



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
*Campus São Paulo*

***Motores Térmicos***

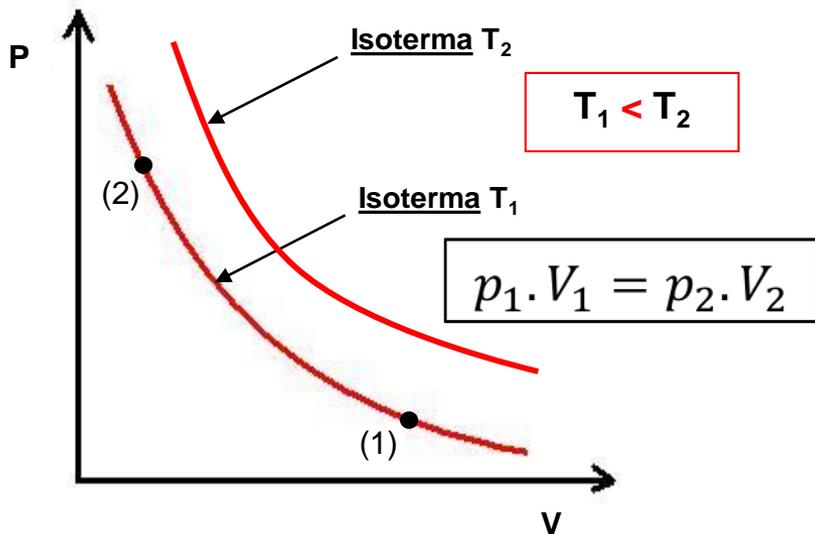
**e**

***Máquinas Frigoríficas***

*1º FIS EMI*

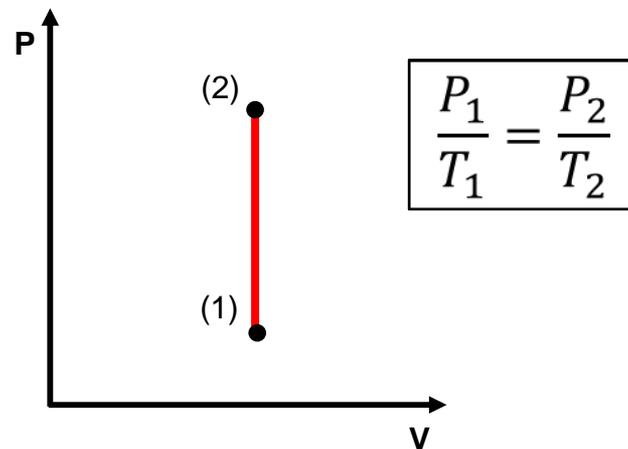
*André Cipoli*

### Transformação Isotérmica

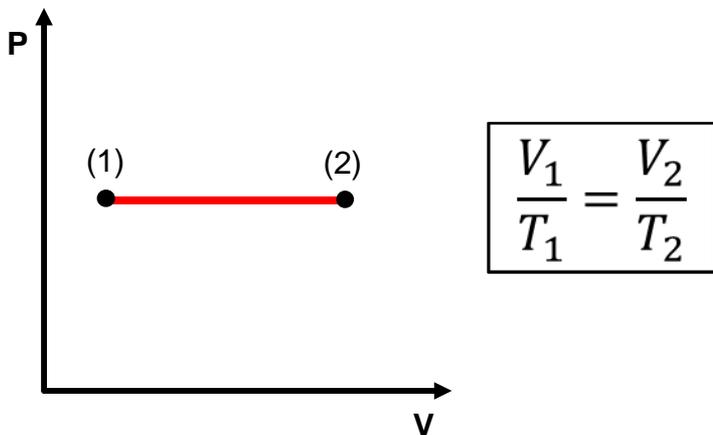


### Transformação Isométrica

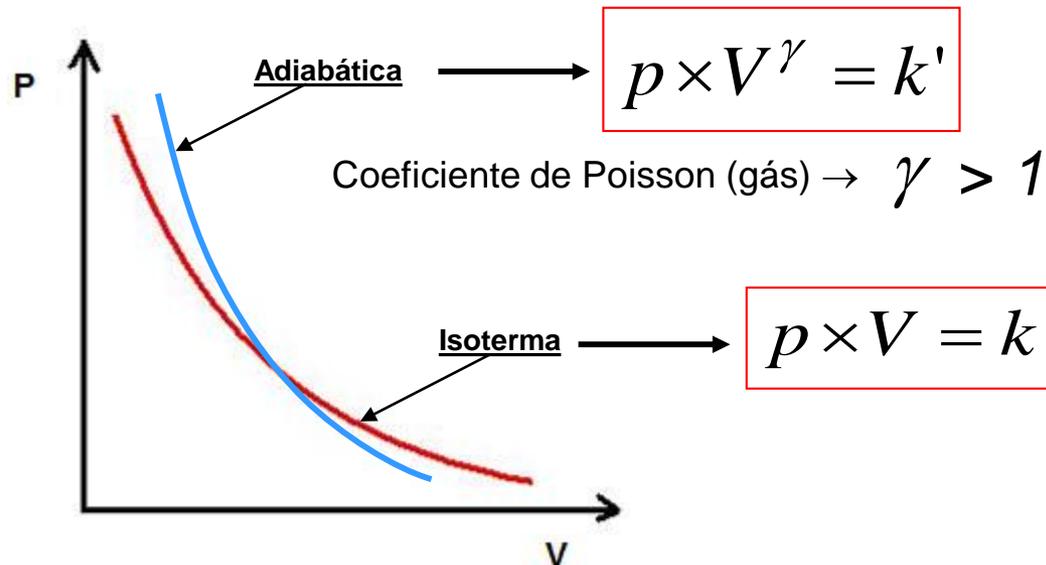
ou isovolumétrica ou isocórica



### Transformação Isobárica

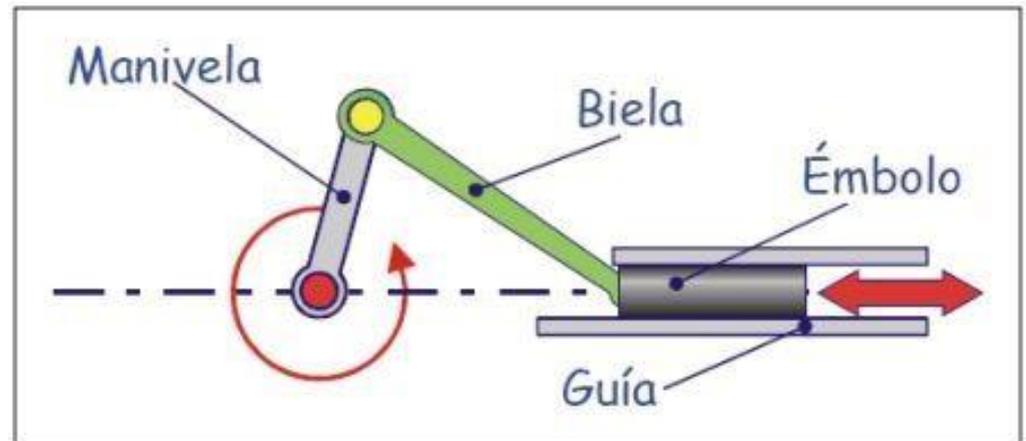
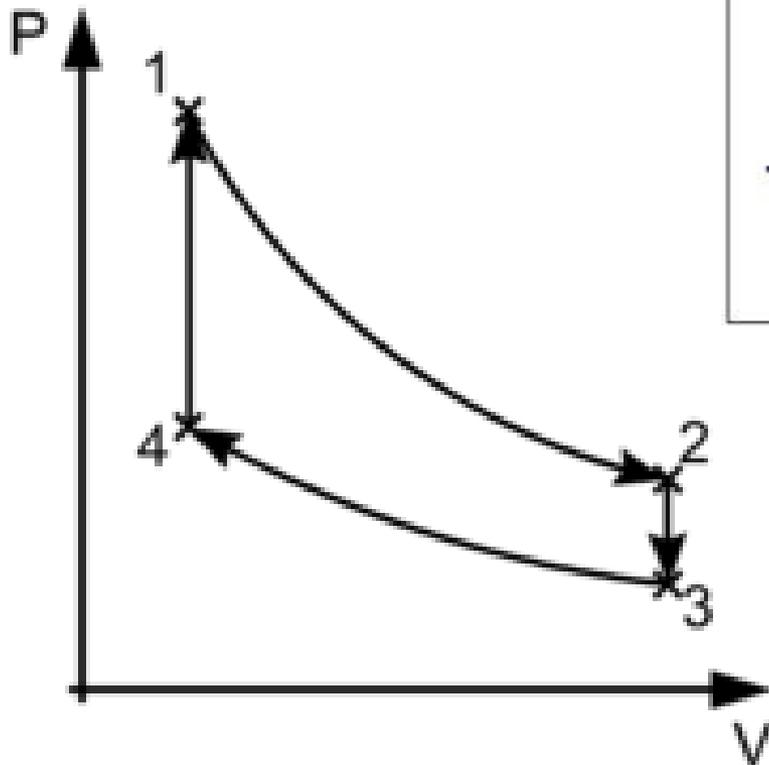


### Transformação Adiabática → Q = 0



# **CICLO TERMODINÂMICO**

Um **ciclo termodinâmico** é uma série de processos termodinâmicos que devolve um sistema ao seu estado inicial. As propriedades dependem apenas do estado termodinâmico e, portanto, não mudam ao longo de um ciclo.



