



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

Motores Térmicos

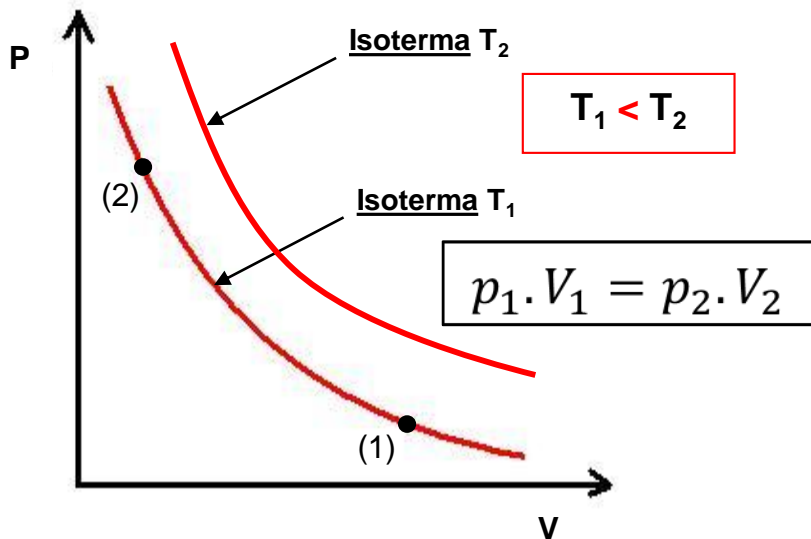
e

Máquinas Frigoríficas

1º FIS EMI

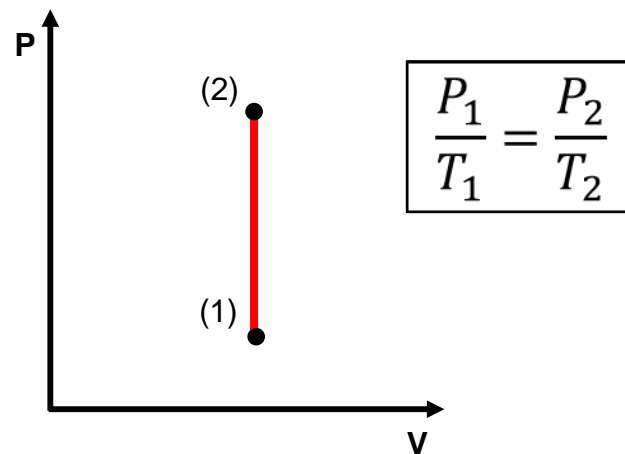
André Cipoli

Transformação Isotérmica

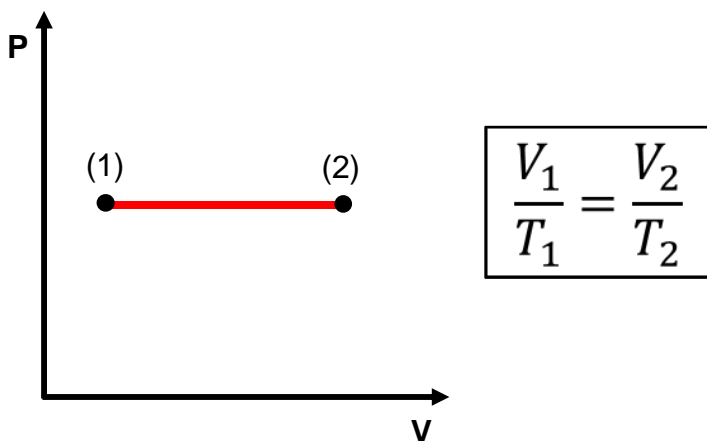


Transformação Isométrica

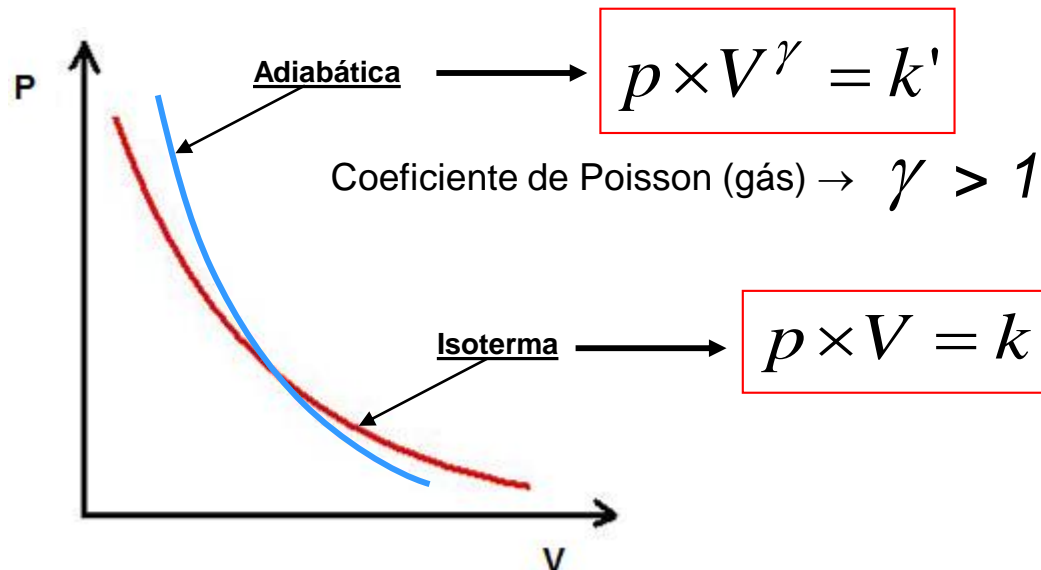
ou isovolumétrica ou isocórica



Transformação Isobárica

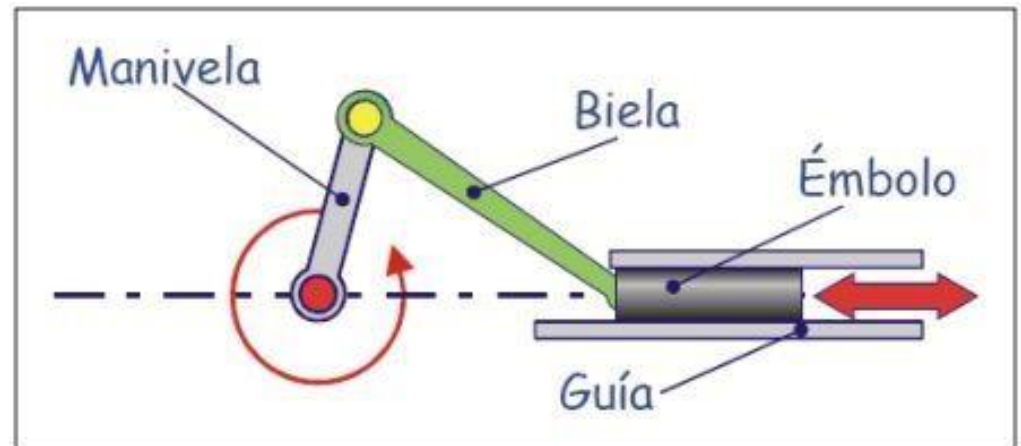
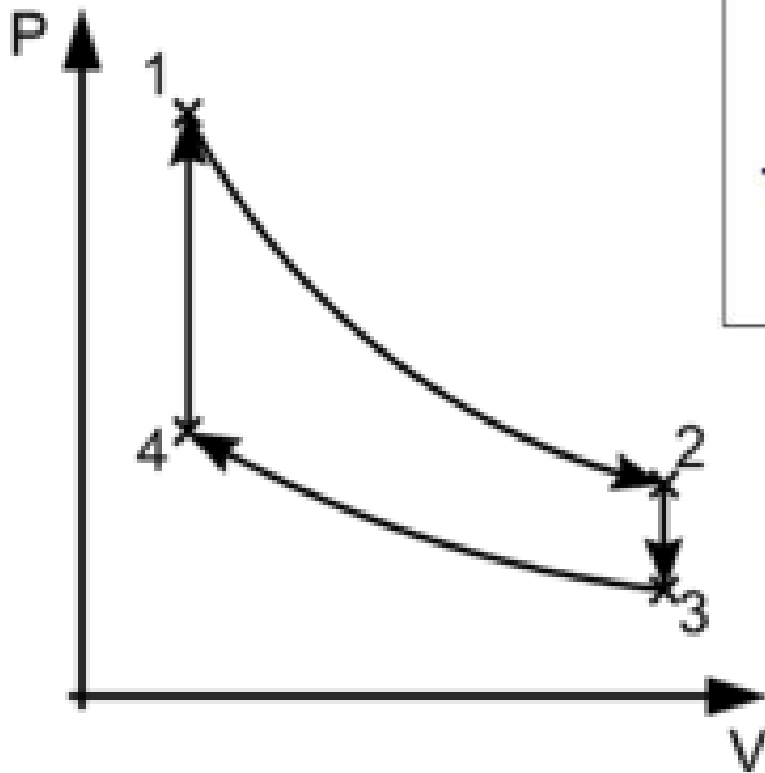


Transformação Adiabática → Q = 0



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”

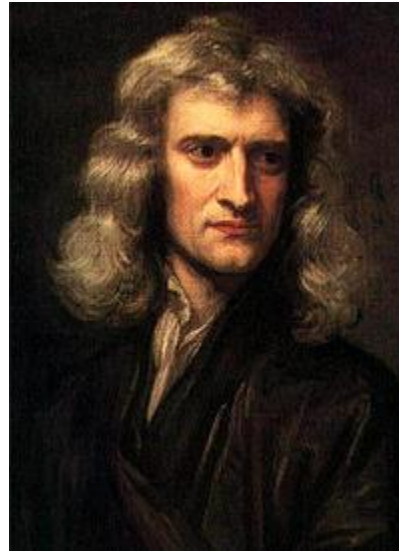
Uma teoria mecânica ...



