

## *Curso Termodinâmica I – TM344*

- **Cap. 2 – Energia e a Primeira Lei da Termodinâmica**

Trabalhos de Galileu e outros

Newton → formulou a descrição geral sob a influência de forças a eles aplicadas.

# *Leis Principais da Termodinâmica*

- A **Lei Zero** da Termodinâmica determina que, quando dois corpos têm igualdade de temperatura com um terceiro corpo, eles têm igualdade de temperatura entre si. Esta lei é a base para a medição de temperatura.
- **Primeira Lei da Termodinâmica** fornece o aspecto quantitativo de processos de conversão de energia. É o princípio da conservação da energia e da conservação da massa, agora familiar, : "A energia do Universo é constante".
- A **Segunda Lei da Termodinâmica** determina o aspecto qualitativo de processos em sistemas físicos, isto é, os processos ocorrem numa certa direção mas não podem ocorrer na direção oposta. Enunciada por Clausius da seguinte maneira: "A entropia do Universo tende a um máximo".
- A **Terceira Lei da Termodinâmica** estabelece um ponto de referência absoluto para a determinação da entropia, representado pelo estado derradeiro de ordem molecular máxima e mínima energia. Enunciada como "A entropia de uma substância cristalina pura na temperatura zero absoluto é zero". É extremamente útil na análise termodinâmica das reações químicas, como a combustão, por exemplo.

# Cap. 2 – Energia e a Primeira Lei

A etimologia da palavra tem origem no idioma grego, onde  $\epsilon\rho\gamma\omicron\varsigma$  (ergos) significa "trabalho". A rigor é um conceito primordial, aceito pela Física sem definição, se refere "ao potencial inato para executar trabalho ou realizar uma ação"

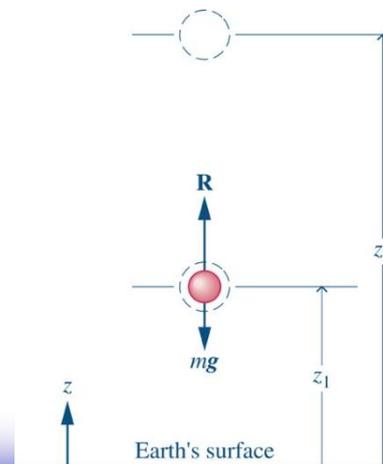
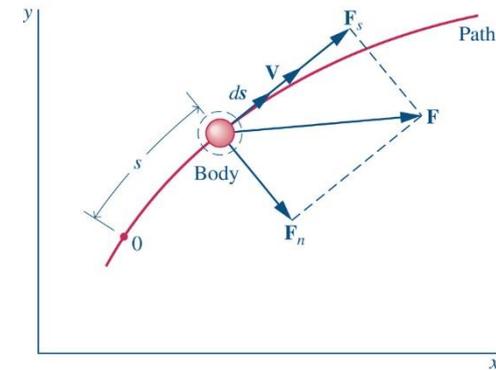
Formas de energia – pode ser armazenada, transferida ou convertida. A quantidade total é conservada (*Princípio da Conservação da Energia*).

Unidade: joule [J]=[N.m]=[kg.m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]

- Energia cinética  $W_{1-2} = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 = \Delta E_c$

- Energia potencial (ou gravitacional)  $\Delta E_{PG} = m g z_2 - m g z_1$

- Energia química, ....



# Princípio da Conservação da Energia

**Joule: “Não perderei tempo repetindo e estendendo essas experiências, pois estou seguro de que os grandes agentes da natureza são *indestrutíveis*, pelo *fiat* do Criador; e que quando se gasta poder mecânico, obtém-se *sempre* um calor exatamente equivalente.”**

# Trabalho

*Um sistema realiza trabalho sobre suas vizinhanças se o único efeito sobre tudo aquilo externo ao sistema puder ser o levantamento de um peso.*

$$W_{1-2} = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

$W > 0$  (+) → trabalho realizado *pelo* sistema

$W < 0$  (-) → trabalho realizado *no* sistema



# Trabalho

$$W_{1-2} = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

- Os limites da integral indicam “desde o estado 1 até o estado 2 e não podem ser interpretados como os valores do trabalho nesses estados. A diferencial do trabalho,  $\delta W$ , é inexata porque, em geral, ela não pode ser calculada sem que sejam especificados os detalhes do processo.

$$\int_1^2 \delta W = \int_1^2 dW = W_{1-2}$$

- Por outro lado, a diferencial de uma propriedade é dita exata e pode ser calculada pelo seu valor em cada um dos estados, independente do caminho percorrido.

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1$$

# Potência

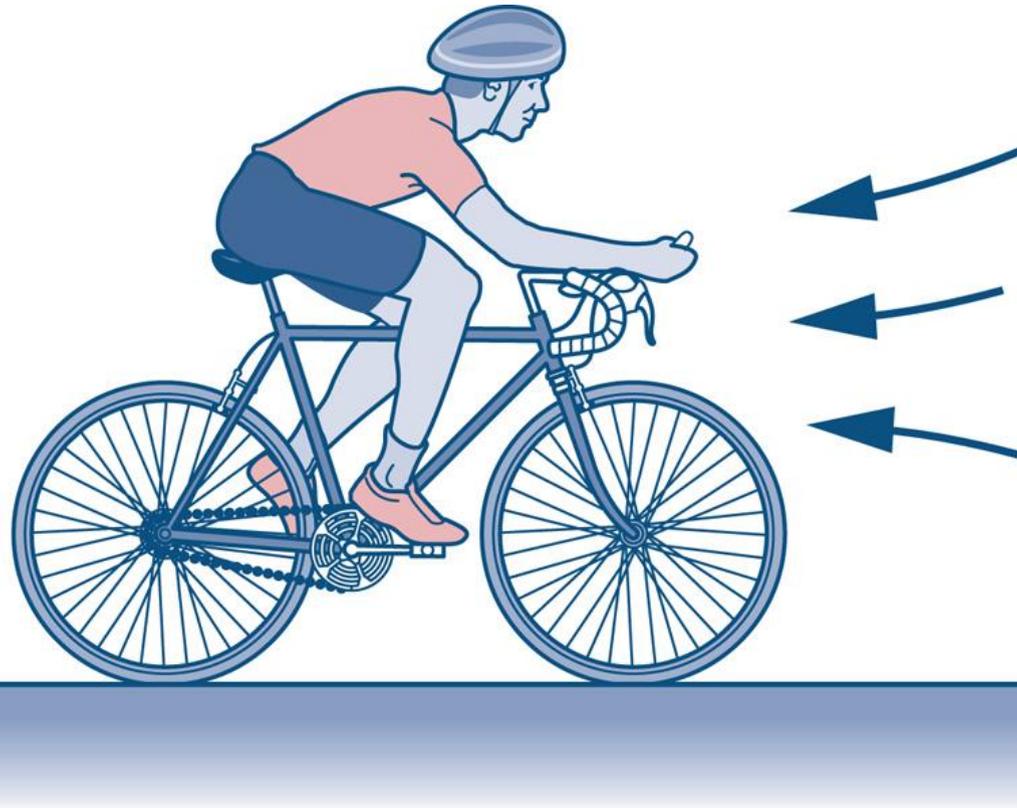
$$\dot{W} = \vec{F} \cdot \vec{V} \quad [\text{W}]$$

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \dot{W} dt = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot \vec{V} dt \quad [\text{J}]$$

- 1 W = 1 J/s
- 1 hp = 1,0138 cv = 745,7 W
- *HP: um cavalo podia levantar 33.000 libras de água a uma altura de um pé em um minuto*
- *CV: representa o equivalente a 75 kg·m·s<sup>-1</sup>, em que 1 kg·m corresponde ao trabalho gasto para erguer uma massa de 1 kg a uma altura de 1 metro.*

## Exemplo

Calcule a Potência necessária para um ciclista viajando a 36 km/h superar a força de arrasto imposta pelo ar ao seu redor.



Dados:

$$C_D = 0,88$$

$$A = 0,362 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1,1 \text{ kg/m}^3$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_D A \rho V^2$$

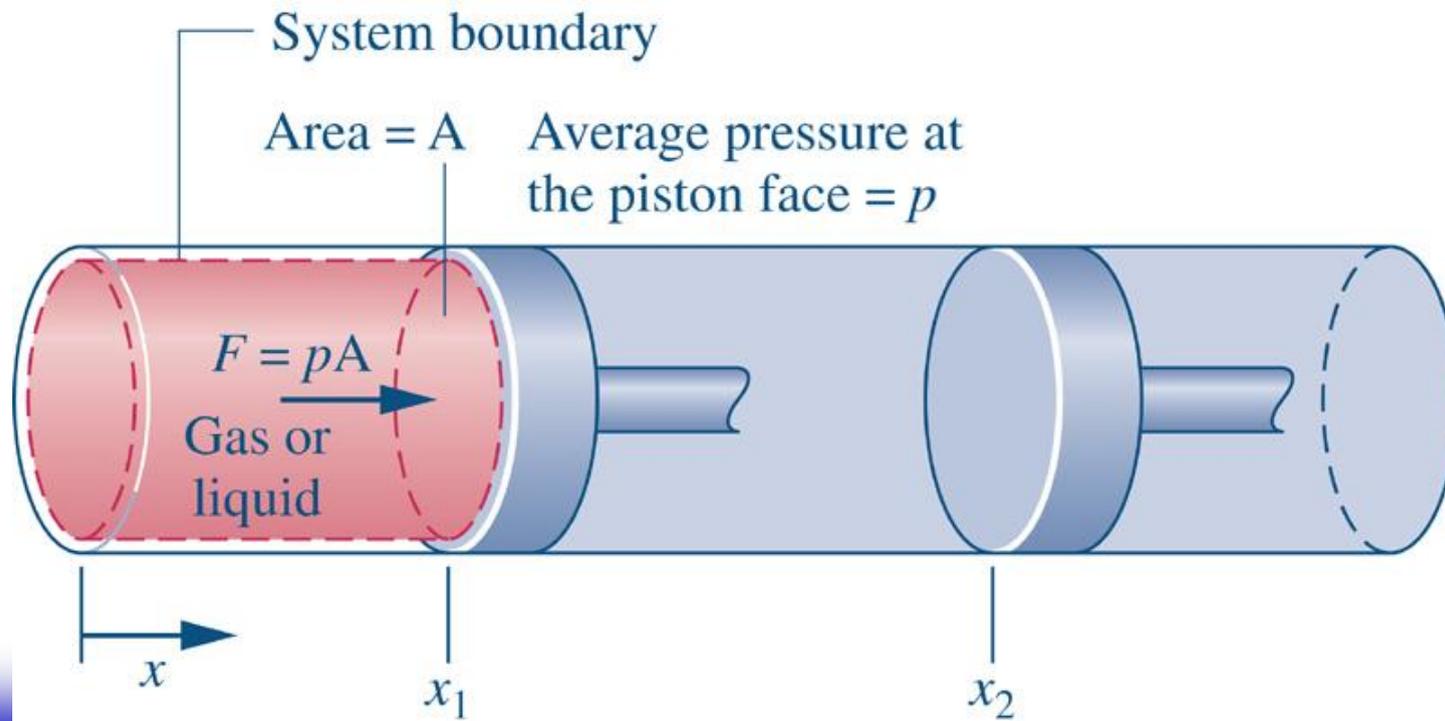
$$\dot{W} = \vec{F} \cdot \vec{V}$$

# Trabalho: Expansão ou compressão de um fluido

$$W_{1-2} = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_{s_1}^{s_2} \delta W$$