## Algumas teorias sobre o Calor !!!



Johann Joachim Becher

1635 - 1682

~ 1667



Georg Ernst Stahl

1659 - 1734

~ 1703



Antoine Laurent de Lavoisier

1743 - 1794

~ 1783

**Flogístico** (inflamado ou queimado)

*“essência que podia fluir entre materiais”*

*“perda de massa na combustão de um material”  
(por perda de flogisto)*

*“impossibilidade de um combustível arder sem a presença de ar”  
(porque o ar é necessário para absorver o flogisto libertado)*

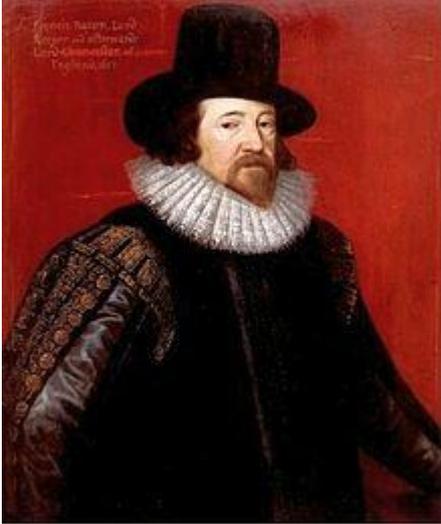
**Calórico**

*“fluido invisível, sem peso e inodoro”*

*“todos os corpos conteriam em quantidades  
determinadas em sua composição”*

*” ↑ T, ↑ calórico”*

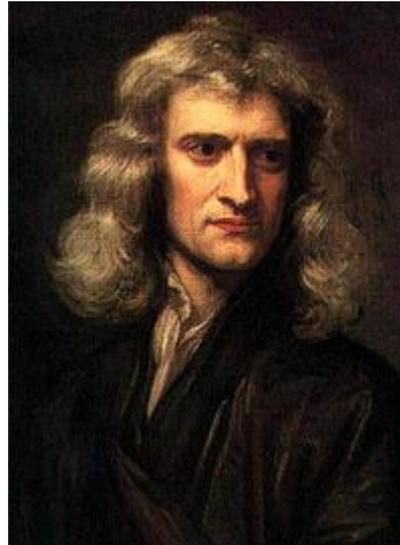
## Uma teoria mecânica ...



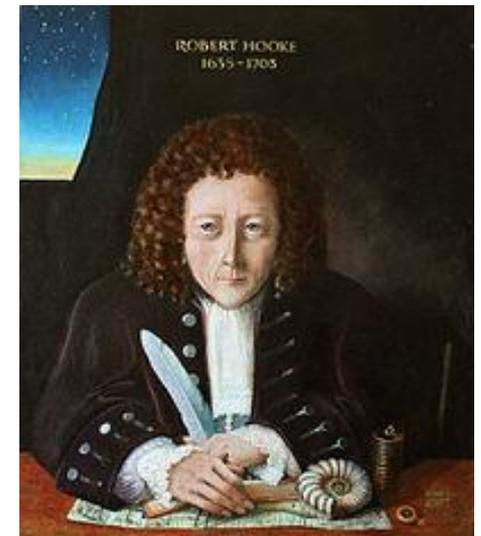
Francis Bacon  
1561 - 1626

“Calor nada mais é do que movimento de partículas.”

*Outros defensores:*



Isaac Newton  
1643 - 1727



Robert Hooke  
1635 - 1703

# Histórico



Heron de Alexandria  
10 - 70 d.C.



Denis Papin  
1647 - 1712  
**1679**



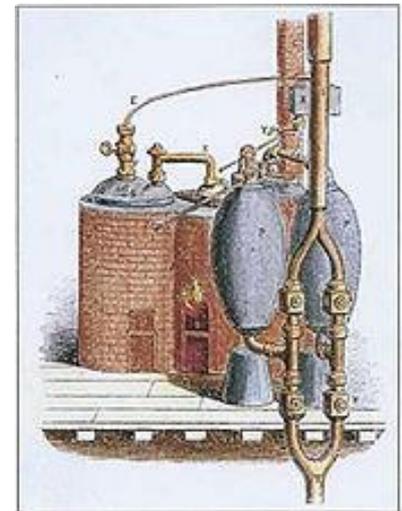
Thomas Savery  
1650 - 1715



Eliolípila



Panela de pressão  
Final do séc. XIX

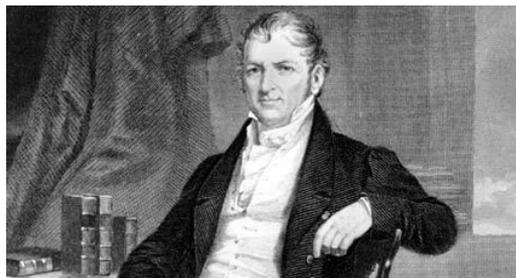


Motor de Savery  
**1698**

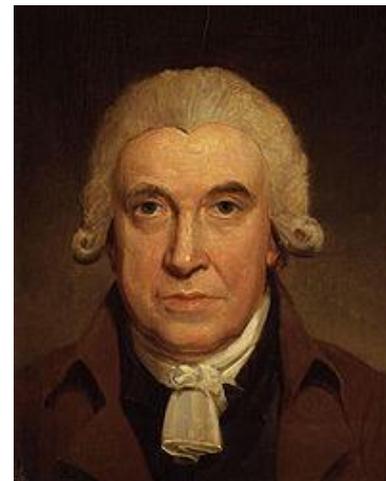
# Histórico



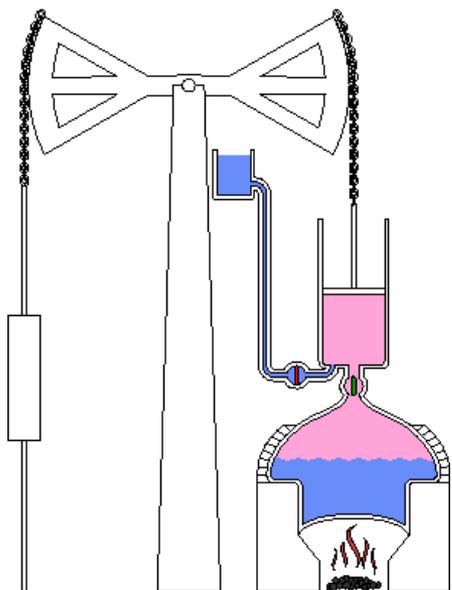
Thomas Newcomen  
1662 - 1729



Nicolas-Joseph Cugnot  
1725 - 1804



James Watt  
1736 - 1819



1712



Fardier à vapeur

1769

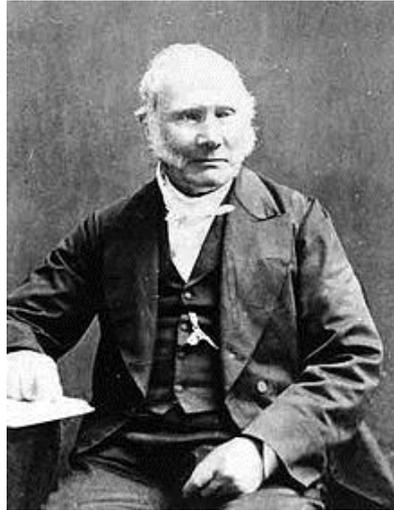


1769

# Histórico



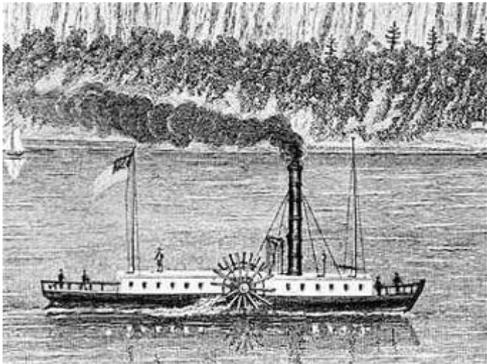
Robert Fulton  
1765 - 1815



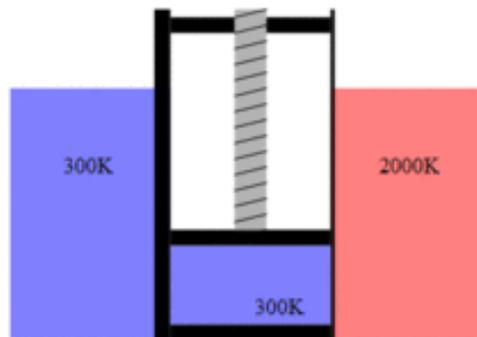
Robert Stirling  
1790 - 1878



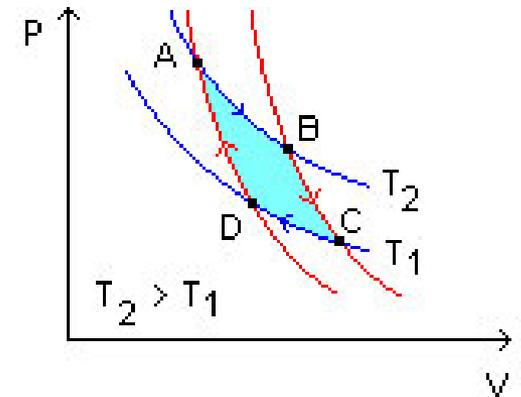
N. L. Sadi Carnot  
1796 - 1832  
**1824**



