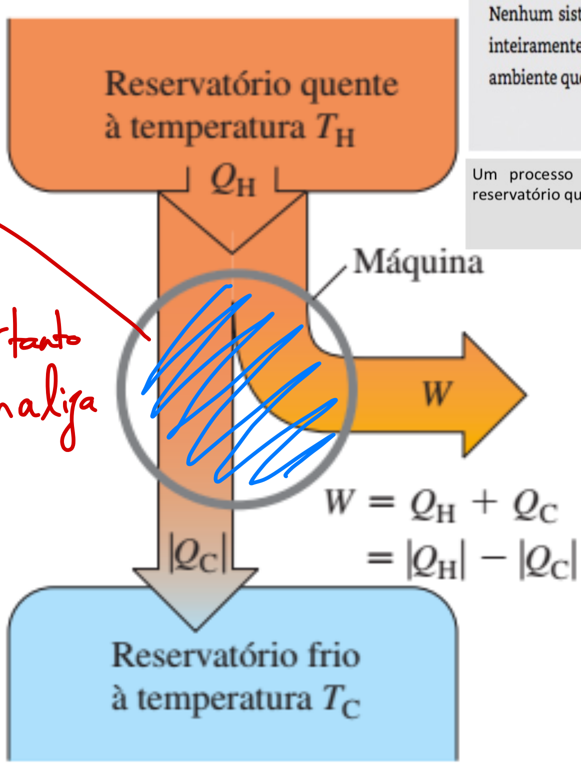
Máquinas Térmicas

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



A máquina térmica realiza ciclos termodinâmicos, portanto o ciclo inicia e finaliza no mesmo estado termodinâmico

Nenhum sistema pode absorver calor de um único reservatório e convertê-lo inteiramente em trabalho sem que resultem outras variações no sistema e no ambiente que o cerca.

SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA: ENUNCIADO DE KELVIN

Um processo cujo único resultado efetivo seja o de retirar calor de um reservatório quente e transformá-lo inteiramento em trabalho é impossível.

SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA: ENUNCIADO DE CLAUSIUS

$\Downarrow$

Impossível $Q_c = 0$

$Q_H = Q_Q$ (Reservatório quente)

$Q_C = Q_F$ (Reservatório frio)

Trabalho realizado pela máquina — Calor rejeitado pela máquina

Eficiência térmica de uma máquina

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

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.

(i) $Q_Q = 5000\,J$ e $Q_F = 4500\,J$

$$W = Q_Q - Q_F = 5000 - 4500 = 500\,J$$

$$e = \frac{W}{Q_Q} = \frac{500}{5000} = 0{,}1$$ ou seja 10% de eficiência

(ii) $Q_Q = 25000\,J$ e $W = 2000\,J$

$$e = \frac{W}{Q_Q} = \frac{2\cancel{000}}{25\cancel{000}} = 0{,}08$$ ou seja 8% eficiência

(iii) $W = 400\,J$ e $Q_F = 2800\,J$

$$W = Q_Q - Q_F \Rightarrow Q_Q = W + Q_F = 400 + 2800 = 3200\,J$$

$$e = \frac{W}{Q_Q} = \frac{4\cancel{00}}{32\cancel{00}} = 0{,}125$$ ou seja 12,5% de eficiência

Mais eficiente $\rightarrow$ menos eficiente: iii $\rightarrow$ i $\rightarrow$ ii

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.

