* Vimos 2 máquinas térmicas: o motor térmico e o refrigerador térmico. Bem como vimos o ciclo de Carnot, ciclo ideal pois as trocas de calor acontecem à temperatura constante. (Troca de calor isotérmica)

O sistema só pode trocar calor quando está a mesma temperatura, pois a conduç de calor é irreversível.

* Quando ocorre mudança de temperatura $T_1 \rightarrow T_2$ isto deve ocorrer sem troca de calor $\Rightarrow$ processos adiabáticos reversíveis.

* Motor $\rightarrow$ inverte $\rightarrow$ refrigerador

* Nas máquinas térmicas, a quantidade de matéria no interior da máquina recebe ou rejeita calor, se expande e se comprime, e muitas vezes pode sofrer transiçõ de fase. Esse processo é cíclico.

* Para máquina de combustão interna, a substância pode ser gasolina com ar.

* Na turbina a vapor, a substância é a água.

* Um motor a gasolina consome 10.000 J de calor e realiza 2000 J de trabalho mecânico em cada ciclo. O calor é obtido pela queima de gasolina com calor de combustão $L_C = 5{,}0 \times 10^4 \, J/g$.

(a) Qual é a eficiência térmica desta máquina?

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{2000}{10.000} = 0{,}2 \quad (20\%)$$

(b) Qual é a quantidade de calor rejeitada em cada ciclo?

$$W = \underbrace{Q_1}_{\text{fonte quente}} - \underbrace{Q_2}_{\text{fonte fria}} \Rightarrow Q_2 = Q_1 - W$$

$$Q_2 = 10.000 - 2.000$$

$$\underbrace{Q_2 = 8000 \, J}_{\text{calor cedido/rejeitado}}$$

(c) Se o motor completa 25 ciclos por segundo, qual é a potência fornecida em Watt?

$$P = 2000 \frac{J}{\text{ciclo}} \times 25 \frac{\text{ciclos}}{s} = 50 \times 10^3 \, W = 50 \, kW$$

(d) Qual é a quantidade de gasolina queimada em cada ciclo?

$$Q_1 = m L_C \Rightarrow m = \frac{Q_1}{L_C} = \frac{10.000 \, [J]}{5 \times 10^4 \, [J/g]} = 0{,}2 g$$

(e) Qual é a quantidade de gasolina queimada por segundo (e por hora)?

$$\frac{0{,}2 g}{\text{ciclo}} \, \frac{25 \text{ ciclos}}{s} = 5{,}0 g/s = \frac{5{,}0 g}{1/3600 \, h} = 18 \, kg/h$$

A densidade da gasolina ~ $0,70\ g/cm^3$

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow 0,7 = \frac{18 \times 10^3 [g/h]}{V}$$

$$V = \frac{18 \times 10^3}{0,7} = 25,7 \times 10^3\ cm^3/h = 25,7\ L/h$$

Se o veículo se desloca a 80 km/h

$$\left.\begin{matrix} 80\ km \longrightarrow 1h \\ 25,7\ L \longrightarrow 1h \end{matrix}\right\} \frac{80}{25,7} = 3,1\ km/L$$

pouco eficiente para 1 caminhão

+ Motor a gasolina usado em automóveis

1) Mistura de ar + gasolina flui p/ o interior do cilindro, o pistão desce e o volume inicial mínimo V aumenta para rV, onde r é a razão de compressão.