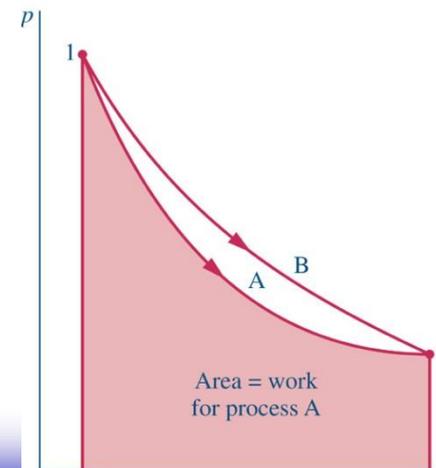
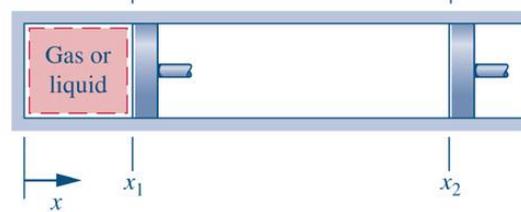
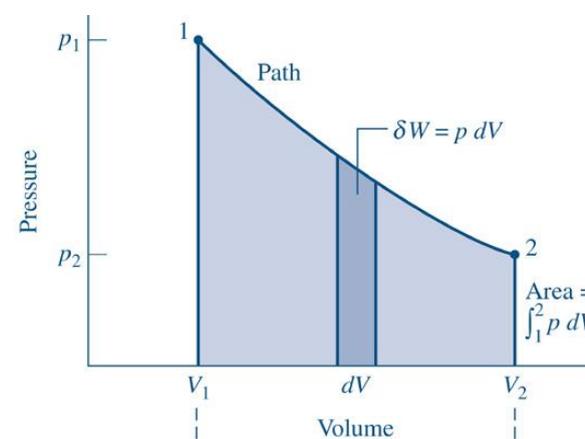
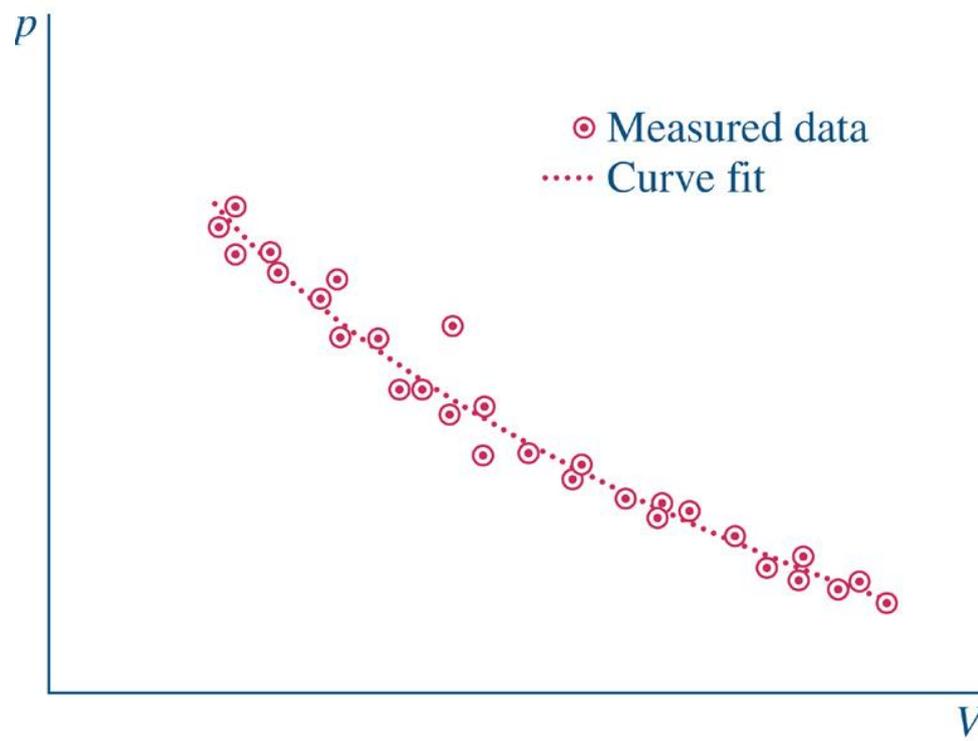
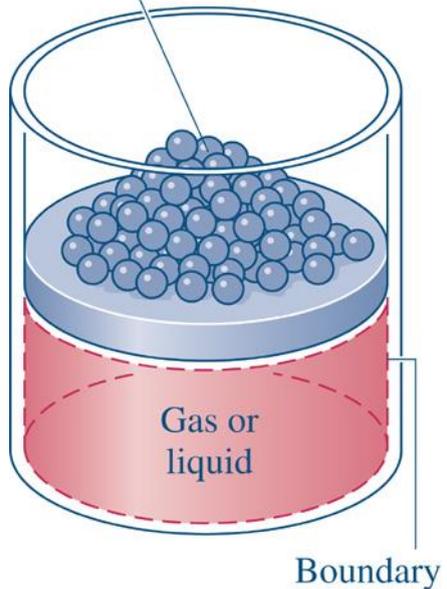
$$\delta W = pAdx = p dV$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$



# Trabalho de Expansão ou compressão em Processos de Quase Equilíbrio

Incremental masses removed during an expansion of the gas or liquid



# Processo politrópico

$$pV^n = cte$$

Exemplo 2.1 – Avalie o trabalho de expansão de um gás em um conjunto pistão-cilindro submetido a um *processo politrópico*.

$$p_1 = 500 \text{ kPa}$$

$$V_1 = 0,1 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0,5 \text{ m}^3$$

$$(a) n = 0$$

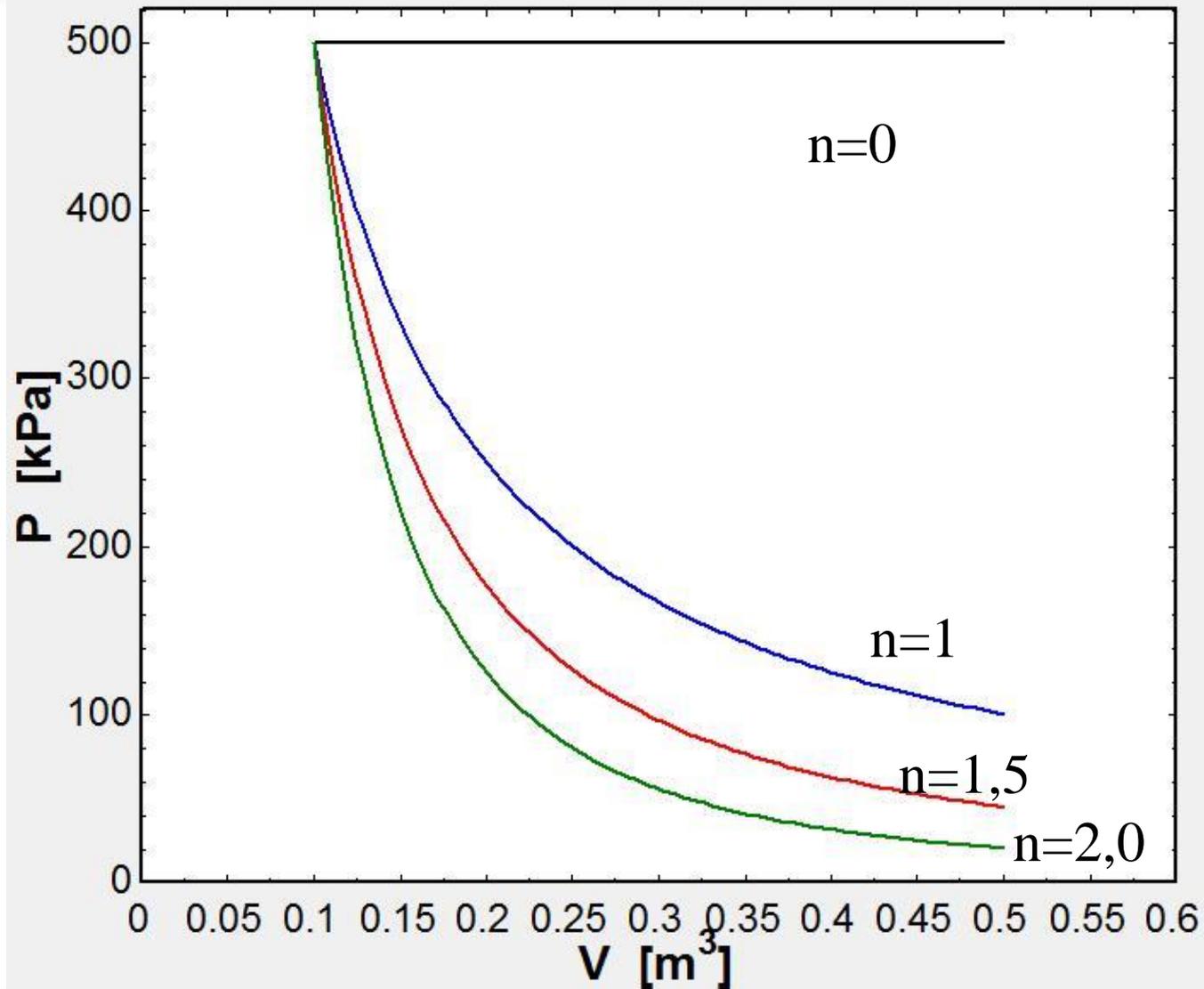
$$(b) n = 1$$

$$(c) n = 1,5$$

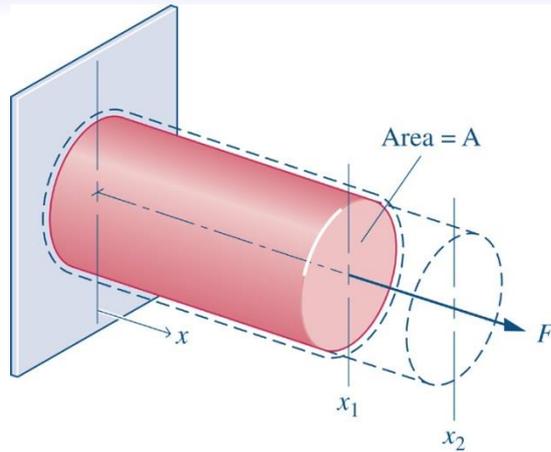
$$(d) n = 2$$

Calcular também  $p_2$  para cada caso.

