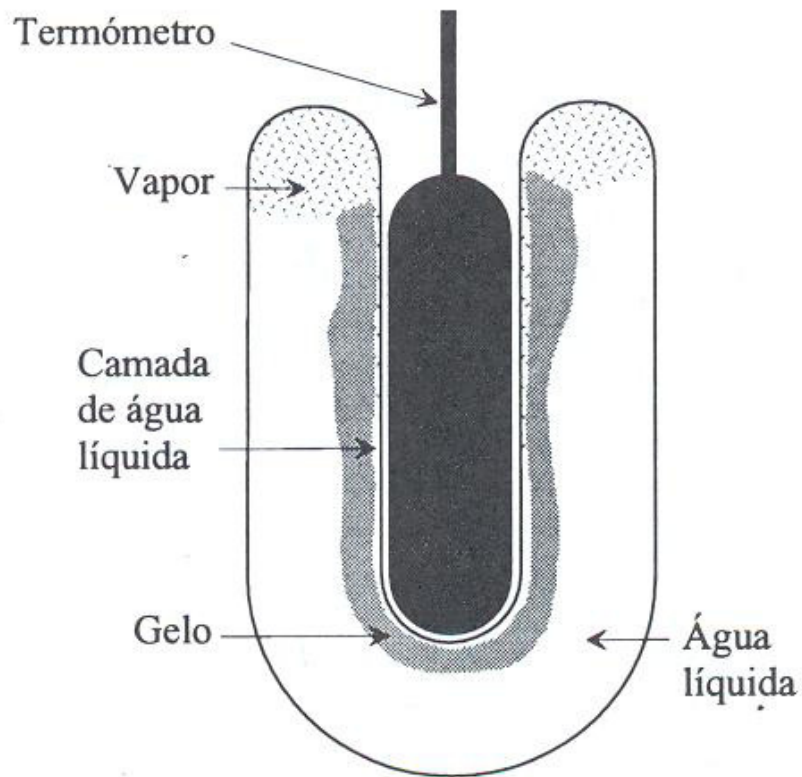
Escala absoluta: **Kelvin**

**Zero absoluto:** cessa toda a atividade térmica molecular

$$\text{Graus Celsius} = \text{Kelvin} - 273,15$$

Termômetros calibrados com recurso a **pontos fixos** (até 1954 eram os pontos de gelo e de vapor da água, depois disso é usado o ponto triplo da água)

Muitas tecnologias são usadas em **termometria** (volume, pressão, resistência elétrica, diferença de potencial,...)



Vaso para obter o  
**ponto triplo** da água  
 $T_3 = 273,16 \text{ K}$ ,  
 $P_3 = 6,12 \text{ mbar} = 612 \text{ Pa}$



Unidades:  
1 atm = 101325 Pa

## Questão

**Temperatura** é uma medida da...

- a) energia total numa substância
- b) energia cinética total numa substância
- c) energia potencial média numa substância
- d) energia cinética média das moléculas duma substância
- e) energia calorífica duma substância
- f) uma sensação psicológica

## Questão

Qual é a fórmula correta para a conversão de Celsius em Kelvin?

a)  $K = C - 273$

b)  $K = C + 273$

c)  $K = C - 100$

d)  $K = C + 100$

e)  $K = 2C/5 + 32$

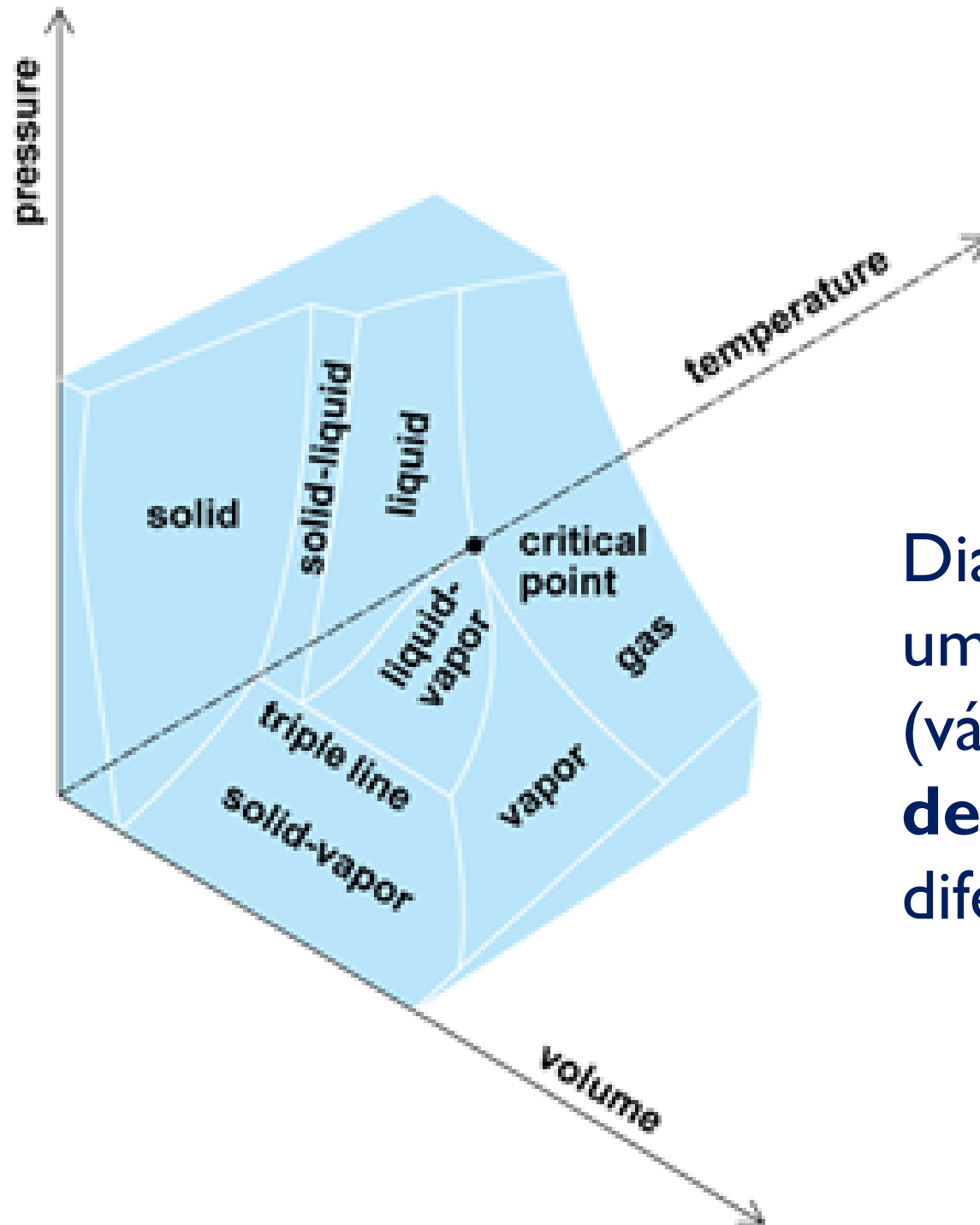
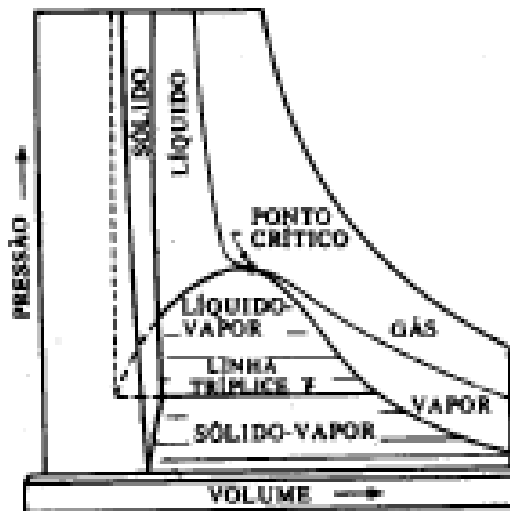
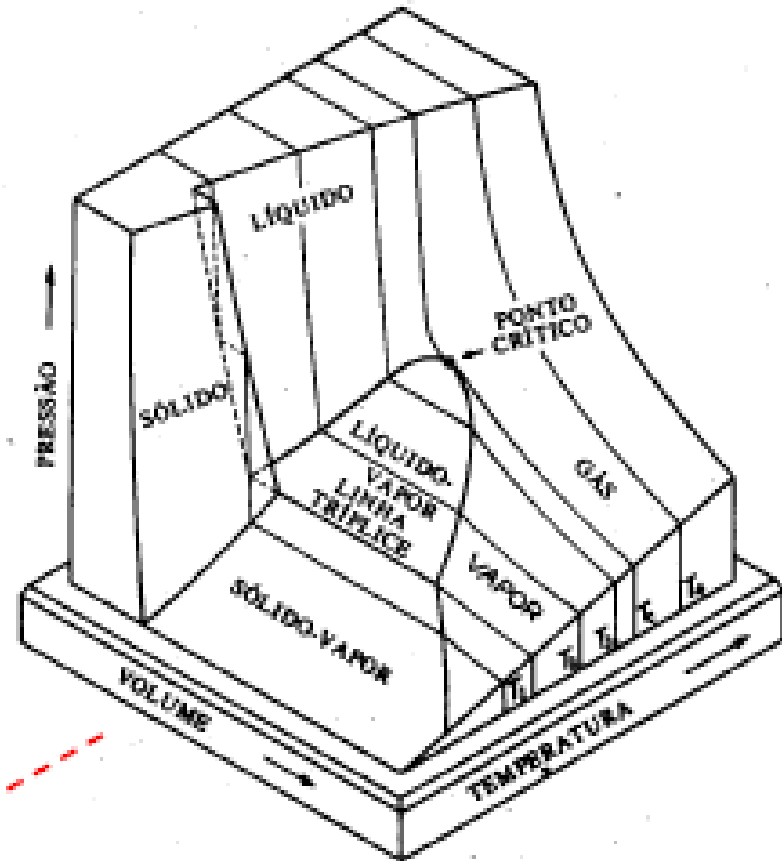
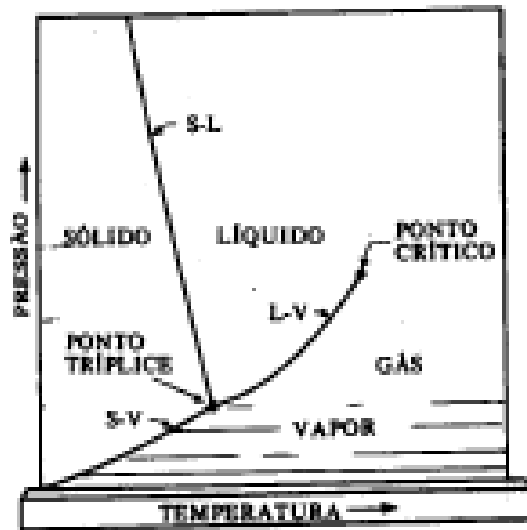
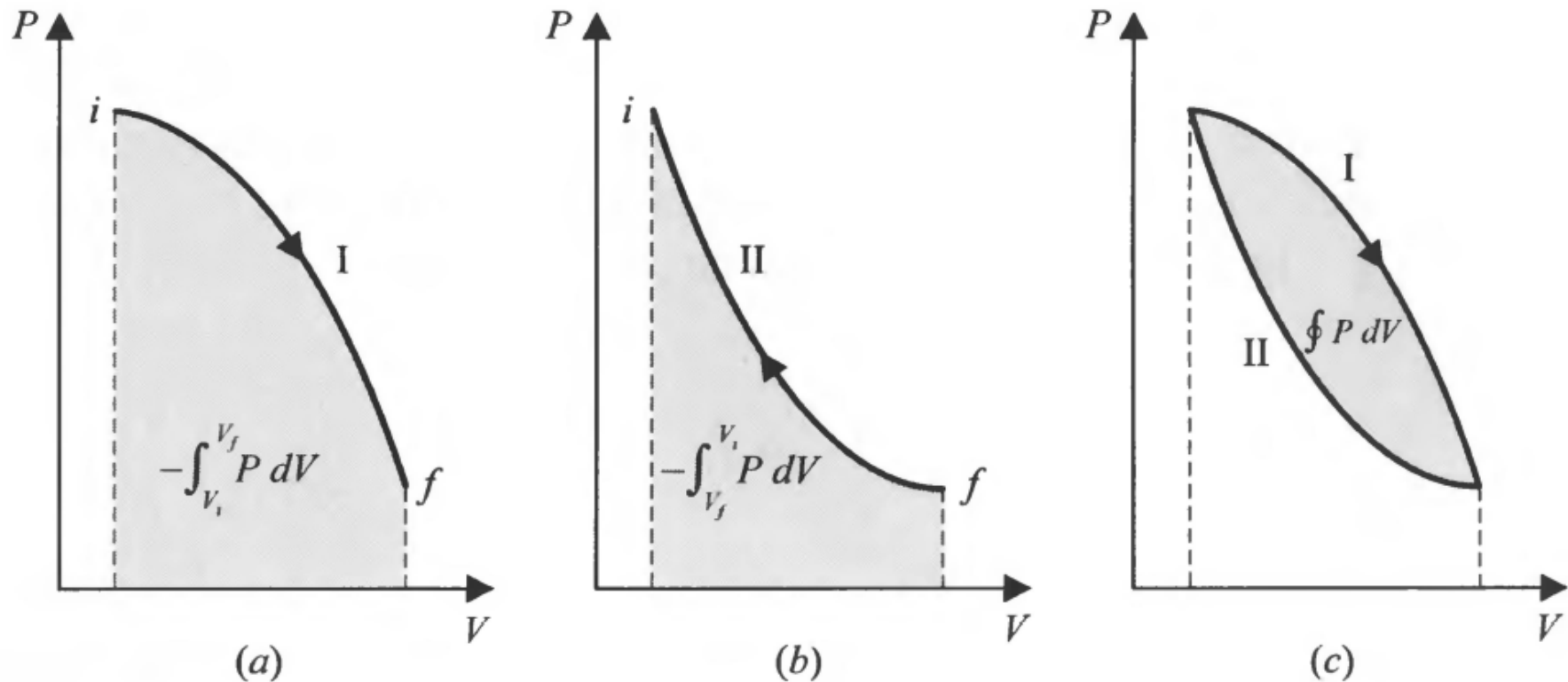