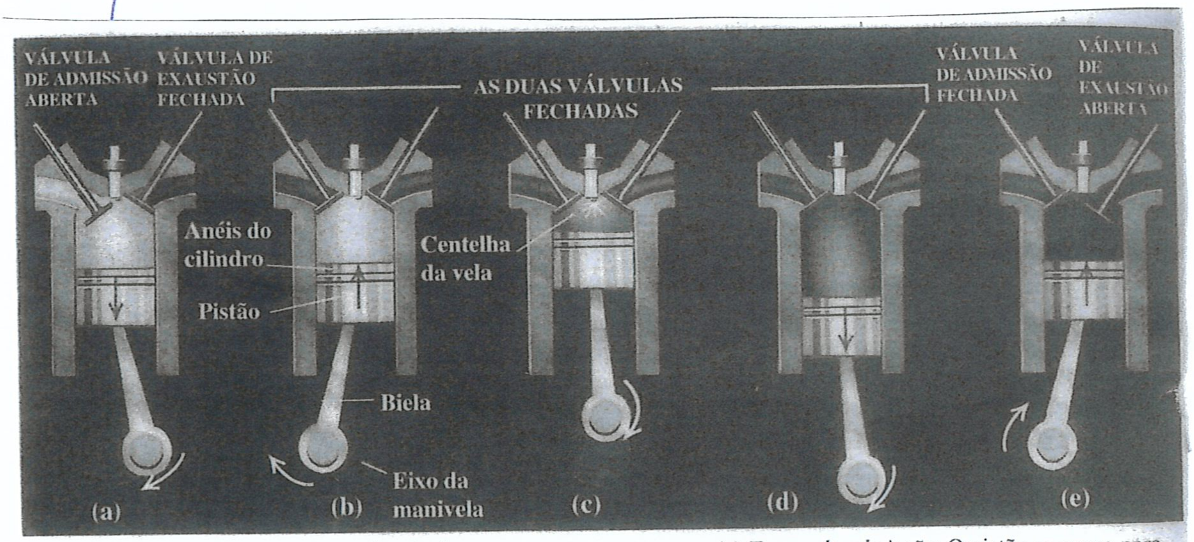


FIGURA 18.2 Ciclo de um motor de combustão interna com quatro tempos. (a) *Tempo de admissão*: O pistão se move para baixo produzindo um vácuo parcial no cilindro: a mistura de ar e gasolina flui para o cilindro através de uma válvula de admissão aberta. (b) *Tempo de compressão:* A válvula de admissão se fecha e a mistura é comprimida à medida que o pistão sobe. (c) *Ignição:* A centelha da vela produz ignição da mistura. (d) *Tempo da potência:* A mistura quente empurra o pistão para baixo, produzindo trabalho. (e) *Tempo da exaustão:* A válvula de exaustão se abre e o pistão se move para cima empurrando a mistura queimada para fora do cilindro e depois o ciclo se repete.

Ciclo de Otto

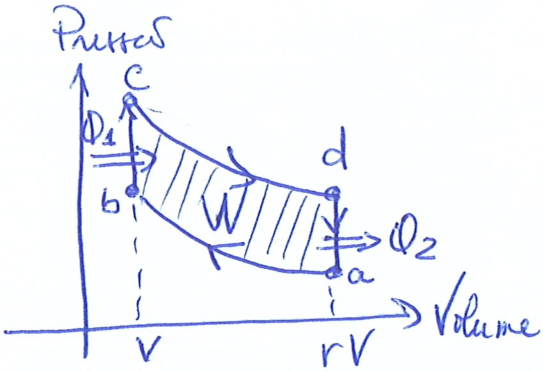
* Os processos bc e da ocorrem a volume constante

$$Q_1 = n C_V (T_c - T_b) > 0$$

hot
quente

$$Q_2 = n C_V (T_a - T_d) < 0$$

cold
fria



$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{(T_c - T_b) + (T_a - T_d)}{(T_c - T_b)}$$

$T_c > T_b$

$T_a < T_d$

* Para os processos adiabáticos:

$$T_a (rV)^{\gamma-1} = T_b V^{\gamma-1} \quad e \quad T_d (rV)^{\gamma-1} = T_c V^{\gamma-1}$$

* Substituindo,

$$\eta = \frac{T_d r^{\gamma-1} - T_a r^{\gamma-1} + T_a - T_d}{T_d r^{\gamma-1} - T_a r^{\gamma-1}} = \frac{\cancel{(T_a - T_d)}(r^{\gamma-1} - 1)}{\cancel{(T_d - T_a)} r^{\gamma-1}}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$ (eficiência térmica do ciclo de Otto)