- (a)  $W = +200 \text{ kJ}$
- (b)  $W = +80,47 \text{ kJ}$
- (c)  $W = +55,28 \text{ kJ}$
- (d)  $W = +40 \text{ kJ}$

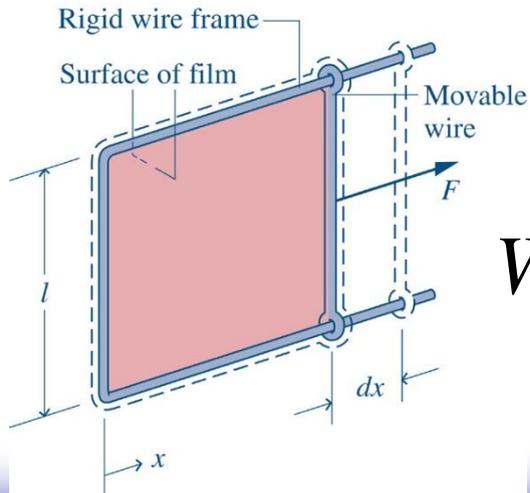
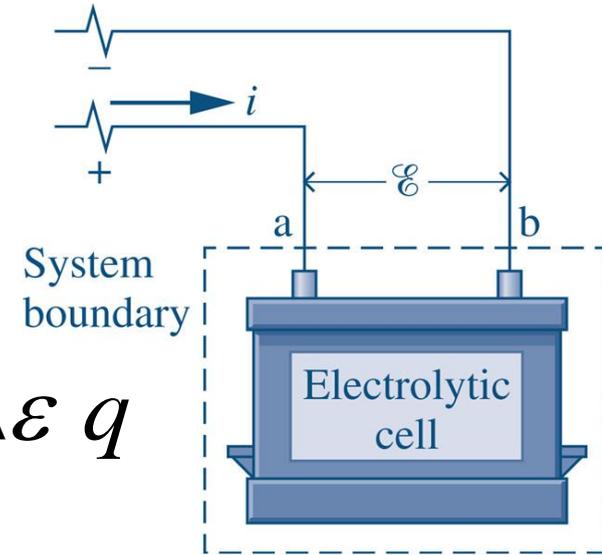


# Outros Trabalhos



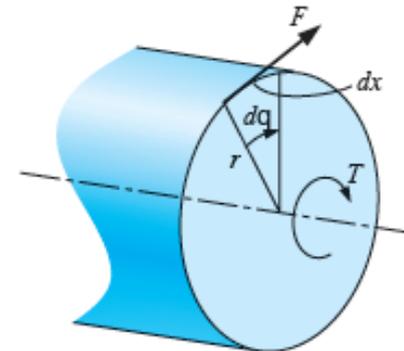
$$W = \int_{x_1}^{x_2} \sigma A dx$$

$$W = -\Delta \varepsilon q$$



$$W = \int_{A_1}^{A_2} \tau dA$$

$$\dot{W} = T\omega$$



# Calor

- Energia em transito devido unicamente à diferença de temperatura e que não está associado à transferência de massa

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{1-2} \quad [J]$$

- Processo adiabático

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{1-2} = 0$$

- Taxa de transferência de calor

$$\dot{Q}_{1-2} = \frac{\delta Q_{1-2}}{\delta t} \quad \left[ \frac{J}{s} \right] = [W]$$

# *Outras unidades de energia*

Quando queremos falar de **energia elétrica** utilizamos a unidade **quilowatt-hora, kWh**.



$$E = P \times t$$

Diagram illustrating the equation  $E = P \times t$  with arrows pointing to the units: kWh (for E), kW (for P), and h (for t).

*Quantos joules corresponde 1 quilowatt-hora?*

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW} \times 1 \text{ h}$$

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s}$$

$$\mathbf{1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J}}$$

# *Outras unidades de energia*

Quando queremos falar em **valores energéticos** de alimentos utilizamos a **caloria**.

<b>Sobremesa</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Caloria</b>
Gelado	2 bolas	199 cal
Gelatina	dose individual	97 cal
Leite Creme	dose individual	140 cal
Mousse Chocolate	dose individual	193 cal
Pudim Flan	dose individual	142 cal
Salada de Frutas	dose individual	98 cal
Tarte de Maçã	fatia média	112 cal

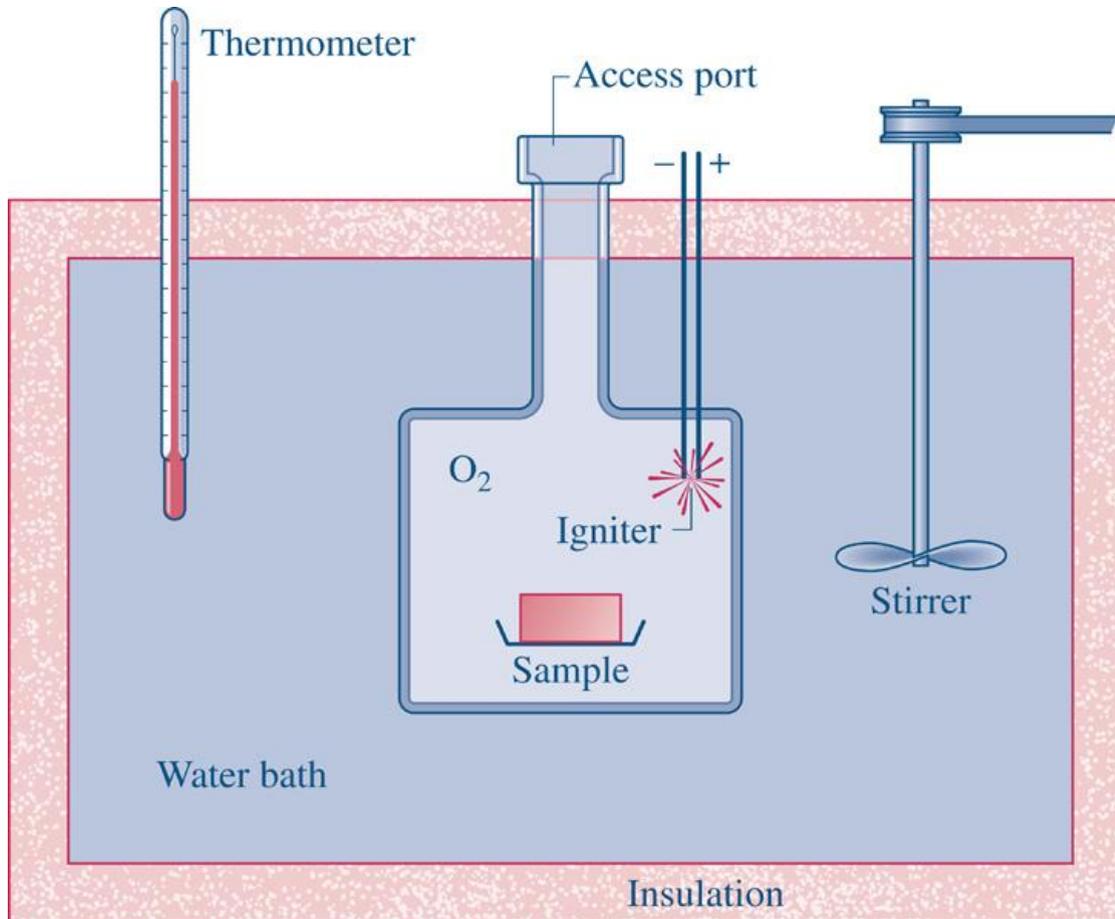
*A caloria relaciona-se com o Joule da seguinte forma:*

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 4 \text{ 180 J}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,18 \text{ kJ}$$