Diagrama PVT de uma substância (várias **equações de estado** para diferentes regiões)

# H<sub>2</sub>O



# Trabalho Termodinâmico



$$W = -\int P dV$$

Integral = **área** abaixo da curva num diagrama PV

Porquê o sinal menos?

# Cálculo do Trabalho

Processo **isocórico** (volume constante)

$$W = -\int P dV = 0$$

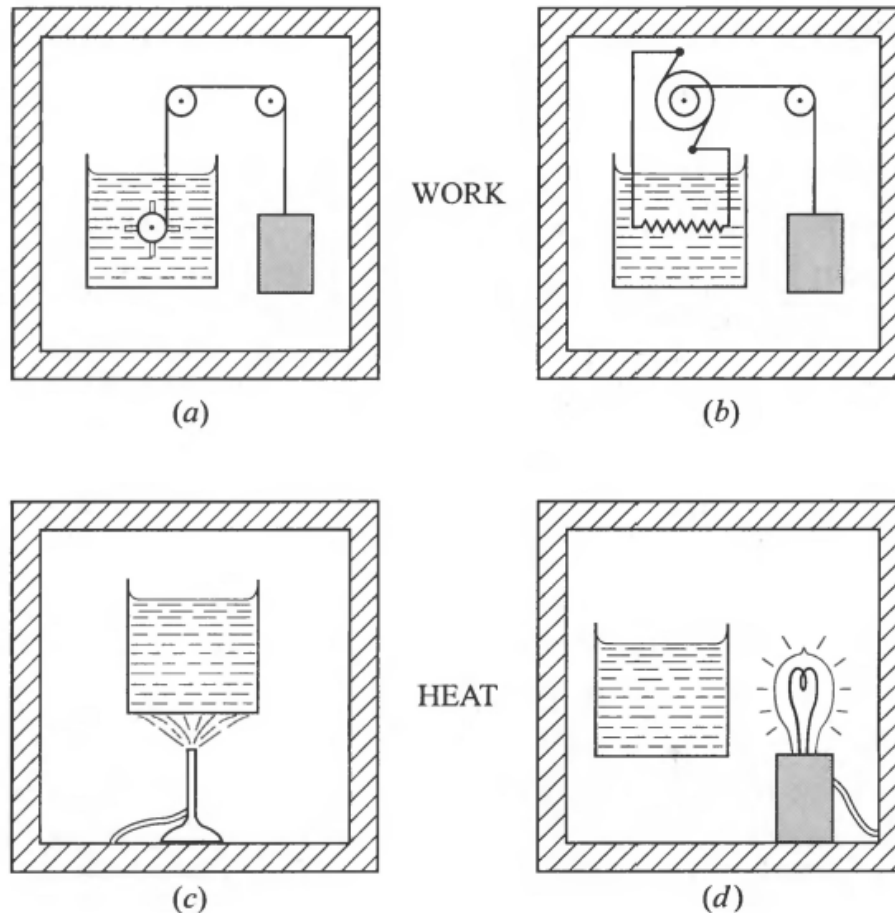
Processo **isobárico** (pressão constante)

$$W = -\int P dV = -P\Delta V$$

Processo **isotérmico** num **gás ideal** (temperatura constante)

$$W = -\int P dV = -\int \frac{nRT}{V} dV = -nRT \int \frac{1}{V} dV = -nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$$

# Distinção entre trabalho e calor



Parede **diatérmica**  
ou **adiabática**

**Trabalho:** energia produzida pela queda de um corpo (**meios mecânicos**)

**Calor:** energia trocada devido a uma **diferença de temperatura**

## Questão

A transferência de **energia térmica** entre objetos a diferentes temperaturas é chamada...

- a) temperatura
- b) calor
- c) energia interna
- d) trabalho
- e) entalpia
- f) condução
- g) convecção
- h) radiação
- i) nenhum destes

## Questão

O **calor** é medido em

- a) joules
- b) gramas
- c) pascal
- d) graus celsius
- e) watts
- f) moles
- g) metros cúbicos

# Primeira Lei da Termodinâmica

## Conservação da energia

$$dU = \delta Q + \delta W$$

$$\Delta U = Q + W$$

Há funções de **estado** (energia interna, entropia, entalpia,...) e funções de **processo** (calor, trabalho)

# Capacidade Calorífica

Mede a “**inércia térmica**” de um corpo, qual a quantidade de calor a fornecer para uma dada variação de temperatura

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\delta Q}{dT} \quad (\text{depende do processo})$$

$$C_P = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_P \quad c_P = \frac{1}{n} \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_P \quad \text{Pressão constante}$$

$$C_V = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_V \quad c_V = \frac{1}{n} \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_V \quad \text{Volume constante}$$

**Calor específico** é a capacidade térmica por unidade de **massa** (água:  $c=4,18 \text{ kJ/kg.K}$ )

Coeficiente adiabático:  $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{c_P}{c_V}$

**Processo adiabático** (sem troca de calor) para um **gás ideal** (perfeito):

$$PV^\gamma = \text{constante}$$

Para um **gás ideal**  $U=U(T)$  e para um processo **isocórico**, da Primeira Lei:

$$dU = \delta Q + \delta W = \delta Q - PdV = \delta Q$$

$$\Rightarrow C_V = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_V = \left( \frac{dU}{dT} \right)_V = \frac{dU}{dT}$$

# Relação entre as Capacidades Caloríficas

**Primeira Lei :**

$$dU = \delta Q + \delta W \Leftrightarrow \frac{dU}{dT} = \frac{\delta Q}{dT} - P \frac{dV}{dT}$$

Para um **gás ideal**, num processo **isobárico**:

$$\frac{dU}{dT} = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_P - P \left( \frac{dV}{dT} \right)_P \Leftrightarrow C_V = C_P - P \frac{nR}{P} \Leftrightarrow \boxed{C_P = C_V + nR}$$

## Questão

Uma substância com um **calor específico** elevado

- a) Está sempre extremamente quente
- b) Requer muita energia para aquecer
- c) Não é pesado
- d) Não requer muita energia para aquecer
- e) Tem de ser um sólido
- f) Arrefece rapidamente

## Questão

A quantidade de **calor** necessária para elevar a temperatura de 1 g de uma substância de 1 °C é chamada o quê?

- a) Calor latente
- b) Calor específico
- c) Calor de formação
- d) Calor de fusão
- e) Calor especial
- f) Calor grâmico

## Questão

Considere 20 g de água (o calor específico da água é de 4,18 J/g.K). Se a sua temperatura varia de 25°C para 20°C, que quantidade de **energia térmica** (Q) é trocada pela água com o ambiente?

- a) 418 J
- b) 209 J
- c) 83 J
- d) 4,18 J
- e) 20,9 J
- f) 0 J

## Questão

O calor específico da água é  $4,18 \text{ J/gK}$  e o calor específico da madeira é  $1,76 \text{ J/gK}$ . Que material precisa de mais **energia térmica** para aumentar a sua temperatura?

- a) Água
- b) Madeira
- c) São ambos iguais
- d) Não se pode saber
- e) Só fazendo uma experiência

## Problema I

Um gás ideal diatômico ( $C_v = (5/2)nR$ ) sofre uma expansão adiabática, em que o seu volume aumenta de 2 para 4 litros, até atingir a pressão e a temperatura ambiente (1 atm, 20°C). Determine:

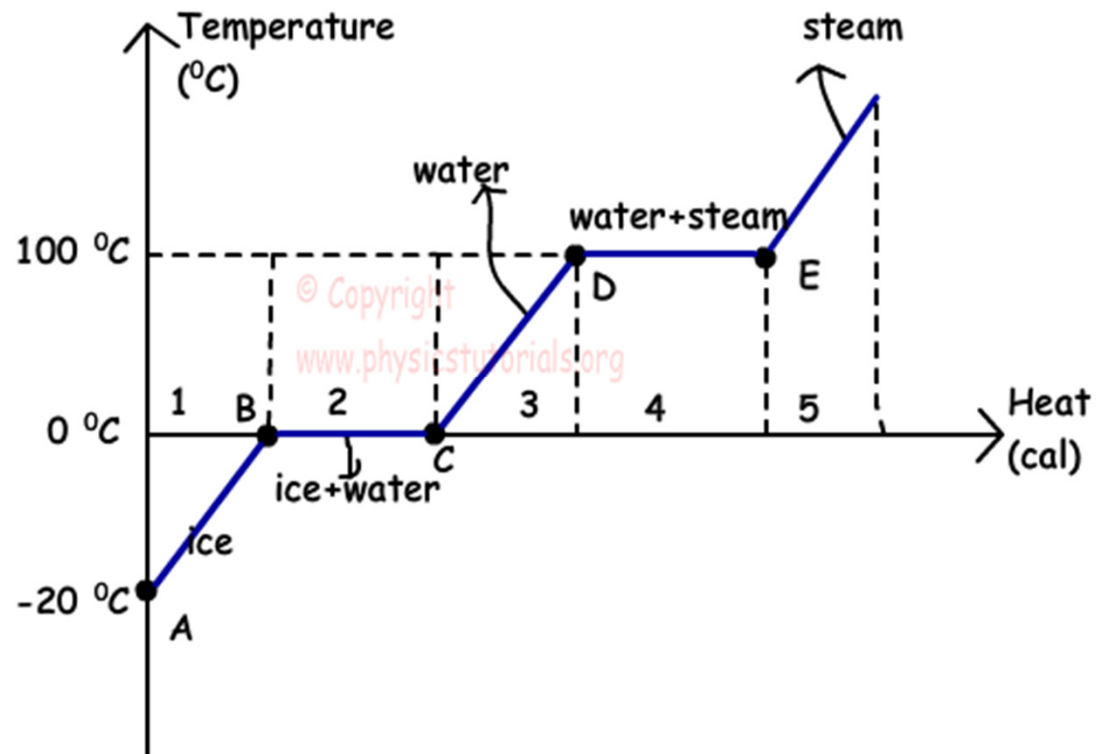
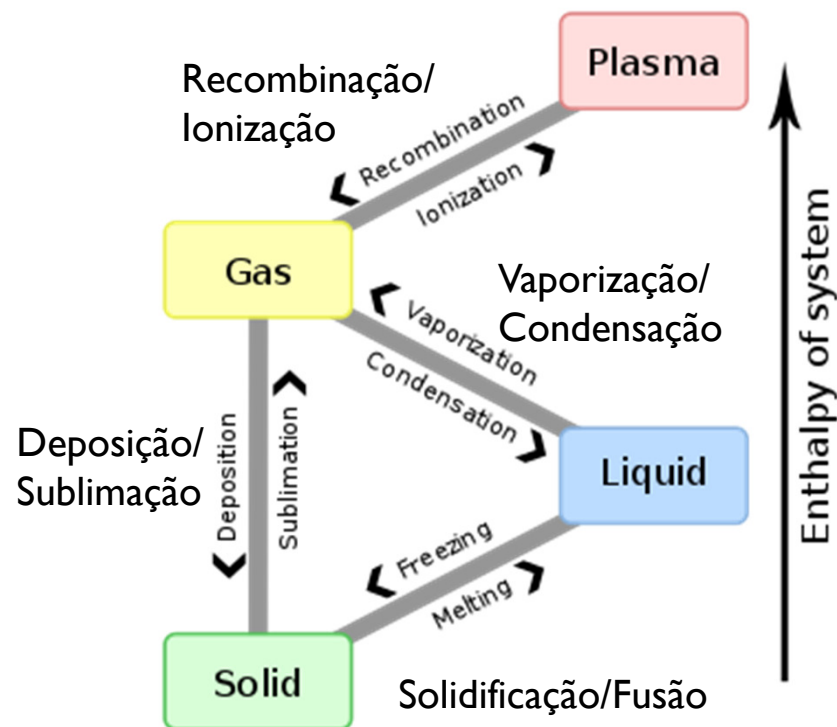
- a) O número de moles do gás
- b) A sua pressão e temperatura iniciais
- c) O trabalho realizado sobre o gás e a variação da sua energia interna.