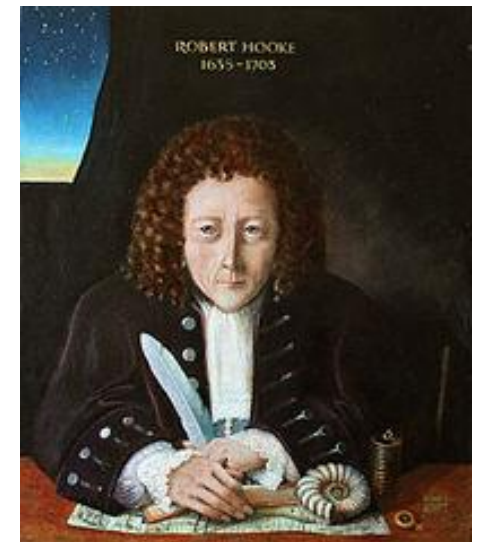
Francis Bacon
1561 - 1626

“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



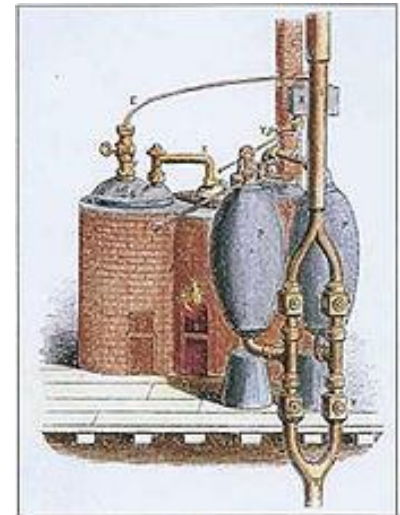
Thomas Savery
1650 - 1715



Eliolípila



Panela de pressão
Final do séc. XIX

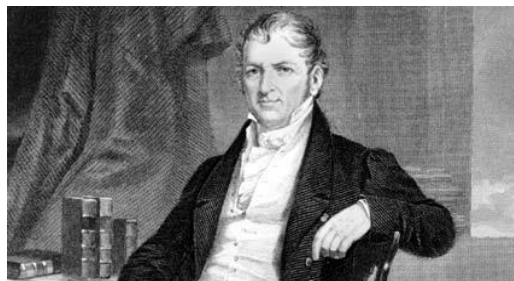


Motor de Savery
1698

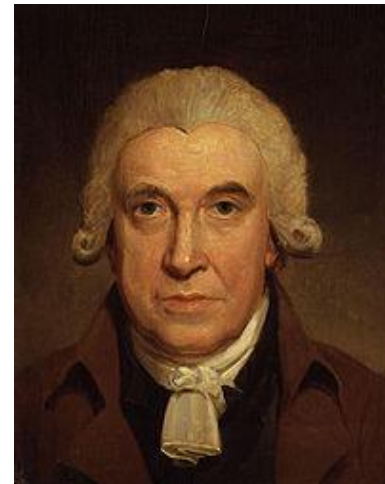
Histórico



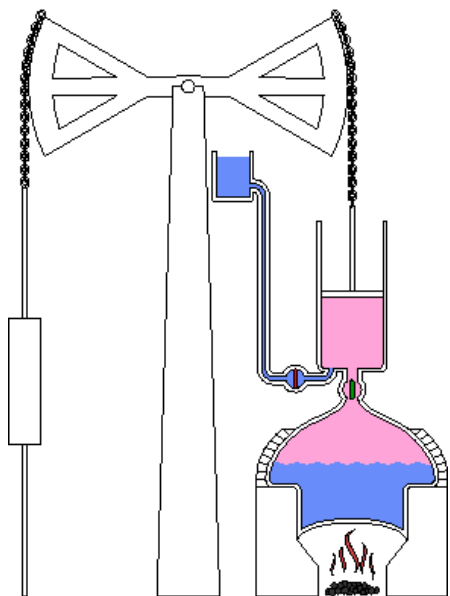
Thomas Newcomen
1662 - 1729



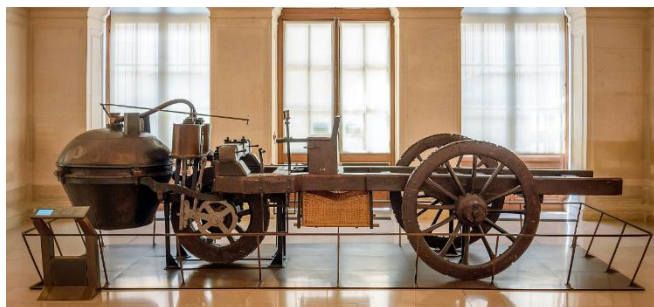
Nicolas-Joseph Cugnot
1725 - 1804



James Watt
1736 - 1819

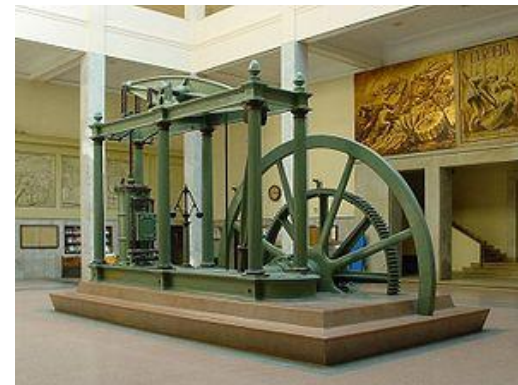


1712



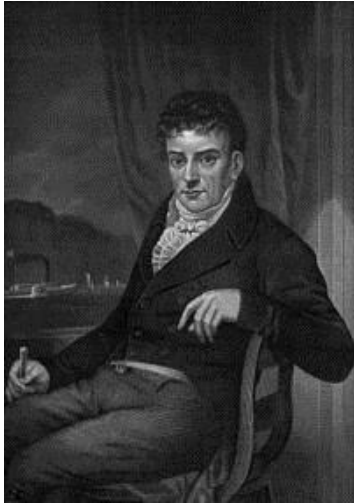
Fardier à vapeur

1769

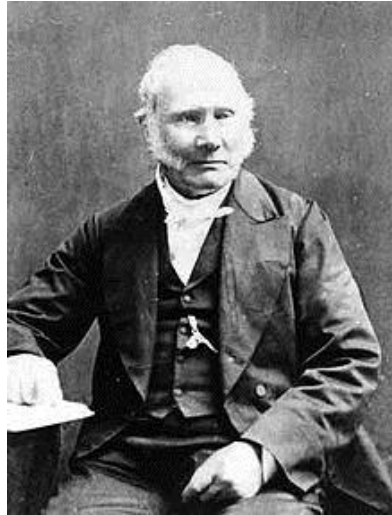


1769

Histórico



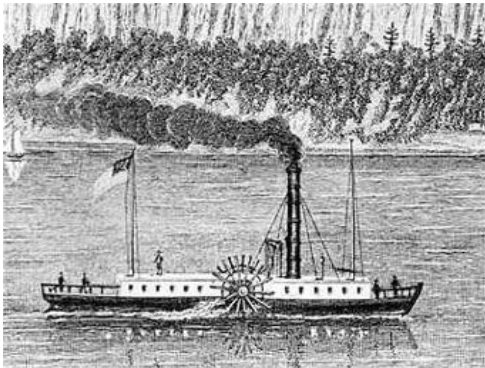
Robert Fulton
1765 - 1815



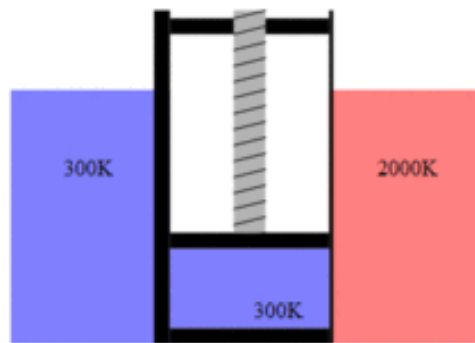
Robert [Stirling](#)
1790 - 1878