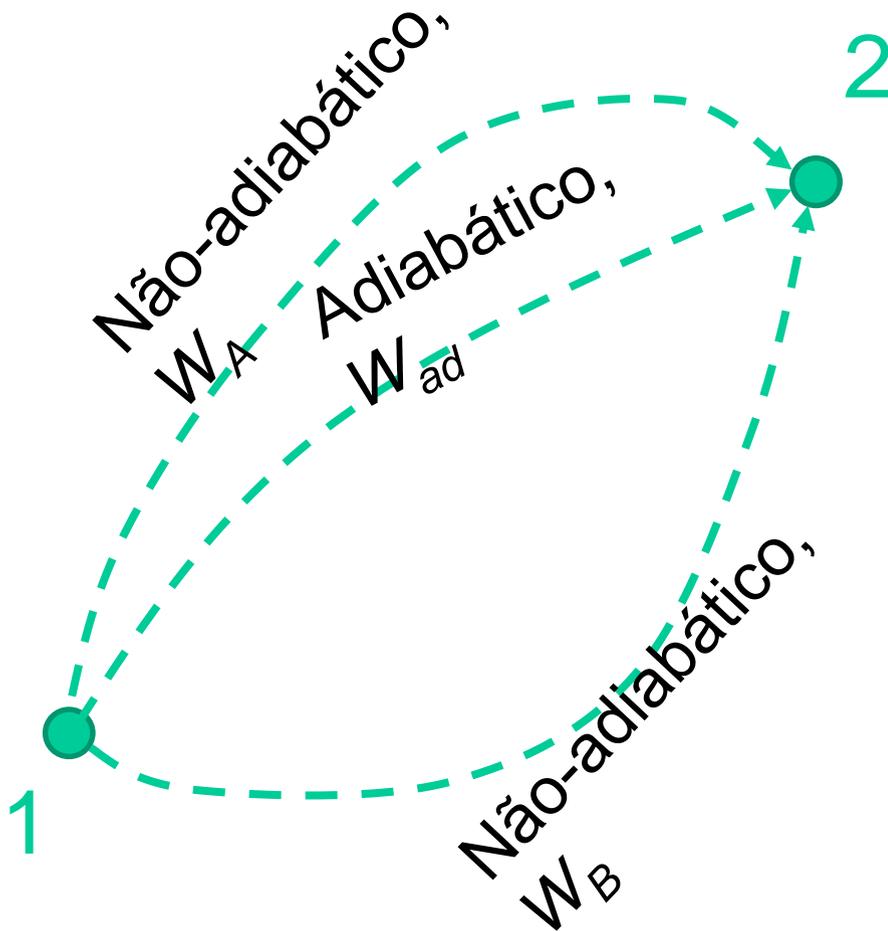
# *Calorímetro a volume constante*



$$Q = m c \Delta T$$

- Aquecer uma lata de refrigerante:
- $Q = m c \Delta T$
- $Q = 0,35 \text{ [kg]} 4200 \text{ [J/(kgK)] } 36 \text{ [K]}$
- $Q = 52,9 \text{ kJ} = 12,66 \text{ kcal}$
- Cerveja = 160 kcal
- Coca-cola = 137 kcal

# Primeira lei da termodinâmica

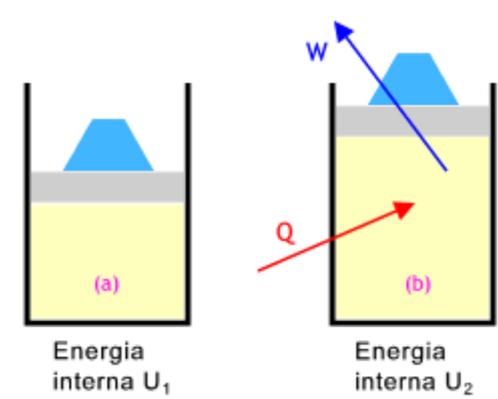


$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EPG = -W_{ad}$$

$$\Delta E = Q - W$$

- $Q > 0$  : calor transferido para o sistema.
- $Q < 0$  : calor transferido do sistema.

# Primeira Lei



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

$$U_2 - U_1 = Q - W \quad [J]$$

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad [W]$$

# Convenção de sinais



$Q > 0 (+)$  → transferência de calor *para* o sistema

$Q < 0 (-)$  → transferência de calor *do* sistema

# 1ª Lei



Julius Robert  
von Mayer  
(1845)

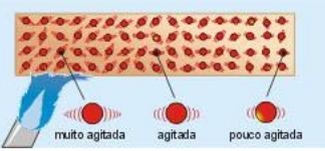
Médico que descreveu a oxidação do sangue como principal fonte de energia. Concluiu isto a partir da cor do sangue em climas frios e quentes.

Expulso por um ano e preso por um período por ter feito pichação de uma organização proibida.

Trabalho de Joule:  
1841-1843

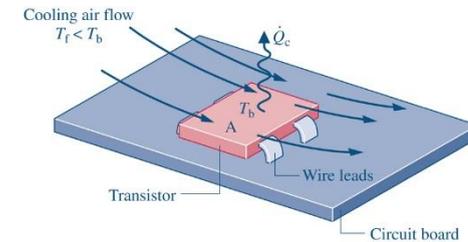
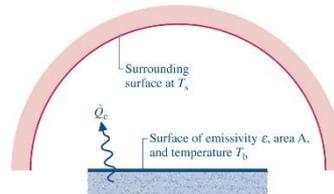
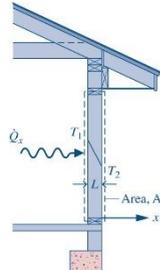


Em 1847 o físico alemão Hermann von Helmholtz (1821-1894) enunciou a Primeira Lei da Termodinâmica, que define que toda energia é conservada, nunca é criada ou destruída.



# Modos de transferência de Calor

Conduction through a solid or a stationary fluid	Convection from a surface to a moving fluid	Net radiation heat exchange between two surfaces

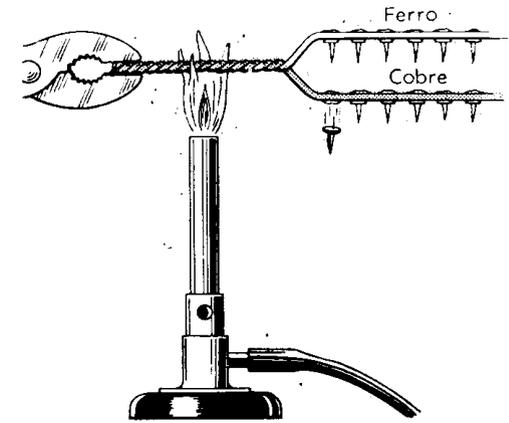


**Condução:** Calor transferido em um sólido ou em fluido estacionário (gás ou líquido) devido a agitação randômica de seus átomos /moléculas/ elétrons.

**Convecção:** Calor transferido devido ao efeito combinado da condução e o movimento macroscópico do meio (advecção).

**Radiação:** Energia emitida pela matéria proporcional a sua temperatura e provocada pela alterações de níveis dos elétrons, emitindo onda eletromagnéticas ou fótons. Não necessita um meio para que ocorra seu transporte.

# Condução



Forma Geral **lei de Fourier**:

$$q'' = -k \nabla T$$

Fluxo de calor  $\text{W/m}^2$     Condutividade térmica  $\text{W/m} \cdot \text{K}$     Gradiente de Temperatura  $\text{K/m}$

$$\dot{Q} = q'' \cdot A$$



Jean Baptiste Joseph Fourier, nasceu em 21 de março de 1768, e morreu em 16 de maio de 1830. Foi um matemático francês conhecido principalmente pela sua contribuição à análise matemática do fluxo de calor. Treinado para o sacerdócio, Fourier não fez os seus votos. Ao contrário, dirigiu-se em direção a matemática. Ele estudou primeiro (1794) e depois ensinou matemática na recentemente criada Escola Normal. Ele se uniu (1798) ao exército de Napoleão em sua invasão do Egito como conselheiro científico.

Ao longo de sua vida Fourier demonstrou o seu interesse em matemática e físicas matemáticas. Ele ficou famoso pela sua **Theorie analytique de la Chaleur** (1822), um tratamento matemático da teoria de calor. Ele estabeleceu a equação diferencial parcial administrando a difusão de calor e resolveu isto usando série infinita de funções trigonométricas. Embora estas série terem sido usadas antes, Fourier as investigou em detalhe muito maior.

<http://fisicomaluco.com/experimentos/jean-baptiste-joseph-fourier/>

THÉORIE  
ANALYTIQUE  
DE LA CHALEUR,  
PAR M. FOURIER.



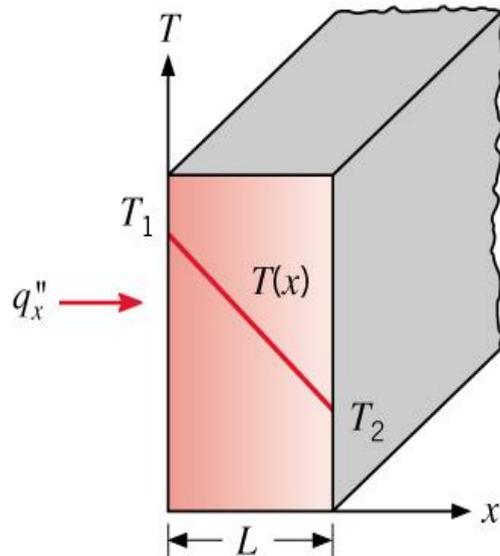
CHEZ FIRMIN DIDOT, PÈRE ET FILS,  
LIBRAIRES POUR LES MATHÉMATIQUES, L'ARCHITECTURE HYDRAULIQUE  
ET LA MÉCANIQUE, RUE JACOB, N° 54.

1822

lei de Fourier:

$$q'' = -k \nabla T$$

Aplicado a um problema unidimensional, regime permanente numa parede plana e com propriedades constantes:



$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$q_x'' = k \frac{T_1 - T_2}{L}$$