DADOS:  $R = 8,314 \text{ J/K.mol}$ , 1 atm = 101325 Pa

# Transições de fase

A matéria pode estar em diferentes **fases** ou **estados** (como sólida, líquida, gasosa, plasma, condensado de Bose-Einstein), com diferentes ligações entre as moléculas

A transição de fase envolve troca de energia (fornecida ou retirada) por unidade de massa: **calor latente** de fusão, de vaporização ou de condensação, e de sublimação



## Questão

Num processo termodinâmico no qual a pressão é mantida constante, o **calor** transferido para o sistema é

- a) zero
- b)  $\Delta U + W$
- c)  $\Delta U + P\Delta V$
- d)  $\Delta U$
- e)  $-P\Delta V$
- f)  $C_V\Delta T$
- g)  $-C_P\Delta T$

## Questão

Se uma mole de prata pesa 108 gramas e o seu calor de vaporização é de 250 kJ/mol, quanta **energia** é libertada se 20 gramas de vapor de prata são condensados para o estado líquido no ponto de ebulição/vaporização?

- a) 1350 kJ
- b) 9 kJ
- c) 250 kJ
- d) 46 kJ
- e) 27 kJ
- f) 54 kJ

# Equipartição da energia

A energia distribui-se igualmente por todos os graus de liberdade possíveis, cabendo a cada **grau de liberdade** (desde que seja uma função **quadrática** da variável) a energia

$$\frac{1}{2} k_B T$$

Em geral (sendo ***f*** o número de graus de liberdade de cada molécula), a energia interna é dada por

$$U = N \left( \frac{f}{2} k_B T \right)$$

Uma **molécula monoatômica** tem 3 graus de liberdade de translação

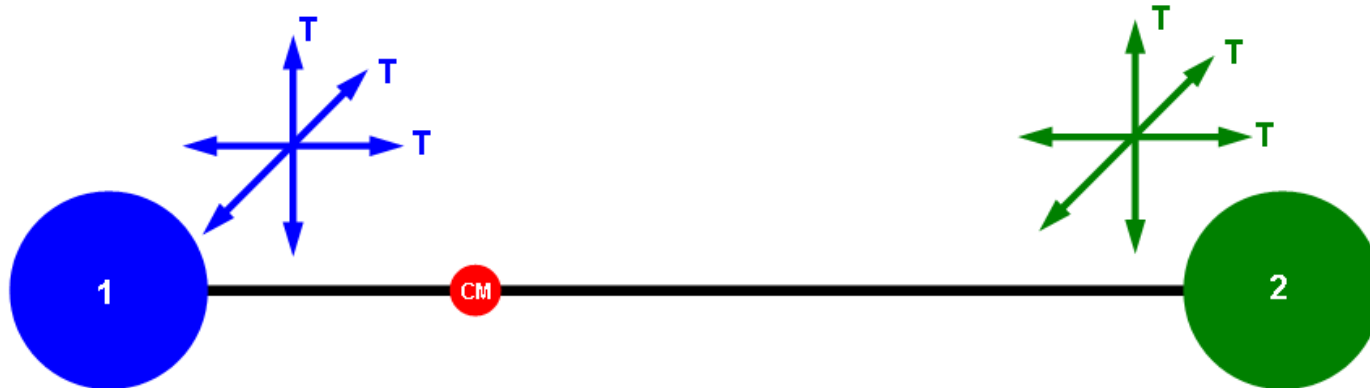
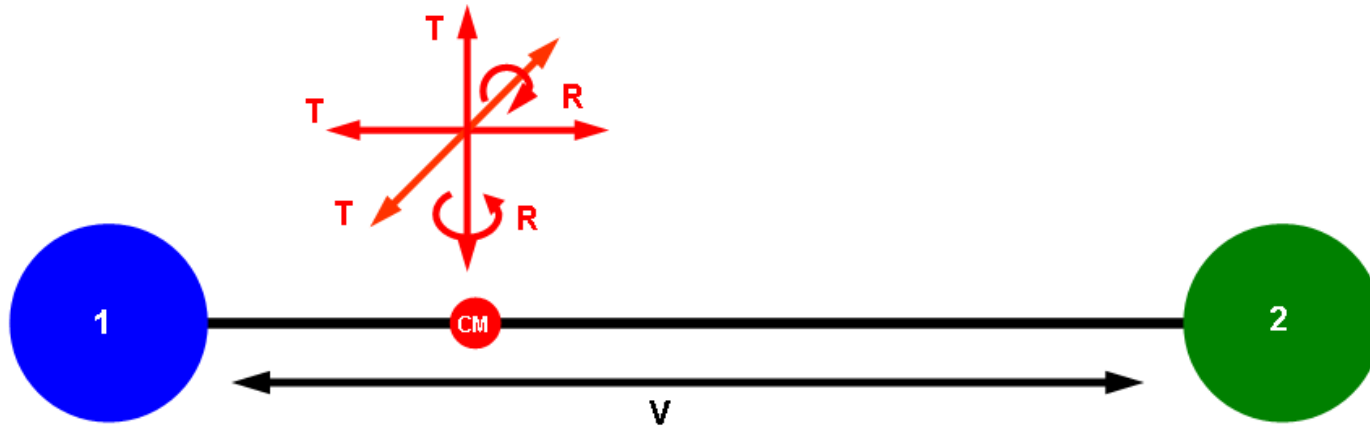
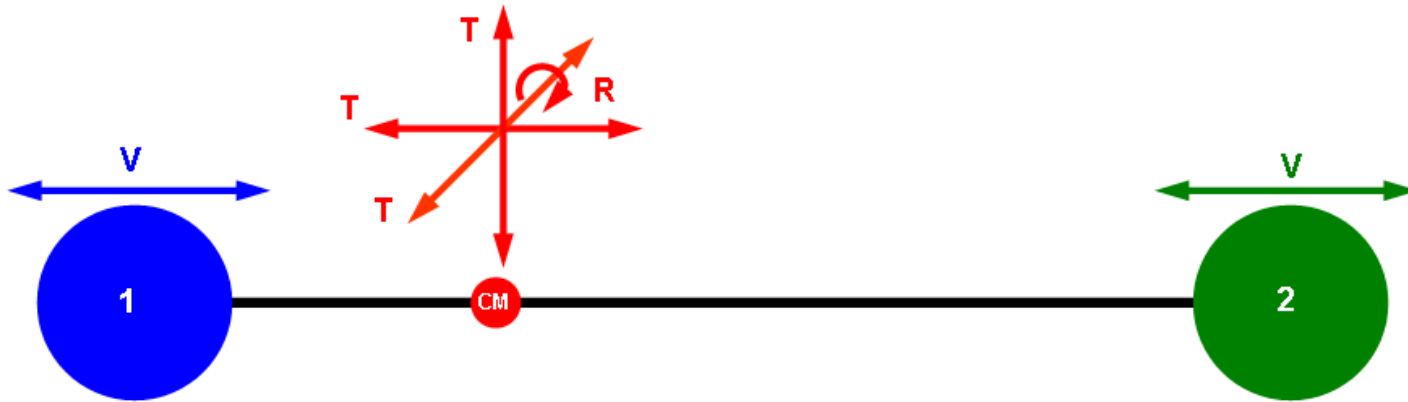
Numa **molécula diatômica** existem dois graus de liberdade de rotação para além dos 3 de translação, e então

$$U = \frac{5}{2} Nk_B T$$

Assim, para um **gás ideal diatômico**

$$C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{5}{2} Nk_B = \frac{5}{2} nN_A k_B = \frac{5}{2} nR$$

$$C_P = C_V + nR = \frac{7}{2} nR \quad \text{e} \quad \gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{7}{5}$$



Graus de liberdade de molécula diatômica

## Questão

A quantidade de **calor** necessária para derreter uma mole de uma substância é chamada:

- a) Calor específico
- b) Calor latente
- c) Calor de vaporização
- d) Calor de fusão
- e) Calor especial
- f) Calor molar
- g) Calor específico molar

## Questão

A **temperatura** de um copo de água muito fria acabará...

- a) À temperatura ambiente
- b) Sempre mais fria que a temperatura ambiente
- c) Mais quente que a temperatura ambiente
- d) Não altera a sua temperatura
- e) Tem uma temperatura oscilatória
- f) Não sabemos, depende da pressão atmosférica

## Questão

Qual das seguintes **fases/estados** da matéria tem o maior movimento e o arranjo menos ordenado?