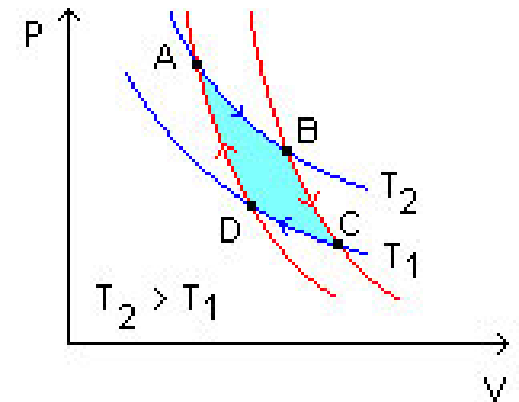
N. L. Sadi [Carnot](#)
1796 - 1832
1824



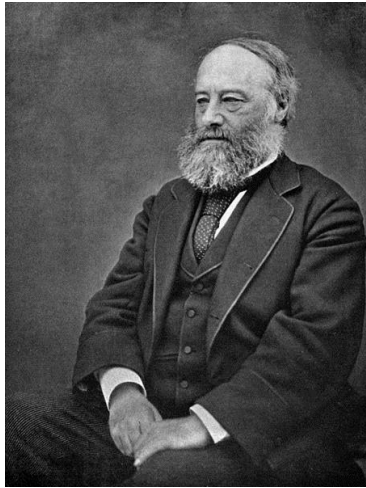
Clermont
1807



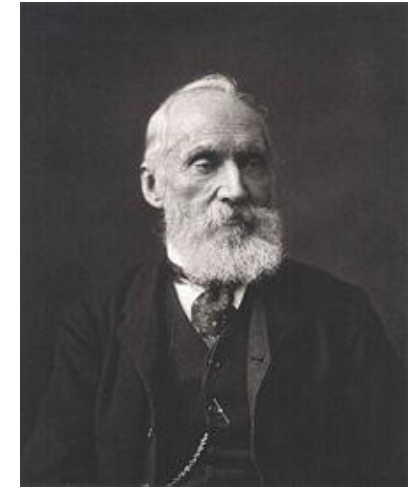
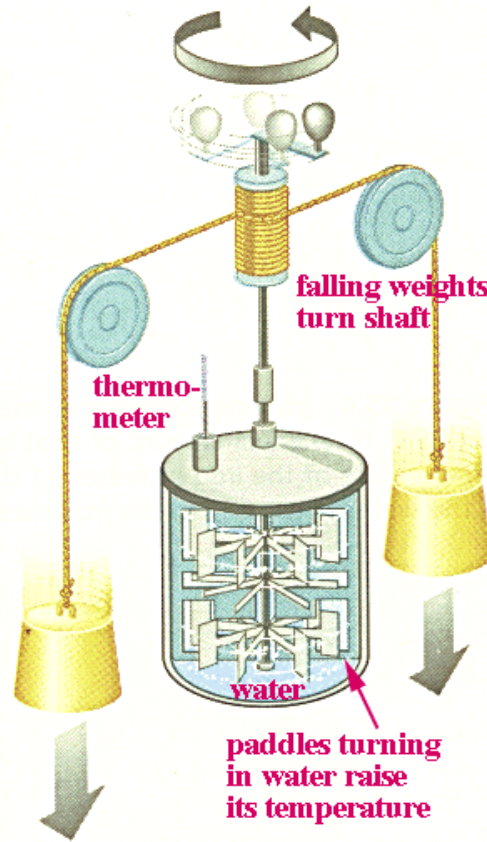
1816



Determinação experimental do equivalente **mecânico** do calor



James P. Joule
1818 - 1889
1845

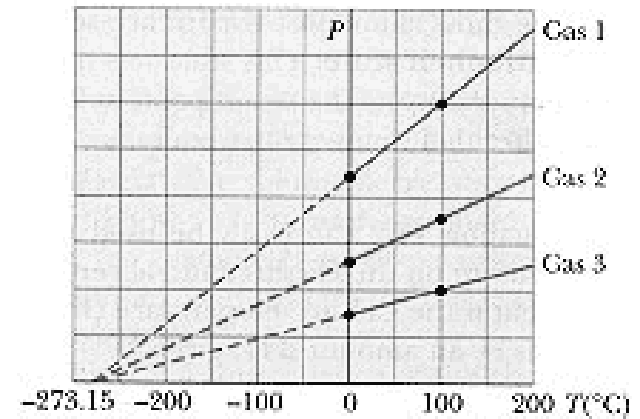


William Thomson
1824 - 1907
"Lord Kelvin"

Equivalente mecânico do calor

1 caloria \approx 4,159 J
(1850)

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



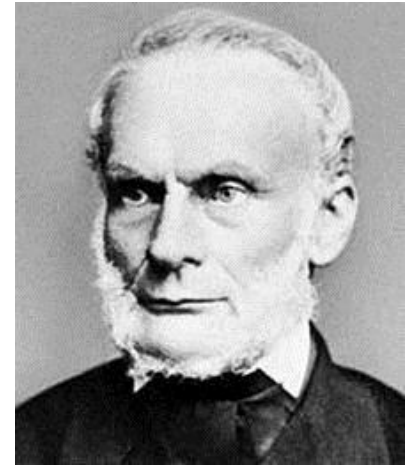
Histórico



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)**

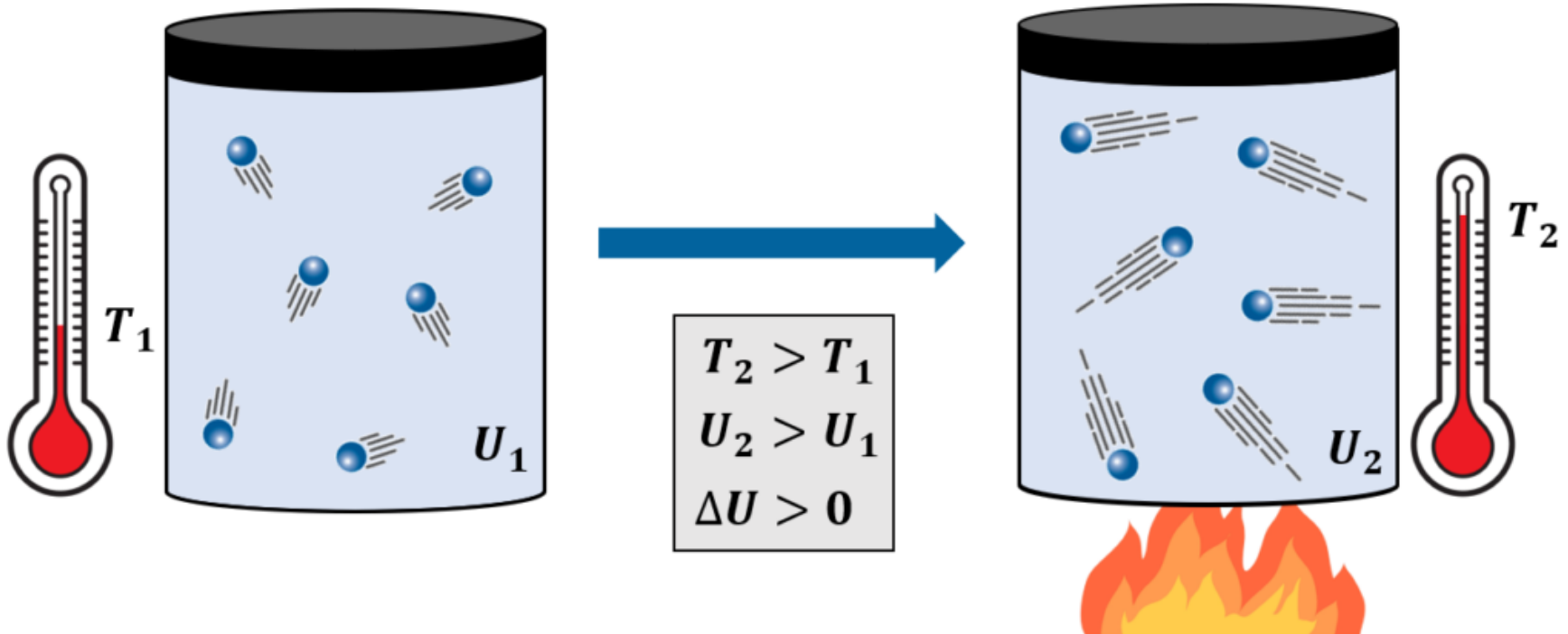
$W \rightarrow$ **trabalho fornecido ao meio exterior (> 0)**

Energia Interna

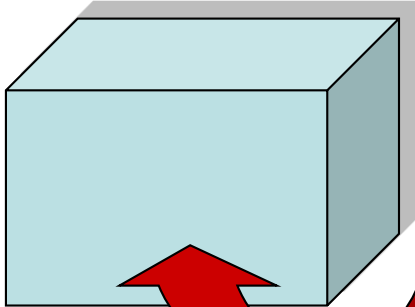
É a energia associada ao grau de agitação térmica da partícula (átomo ou molécula).