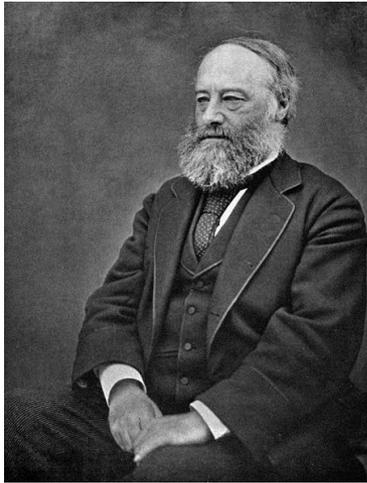
Clermont  
**1807**



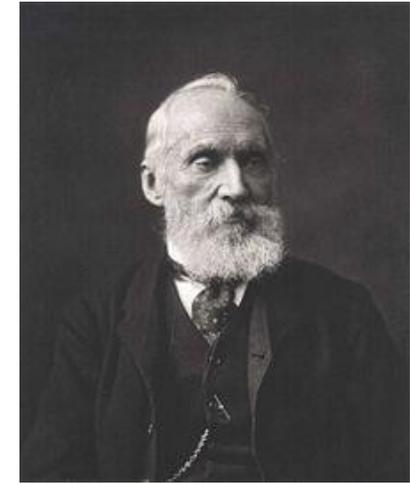
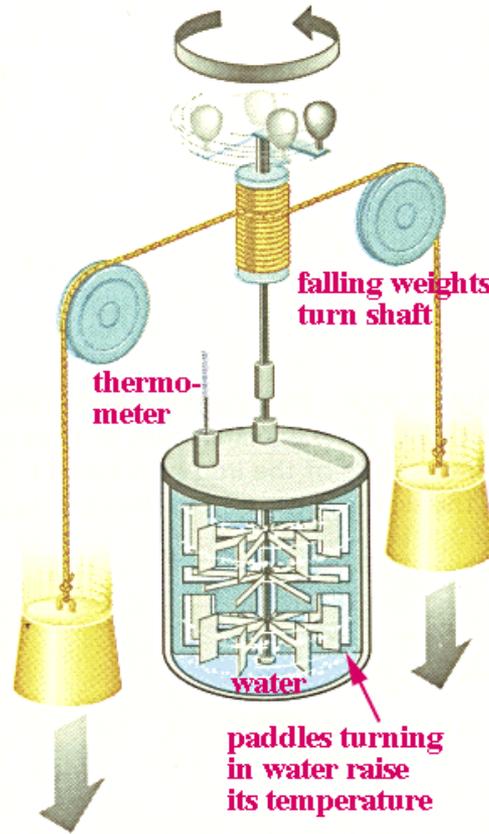
**1816**



# Determinação experimental do equivalente **meccânico** do calor



James P. Joule  
1818 - 1889  
**1845**

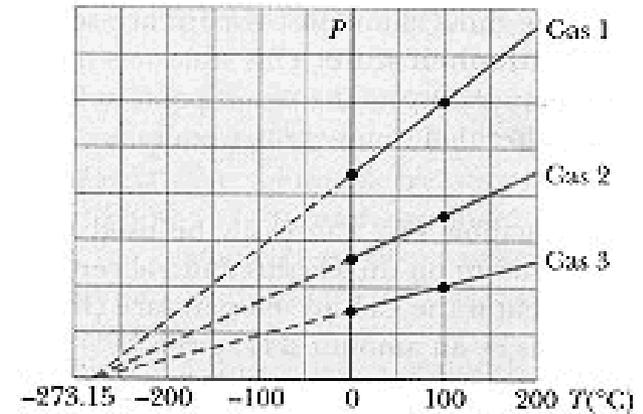


William Thomson  
1824 - 1907  
**"Lord Kelvin"**

*Equivalente mecânico do calor*

**1 caloria  $\approx$  4,159 J**  
**(1850)**

**1 caloria  $\rightarrow$  4,17 a 4,22 J**  
**(atual)**



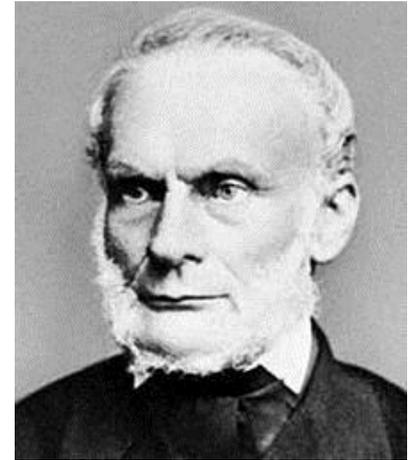
# Histórico



Julius R. Mayer  
1814 - 1878  
~ 1841



Hermann L. F. von Helmholtz  
1821 - 1894  
1847



Rudolf J. E. Clausius  
1822 - 1888  
1850

## 1ª Lei da Termodinâmica

$$\Delta U = Q - W$$

$U \rightarrow$  *Energia Interna*  $\rightarrow U = f(T)$

- Cinética de translação
- Cinética de rotação
- Vibracional (*Potencial + Cinética*)

# 1ª Lei da Termodinâmica

ou Lei de Conservação da Energia

$$\Delta U = Q - W \quad \text{para uma transformação.}$$

$$U_f - U_i = Q - W$$

onde

$U_f \rightarrow$  **Energia interna final da substância**

$U_i \rightarrow$  **Energia interna inicial da substância**

$Q \rightarrow$  **calor cedido ao meio exterior (< 0)**

$Q \rightarrow$  **calor recebido do meio exterior (> 0)**

$W \rightarrow$  **trabalho recebido do meio exterior (< 0)**

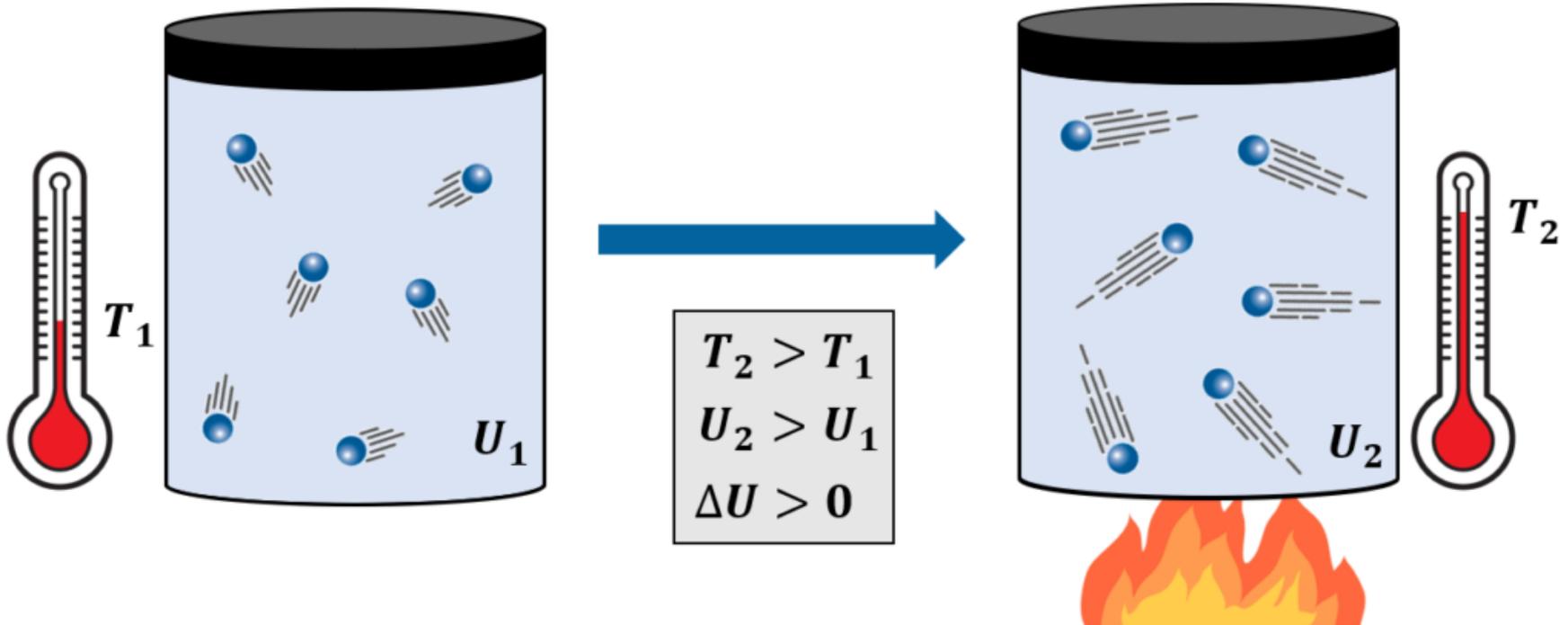
$W \rightarrow$  **trabalho fornecido ao meio exterior (> 0)**

# Energia Interna

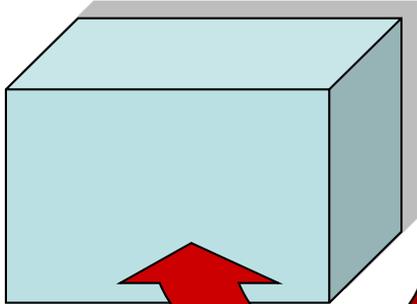
É a energia associada ao grau de agitação térmica da partícula (átomo ou molécula).

Tem relação direta com a **Temperatura absoluta** do sistema, expressando suas energias cinética e potencial (translação, rotação e/ou vibração).

$$U = f(T)$$

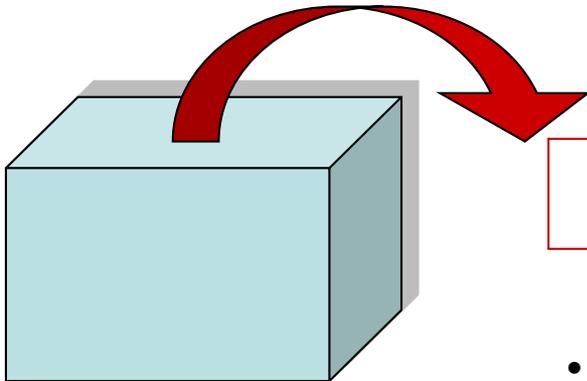


# Troca de Calor (Q)



- Energia Térmica (**Q**) recebida do meio exterior

$$Q > 0$$

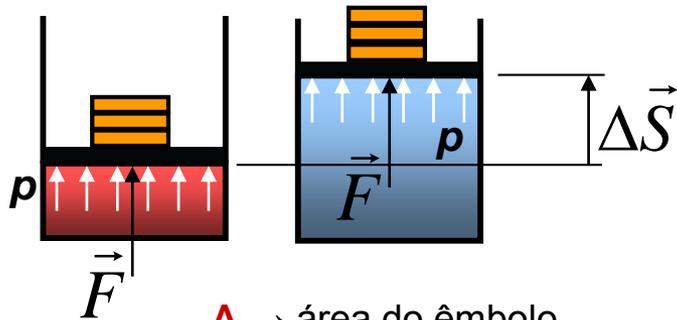
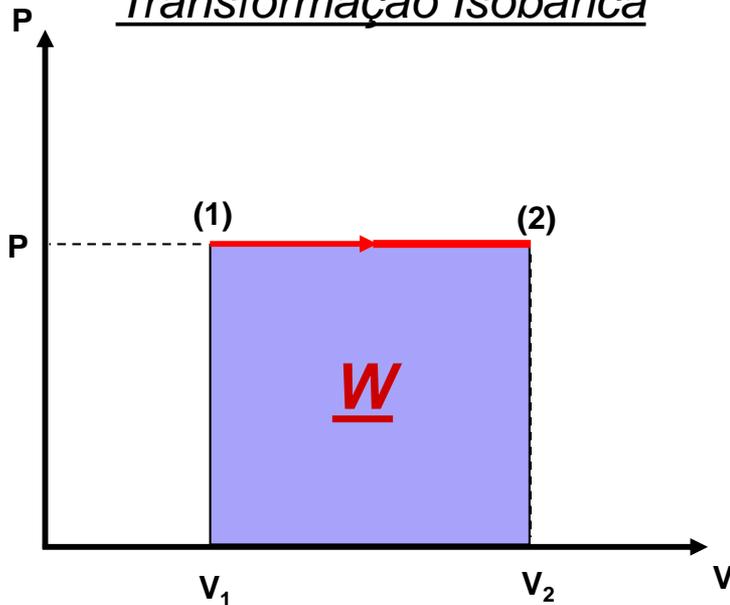