- a) Sólido
- b) Líquido
- c) Gás
- d) Mistura de líquidos
- e) Gel viscoso
- f) Quarto minguante

# Máquina térmica cíclica

É impossível um processo **cíclico** cujo único resultado seja a absorção de calor de uma **fonte quente** (ou **fonte de calor**) e a conversão total desse calor em **trabalho**

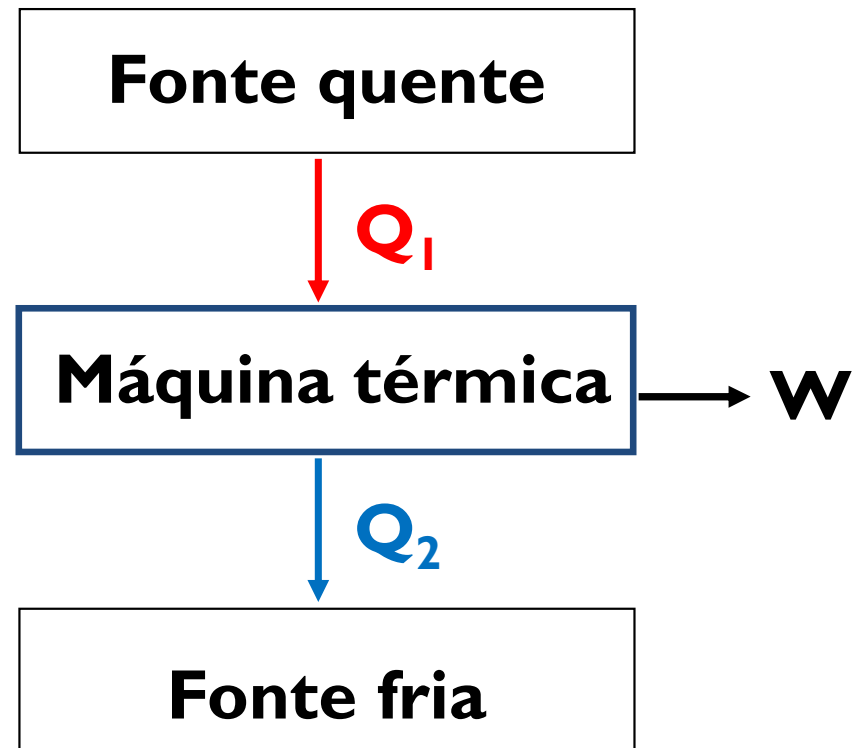
Algum calor tem de ser transferido para uma **fonte fria** para completar o ciclo

$Q_1$  ( $Q_2$ ) é o calor trocado entre a máquina e um **reservatório** a temperatura **elevada** (**baixa**)

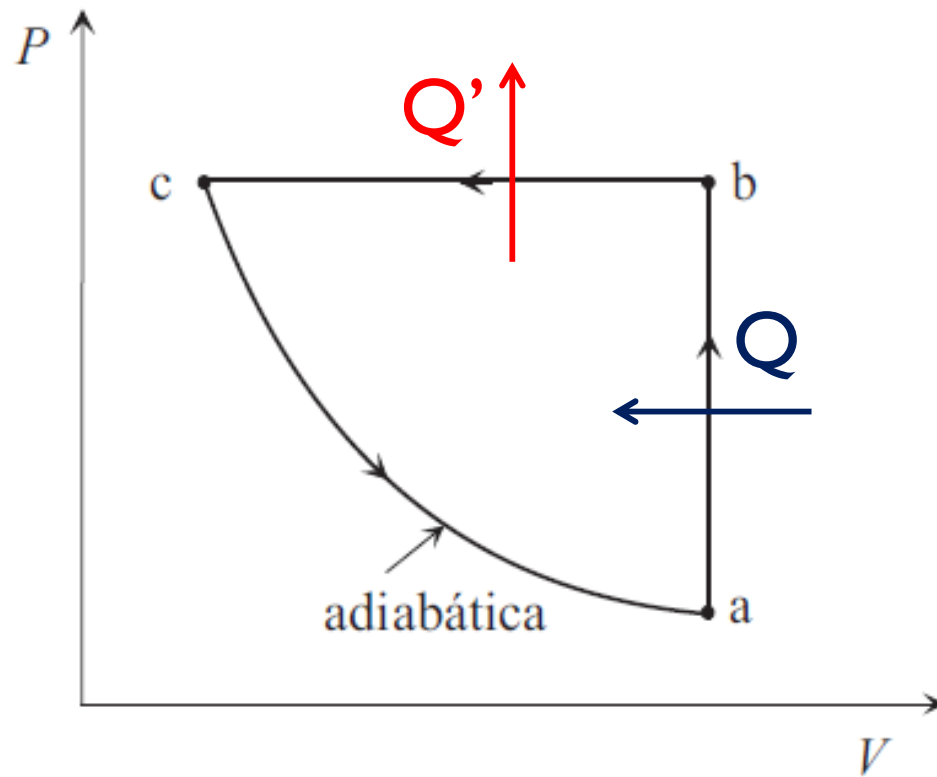
Como num **ciclo**  $\Delta U = 0$  então

$$|W| = |Q_1 + Q_2| = |Q_1| - |Q_2|$$

Invertendo o ciclo tem-se uma **máquina frigorífica**



# Exemplo de ciclo termodinâmico



Processo	$Q$	$W$	$\Delta U$
$ab$	100	0	100
$bc$	-600	1500	900
$ca$	0	-1000	-1000
$abca$	-500	500	0

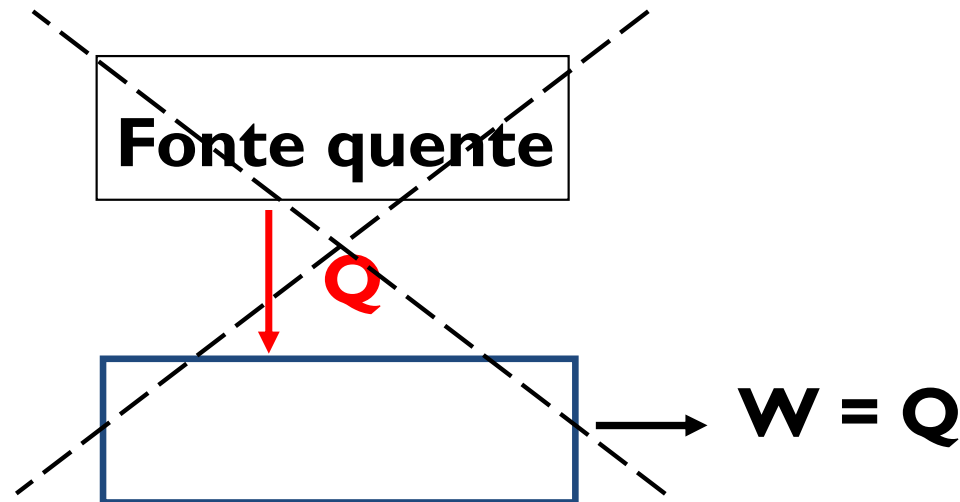
**Rendimento** de uma máquina térmica cíclica:

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

# Enunciados do Segundo Princípio da Termodinâmica

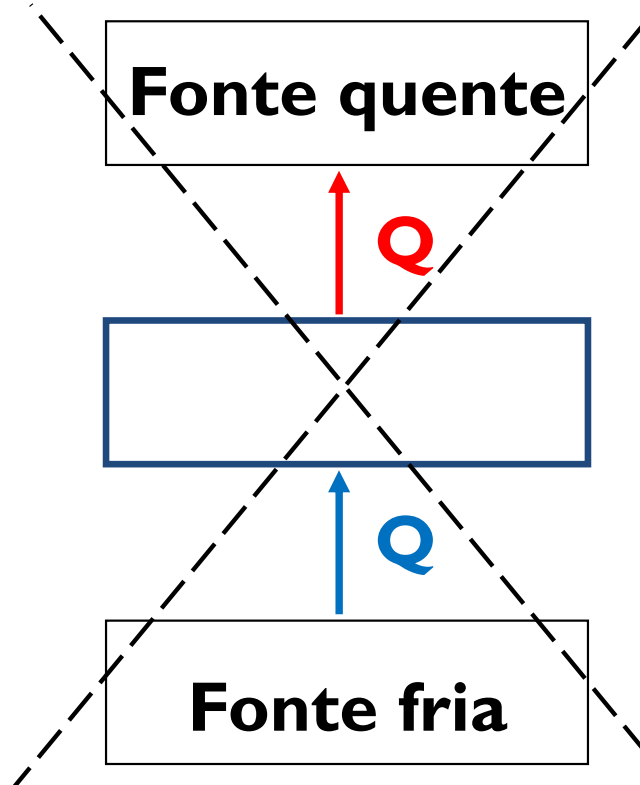
## Enunciado de Kelvin-Planck

É impossível construir uma máquina que, **operando ciclicamente**, tenha como **único** efeito a extração de calor de uma fonte de calor e a realização do trabalho equivalente



# Enunciado de Clausius

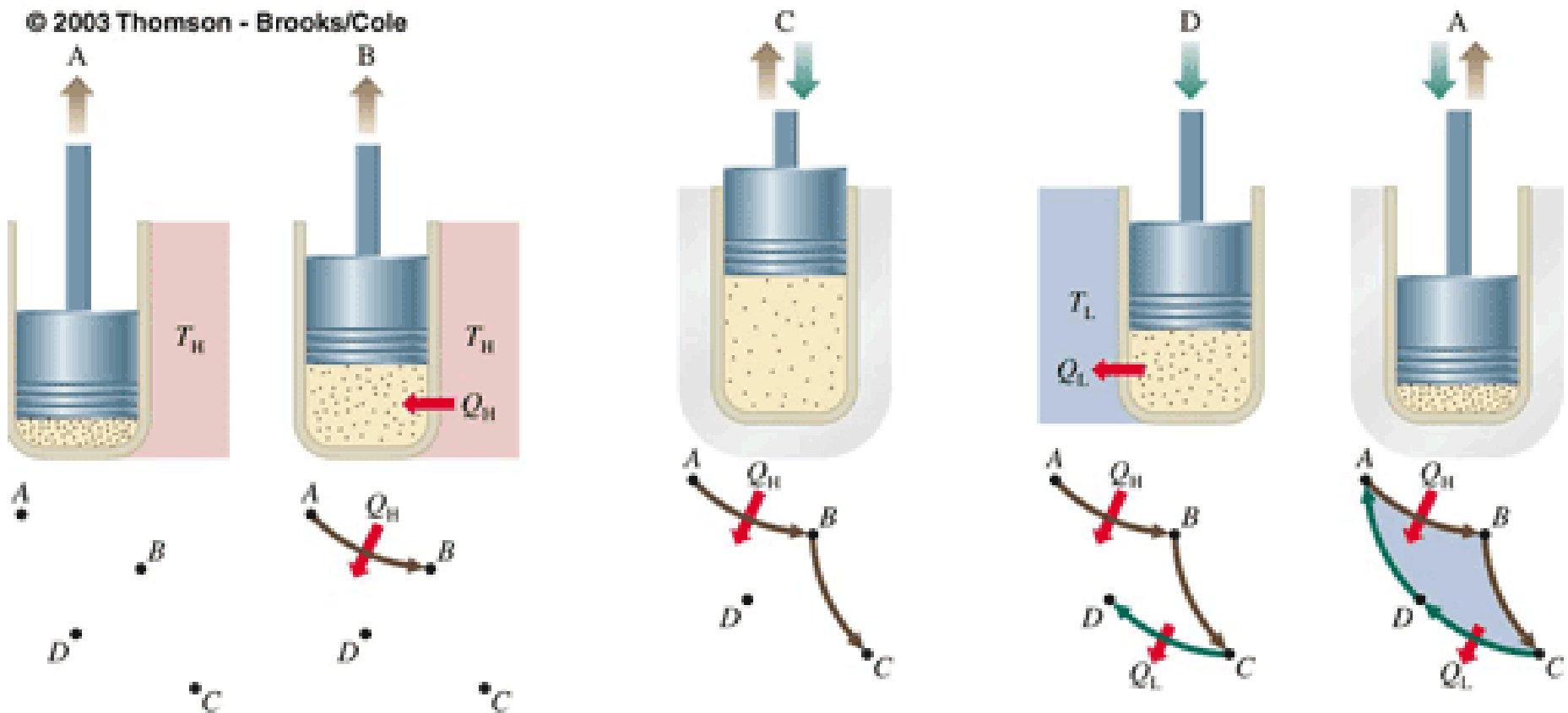
É impossível construir uma máquina que, **operando ciclicamente**, tenha como **único** efeito a transferência de calor de uma fonte fria para uma fonte quente