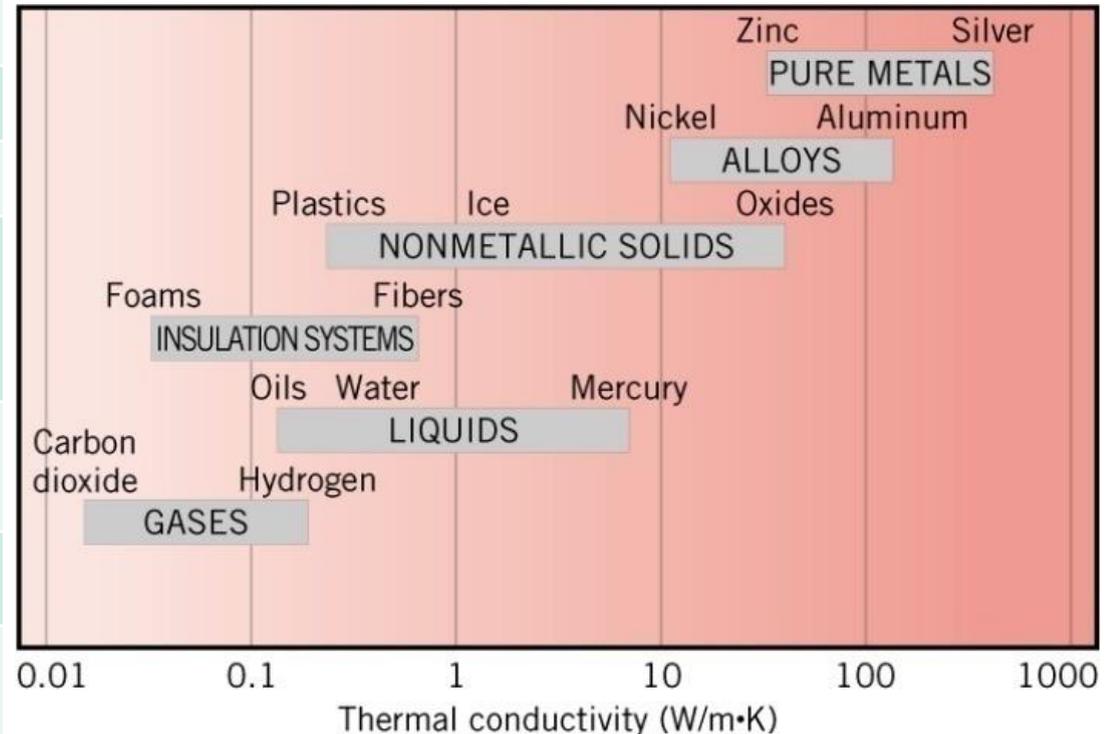
Taxa transferida de calor

$$\dot{Q} = q'' \cdot A \quad (\text{W})$$

# Propriedades Termofísicas

## Condutividade Térmica

material	k[W/(m.K)
Cobre Puro	401
Alumínio Puro	237
Aço Carbono	~50
Ouro	317
Prata	429
Diamante	2300
Grafite	1950 ⊥ 5,7
Argamassa de cimento	0,72
Fibra de vidro	0,063
Ar parado	0,00934



# Micro e Nanoescala

- Condução pode ser tratada como um transporte de energia (**electrons ou phonon**).

- Para um sólido:

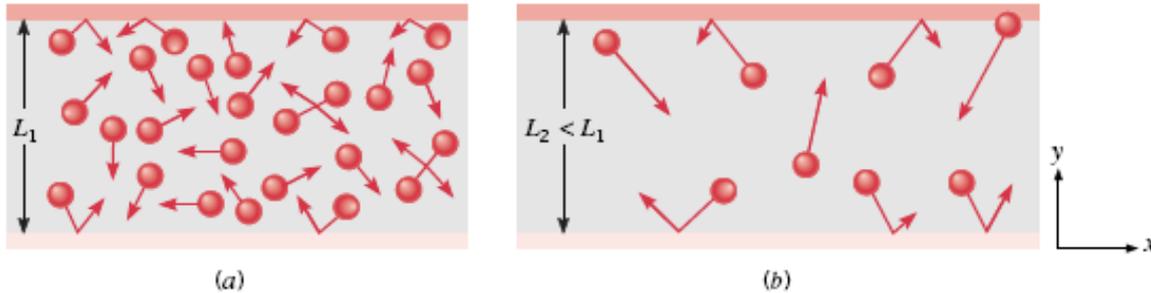
$$k = \frac{1}{3} C \bar{c} \lambda_{mfp} \quad (2.7)$$

Energia transportada por unidade de volume

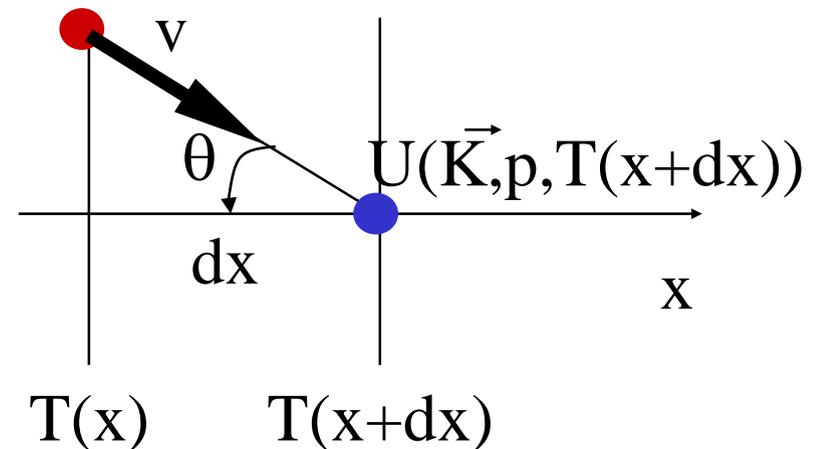
Livre caminho médio – distância média percorrida no transporte da energia antes da colisão

Velocidade do transporte.

- Os pacotes de energia colidem também com as fronteiras, afetando a propagação.



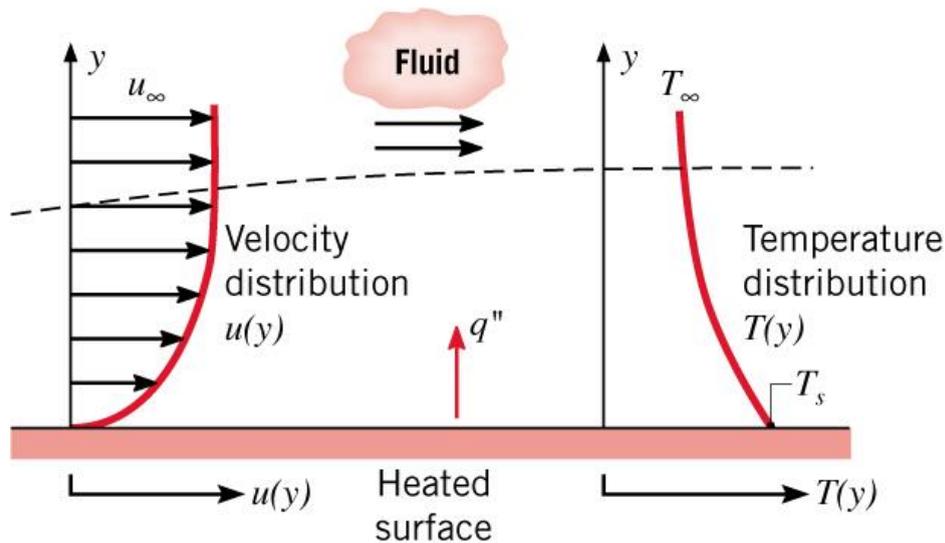
**FIGURE 2.6** Electron or phonon trajectories in (a) a relatively thick film and (b) a relatively thin film with boundary effects.



$$k_x(K, p) = C(K, p) v^2(K, p) \tau(K, p) \cos^2(\theta_{K,x})$$

# Convecção

Calor transferido devido ao efeito combinado da condução e o movimento macroscópico do meio (advecção).



Isaac Newton nasceu em Londres, no ano de 1643, e viveu até o ano de 1727. Cientista, químico, físico, mecânico e matemático, trabalhou junto com Leibniz na elaboração do cálculo infinitesimal. Durante sua trajetória, ele descobriu várias leis da física, entre elas, a lei da gravidade.

**Lei de Newton do resfriamento:**

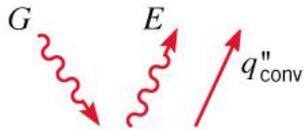
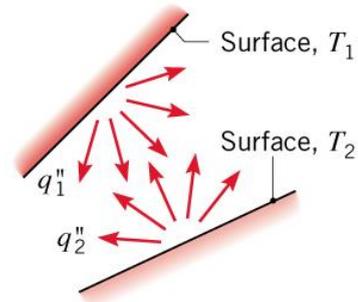
$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty)$$

$h$ : Coeficiente de convecção local ou coeficiente de película ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

## Typical Values of the Convection Heat Transfer Coefficient

Applications	$h$ ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )	$h$ ( $\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{R}$ )
Free convection		
Gases	2–25	0.35–4.4
Liquids	50–1000	8.8–180
Forced convection		
Gases	25–250	4.4–44
Liquids	50–20,000	8.8–3500

Net radiation heat exchange between two surfaces



Surface of emissivity  $\varepsilon$ , absorptivity  $\alpha$ , and temperature  $T_s$

# Radiação

A transferência de calor por radiação depende do poder Emissivo da superfície ( $E$ ), bem como da radiação incidente na superfície (Irradiação –  $G$ )

## Energia emitida:

Poder Emissivo:  $\dot{Q} = \varepsilon E_h = \varepsilon \sigma T_s^4$  [ $W / m^2$ ]

$\varepsilon$ : Emissividade ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ )

Poder emissivo de um corpo negro (emissor perfeito)

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann constant ( $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ )

## Energia absorvida - Irradiação:

$$G_{\text{abs}} = \alpha G$$

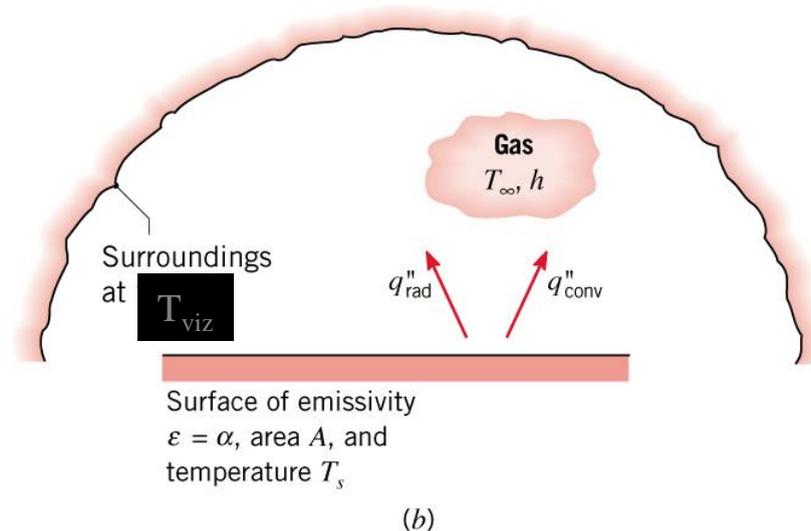
$G_{\text{abs}}$ : Radiação incidente absorvida ( $W / m^2$ )

$\alpha$ : Absortividade da superfície ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$G$ : Irradiação ( $W / m^2$ )

# Radiação

Caso especial: uma superfície pequena envolvida por uma vizinhança muito maior com temperatura uniforme.