- Energia Térmica (**Q**) fornecida ao meio exterior

$$Q < 0$$

# Como determinar o **trabalho mecânico $W$** gerado por uma máquina térmica, sobre as redondezas?

## Transformação Isobárica

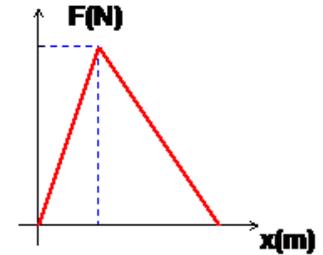


$A$  → área do êmbolo

$p$  → pressão do gás

## Cálculo do Trabalho $W$

$$W = |\vec{F}| \cdot |\Delta\vec{S}| \cdot \cos \theta$$



Para calcular o trabalho realizado **pele** gás **sobre** o meio (expansão):

$$W = p \cdot A \cdot \Delta S \cdot \cos(0^\circ)$$

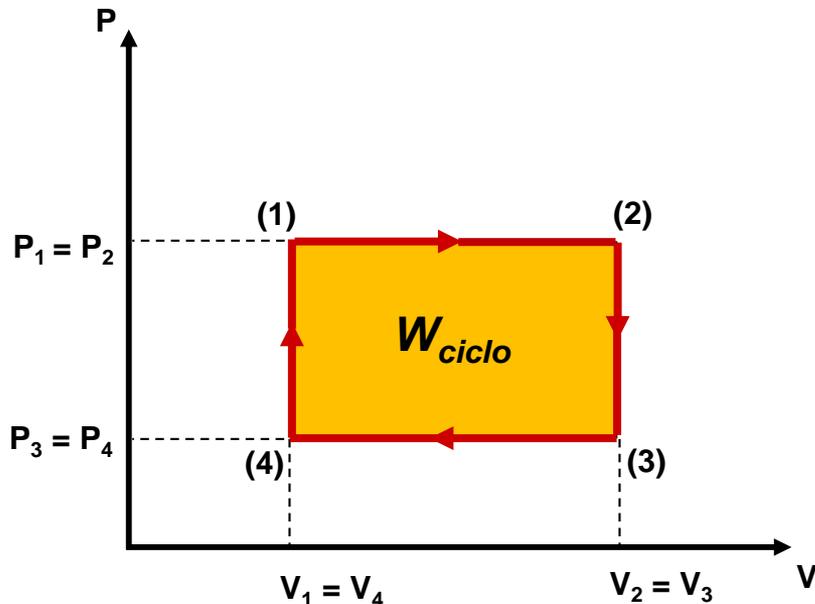
mas,  $\Delta V = A \cdot \Delta S$

$$\therefore W = p \cdot \Delta V$$

se  $\Delta V > 0$ , então  $W > 0$  → Trabalho de **expansão**

se  $\Delta V < 0$ , então  $W < 0$  → Trabalho de **compressão**

# Trabalho em um Ciclo Termodinâmico



(1) → (2) → Expansão Isobárica

(2) → (3) → Transf. Isométrica

(3) → (4) → Compressão Isobárica

(4) → (1) → Transf. Isométrica

$$W_{ciclo} = W_{(1) \rightarrow (2)} + W_{(2) \rightarrow (3)} + W_{(3) \rightarrow (4)} + W_{(4) \rightarrow (1)}$$

$$W_{(1) \rightarrow (2)} = p_2 \cdot (V_2 - V_1)$$

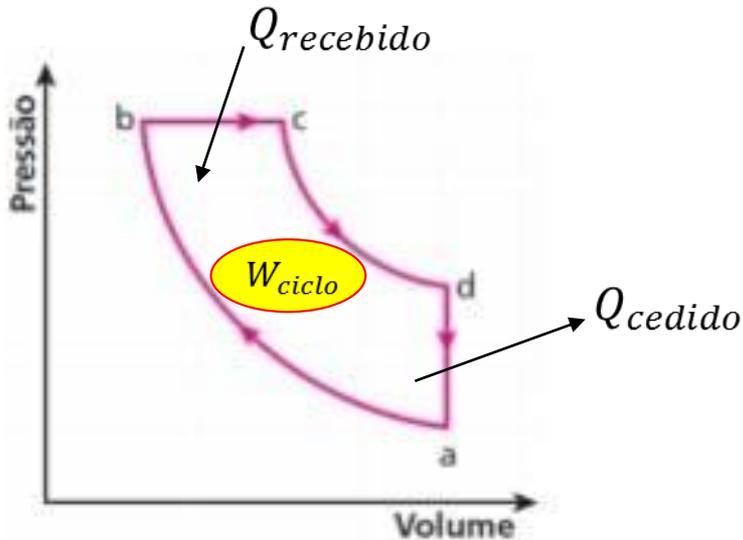
$$W_{(2) \rightarrow (3)} = 0$$

$$W_{(3) \rightarrow (4)} = p_3 \cdot (V_4 - V_3)$$

$$W_{(4) \rightarrow (1)} = 0$$

$$\therefore W_{ciclo} = W_{(1) \rightarrow (2)} + W_{(3) \rightarrow (4)} > 0 \quad (\text{Ciclo no sentido } \textbf{Horário})$$

# 1ª Lei da Termodinâmica para um **ciclo qualquer**



$$\Delta U = Q - W$$

$$\Delta U_{ciclo} = \Delta U_{a \rightarrow b} + \Delta U_{b \rightarrow c} + \Delta U_{c \rightarrow d} + \Delta U_{d \rightarrow a}$$

$$\Delta U_{ciclo} = (U_b - U_a) + (U_c - U_b) + (U_d - U_c) + (U_a - U_d) = 0$$

$$\Sigma Q_{(recebido/cedido)_{ciclo}} = \Sigma W_{(recebido/cedido)_{ciclo}} = W_{\acute{u}til}$$

# Resultados experimentais

Gás (300 K)	$c_v$ (J/mol.K)
Hélio*	12,5
Argônio*	12,5
Neônio*	12,7
Criptônio*	12,3

\* Gases monoatômicos

Da transformação isocórica, vem:

$$c_v = \frac{\Delta U(Q)}{n \times \Delta T}$$

$c_v$  → calor específico molar a volume constante

*Analizando-se os resultados experimentais, percebe-se uma igualdade nos valores de energia, por átomo, para aumentar a temperatura de um kelvin.*

**Sucesso** do modelo cinético (mecânico) para os gases monoatômicos!!!

*E para os outros gases e outros estados da matéria?*

*Bem, **ajusta-se** o modelo...*

# Relação de Mayer $\longrightarrow$ $C_p - C_v = R$

Gás (300 K)	$c_p$ (J/g.K)	$c_p$ (J/mol.K)	$c_v$ (J/mol.K)	$\gamma = c_p/c_v$
Hélio*	5,19	20,8	12,5	1,66
Argônio*	0,52	20,8	12,5	1,66
Neônio*	1,03	20,8	12,7	1,64
Criptônio*	0,25	20,8	12,3	1,69
Hidrogênio**	14,3	28,8	20,4	1,41
Oxigênio**	0,92	29,4	21,1	1,39
Cloro**	0,48	34,7	25,7	1,35
Dióxido de Carbono***	0,839	37,0	28,5	1,30
Dióxido de Enxofre***	0,64	40,4	31,4	1,29
Vapor de água***	2,08	35,4	27,0	1,31
Metano***	2,19	35,5	27,1	1,31