# Ciclo de Carnot

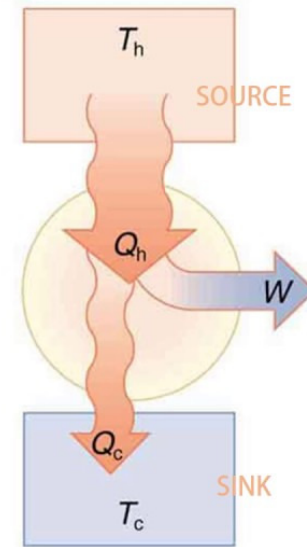
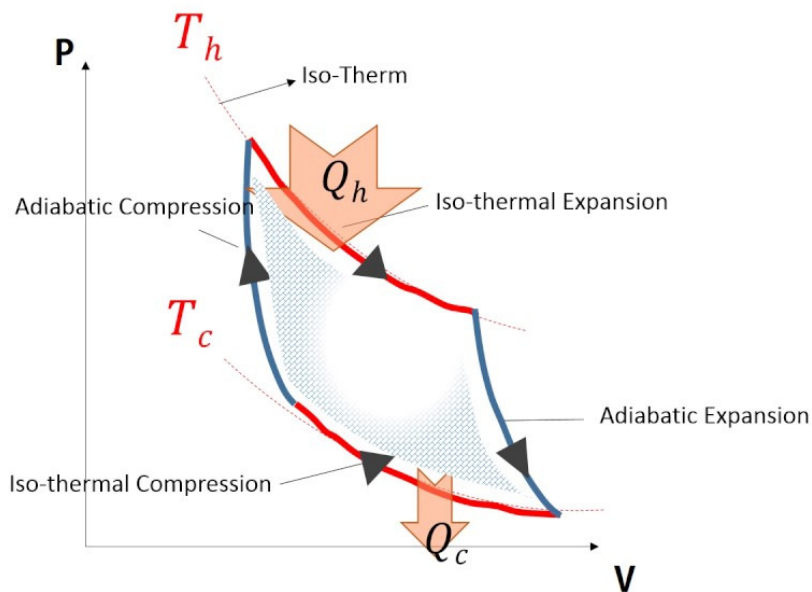
Dois processos **isotérmicos** intercalados com dois processos **adiabáticos** (todos reversíveis)

O maior rendimento possível entre duas fontes

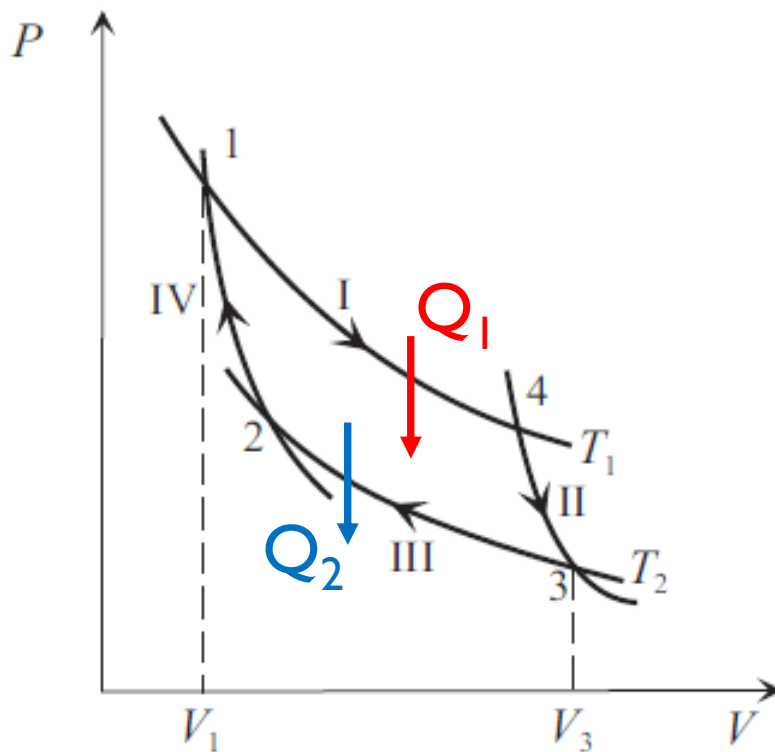
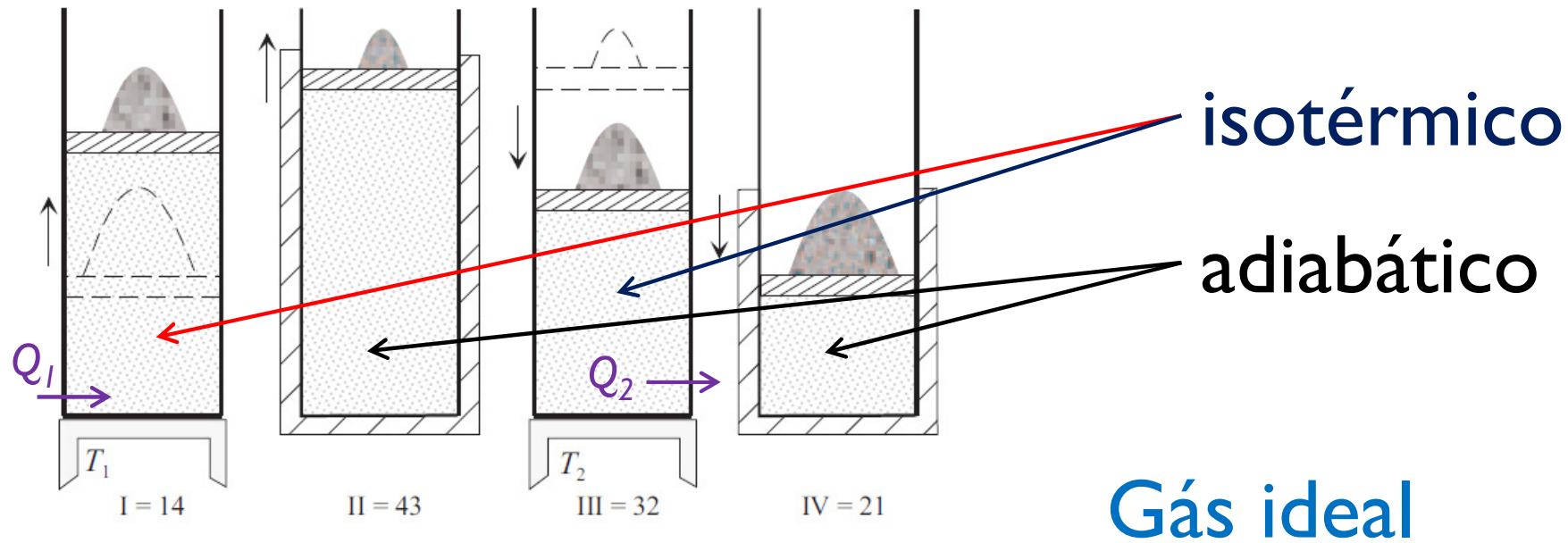


**Rendimento** de um ciclo de Carnot, que funciona entre dois reservatórios às temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ):

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$



$$\eta \text{ (efficiency)} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

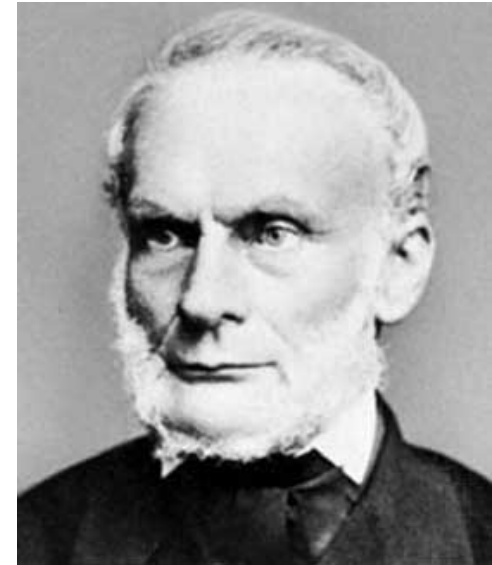


Processo	$Q$	$W$	$\Delta U$
14	$Q_1$	$W_1$	0
43	0	$W_{43}$	$W_{43}$
32	$Q_2$	$W_2$	0
21	0	$W_{21}$	$W_{21}$
ciclo	$Q_2 + Q_1$	$W_1 + W_2 +$ <del><math>+W_{43} + W_{21}</math></del>	$0 = (W_{43} + W_{21})$ ou $W_{43} = -W_{21}$

Considerando um **número infinito de fontes de calor**, o sistema troca um calor infinitesimal  $\delta Q$  com cada uma delas

Teorema de Clausius

$$\oint \frac{\delta Q}{T_{\text{fonte}}} \leq 0$$



**Entropia**

$$\Delta S = \int_i^f \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

(definição desta função de estado)

**Exemplo:** condução do calor  $Q$  através do sistema, entre um reservatório à temperatura  $T_1$  e outro reservatório à temperatura  $T_2$

O sistema permanece inalterado, mas não os **reservatórios**

$$\Delta S_{\text{sistema}} = 0 \quad , \quad \Delta S_{\text{reserv. quente}} = -\frac{Q}{T_1} \quad , \quad \Delta S_{\text{reserv. frio}} = +\frac{Q}{T_2}$$

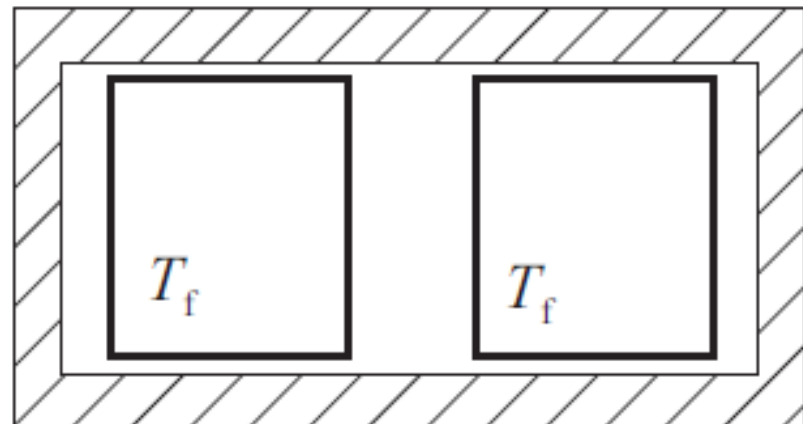
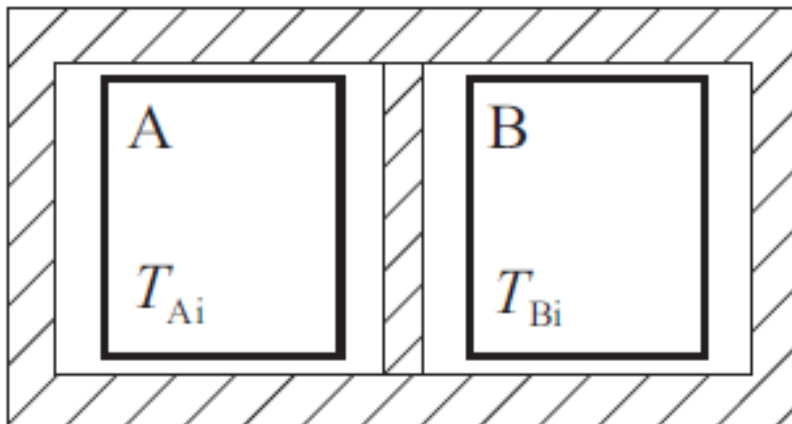
$$\Delta S_{\text{universo}} = \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} > 0 \quad (T_1 > T_2)$$

**Exemplo:** dois corpos idênticos, limitados por uma fronteira rígida e **adiabática**, inicialmente às temperaturas  $T_{Ai}$  e  $T_{Bi}$ , postos em contacto térmico (no final ficam em equilíbrio térmico à temperatura  $T_f$ )

A variação de energia interna, considerando  $C_V$  constante,

$$\Delta U = Q + W = 0 = \int_{T_{Ai}}^{T_f} C_V dT + \int_{T_{Bi}}^{T_f} C_V dT = C_V (T_f - T_{Ai} + T_f - T_{Bi}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_f = \frac{1}{2} (T_{Ai} + T_{Bi})$$