$$G = \sigma T_{viz}^4$$

$$G_{abs} = \alpha G = \alpha \sigma T_{viz}^4$$

$$E = \epsilon \sigma T_s^4$$

$$q''_{rad} = \pm(E - G_{abs}) = \pm(\epsilon \sigma T_s^4 - \alpha \sigma T_{viz}^4)$$

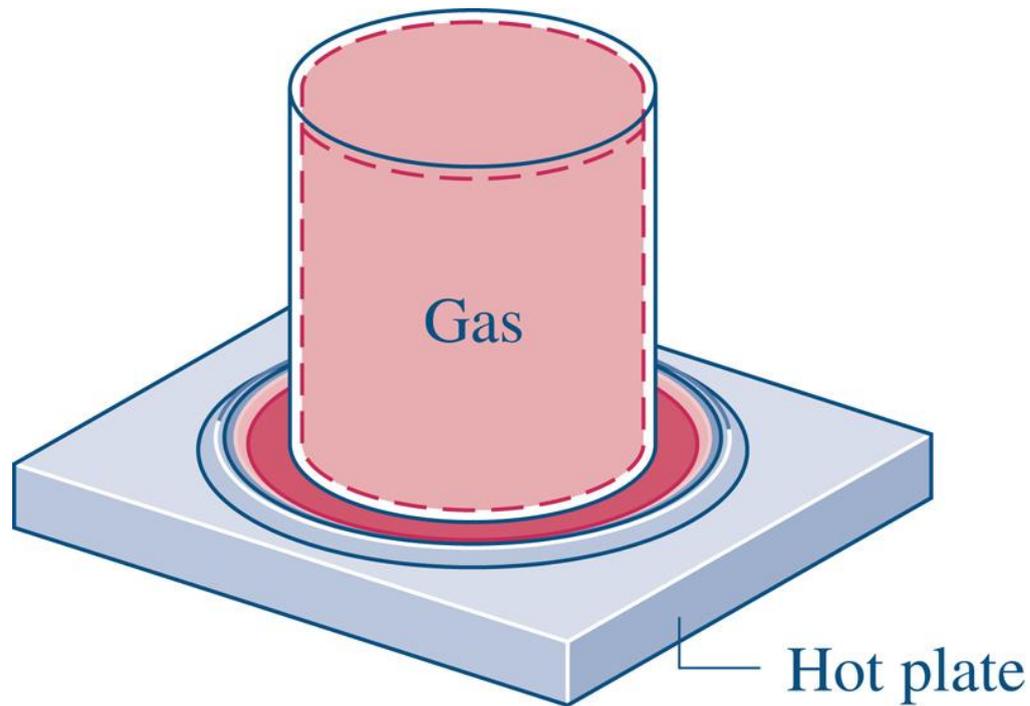
Lei de Kirchhoff:  $\alpha = \epsilon$ , logo

$$q''_{rad} = \pm \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4)$$



**Gustav Robert Kirchhoff** (1824, 1887) foi um físico alemão, com contribuições científicas principalmente no campo dos circuitos elétricos, na espectroscopia, na emissão de radiação dos corpos negros e na teoria da elasticidade (modelo de placas de Kirchhoff). Kirchhoff propôs o nome de "radiação do corpo negro" em 1862. É o autor de duas leis fundamentais da teoria clássica dos circuitos elétricos e da emissão térmica.

# 1ª Lei da Termodinâmica



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

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

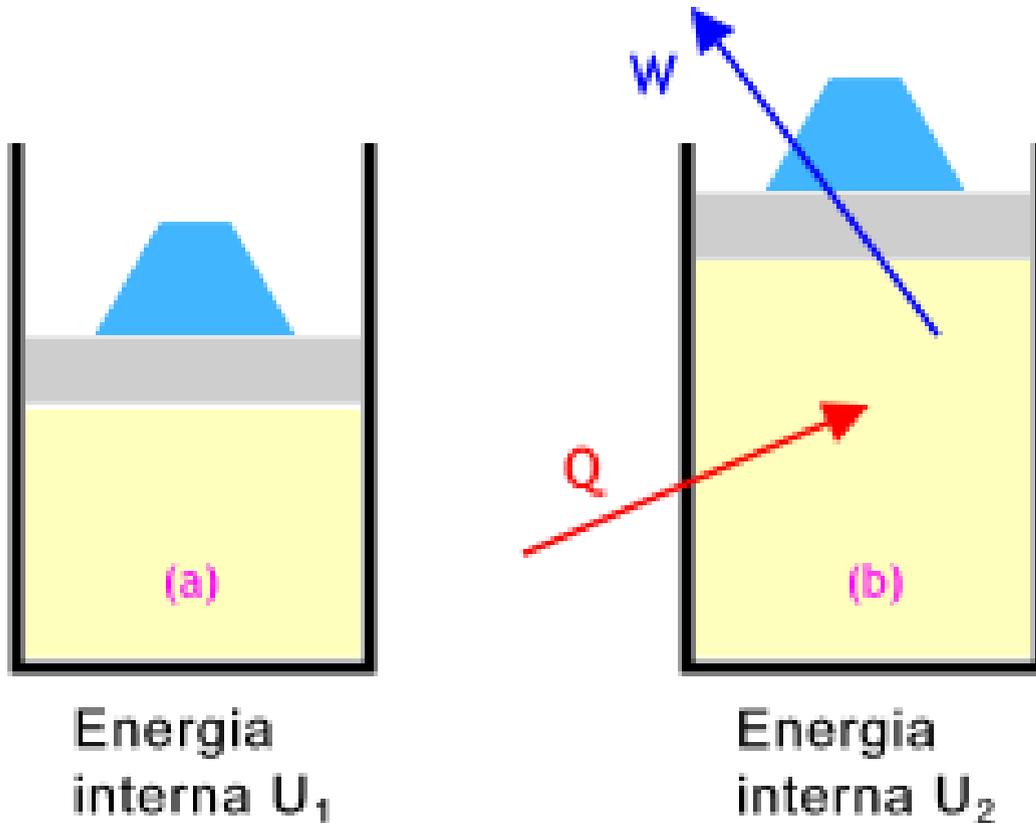
$$U_2 - U_1 = Q_{12} - W_{12}$$

(*processo isocórico*  $\equiv$  *isovolumétrico*)

$$V_2 - V_1 = 0; \quad W_{12} = 0$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12}$$

# Primeira Lei da Termodinâmica

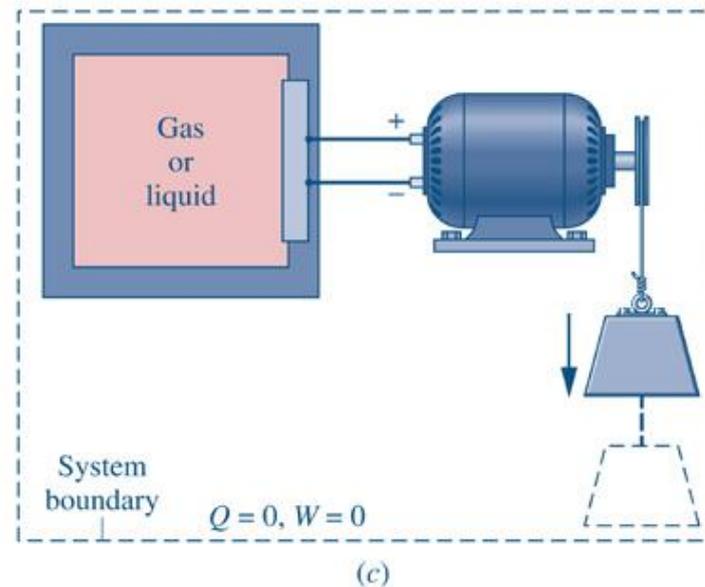
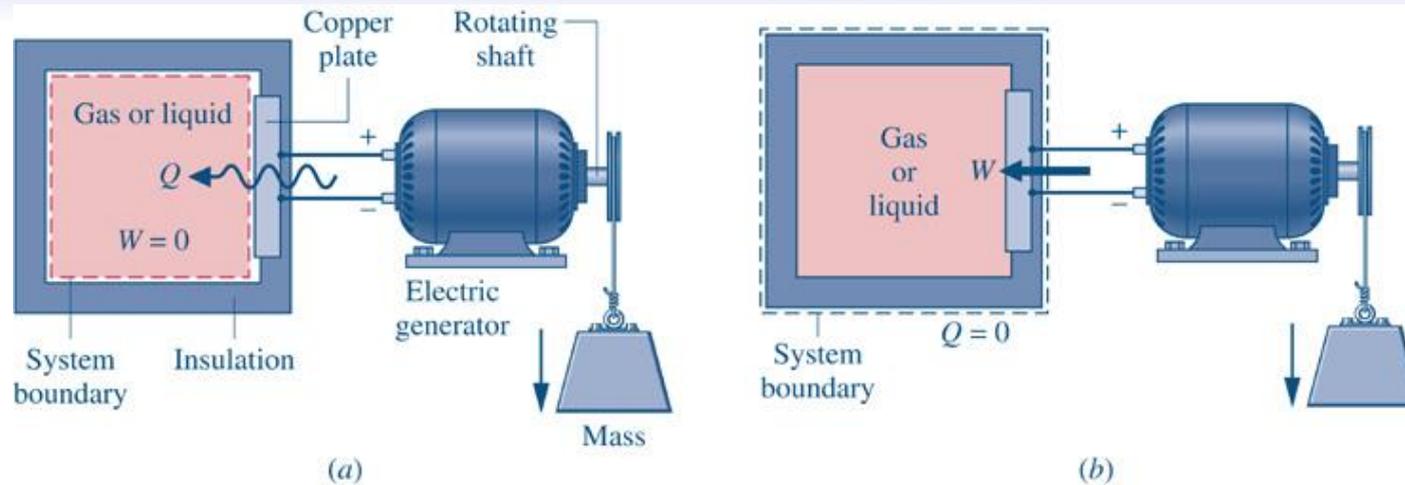


$$dU = \delta Q - \delta W$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12} - W_{12}$$

$$V_2 - V_1 \neq 0; \quad W_{12} \neq 0$$

# Exemplo de sistemas alternativos

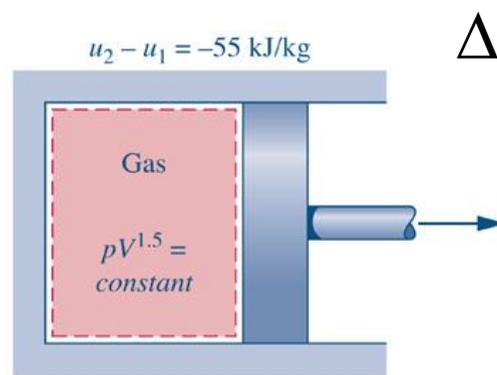
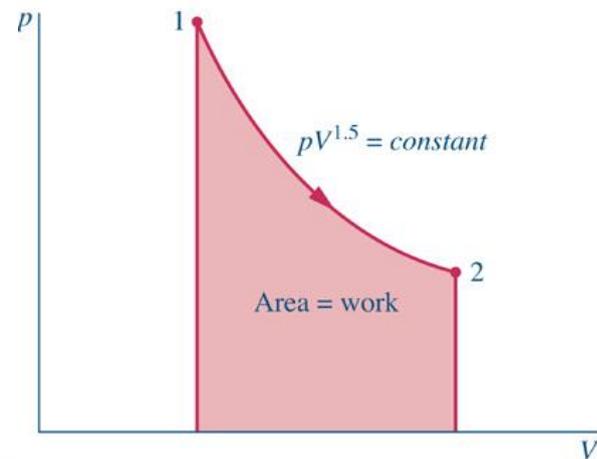


