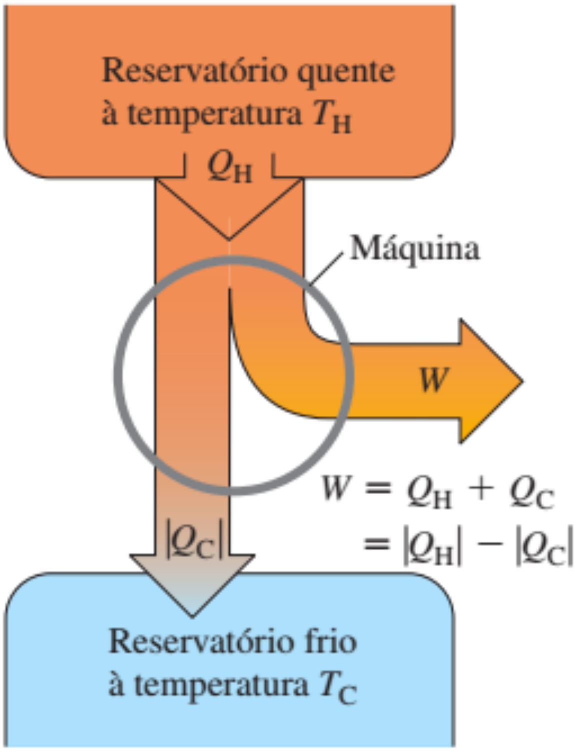
Máquinas Térmicas

Figura 20.3 Diagrama esquemático do fluxo de energia de uma máquina térmica.



Trabalho realizado pela máquina — Calor rejeitado pela máquina

Eficiência térmica de uma máquina

$$e = \frac{W}{Q_H} = 1 + \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \left|\frac{Q_C}{Q_H}\right| \qquad (20.4)$$

Calor absorvido pela máquina

Coloque as seguintes máquinas térmicas em ordem da mais alta à mais baixa eficiência térmica.
(i) Uma máquina que absorve 5.000 J de calor e rejeita 4.500 J de calor em um ciclo;
(ii) uma máquina que absorve 25.000 J de calor e realiza 2.000 J de trabalho em um ciclo;
(iii) uma máquina que realiza 400 J de trabalho e rejeita 2.800 J de calor em um ciclo.

Resposta: eficiência de (iii) = 0,125 > de (i) = 0,1 > de (ii) = 0,08

Máquinas de Combustão Interna

O motor a gasolina, usado em automóveis e em muitas outras máquinas, é um exemplo familiar de máquina térmica.

Figura 20.5 Ciclo de um motor de combustão interna com quatro tempos.