\* Gases monoatômicos

\*\* Gases diatômicos

\*\*\* Gases ou vapores poliatômicos

$$R = 8,31 \text{ J/mol.K (c.u.g.p.)}$$

# Classificação dos Motores Térmicos

M. Combustão Externa

Máquinas a vapor



M. Combustão Interna

Rotativos

Contínuos

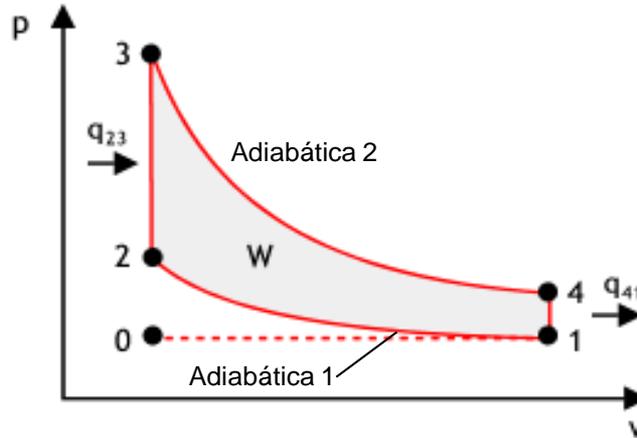
**Alternativos**



## i. Motor convencional de 4 tempos



Nikolaus Otto  
1832 - 1891



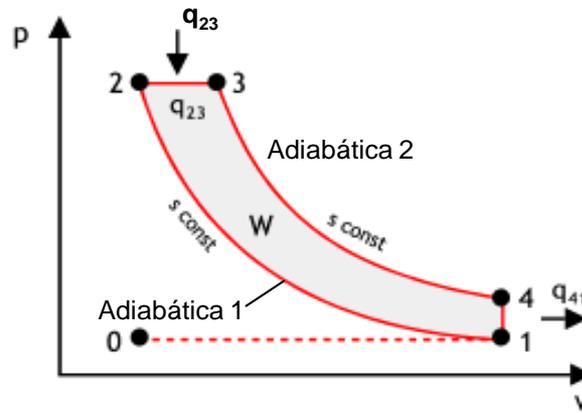
Ciclo Otto



Motor BMW



Rudolf Diesel  
1853 - 1913



Ciclo Diesel



Motor MWM

### iii. Motor convencional de 4 tempos

Rendimentos Térmicos Teóricos (Ciclo a ar)

$$\eta_{\text{tér.m.Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

$$\eta_{\text{tér.m.Diesel}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \times \frac{\alpha^{\gamma-1}}{\gamma \times (\alpha - 1)}$$

razão (ou taxa) de compressão



$$r = \frac{V_1}{V_2}$$

Otto → 6:1 a 12:1

Diesel → 16:1 a 20:1

razão de corte



$$\alpha = \frac{V_3}{V_2}$$

Diesel → ≈ 3,5

Coefficiente Adiabático



$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

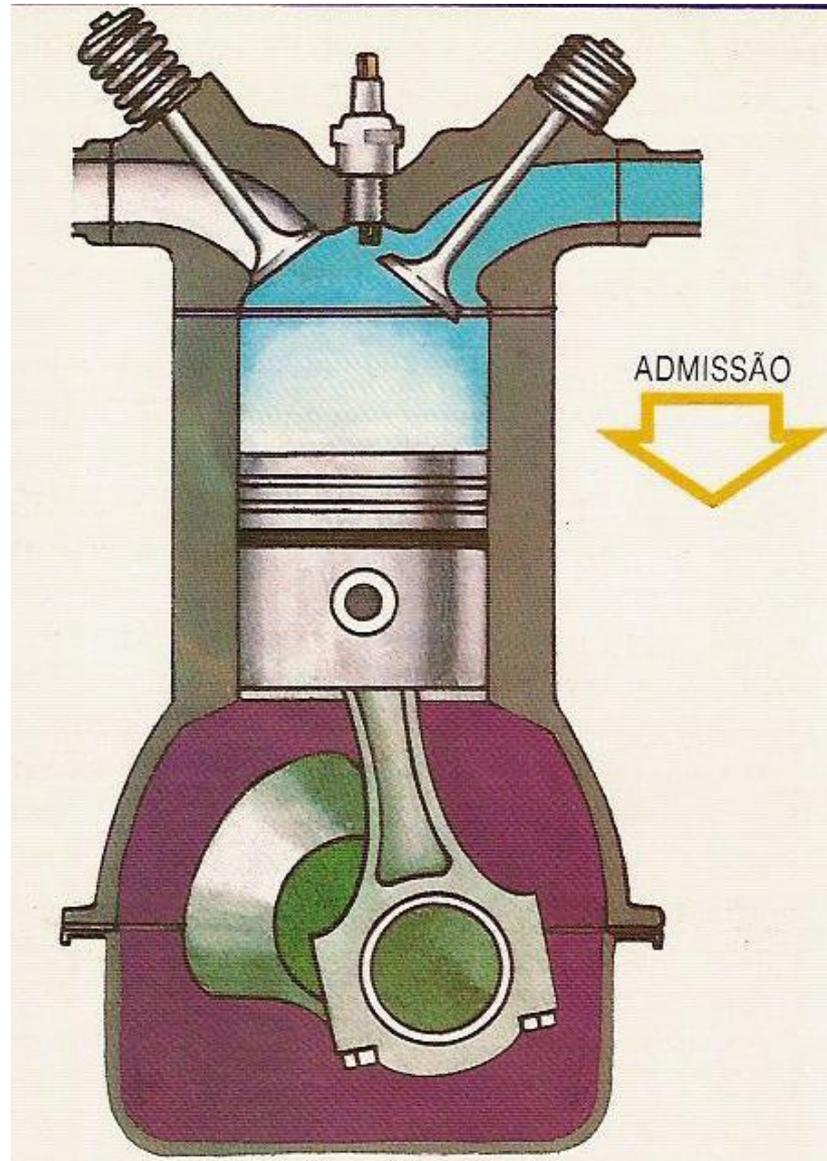
p/ o ar → 1,4

$$22\% < \eta_{\text{tér.m.Otto}} < 30\%$$

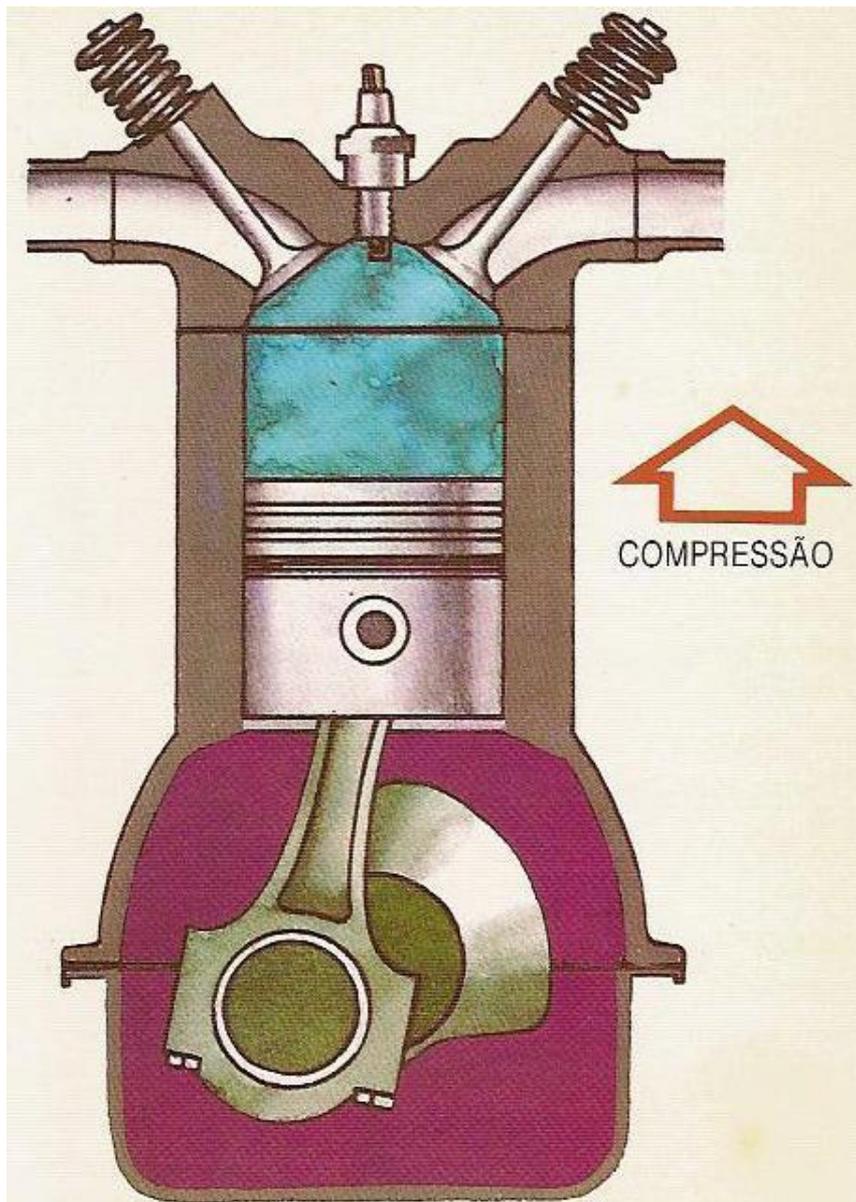
$$30\% < \eta_{\text{tér.m.Diesel}} < 38\%$$