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

$$U = f(T)$$

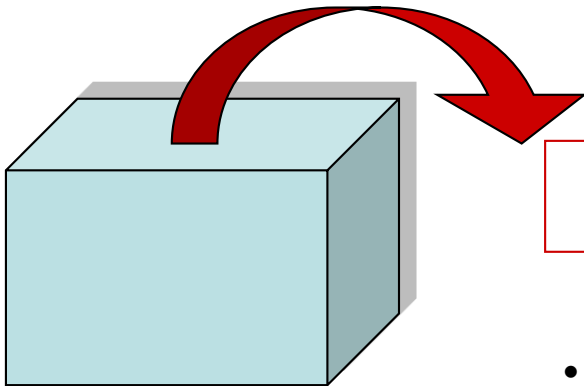


Troca de Calor (Q)



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

$$Q > 0$$

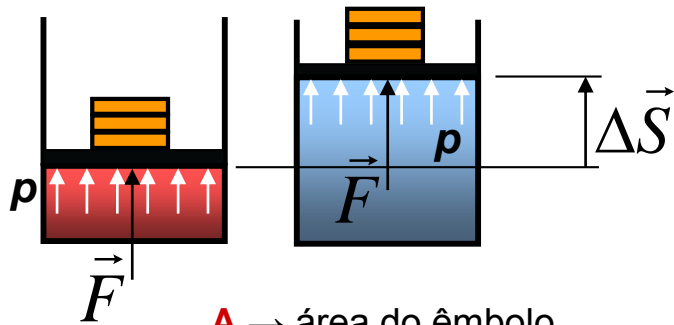
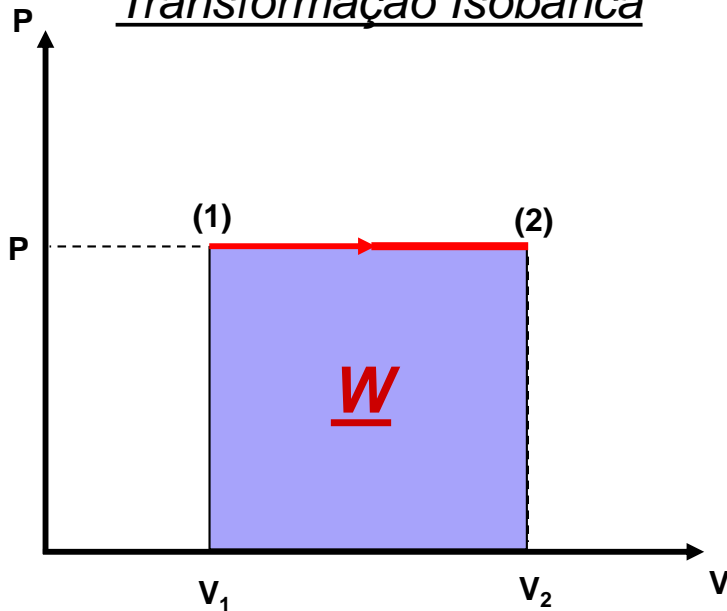


- Energia Térmica (**Q**) fornecida ao meio exterior

$$Q < 0$$

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

Transformação Isobárica

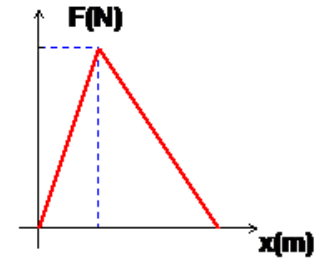


A → área do êmbolo

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):