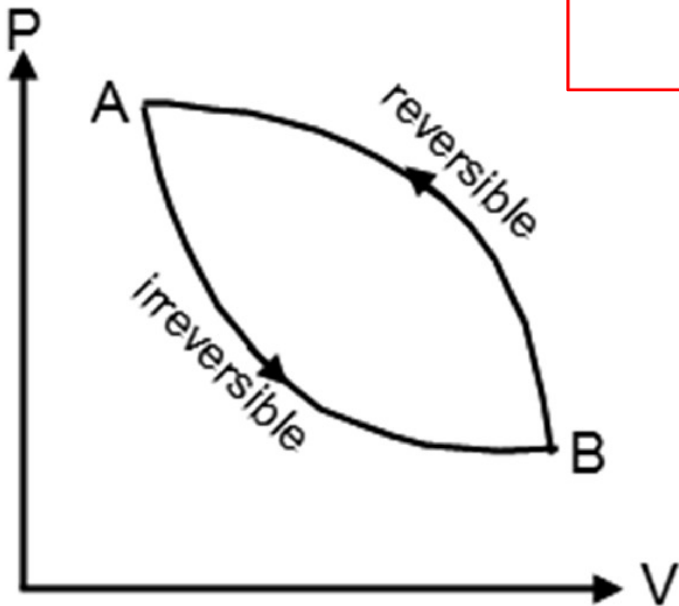
## A variação de **entropia**

$$\Delta S = \int_{T_{Ai}}^{T_f} \frac{C_V}{T} dT + \int_{T_{Bi}}^{T_f} \frac{C_V}{T} dT = C_V \left( \ln \frac{T_f}{T_{Ai}} + \ln \frac{T_f}{T_{Bi}} \right) = C_V \ln \left( \frac{T_f}{\sqrt{T_{Ai} T_{Bi}}} \right)^2 \geq 0$$

Pois a média geométrica é sempre menor ou igual que a média aritmética

$$\oint \frac{\delta Q}{T_{\text{fonte}}} = \int_i^f \frac{\delta Q_{\text{irrev}}}{T_{\text{fonte}}} + \int_f^i \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T_{\text{fonte}}} = \int_i^f \frac{\delta Q_{\text{irrev}}}{T_{\text{fonte}}} - \Delta S \leq 0$$

$$\Delta S \geq \int_i^f \frac{\delta Q_{\text{irrev}}}{T_{\text{fonte}}}$$



Podemos trocar os limites do integral num processo reversível mas não num processo irreversível

$$S_f - S_i > \int_i^f \frac{\delta Q_{irrev}}{T_{fonte}}$$

**Processos irreversíveis  
infinitesimais**

$$dS > \frac{\delta Q_{irrev}}{T_{fonte}}$$

**Em geral** (a igualdade é  
válida apenas para processos  
**reversíveis**)

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

## Problema 2

Num recipiente bem isolado, que contém 2 litros de água a  $40^{\circ}\text{C}$ , são introduzidas 150 g de gelo a  $-10^{\circ}\text{C}$ . Determine:

- a) A temperatura final da mistura
- b) O calor trocado entre a água e o gelo
- c) A variação de entropia do sistema água-gelo neste processo.

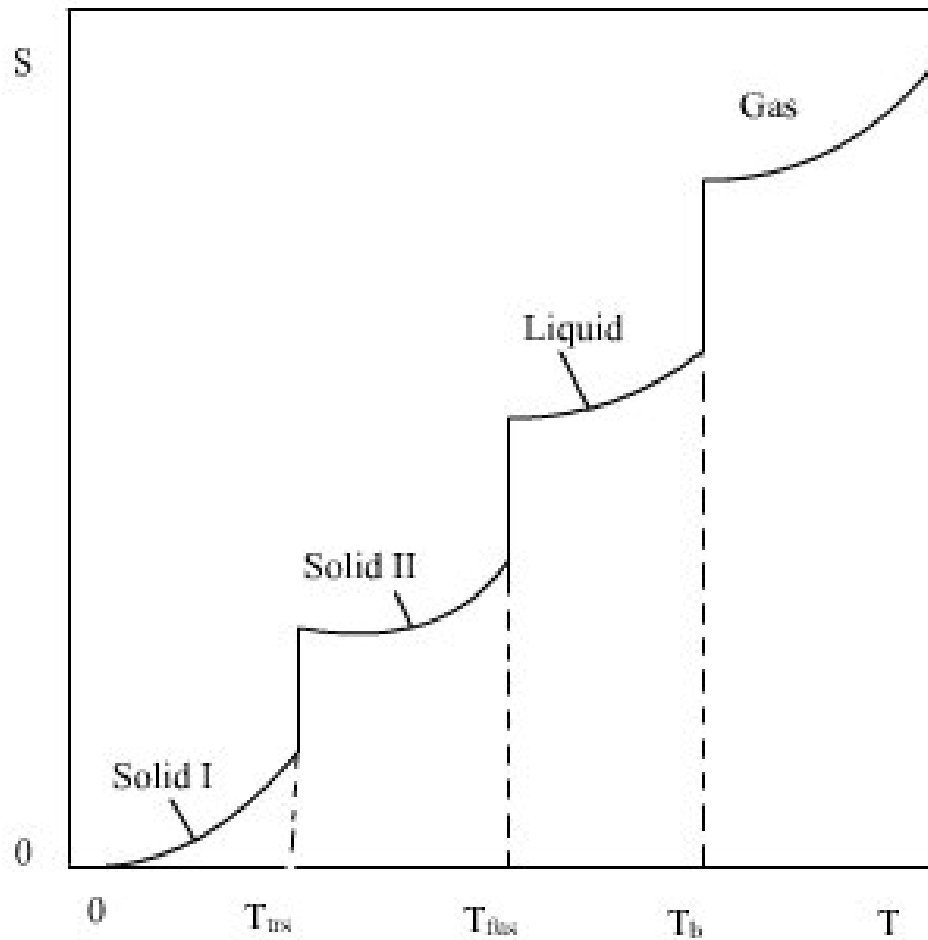
DADOS:  $C_p(\text{gelo})=2,11 \text{ kJ/K.kg}$ ,  $C_p(\text{água})=4,19 \text{ kJ/K.kg}$ ,  $\ell_F=334 \text{ kJ/kg}$

## Segunda Lei da Termodinâmica

Para um processo **adiabático**, como o que envolve todo o Universo:

$$\Delta S = S_f - S_i \geq 0$$

Princípio da **não diminuição da entropia**



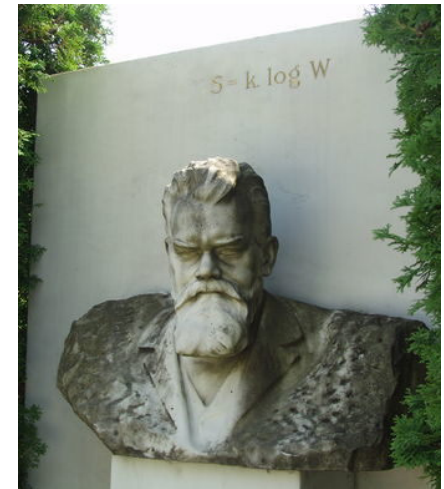
## Entropia de uma substância em função da temperatura

$$S = \int_0^{T_{trans.}} C_{P,1} \frac{dT}{T} + \frac{\Delta_{trans.} H}{T_{trans.}} + \int_{T_{trans.}}^{T_{fusão}} C_{P,2} \frac{dT}{T} + \frac{\Delta_{fusão} H}{T_{fusão}} + \int_{T_{fusão}}^{T_{vapor.}} C_{P,3} \frac{dT}{T} + \frac{\Delta_{vapor.} H}{T_{vapor.}} + \int_{T_{vapor.}}^T C_{P,4} \frac{dT}{T}$$

Sól. I + S.I  $\rightarrow$  S.II + Sól. II + Fusão + Líquido + Vaporização + Vapor

Em Mecânica Estatística, a **equação de Boltzmann** relaciona a Entropia de um gás ideal com o número de microestados correspondentes a um dado macroestado

$$S = k_B \ln W$$



Um gás ideal com  $N$  partículas idênticas, das quais  $N_i$  estão no estado  $i$  (intervalo de posições e de momentos lineares), pode ser calculado através de permutações

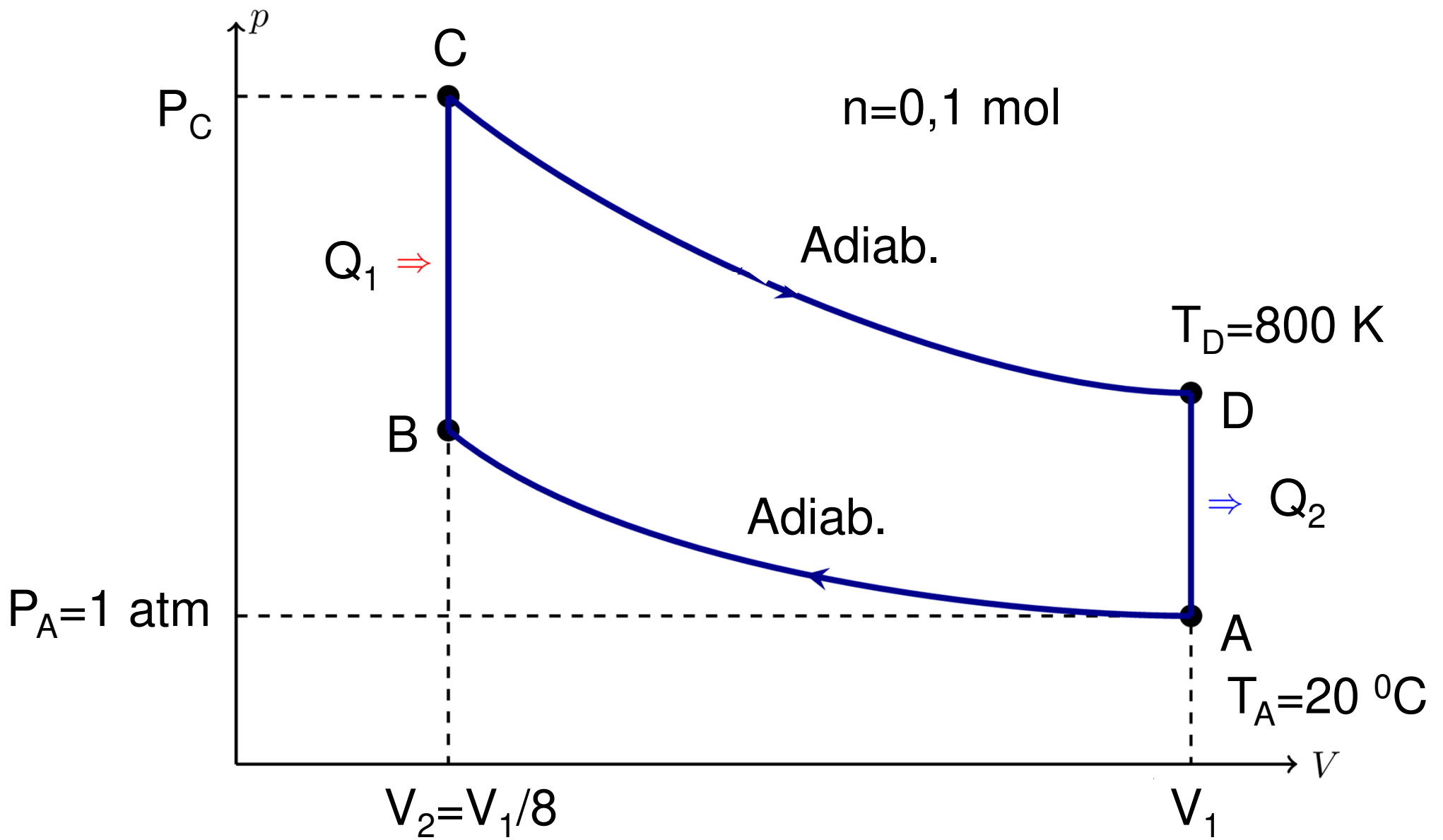
$$W = \frac{N!}{\prod_i N_i!}$$

## Problema 3

Ar, que se comporta como um gás ideal diatômico, realiza o ciclo termodinâmico da figura, em processos lentos que podem ser considerados quase-estáticos. Determine:

- Os valores de  $P$ ,  $V$  e  $T$  em todos os pontos (de A a D)
- O trabalho realizado em cada um dos processos deste ciclo
- O calor que entra e que sai em cada um dos processos, e o rendimento deste ciclo
- A variação de energia interna em cada um dos processos
- A variação de entropia em cada um dos processos.