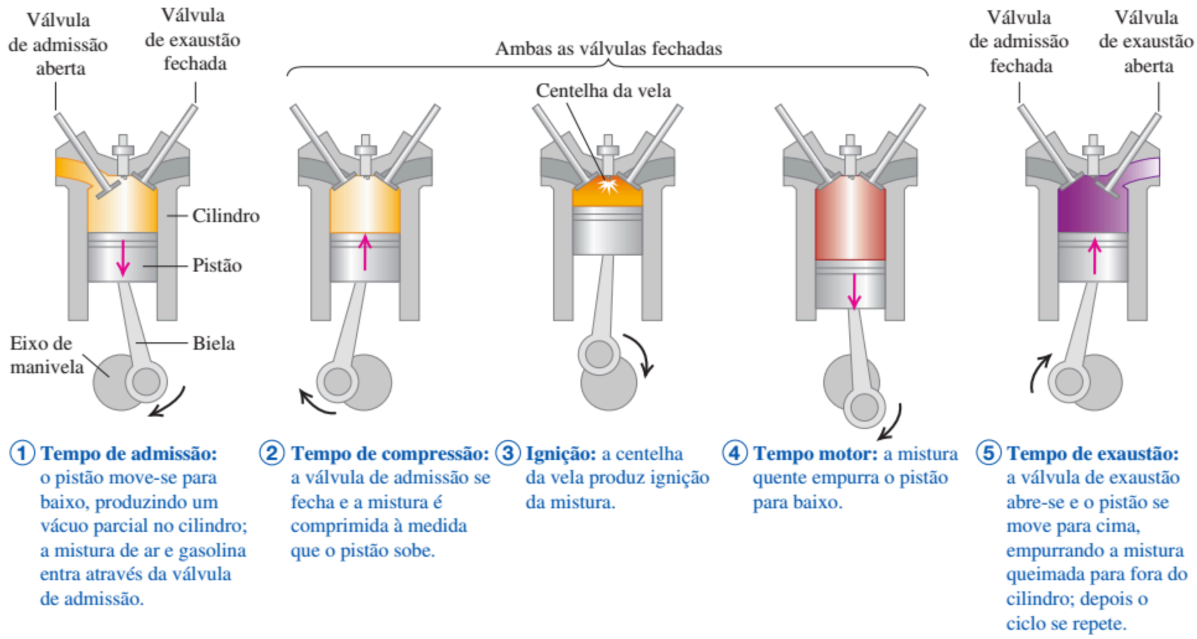
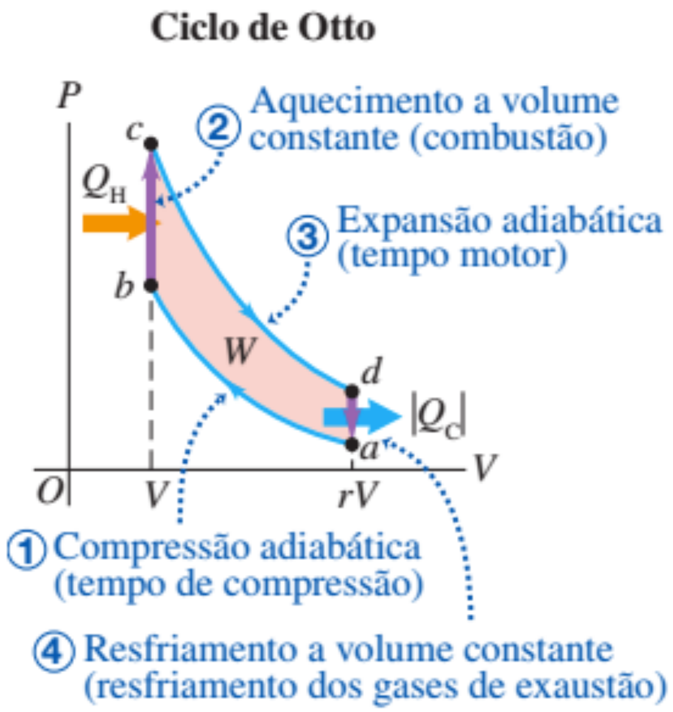


Figura 20.6 Diagrama *PV* de um ciclo de Otto, modelo do ciclo idealizado dos processos termodinâmicos em um motor a gasolina.



a → b compressão adiabática ou aquecimento adiabático

$$P_a V_a^{\gamma} = P_b V_b^{\gamma}$$

b → c aquecimento isocórico

$$\Delta U_{bc} = Q_{bc} = nc_v(T_c - T_b)$$
$$Q_{bc} = Q_H$$

c → d expansão adiabática ou resfriamento adiabático;