ii. Funcionamento do motor de 4 tempos

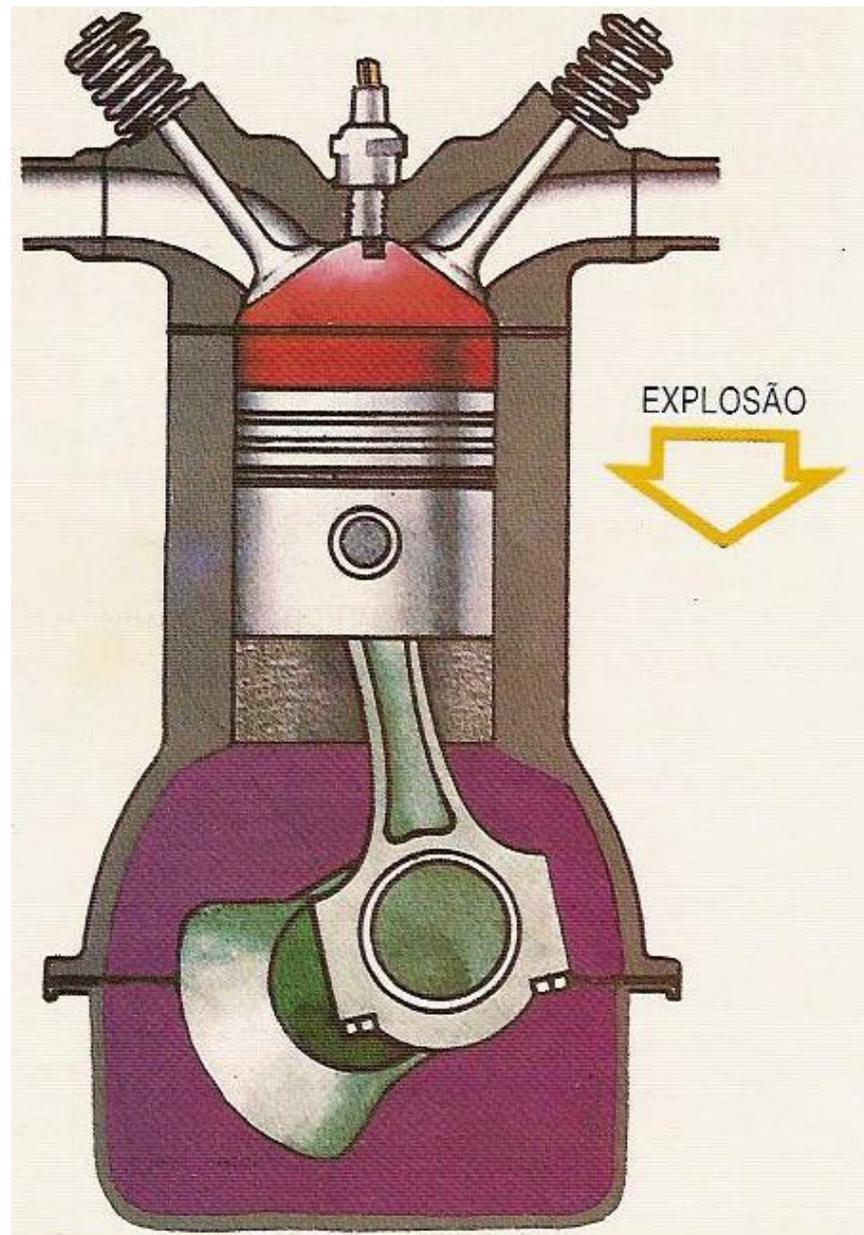
1º Tempo - Admissão



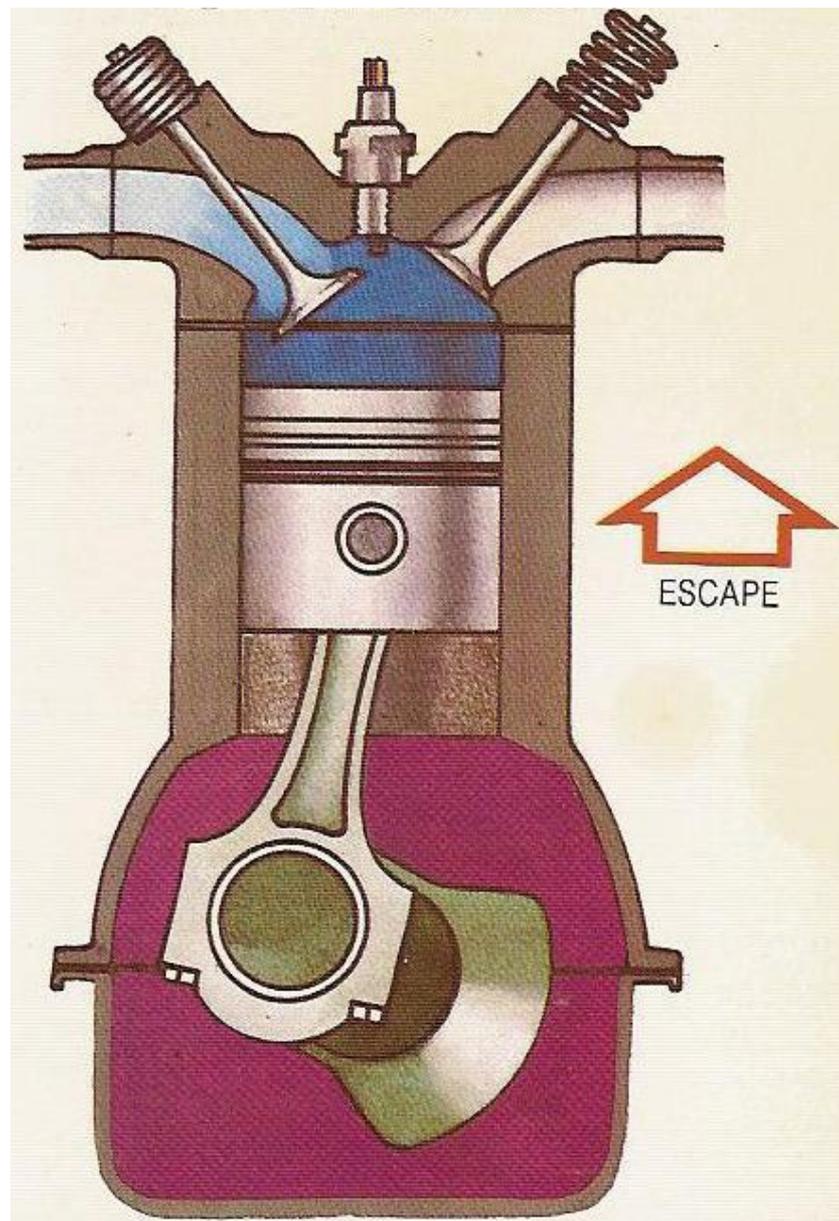
## 2º Tempo - Compressão



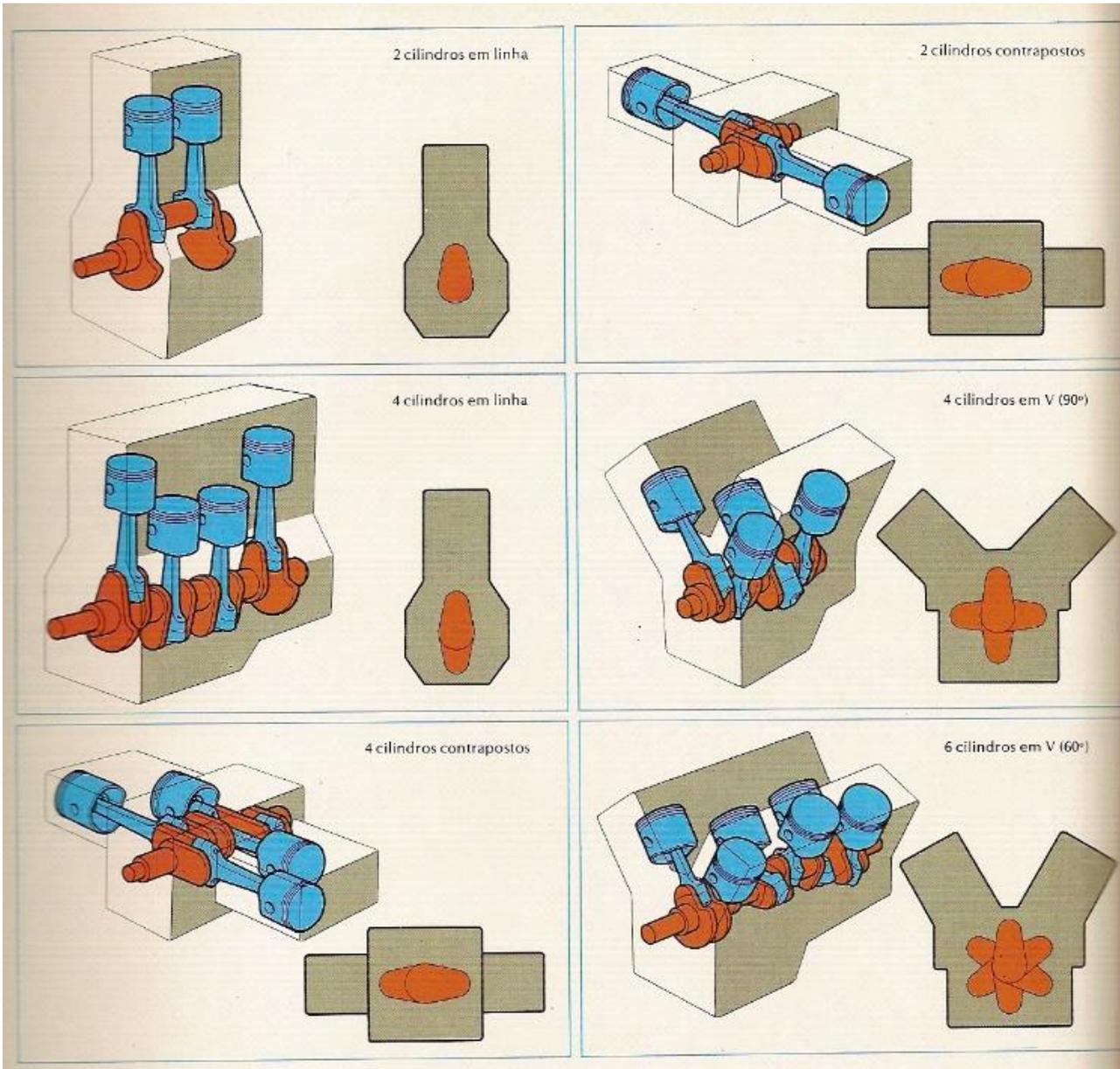
## 3º Tempo - Expansão



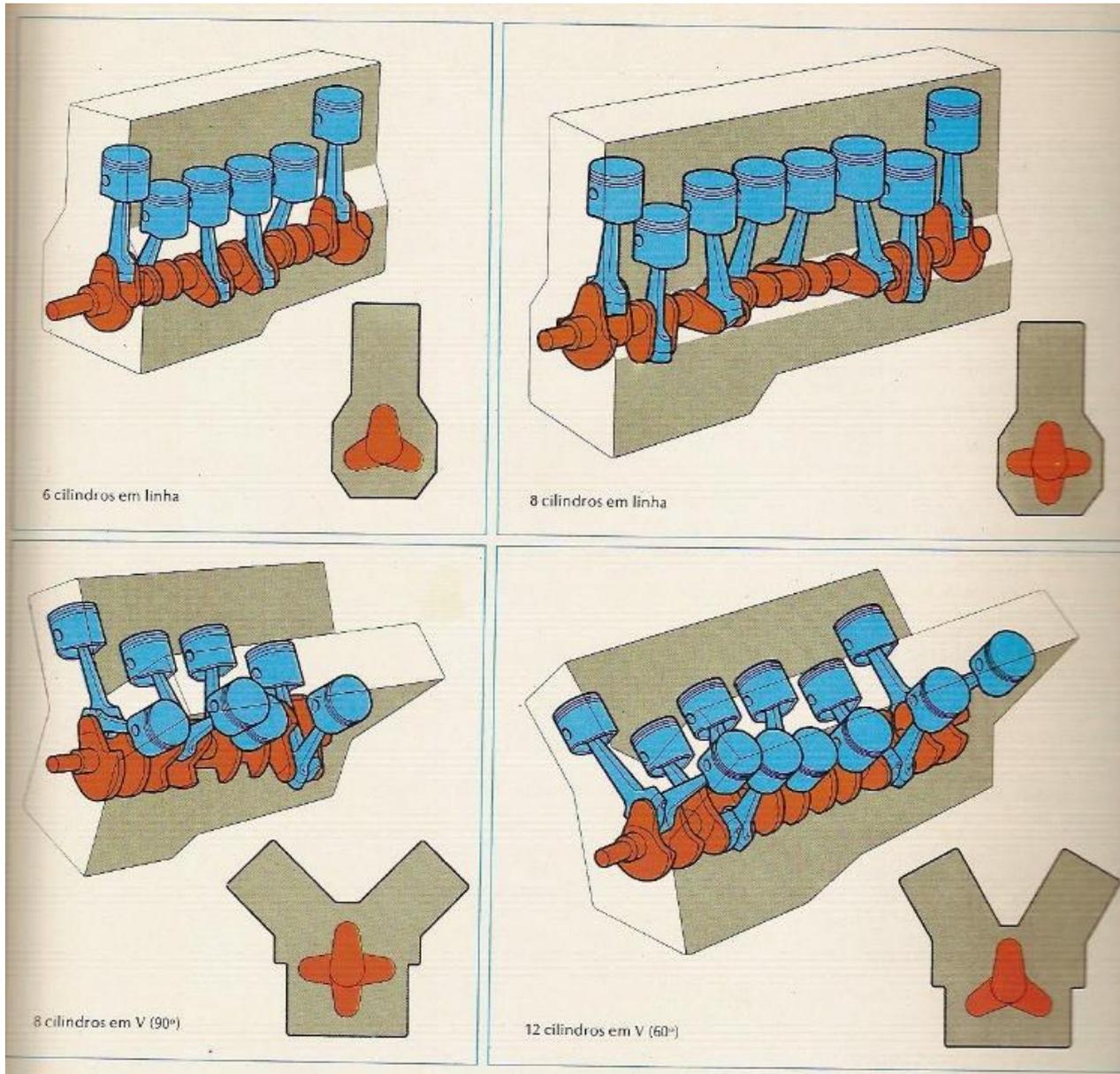
## 4º Tempo - *Exaustão*



# iv. Número e disposição de cilindros



## *iv. Número e disposição de cilindros*

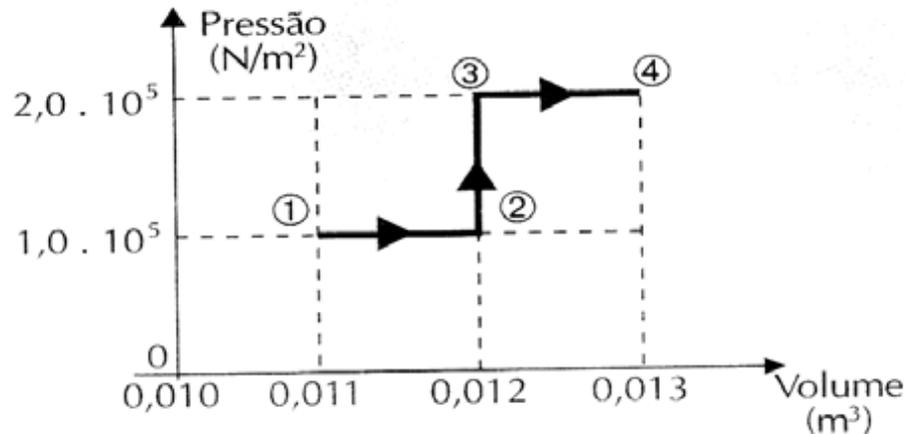


# Exercícios

1) (UFMG) Um gás ideal inicialmente no estado 1, sofre as transformações representadas na figura.

a) Qual é o trabalho realizado pelo gás na transformação de 1 a 4?

b) A temperatura do gás no estado 1 é 300 K. Qual será sua temperatura no estado 4?



11) (U.F. Ouro Preto – MG - adaptada) Um gás ideal executa o ciclo ABCDA indicado na figura. Para esse **ciclo** calcule:

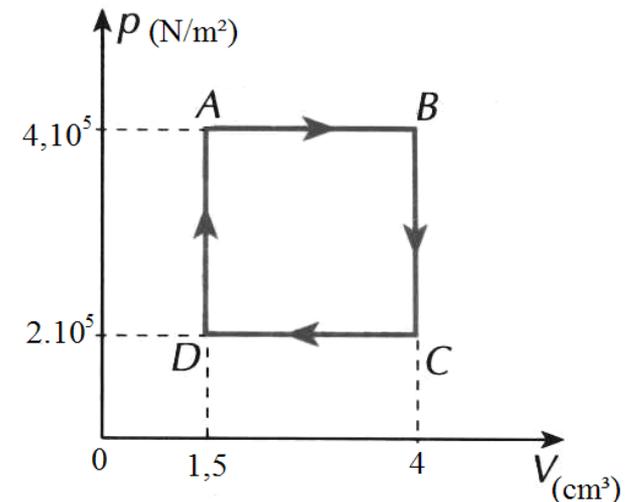
a) o trabalho realizado pelo gás;

b) a quantidade de calor trocado pelo gás;

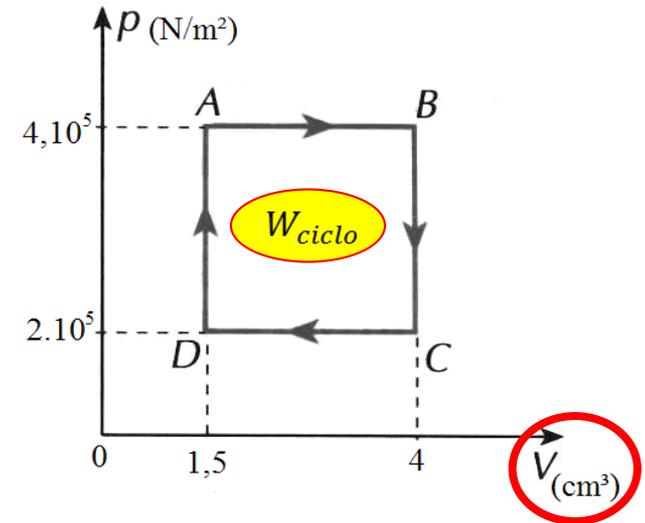
c) a variação de energia interna sofrida pelo gás;

d) a temperatura nos pontos A, B e C, sabendo-se que a temperatura no ponto D vale 27°C;