## Exemplo 2.2: Balanço de energia em sistemas fechados

Um conjunto cilindro-pistão contém 0,4 kg de um certo gás. O gás está sujeito a um processo no qual a relação pressão-volume é

$$pV^{1,5} = \text{constante}$$

A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de  $0,1 \text{ m}^3$  e o volume final de  $0,2 \text{ m}^3$ . A variação de energia específica é  $u_2 - u_1 = -55 \text{ kJ/kg}$ . Não há variação significativa de energia cinética ou potencial. Determine a transferência de calor líquida no processo em  $\text{kJ}$ .

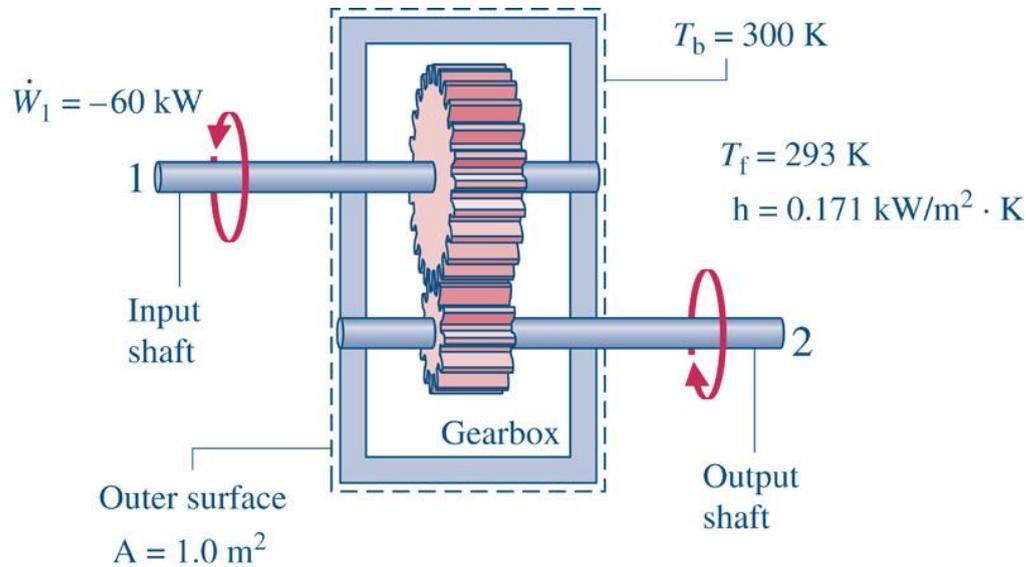


$$\Delta E = \Delta EC + \Delta EPG + \Delta U = Q_{12} - W_{12}$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12} - W_{12}$$

$$Q_{12} = m(u_2 - u_1) + W_{12}$$

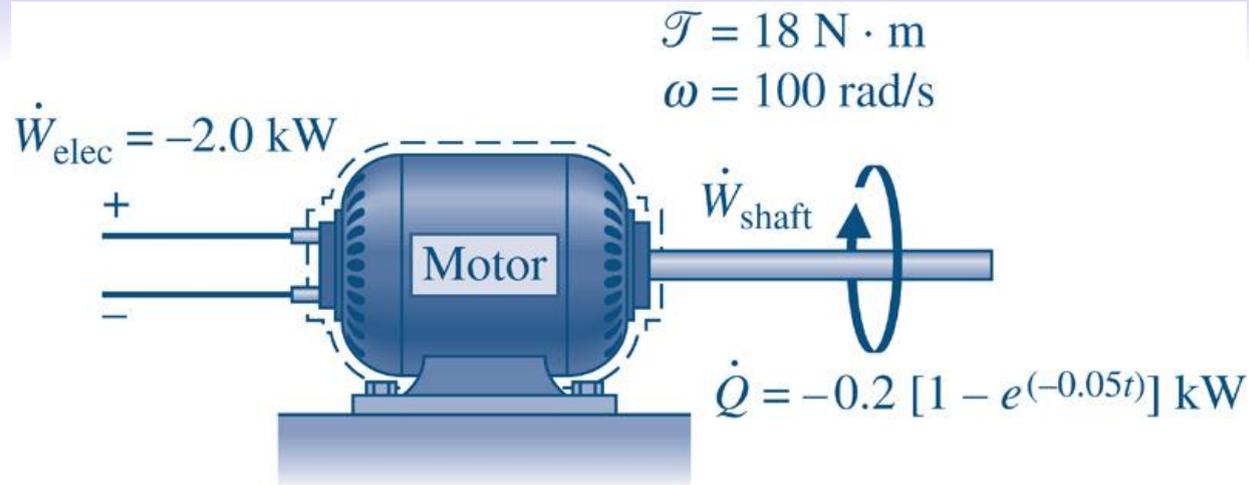
# Exemplo 2.4: Considerando a taxa de transferência de calor pela fronteira em Regime Permanente



$$\dot{Q} = hA(T_S - T_\infty)$$

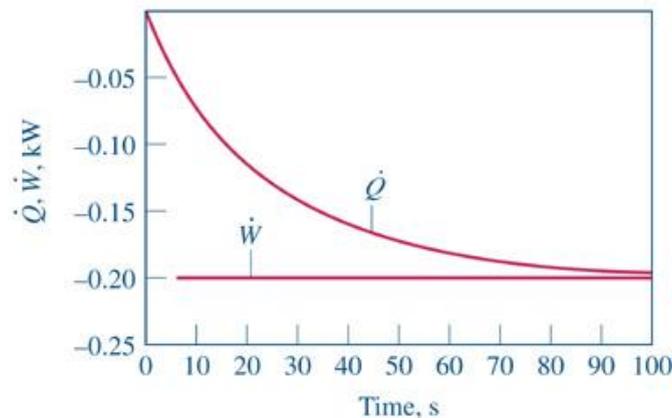
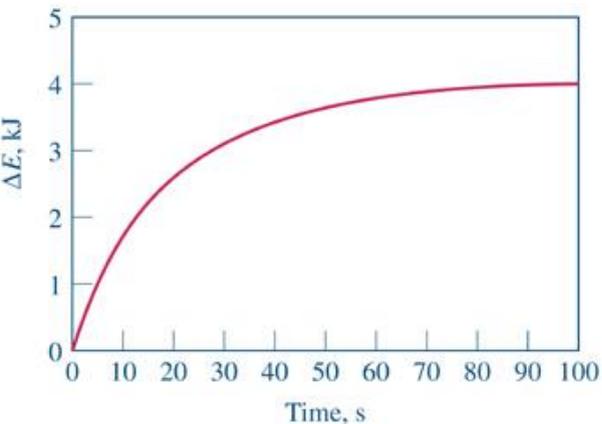
$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

## Exemplo 2.6: Regime Transiente

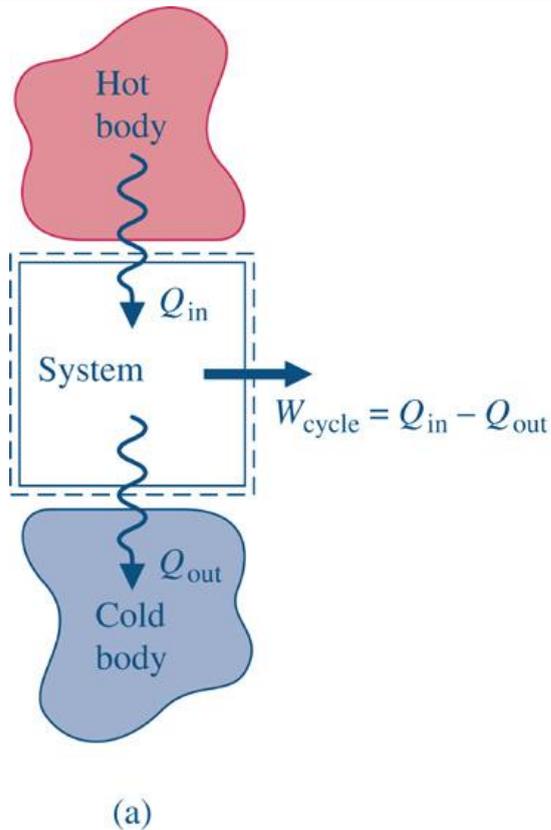


Representar  $\dot{Q}$  e  $\dot{W}$  em [kW] e  $\Delta E$  em [kJ] graficamente para o intervalo de tempo entre  $t=0\text{s}$  a  $t=120\text{s}$