DADOS:  $T_A = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_D = 800\text{ K}$ ,  $P_A = 1\text{ atm}$ ,  $V_2 = V_1/8$ ,  $n = 1\text{ mol}$ ,  
 $R = 8,314\text{ J/K.mol}$ ,  $1\text{ atm} = 101325\text{ Pa}$



## Enunciado de Nernst do Terceiro Princípio (ou lei):

A **variação da entropia** num processo entre dois estados de equilíbrio tende para zero quando a temperatura se aproxima do zero absoluto

$$\lim_{T \rightarrow 0} (S_1 - S_2) = 0$$

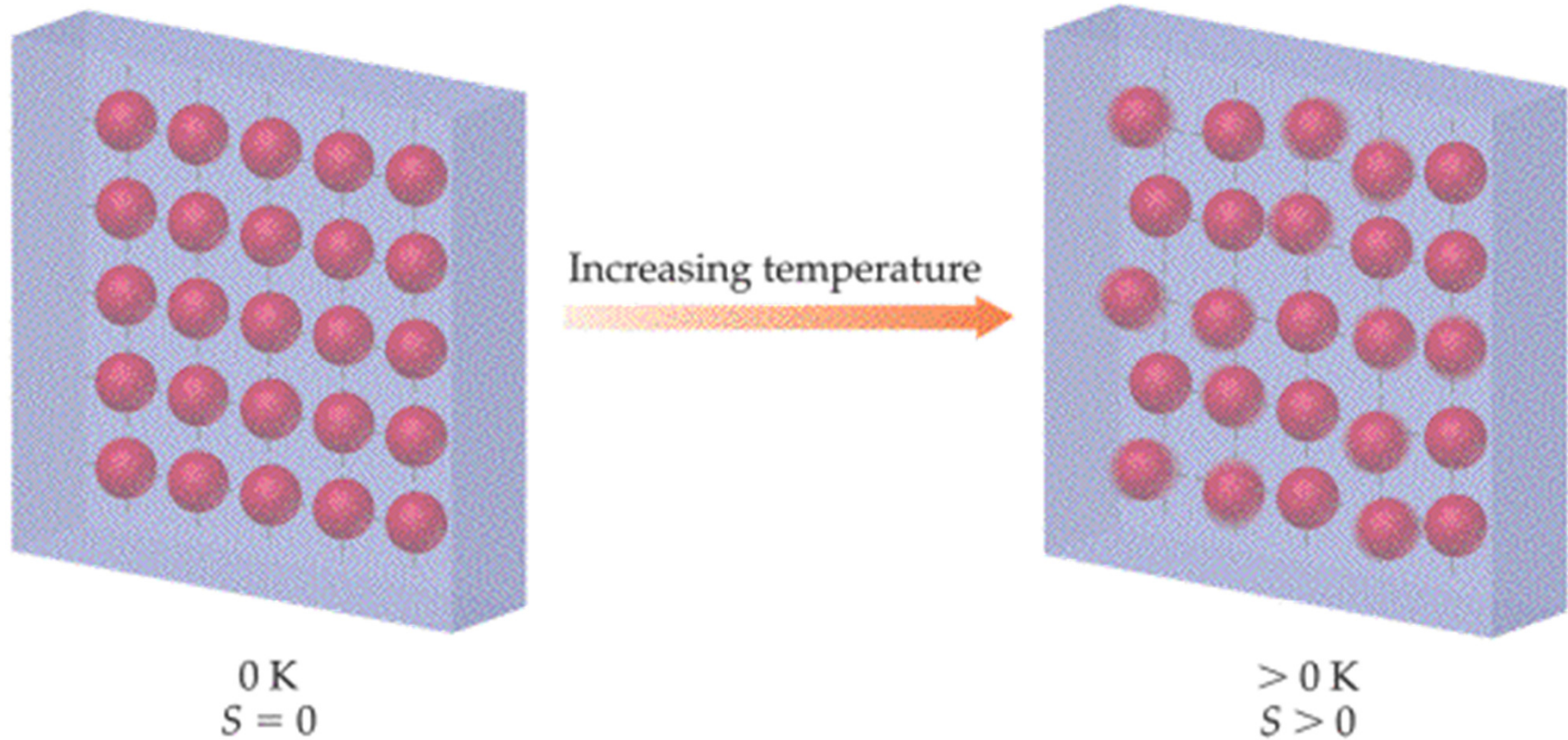
## Enunciado de Planck do Terceiro Princípio:

A **entropia** de um sólido ou de um líquido puro (em equilíbrio) anula-se no zero absoluto

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

A **entropia** de qualquer estado A é então uma quantidade bem definida

$$S(A) = \int_{T=0}^A \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$



A 0 K os átomos de um **crystal perfeito** estão perfeitamente **alinhados**, mas se a temperatura for ligeiramente superior ao zero absoluto eles deslocam-se desta posição de máximo ordenamento

○ **zero absoluto** é inalcançável



# Outros assuntos do programa de Termodinâmica Olímpica

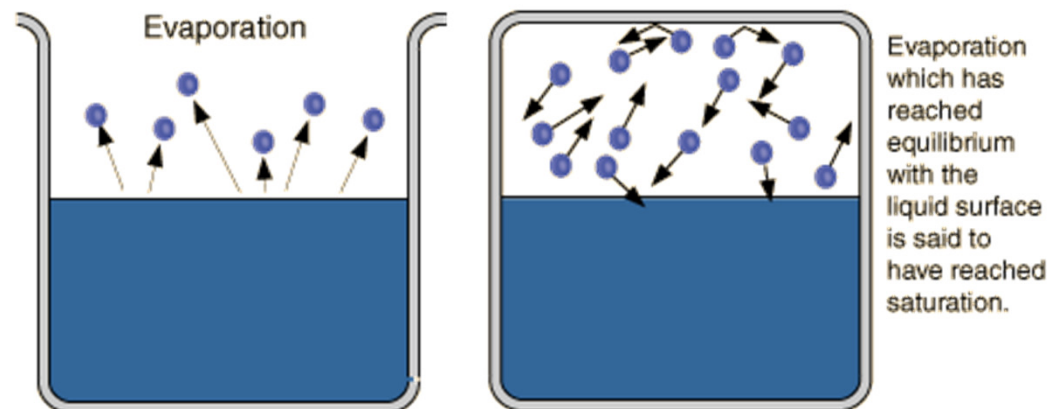


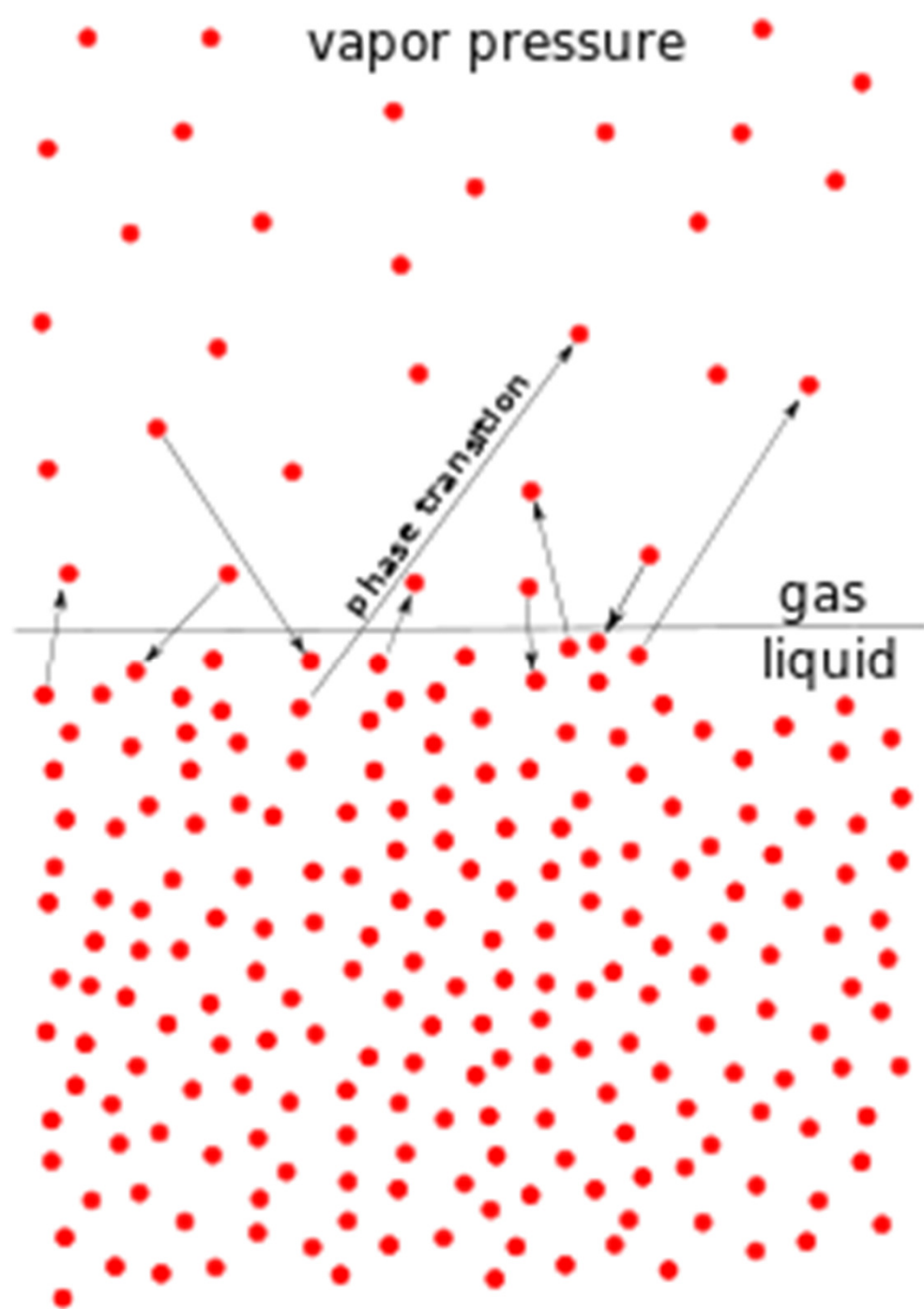
# Pressão de vapor de equilíbrio

Pressão exercida por um vapor em equilíbrio termodinâmico com a sua fase condensada (líquida ou sólida), a uma certa temperatura, num sistema fechado

É uma indicação da taxa de **evaporação** do líquido (relacionada com a tendência das moléculas para escaparem do líquido)

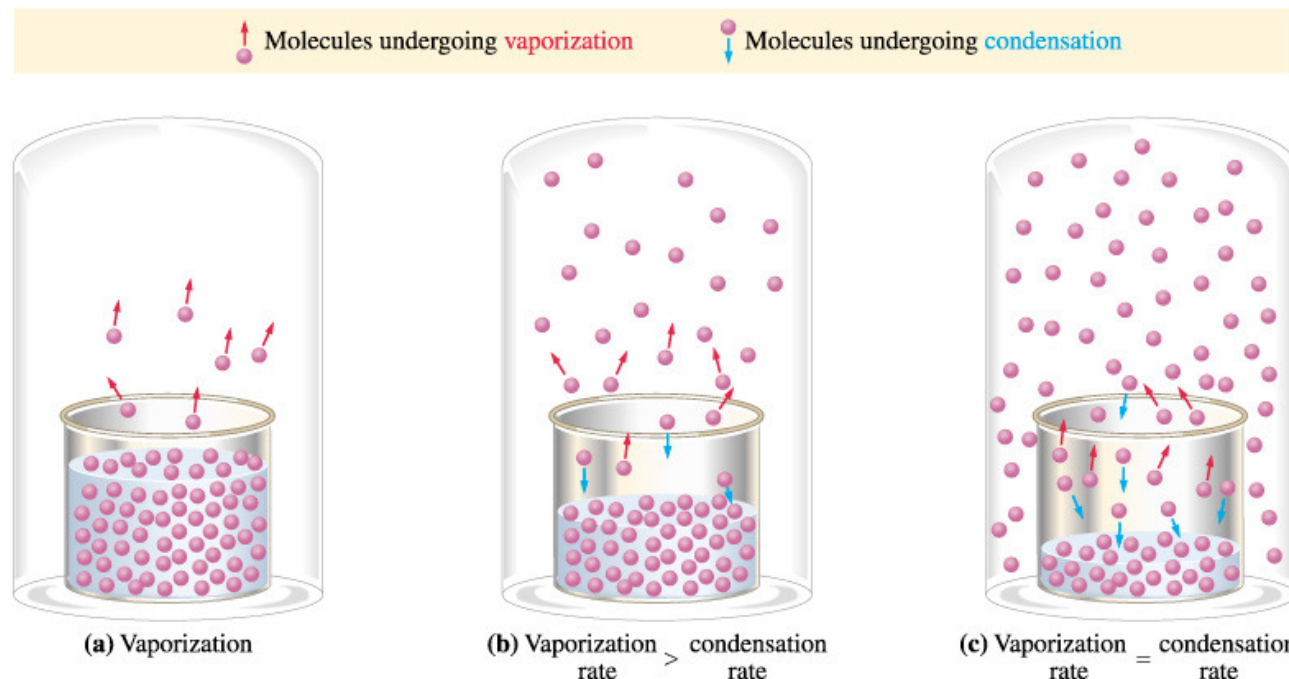
Se tiver um valor elevado a substância diz-se **volátil**