e) O número de mols do gás.



- Resolução do exercício 2:



a) O Trabalho realizado pelo gás ( $W_{ciclo}$ ):

$$W_{ciclo} = W_{A \rightarrow B} + W_{B \rightarrow C} + W_{C \rightarrow D} + W_{D \rightarrow A}$$

$$W_{ciclo} = p_{AB} \cdot \Delta V_{AB} + p_{BC} \cdot \Delta V_{BC} + p_{CD} \cdot \Delta V_{CD} + p_{DA} \cdot \Delta V_{DA}$$

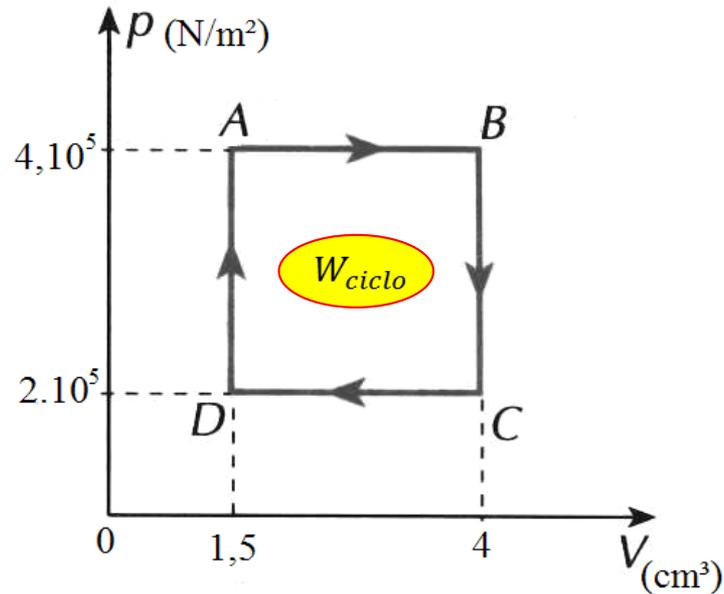
$$W_{ciclo} = +4 \cdot 10^5 \cdot (4 - 1,5) + p_{BC} \cdot (4 - 4) + 2 \cdot 10^5 \cdot (1,5 - 4) + p_{DA} \cdot (1,5 - 1,5)$$

$$W_{ciclo} = +4 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot (4 - 1,5) \cdot 10^{-6} m^3 + 2 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot (1,5 - 4) \cdot 10^{-6} m^3$$

$$W_{ciclo} = +4 \cdot 10^5 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^5 \cdot (-2,5) \cdot 10^{-6}$$

$$W_{ciclo} = +10 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-1} \rightarrow W_{ciclo} = +5 \cdot 10^{-1} N \cdot m (J)$$

a.1) Calculando o Trabalho realizado pelo gás ( $W_{ciclo}$ ), usando o gráfico  $p \times V$ :