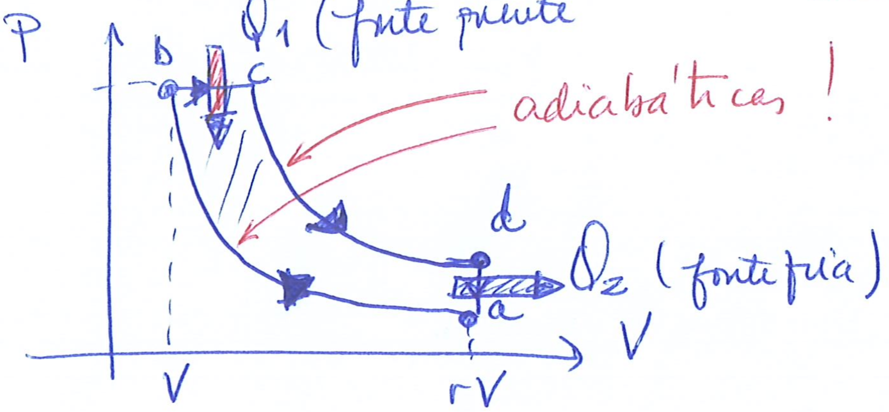
Para $r = 8$ e $\gamma = 1{,}4$ (para o ar) $\Rightarrow \eta_{\text{ideal Otto}} = 0{,}56$ (56%)

* Modelo idealizado

Motor a gasolina real $\eta \simeq 35\% \Rightarrow$ solta no ar (poluição)

CO e outros produtos da não queima.

* O ciclo Diesel é similar. (ideal)



Em a o ar é comprimido adiabaticamente até b.

Em b o ar é aquecido a pressão constante até c

Em c o ar é expandido adiabaticamente até d

Em d o ar é resfriado a volume constante até a

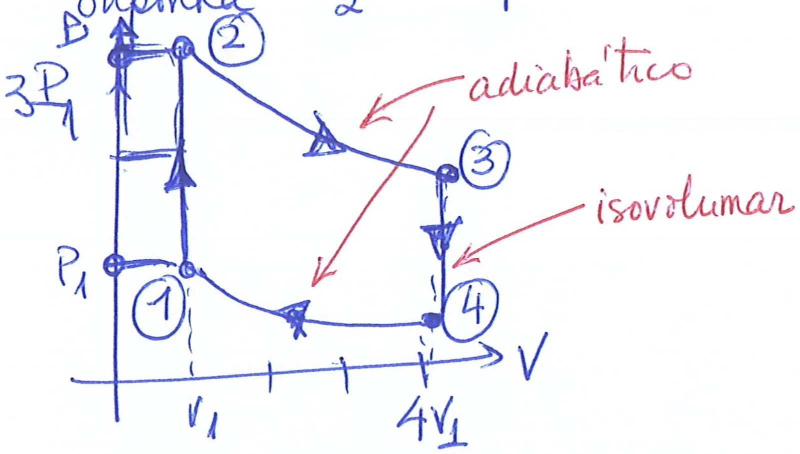
"No início do tempo de compressão não há combustível. Um pouco antes do início do tempo de potência, os injetores começam a injetar o combustível diretamente no cilindro, com uma velocidade suficiente para manter a pressão constante durante a 1ª parte do tempo de potência. Em virtude da elevada temperatura resultante da compressão adiabática, o combustível explode espontaneamente à medida que é injetado, não é necessário usar nenhuma vela de ignição".