Com o aumento da temperatura de um líquido a **energia cinética** das suas moléculas também sobe, aumentando o número de moléculas que passa para vapor e assim a sua pressão de vapor

A pressão de vapor é igual à pressão atmosférica ambiente quando a temperatura atinge o **ponto de ebulição** (a essa pressão atmosférica)



## Humidade relativa

Razão entre a quantidade de água presente na atmosfera (**pressão parcial de vapor de água**) e a quantidade total de vapor de água que a atmosfera pode suportar a uma determinada temperatura (pressão de vapor,  $p^*$ )

$$\phi = \frac{p(H_2O)}{p^*(H_2O)} \times 100\%$$

## Lei de Dalton

Numa mistura gasosa, a pressão de cada componente é independente da pressão das outras, a pressão total ( $P$ ) é igual à soma das **pressões parciais** das componentes

$$P = p_1 + p_2 + \cdots + p_n$$

$$p_i = x_i P$$

onde  $x_i$  é a **fração molar** da componente  $i$

# Radiação

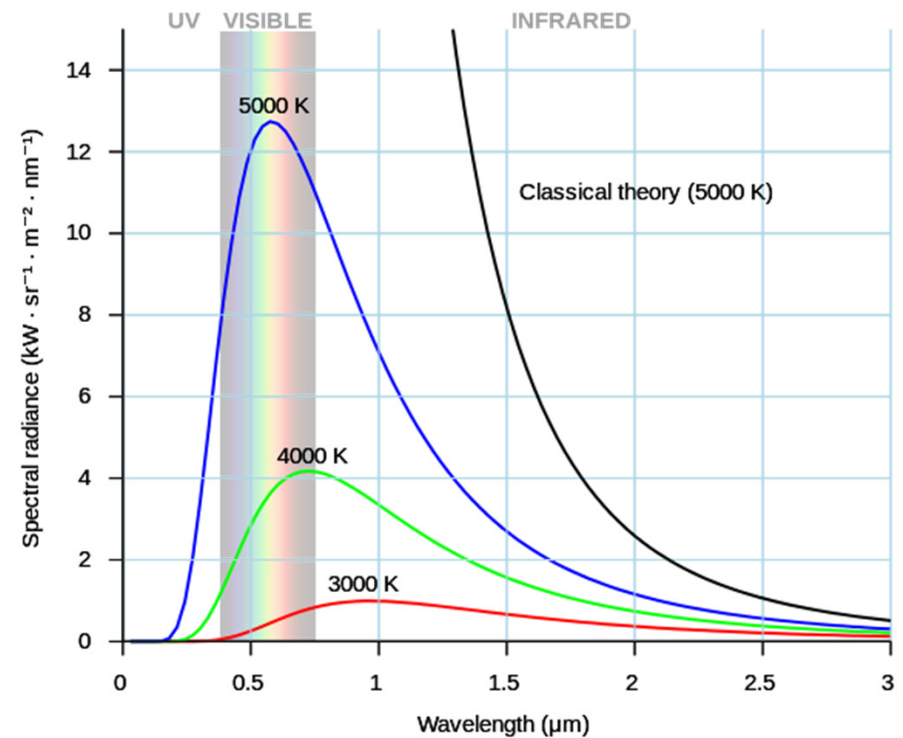
$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$$

**Lei de Planck** para a radiância espectral (**energia** da radiação para diferentes frequências), consequência da **quantização da energia**

$$B_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

**Lei do deslocamento de Wien:** o comprimento de onda do máximo da curva da radiação emitida por um corpo negro é inversamente proporcional à sua temperatura

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K})$$



# Radiação

**Lei de Stefan-Boltzmann** para a potência (energia por unidade de tempo) radiada por um corpo com emissividade  $\varepsilon$ , área da superfície  $A$ , à temperatura  $T$

$$P = A\varepsilon\sigma T^4$$

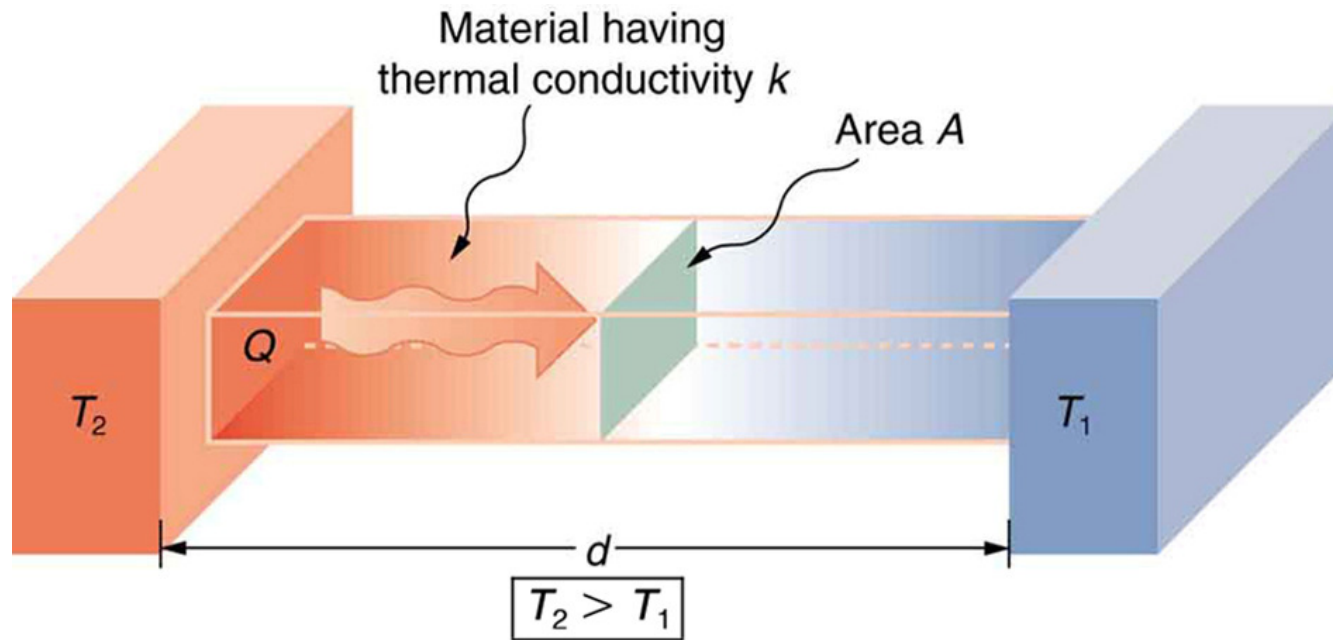
onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann

## Condutividade térmica ( $\kappa$ )

Quantifica a capacidade dos materiais para **conduzir energia térmica (calor)**

Relaciona a quantidade de calor  $Q$  trocada por intervalo de tempo  $\Delta t$  (**potência** térmica) através de uma barra de material de comprimento  $L$ , na direção perpendicular à sua secção reta, de área  $A$ , com a diferença de temperatura  $\Delta T$  entre as extremidades

$$\frac{Q}{\Delta t} \frac{L}{A} = \kappa \Delta T$$



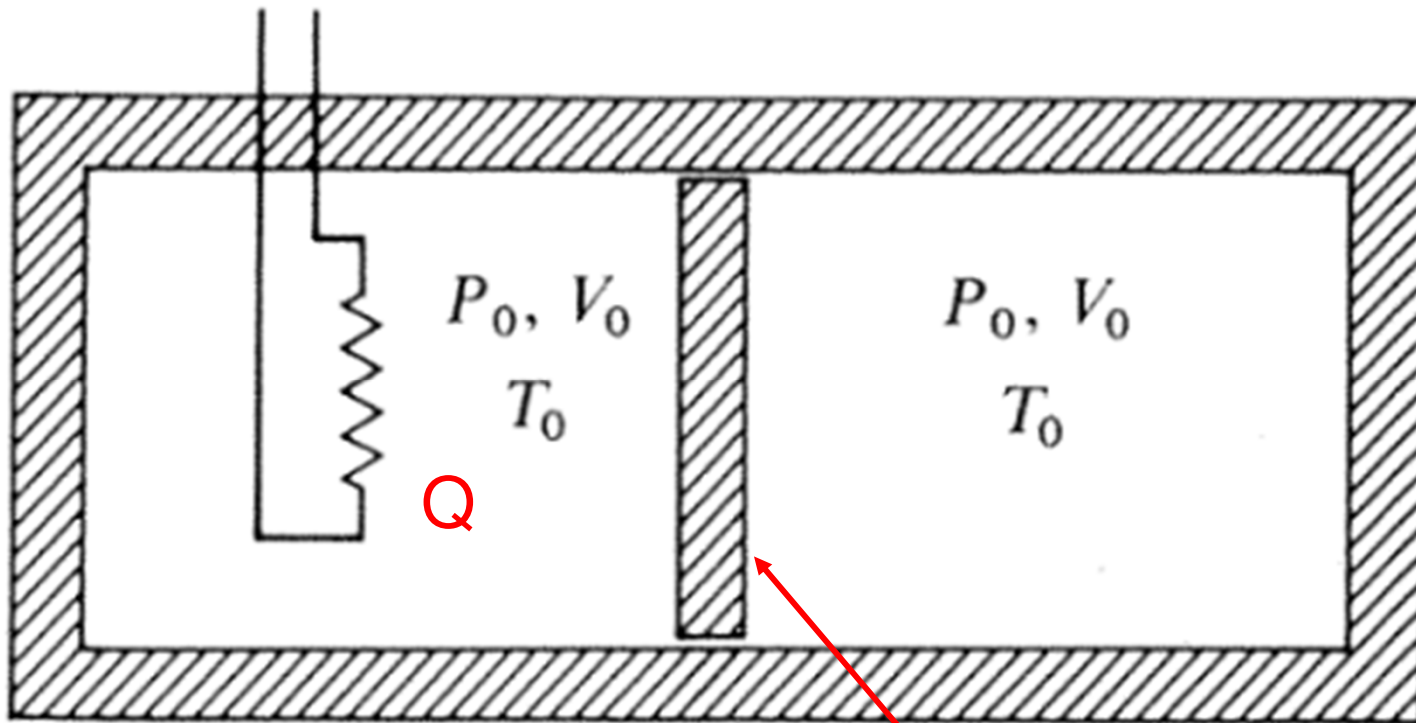
**Lei de Fourier** a uma dimensão

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x}$$

## Problema 4

Um gás ideal monoatômico ( $C_v = (3/2)nR$ ) preenche igualmente um recipiente bem isolado, onde existe uma separação adiabática, que se pode mover livremente, a dividir o volume em duas partes iguais. O lado esquerdo é aquecido até a sua pressão chegar a 3 vezes o valor da pressão inicial. Determine:

- a) A pressão e volume finais do lado direito
- b) O volume final do lado esquerdo
- c) As temperaturas finais do lado esquerdo e do lado direito
- d) O trabalho realizado sobre cada um dos lados
- e) A variação de energia interna do sistema
- f) O calor fornecido ao sistema



Partição móvel