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

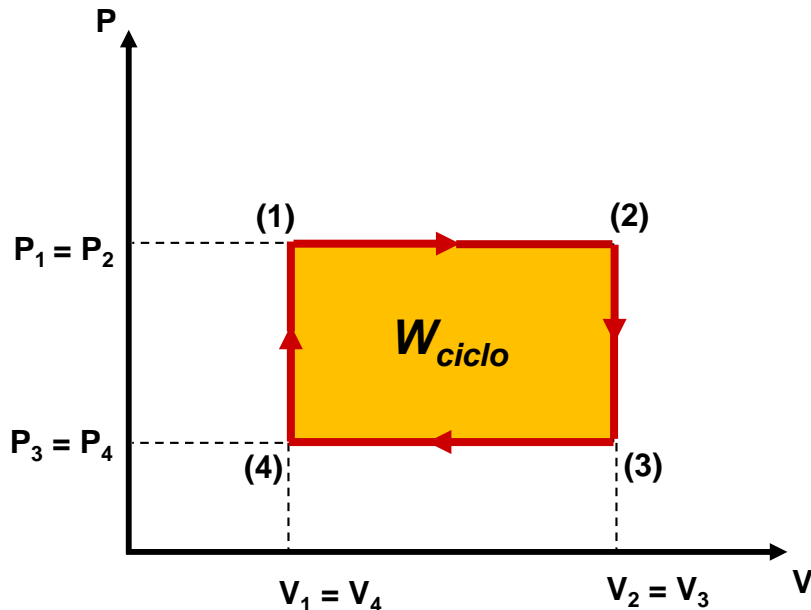
mas, $\Delta V = A \cdot \Delta S$

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

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

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

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

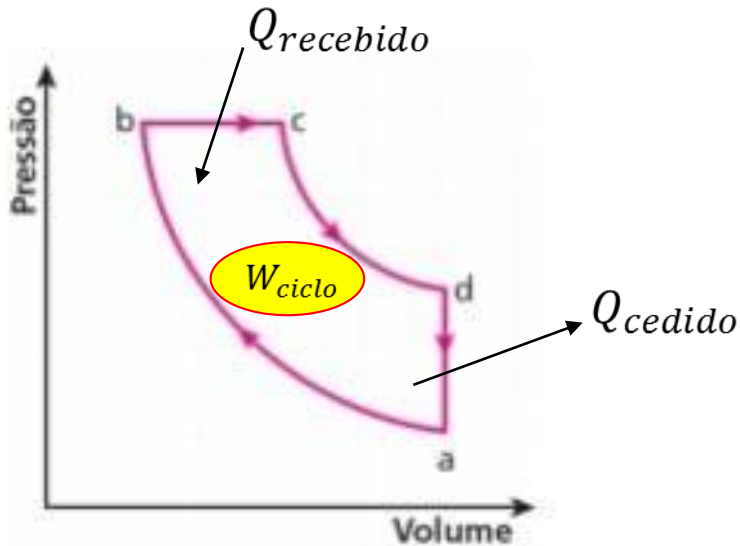
$$W_{(2) \rightarrow (3)} = 0$$

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

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

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

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

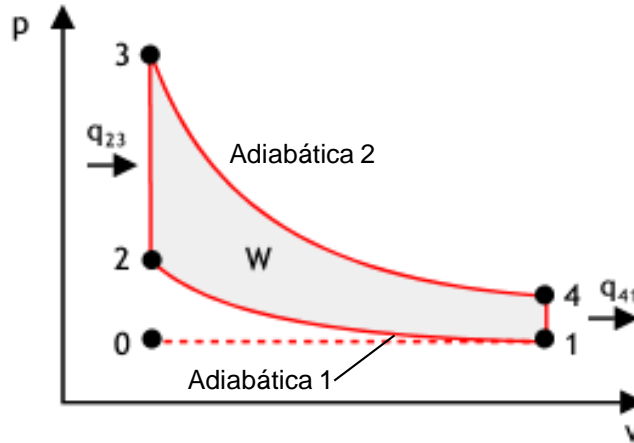
Alternativos



i. Motor convencional de 4 tempos



Nikolaus Otto
1832 - 1891



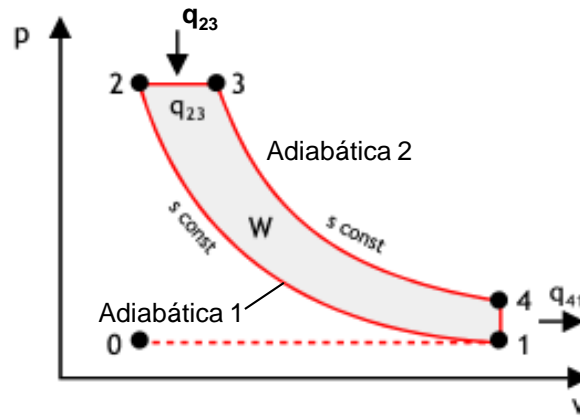
Ciclo Otto



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

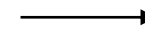
razão de corte



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

Diesel → ≈ 3,5

Coefficiente Adiabático



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

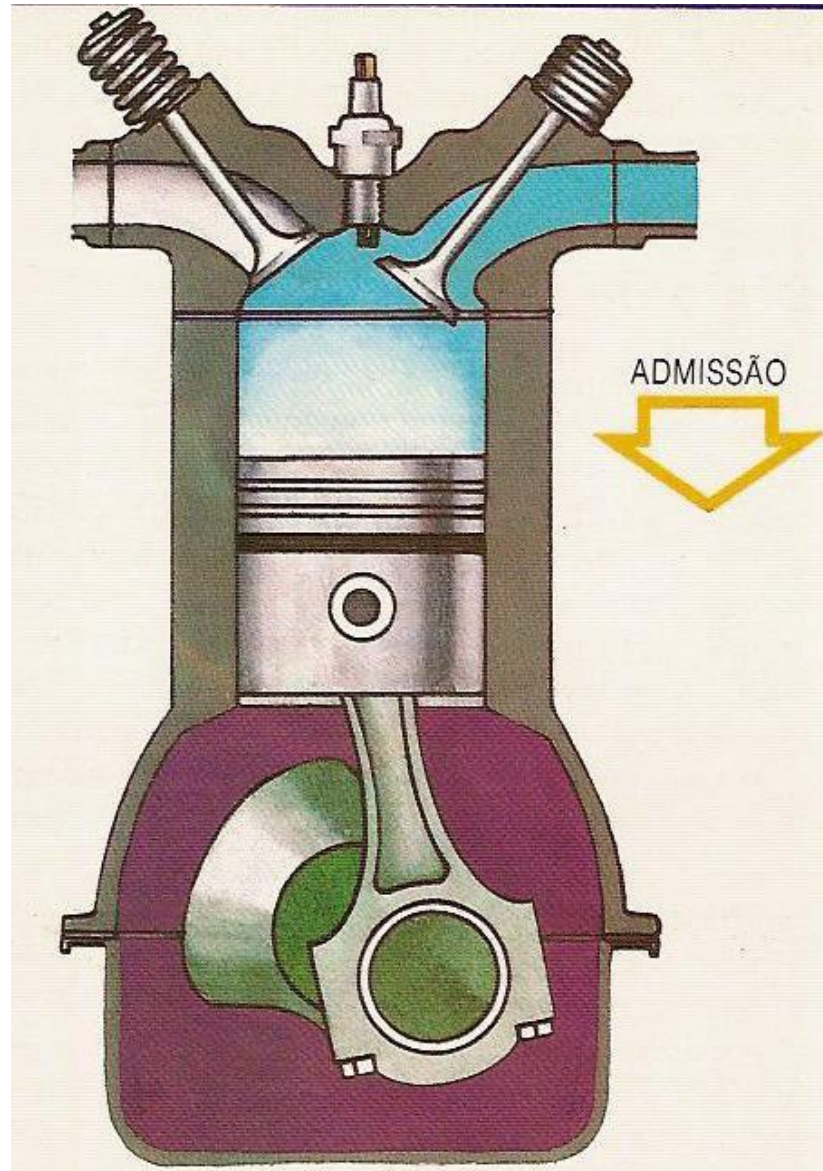
p/ o ar → 1,4

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

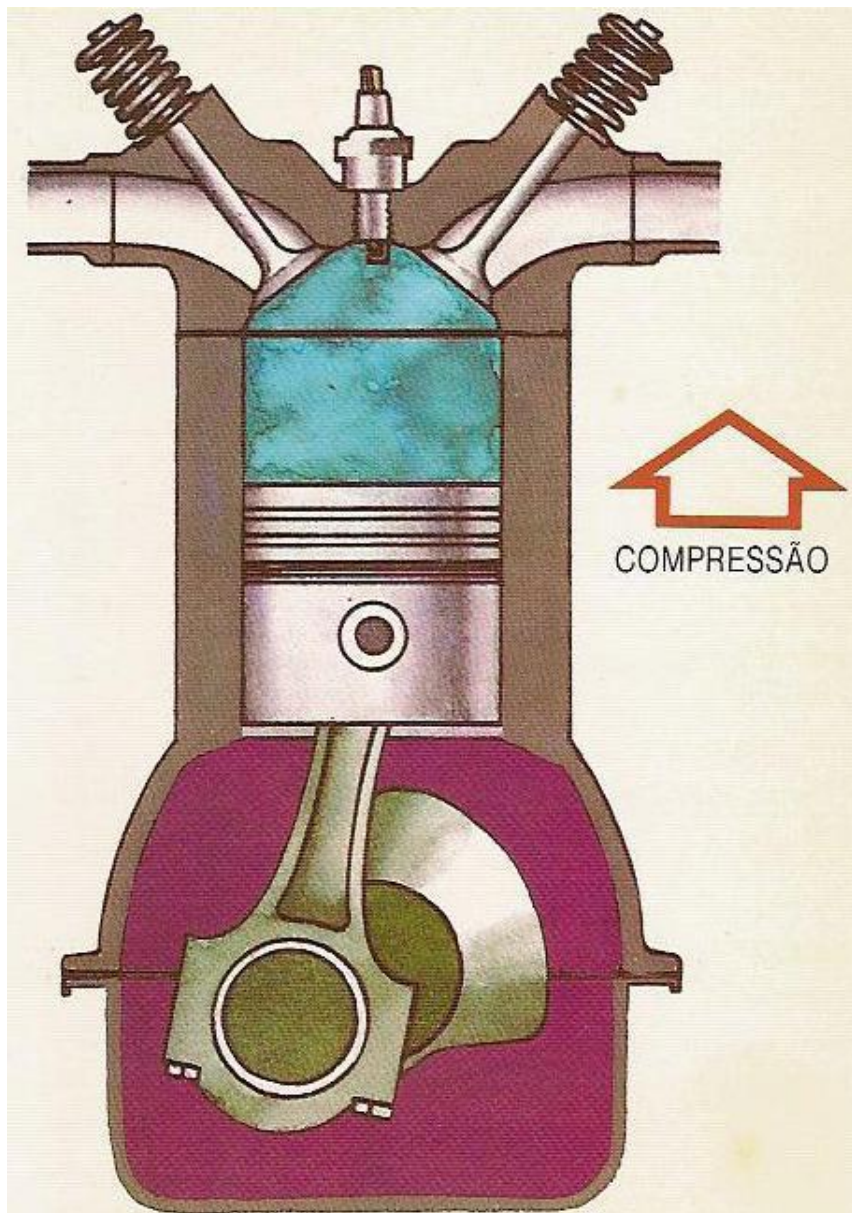
$$30\% < \eta_{\text{tér.m.Diesel}} < 38\%$$