$r \sim 15 \text{ e } 20 \Rightarrow \gamma = 1{,}4 \Rightarrow \eta_{\substack{ideal \\ diesel}} \simeq 0{,}65 - 0{,}70 > \eta_{\substack{ideal \\ otto}}$

Ref. Young + Freedman (Física II)

* Um motor a combustão interna a gasolina pode ser mostrado na figura abaixo. Suponha o gás ideal e use a razão de compressão 4:1 ($V_2 = 4V_1$)

Suponha $P_2 = 3P_1$.



a) Determine a temperatura em cada vértice do ciclo em termos de T_1 e da razão $\gamma = C_P/C_V$

(i) $pV = nRT$ ou $\frac{pV}{T} = nR$

(ii) $pV^{\gamma} = cte$ numa transformação adiabática

(iii) $U = nC_V T$ onde o valor $C_V = \frac{3}{2}R$ para um gás monoatômico, etc. Neste exemplo não é fornecido o valor de C_V, portanto não se sabe se o gás ideal que está sendo usado é monoatômico ou poliatômico.

	V	P	T
1	V_1	P_1	T_1
2	V_1	$3P_1$	
3	$4V_1$		
4	$4V_1$		

Processo 1 → 2 (Volume constante)

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{3P_1 V_1}{T_2} \Rightarrow \boxed{T_2 = 3T_1}$$

Processo 2 → 3 (Adiabatico)

$$P_2 V_2^\gamma = P_3 V_3^\gamma$$

$$3P_1 \cancel{V_1^\gamma} = P_3 4^\gamma \cdot \cancel{V_1^\gamma} \Rightarrow \boxed{P_3 = 3P_1 4^{-\gamma}}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_3 V_3}{T_3} \Rightarrow \frac{\cancel{P_1}\cancel{V_1}}{T_1} = \frac{3\cancel{P_1} 4^{-\gamma} \cdot 4\cancel{V_1}}{T_3} \Rightarrow$$

$$\boxed{T_3 = 3 \times 4^{1-\gamma} \times T_1}$$

Processo 4 → 1 (Adiabatico)

$$P_4 V_4^\gamma = P_1 V_1^\gamma$$

$$P_4 \cdot 4^\gamma \cancel{V_1^\gamma} = P_1 \cancel{V_1^\gamma} \Rightarrow \boxed{P_4 = P_1 \times 4^{-\gamma}}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_4 V_4}{T_4} \Rightarrow \frac{\cancel{P_1}\cancel{V_1}}{T_1} = \frac{\cancel{P_1} \times 4^{-\gamma} \times 4\cancel{V_1}}{T_4} \Rightarrow \boxed{T_4 = 4^{1-\gamma} \times T_1}$$

b) Determine o trabalho realizado em cada transformação do ciclo em termos de T_1, γ e C_V.

$W_{12} = W_{34} = 0$ pois o volume é constante.

$$W_{23} = \Delta Q_{23} - \Delta U = 0 - nC_V(T_3 - T_2)$$

$$W_{23} = -nC_V 3T_1 (4^{1-\gamma} - 1) > 0$$

$$W_{41} = \Delta Q_{41} - \Delta U_{41} = 0 - nC_V(T_4 - T_1)$$

$$W_{41} = -nC_V T_1 (1 - 4^{1-\gamma}) < 0$$

(trabalho negativo realizado sobre o gás)

c) O rendimento do ciclo em função de γ.

$$\eta = \frac{\text{trabalho fornecido}}{\text{calor que entra}} = \frac{W_{23} + W_{41}}{Q_{12}} =$$

$$= \frac{-nC_V 3T_1 (4^{1-\gamma} - 1) - nC_V T_1 (1 - 4^{1-\gamma})}{nC_V (T_2 - T_1)} =$$

$$= \frac{+nC_V T_1 3(1 - 4^{1-\gamma}) - nC_V T_1 (1 - 4^{1-\gamma})}{nC_V (3T_1 - T_1)}$$

$$= \frac{\cancel{nC_V T_1}(1 - 4^{1-\gamma})\cancel{(3-1)}}{\cancel{nC_V T_1 (3-1)}} = 1 - 4^{1-\gamma}$$

$$\boxed{\eta = 1 - 4^{1-\gamma}}$$