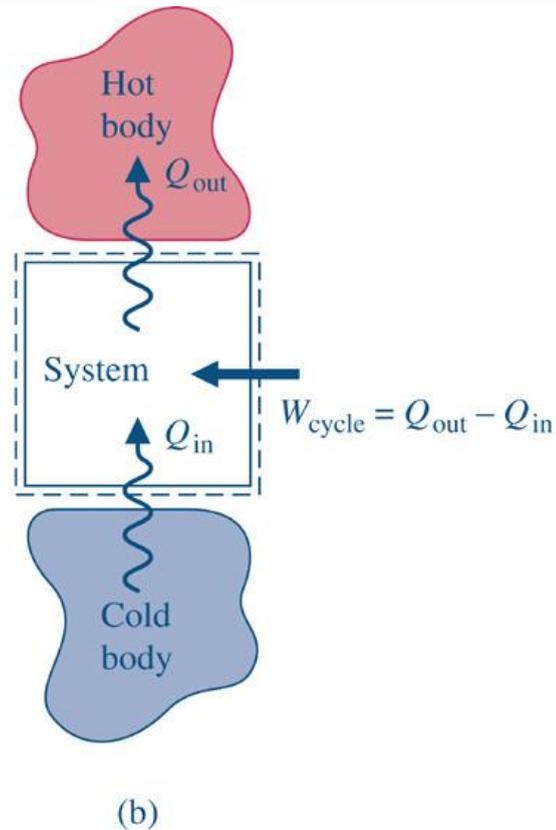
$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$



# Análise de ciclos termodinâmicos



Ciclo de  
Potência



Ciclo de  
Refrigeração

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Integrando em  
um ciclo

$$\Delta E_{ciclo} = Q_{ciclo} - W_{ciclo} \quad [J]$$

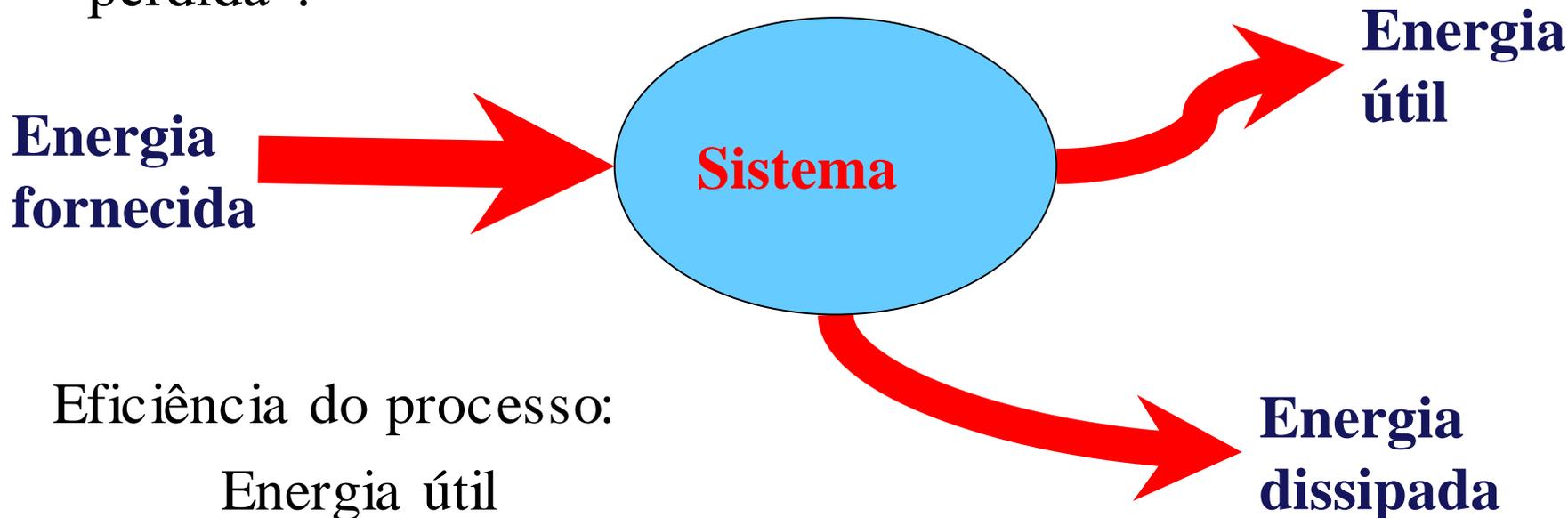
em um ciclo  $\Delta E_{ciclo} = 0$

$$Q_{ciclo} = W_{ciclo}$$

# *Será que alguma energia se perde ao ser transferida de um sistema para outro?*

Num diagrama de energia devemos representar a:

- ✓ **Energia útil** que é a energia que durante a transferência é realmente utilizada.
- ✓ **Energia dissipada** que é a energia que durante a transferência é “perdida”.



Eficiência do processo:

$$\eta = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia fornecida}}$$

# *Princípio da Conservação da Energia*

Podemos concluir que numa transferência de energia:

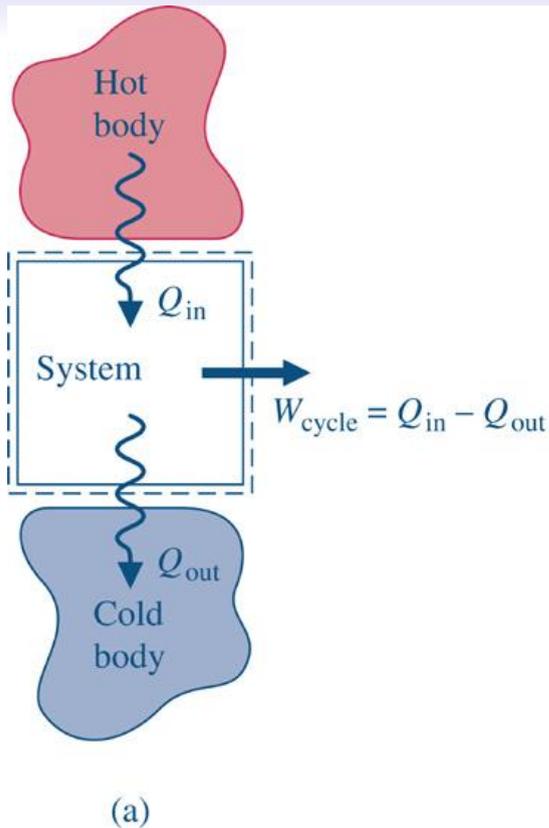
$$E_{fornecida} = E_{útil} + E_{dissipada}$$

Esta expressão traduz o **Princípio da Conservação de Energia**:

“a quantidade de energia que temos no final de um processo é sempre igual à quantidade de energia que temos no início desse mesmo processo”.

**Ou seja, a energia não se cria nem se destrói; apenas se transfere. A energia total do Universo é sempre constante.**

# Ciclo de Potência



$$W_{ciclo} = Q_{ciclo} = Q_{entra} - Q_{sai}$$

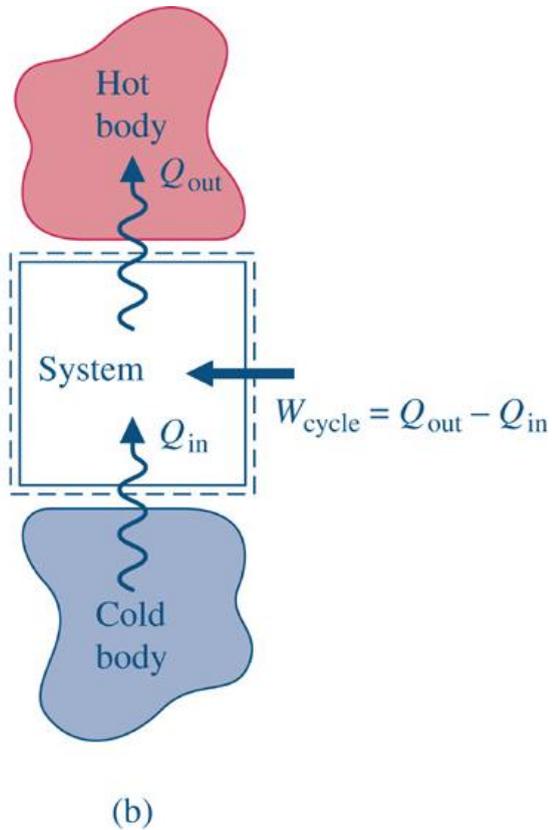
Eficiência Térmica:

$$\eta = \frac{Q_{ciclo}}{Q_{entra}}$$

$$\eta = \frac{Q_{entra} - Q_{sai}}{Q_{entra}} = 1 - \frac{Q_{sai}}{Q_{entra}}$$

$$\eta < 100\%$$

# Ciclo de Refrigeração



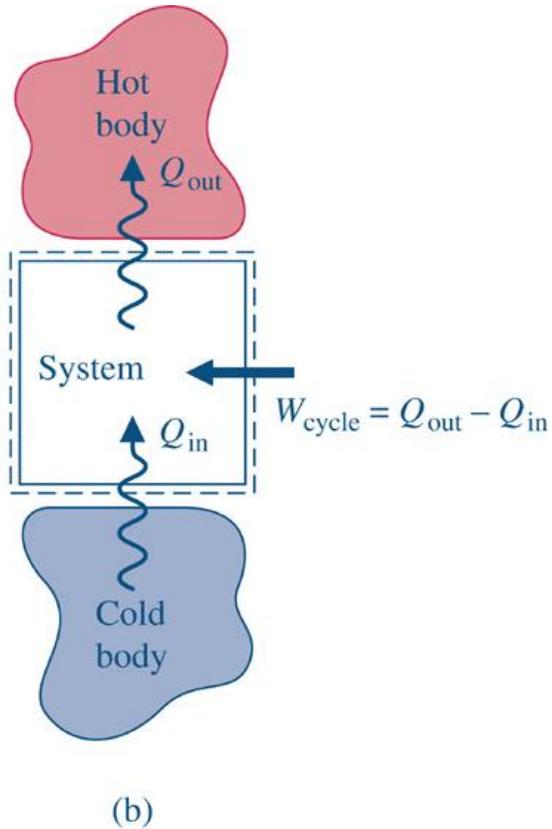
$$W_{ciclo} = Q_{ciclo} = Q_{sai} - Q_{entra}$$

Coeficiente de desempenho,  $\beta$ :

$$\beta = \frac{Q_{entra}}{W_{ciclo}}$$

$$\beta = \frac{Q_{entra}}{Q_{entra} - Q_{sai}}$$

# Bomba de Calor



$$W_{ciclo} = Q_{ciclo} = Q_{sai} - Q_{entra}$$

Coeficiente de desempenho,  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{Q_{sai}}{W_{ciclo}}$$

$$\gamma = \frac{Q_{sai}}{Q_{entra} - Q_{sai}} > 1$$