ii. Funcionamento do motor de 4 tempos

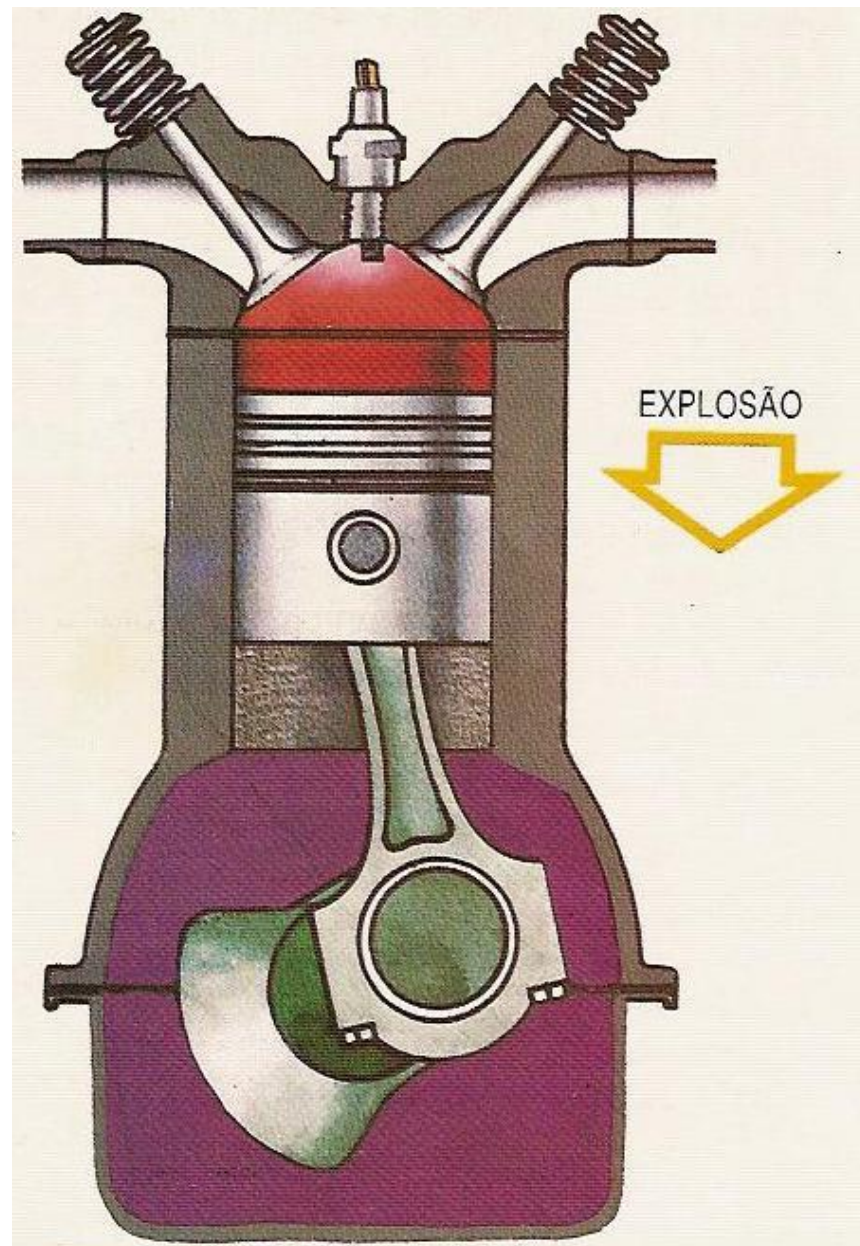
1º Tempo - Admissão



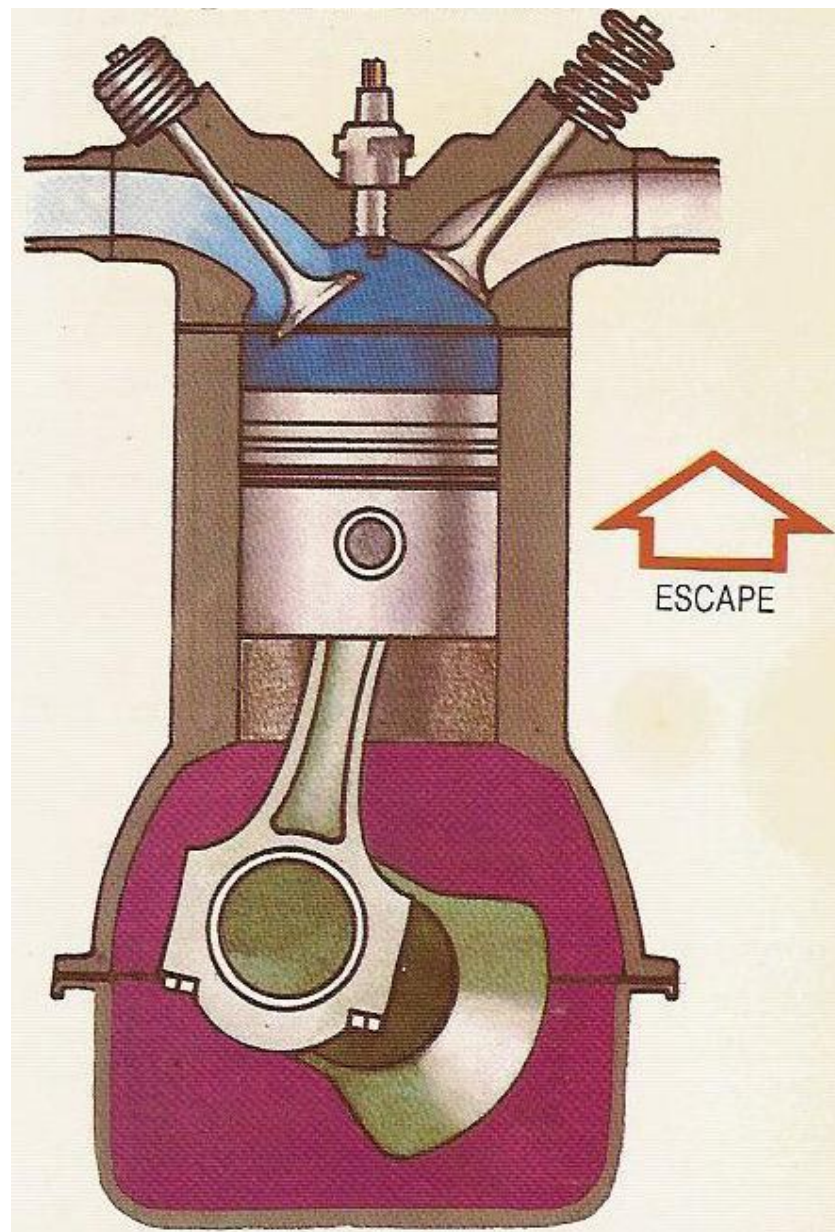
2º Tempo - Compressão



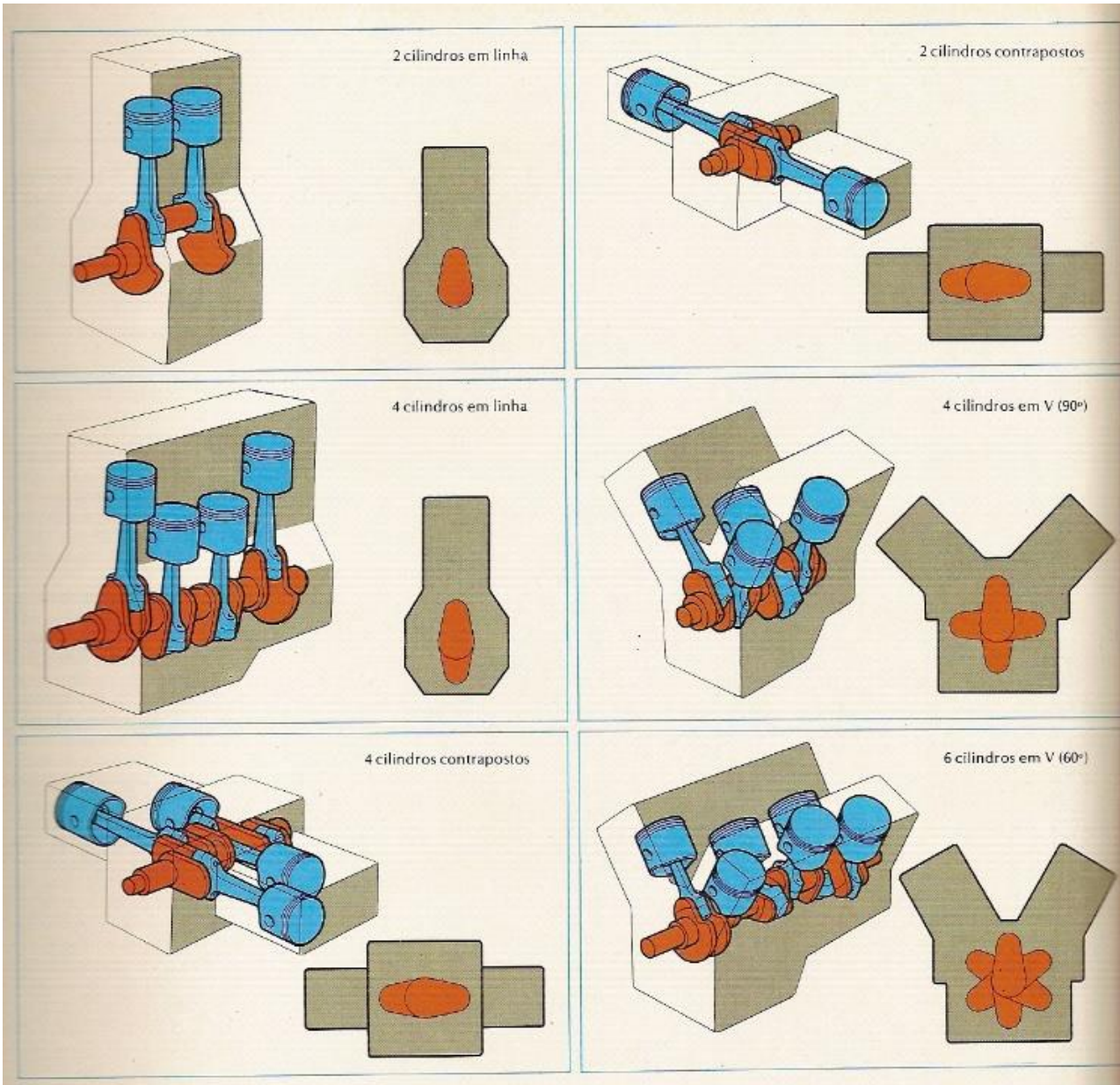
3º Tempo - Expansão



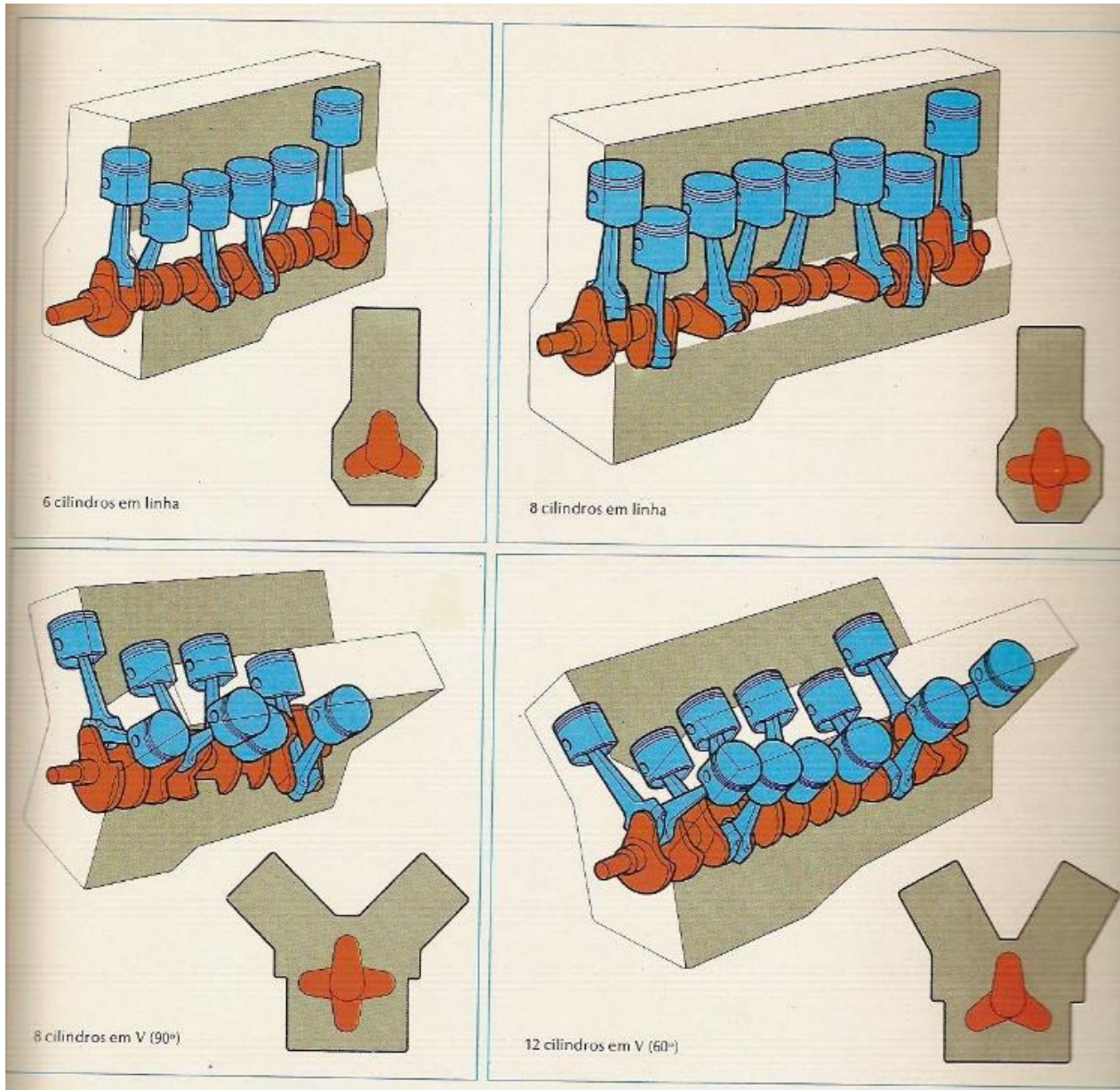
4º Tempo - *Exaustão*



iv. Número e disposição de cilindros



iv. Número e disposição de cilindros