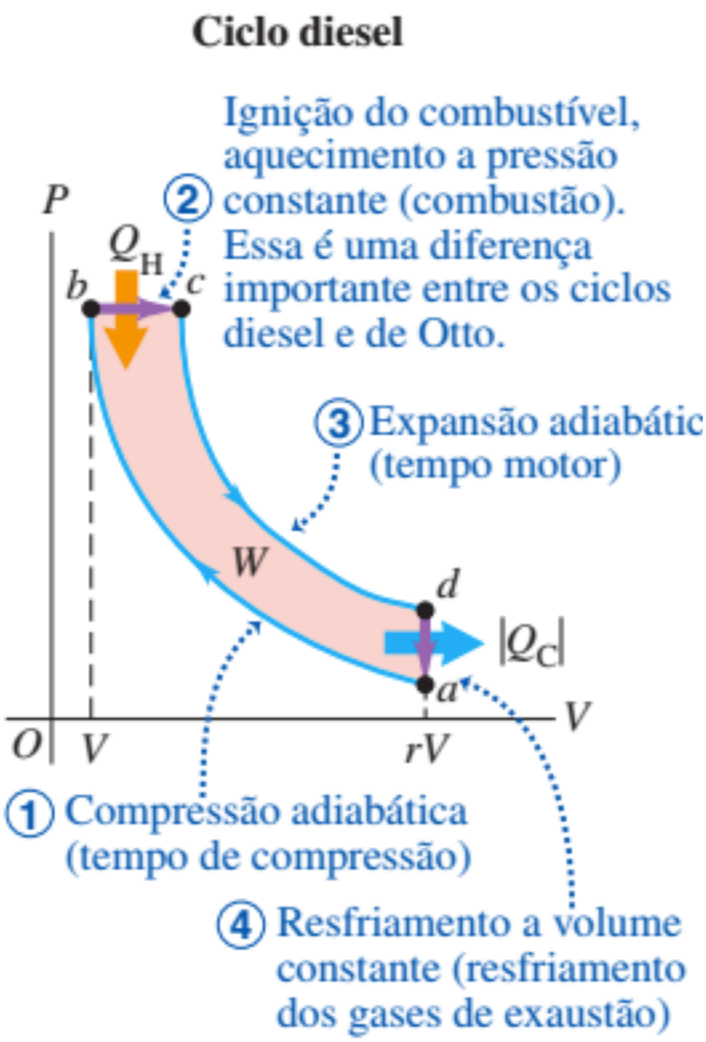
$$P_c V_c^{\gamma} = P_d V_d^{\gamma}$$

d → a resfriamento isocórico;

$$\Delta U_{da} = Q_{da} = nc_v(T_a - T_d)$$
$$Q_{da} = Q_C$$

O motor a diesel também é um exemplo familiar de máquina térmica. Neste caso, o ciclo do motor a diesel é semelhante ao do motor a gasolina. A diferença mais importante é que não existe combustível no cilindro no início do tempo de compressão. Um pouco antes do início do tempo de potência, os injetores começam a injetar o combustível diretamente no cilindro, com velocidade suficiente para manter a pressão constante durante a primeira parte do tempo de potência. Em virtude da elevada temperatura resultante da compressão adiabática, o combustível explode espontaneamente ao ser injetado; não é necessário usar nenhuma vela de ignição.

Figura 20.7 Diagrama *PV* de um ciclo diesel ideal.



a → b compressão adiabática ou aquecimento adiabático

$$P_a V_a^{\gamma} = P_b V_b^{\gamma}$$

b → c expansão isobárica ou aquecimento isobárico

$$Q_{bc} = nc_p(T_c - T_b)$$

$$Q_{bc} = Q_H$$

c → d expansão adiabática ou resfriamento adiabático;

$$P_c V_c^{\gamma} = P_d V_d^{\gamma}$$

d → a resfriamento isocórico;

$$Q_{da} = nc_p(T_a - T_d)$$

$$Q_{da} = Q_C$$

Exercício (Ciclo de Otto)

1) Vamos considerar um motor de combustão interna a gasolina que tem um cilindro de combustão com volume inicial 0,1L que será preenchido por uma mistura de ar e gasolina mantendo a temperatura de 27^{o}C e 1atm na condição de gás ideal. Vamos usar o ciclo de Otto para estudar este motor (4 processos quase-estáticos: compressão adiabática, aquecimento isocórico, expansão adiabática e resfriamento isocórico). Sabendo que as moléculas deste gás serão majoritariamente diatômicas rígidas, que o volume máximo será 0,95L, ou seja uma razão de compressão de 0,95 e que o calor da queima do combustível é de 10.000J, determine:

(a) a quantidade de gás injetada no cilindro, o calor específico molar a volume e pressão constantes;

(b) os valores de temperatura, pressão e volume ao final de cada processos termodinâmico do motor;

(c) a quantidade de trabalho realizado, a quantidade de calor dissipado e a eficiência teórica do motor.