$W_{ciclo} \rightarrow$  Fórmula da área do Retângulo

$$W_{ciclo} = (4 - 1,5) \cdot 10^{-6} \cdot (4 - 2) \cdot 10^{+5}$$

$$W_{ciclo} = +5 \cdot 10^{-1} J \quad (\text{Ciclo no sentido } \underline{\text{Horário}})$$

b) A Quantidade de Calor trocado pelo gás ( $Q_{\text{ciclo}}$ ):

$$Q_{\text{ciclo}} = W_{\text{ciclo}} = W_{\text{útil}}$$

$$Q_{\text{ciclo}} = +5.10^{-1}J$$

c) A Variação de Energia Interna ( $\Delta U_{\text{ciclo}}$ ):

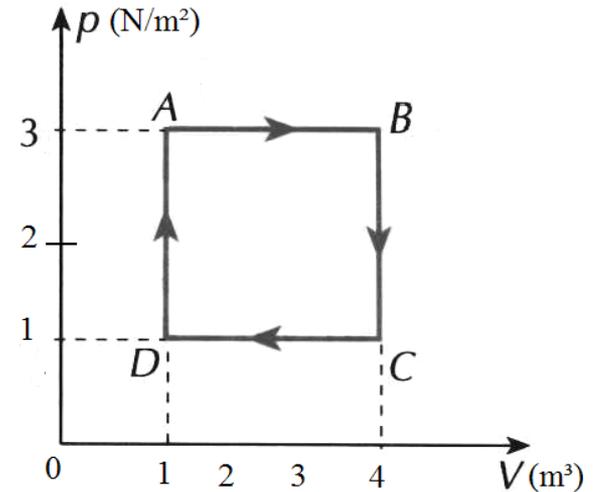
Em um ciclo termodinâmico efetuado por um gás, suas variáveis de estado nos pontos inicial e final não mudam. Como a Energia Interna do gás é uma propriedade dependente apenas da temperatura, e as temperaturas inicial e final são iguais, concluímos que a Energia Interna no ciclo não varia.

$$\Delta U_{\text{ciclo}} = 0$$

# Exercícios

3) (Fuvest – SP) O diagrama  $p \times V$  da figura refere-se a um gás ideal passando por uma transformação cíclica através de um sistema cilindro-pistão.

- Qual o trabalho realizado pelo gás no processo AB?
- Em que ponto do ciclo a temperatura do gás é menor?



4) Uma certa quantidade de gás expande-se adiabaticamente, desde uma pressão inicial de 2atm e volume 2,0L na temperatura de 21°C, até atingir o dobro do seu volume. Sabe-se que, para esse gás, o coeficiente de Poisson é  $\gamma = 2$ .

16) (ITA – SP) A pressão final é, em atm:

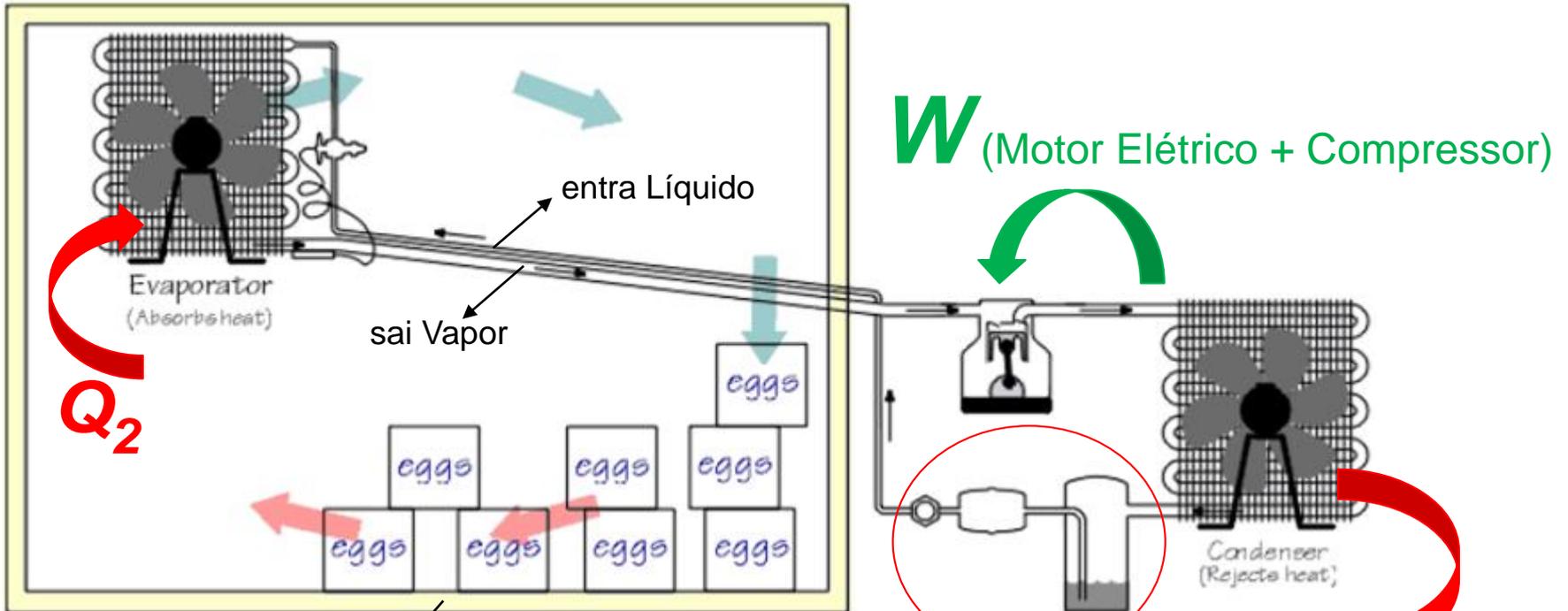
- a) 0,1                      b) 0,2                      c) 0,3                      d) 0,4                      e) 0,5

17) (ITA – SP) A temperatura final é:

- a) -126° C                      b) +12° C                      c) -48° C                      d) +2,1° C                      e) -21° C

# Máquina Frigorífica

## Unidade de Evaporação



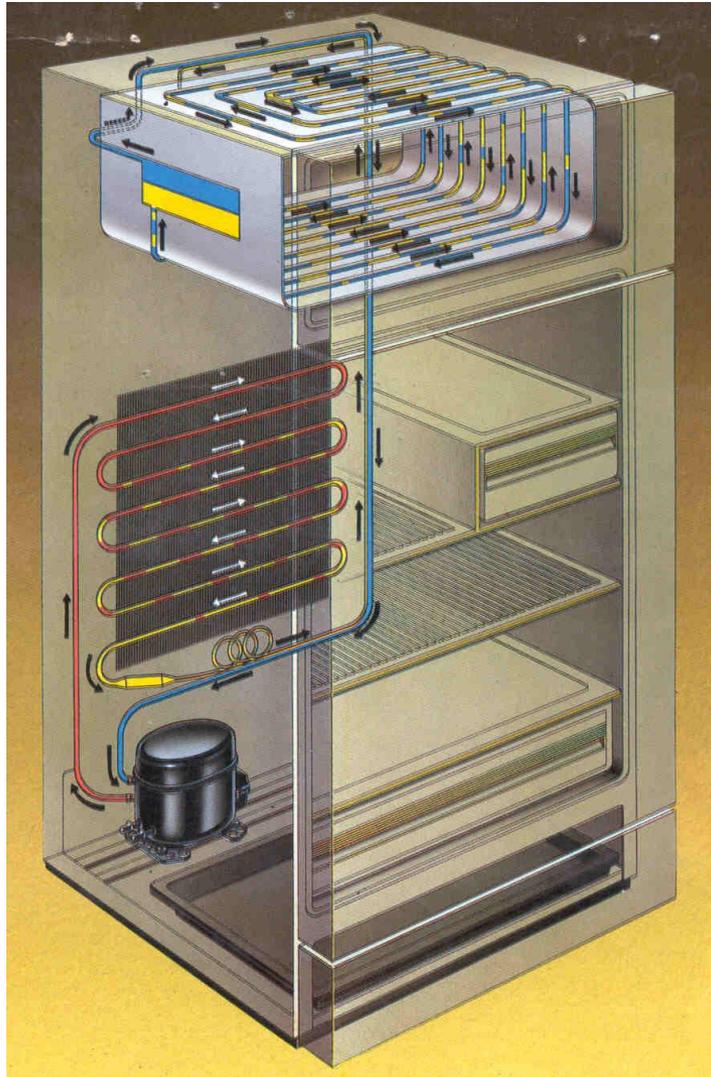
Sistema termicamente isolado

### Balço de Energia

$$Q_1 = W + Q_2$$

## Unidade de Condensação

# Geladeira e Condicionado de Ar



Evaporador



Condensador

R-12 (Freon)

**Protocolo de Montreal  
(1990)**

R134a

R600 (n-butano)

R600a (iso-butano)

R600b (ciclo-pentano)

R744 (CO<sub>2</sub> Líquido)

# **Referências Sitioográficas**

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Savery#First\\_steam\\_engine\\_mechanism](http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery#First_steam_engine_mechanism)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Newcomen\\_steam\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Newcomen_steam_engine)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin\\_Thompson](http://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Thompson)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_cycle)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin\\_Thompson#Bavarian\\_maturity](http://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Thompson#Bavarian_maturity)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Phlogiston\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Phlogiston_theory)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/J.\\_J.\\_Becher](http://en.wikipedia.org/wiki/J._J._Becher)
- <http://wwwusers.rdc.puc-rio.br/wbraga/transcal/pdf/Termo/Calorica.PDF>
- [http://www.formula1-dictionary.net/thermal\\_efficiency.html](http://www.formula1-dictionary.net/thermal_efficiency.html)
- <http://www.if.ufrgs.br/~lang/maqterm.pdf>
- <https://blog.aprovatotal.com.br/primeira-lei-da-termodinamica/>