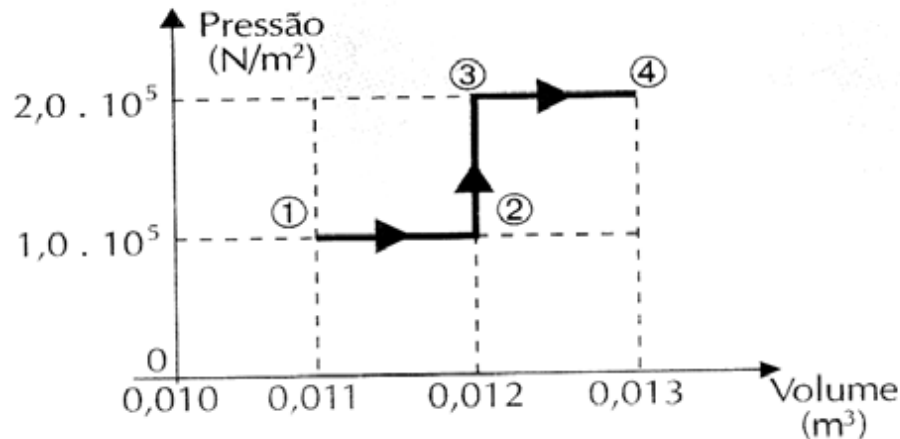


Exercícios

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:

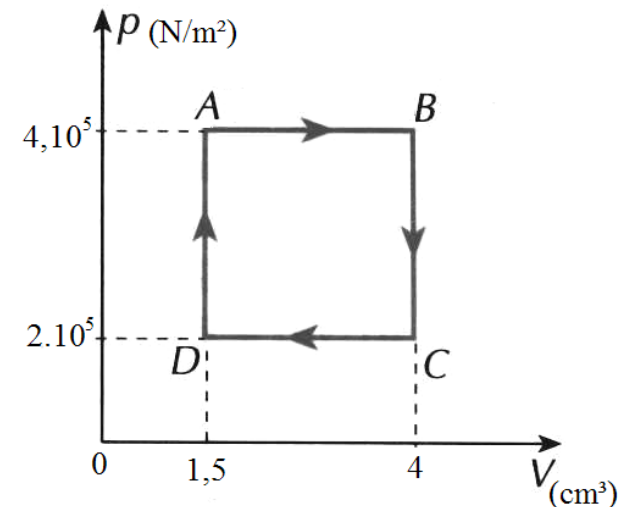
a) o trabalho realizado pelo gás;

b) a quantidade de calor trocado pelo gás;

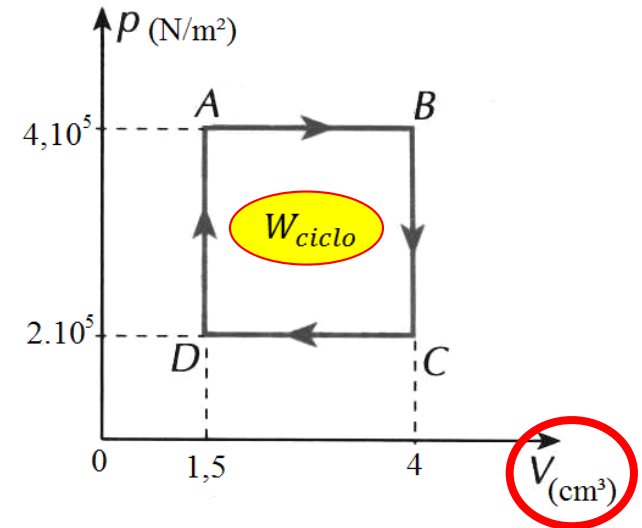
c) a variação de energia interna sofrida pelo gás;

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}):