(d) Use a expressão abaixo para calcular a eficiência do motor, compare com o valor obtido no item anterior e discuta

Eficiência térmica no ciclo de Otto

$$e = 1 - \frac{1}{r^{\gamma - 1}} \qquad (20.6)$$

Razão de compressão (r); Razão dos calores específicos (γ)

Exercício (Ciclo de Diesel)

2) Resolva o problema anterior com os mesmos dados numéricos considerando agora um ciclo de Diesel para estudar o motor (4 processos quase-estáticos: compressão adiabática, aquecimento isobárico, expansão adiabática e resfriamento isocórico). Nestas condições compare a eficiências dos dois motores: este e o do exercício anterior.

S T Q Q S S D

___/___/___

Ciclo Otto $a \xrightarrow{(1)} b \xrightarrow{(2)} c \xrightarrow{(3)} d \xrightarrow{(4)} a$ $R = 0{,}082\ atm.L/mol\,K$

$V_a = 0{,}95L$ $T_a = 27°C = 300K$ $P_a = 1atm$

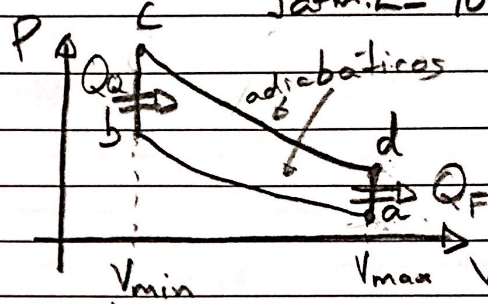
$V_b = 0{,}10L$ $1atm.L \cong 100J$

(1) compressão adiabática

(2) aquecimento isocórico

(3) expansão adiabática

(4) resfriamento isocórico



$Q_Q = 10.000 J$ substância ⇒ gás diatômico rígidas

a) $n = ?$ c_v e c_p

$(V = 0{,}1L)$ $PV = nRT$ $n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 0{,}1}{0{,}082 \times 300} = 0{,}004\ mol$

T.E.E $U = \frac{1}{2} nRT$ para cada grau de liberdade

diatômica rígida 5 (3 transl + 2 rot.)

$U = \frac{5}{2} nRT = n c_v T \Rightarrow c_v = \frac{5}{2} R$ $c_p = c_v + R = \frac{7}{2} R$

$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{7}{5} = 1{,}4$

Resposta: $n = 0{,}004\ mol$ $c_v = \frac{5}{2} R$ e $c_p = \frac{7}{2} R$

b) $a \Rightarrow V_a = 0{,}95L$; $T_a = 300K$; $P_a = 1atm$ $\frac{0{,}95}{0{,}1} = 9{,}5$

$b \Rightarrow V_b = 0{,}10L$

adiabático $PV^\gamma = const$ $P_b V_b^\gamma = P_a V_a^\gamma$ ∴ $P_b = P_a \left(\frac{V_a}{V_b}\right)^\gamma$

$P_b = P_a r^\gamma$ ∴ $P_b = 1 \times 9{,}5^{1,4} = 23{,}37 atm$

$P_b V_b = n R T_b$ $T_b = \frac{P_b V_b}{nR} = \frac{23{,}37 \times 0{,}1}{0{,}004 \times 0{,}082} = 7125K$ ↳ $6852°C$

$b \Rightarrow V_b = 0{,}10L$; $T_b = 7125K$; $P_b = 23{,}4\ atm$

$c \Rightarrow V_c = 0{,}10L$ isocórico $W_{b \to c} = 0$ $\Delta U_{b \to c} = Q_{b \to c}$