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

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

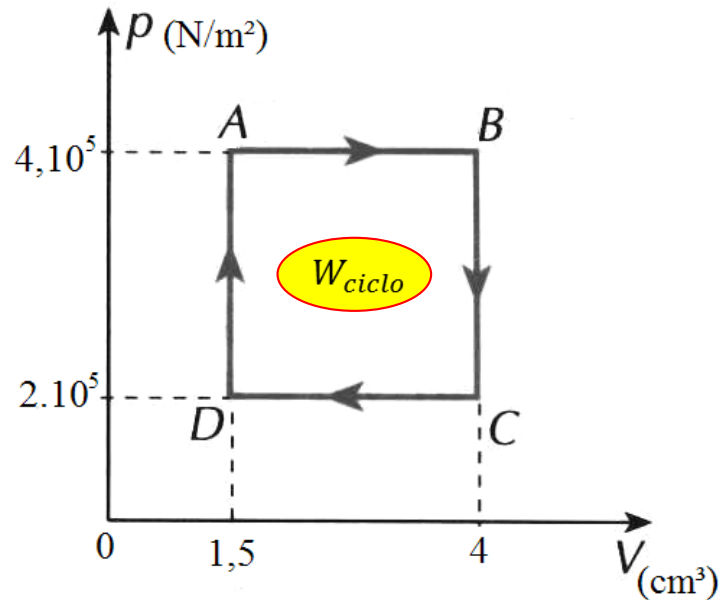
$$W_{ciclo} = +4 \cdot 10^5 \cdot (4 - 1,5) + p_{BC} \cdot (4 \cancel{- 4}) + 2 \cdot 10^5 \cdot (1,5 - 4) + p_{DA} \cdot (1,5 \cancel{- 1,5})$$

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

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

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

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_{ciclo}):

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

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

c) A Variação de Energia Interna (ΔU_{ciclo}):

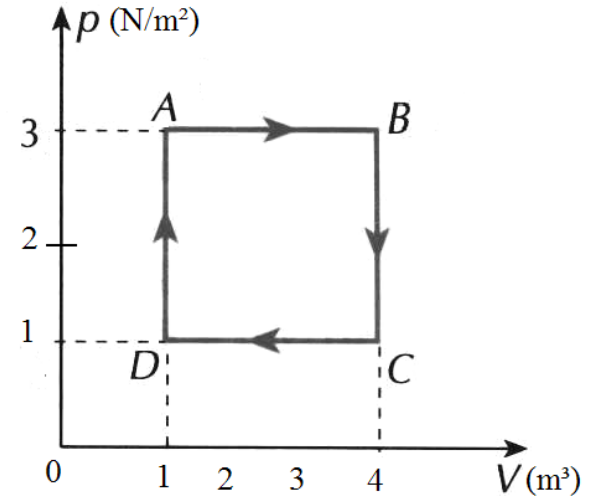
Em um ciclo termodinâmico efetuado por um gás, suas variáveis de estado nos pontos inicial e final não mudam. Como a Energia Interna do gás é uma propriedade dependente apenas da temperatura, e as temperaturas inicial e final são iguais, concluímos que a Energia Interna no ciclo não varia.

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

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:

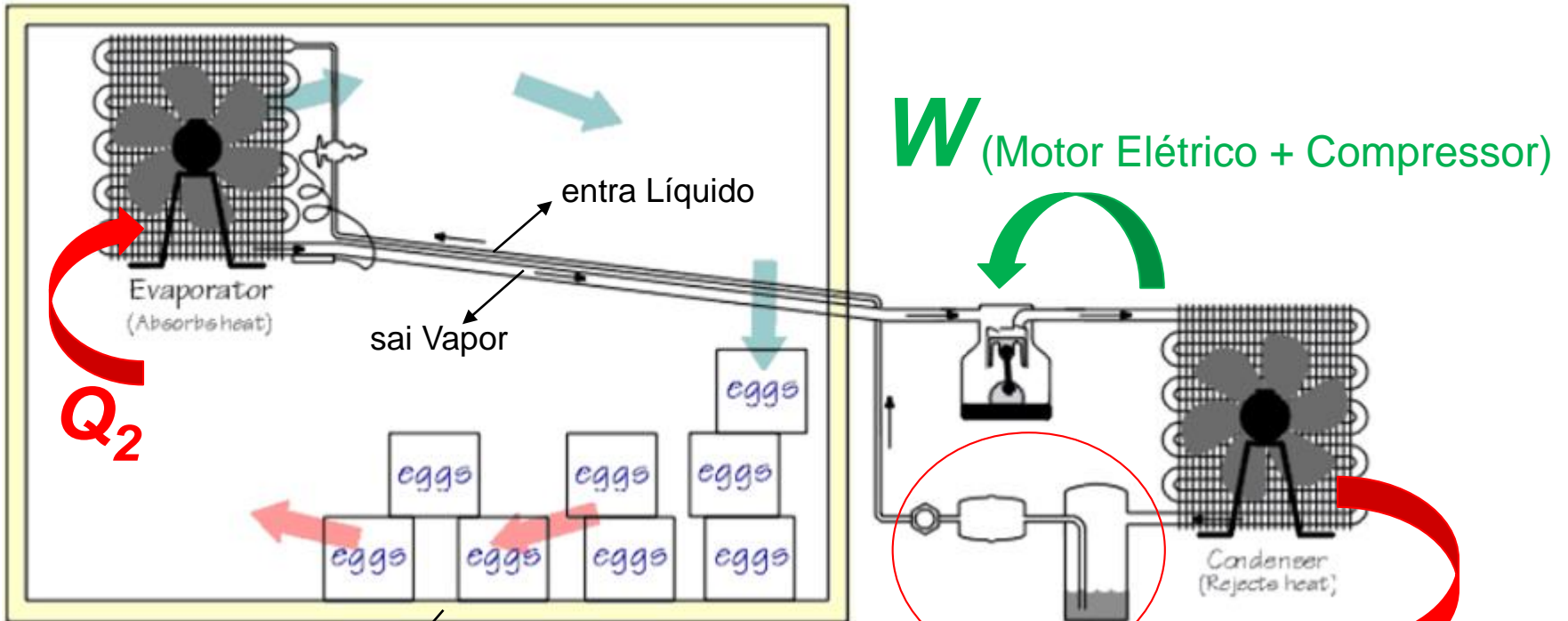
- a) 0,1 b) 0,2 c) 0,3 d) 0,4 e) 0,5

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



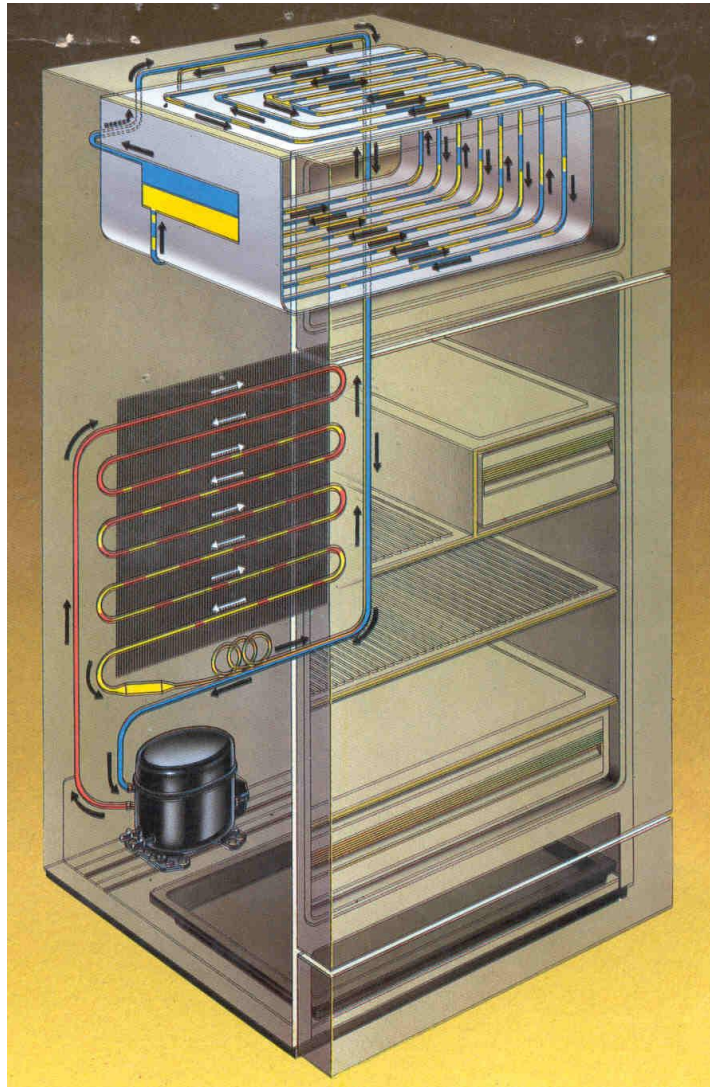
Sistema termicamente isolado

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 (CO₂ Líquido)

Referências Sitioográficas

- http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery#First_steam_engine_mechanism
- http://en.wikipedia.org/wiki/Newcomen_steam_engine
- http://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Thompson
- http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_cycle
- http://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Thompson#Bavarian_maturity
- http://en.wikipedia.org/wiki/Phlogiston_theory
- 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.if.ufrgs.br/~lang/maqterm.pdf>
- <https://blog.aprovatotal.com.br/primeira-lei-da-termodinamica/>