$Q_{b \to c} = 10.000 J \approx 100 atm.L \Rightarrow \Delta U_{b \to c} = 10000 = n c_v (T_c - T_b)$

$100 = 0{,}004 \times \frac{5}{2} \times 0{,}082\ (T_c - 7125)$ ∴ $\frac{1100}{0{,}00082} = T_c - 7125$

$T_c = 114826\ K$

a ⇒ $V_a = 0{,}95\,L$; $T_a = 300\,K$; $P_a = 1\,atm$

b ⇒ $V_b = 0{,}10\,L$; $T_b = 7125\,K$; $P_b = 23{,}4\,atm$

c ⇒ $V_c = 0{,}10\,L$; $T_c = 114826\,K$; $P_c = 376{,}6\,atm$

$P_cV_c = nRT_c \therefore P_c = \dfrac{nRT_c}{V_c} = \dfrac{0{,}004 \times 0{,}082 \times 114826}{0{,}1}$

$P_c = 376{,}6\,atm$

d ⇒ $V_d = 0{,}95\,L$ $\quad$ c → d adiabático $\quad PV^{\gamma} = const$

$P_cV_c^{\gamma} = P_dV_d^{\gamma} \quad P_d = P_c\left(\dfrac{V_c}{V_d}\right)^{\gamma} = P_c\left(\dfrac{V_{min}}{V_{max}}\right)^{\gamma} = \dfrac{P_c}{r^{\gamma}}$

$P_d = \dfrac{376{,}6}{9{,}5^{1{,}4}} = 16{,}1\,atm \quad r = \dfrac{V_{max}}{V_{min}} = \dfrac{0{,}95}{0{,}1} = 9{,}5$

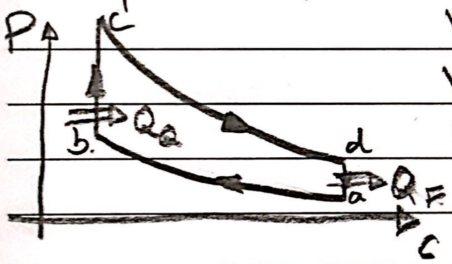
$T_d = \dfrac{V_dP_d}{nR} = 0{,}95 \times 16{,}1 / 0{,}004 \times 0{,}082 = 46.631\,K$

Resposta: (b) $\quad V_a = 0{,}95\,L$; $P_a = 1\,atm$; $T_a = 300\,K$

$V_b = 0{,}10\,L$; $P_b = 23{,}4\,atm$; $T_b = 7125\,K$

$V_c = 0{,}10\,L$; $P_c = 376{,}6\,atm$; $T_c = 114826\,K$

$V_d = 0{,}95\,L$; $P_d = 16{,}1\,atm$; $T_d = 46631\,K$



d → a isocórico $\quad W_{d-a} = 0 \Rightarrow \Delta U_{d-a} = Q_{d-a}$

$\Delta U_{da} = nc_v\Delta T = 0{,}004 \times \dfrac{5}{2}\, 0{,}082\,(300 - 46631) = -38\,atm.L$

$\Delta U_{d-a} = Q_{da} = -3800\,J$ ⇒ calor liberado pelo motor

$\Delta U = 0$ ciclo $\quad W = |Q_Q| - |Q_F| = 10000 - 3800 = 6200\,J$

$e = \dfrac{W}{Q_Q} = \dfrac{6200}{10000} = 0{,}62$ $\qquad$ Resposta (c) $W = 6200\,J$

$Q_F = -3800\,J$

$e = 0{,}62$

(d) $e = 1 - \dfrac{1}{r^{\gamma-1}} = 1 - \dfrac{1}{9{,}5^{0{,}4}} = 0{,}59$

Esta diferença se deve ao fator de conversão de unidades de atm.L para J que usamos aproximado 1atm.L = 100J, mas o valor exato seria de 1 atm.L = 101,2J.