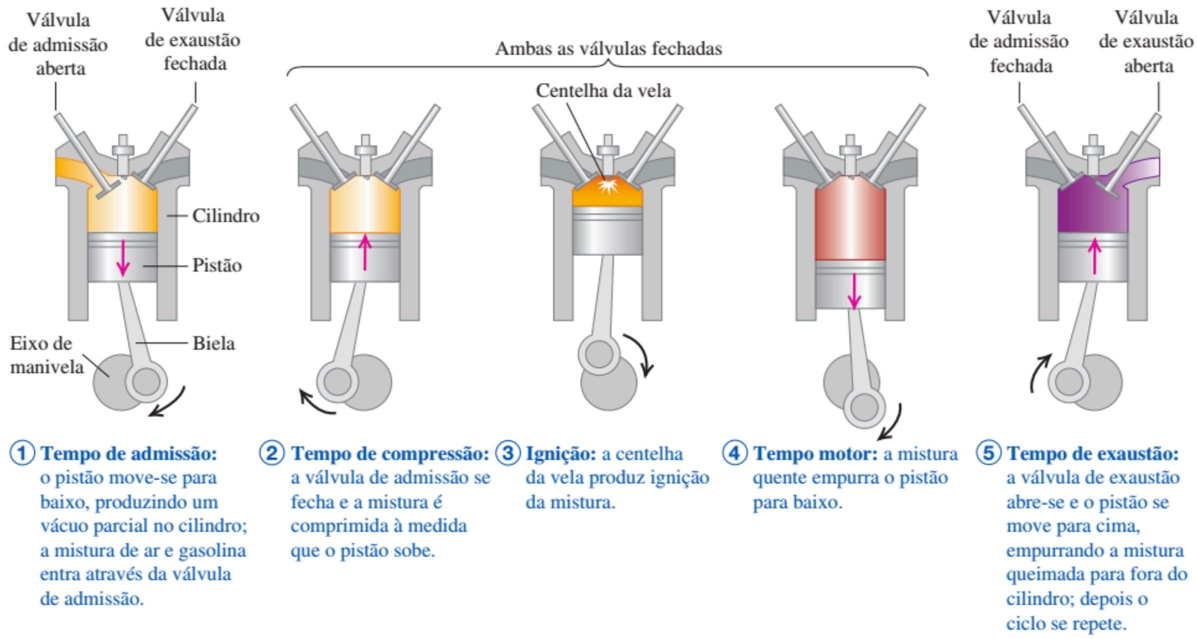
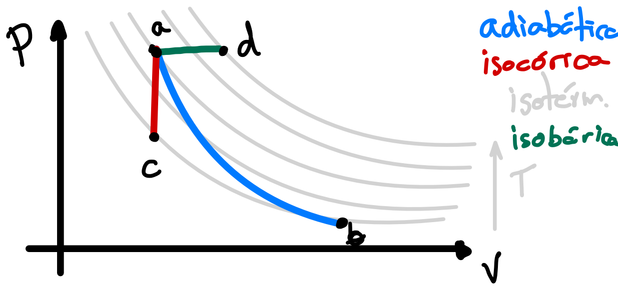
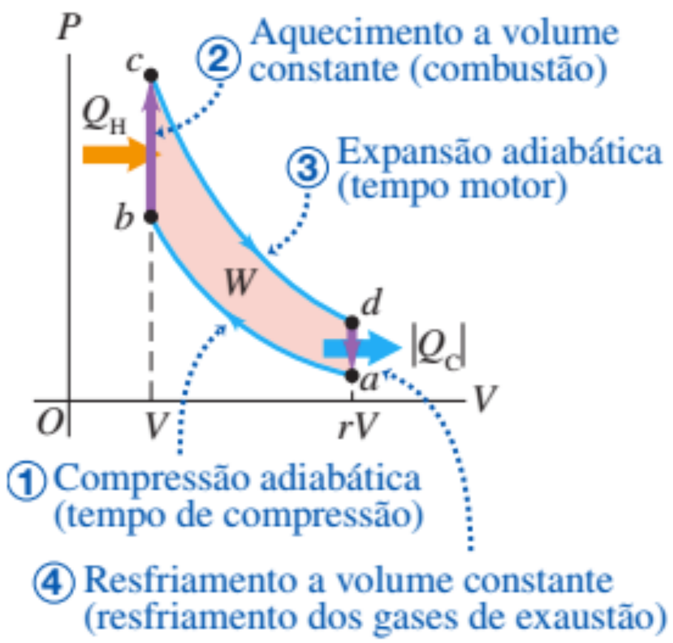


Figura 20.6 Diagrama *PV* de um ciclo de Otto, modelo do ciclo idealizado dos processos termodinâmicos em um motor a gasolina.



Ciclo de Otto



a → b compressão adiabática ou aquecimento adiabático

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

b → c aquecimento isocórico $\quad W_{bc} = 0$

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

c → d expansão adiabática ou resfriamento adiabático;

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

d → a resfriamento isocórico; $\quad W_{da} = 0$

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

$$e = \frac{|Q_Q| - |Q_F|}{Q_Q}$$

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°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 9,5 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;

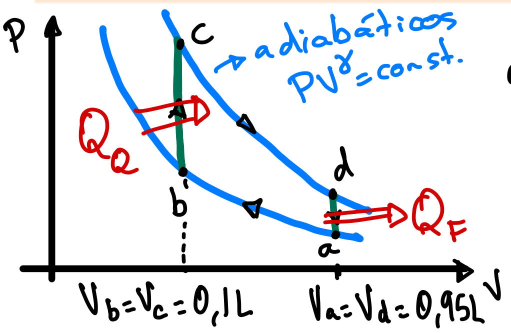
(b) os valores de temperatura, pressão e volume ao final de cada processos termodinâmico do motor;

(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 — Razão dos calores específicos



$a \to b$ compressão adiabática (aquecimento)
$b \to c$ aquecimento isocórico
$c \to d$ expansão adiabática
$d \to a$ resfriamento isocórico

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{0,95}{0,1} = 9,5$$

$Q_{combustão} = Q_Q = 10000J$

Condições iniciais: $V_b = 0,1L = 0,1 \times 10^{-3} m^3 = 10^{-4} m^3$

$P_b = 1atm = 10^5 Pa$

$T_b = 27°C = 300K$

O sistema é composto por um gás diatômico assim pelo T.E.E $U = \frac{5}{2}NkT = \frac{5}{2}nRT = nc_vT$

$c_v = \frac{5}{2}R \Rightarrow$ para o gás ideal $c_p = c_v + R = \frac{7}{2}R$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\frac{7}{2}R}{\frac{5}{2}R} = \frac{7}{5}$$

$c_v = \frac{5}{2}R$; $c_p = \frac{7}{2}R$ e $\gamma = \frac{7}{5} = 1,4$

a) $n = ?$ $c_v = ?$ $c_p = ?$

No estado termodinâmico b $\Rightarrow$ $P_b V_b = nRT_b$

$$n = \frac{P_b V_b}{RT_b} = \frac{10^5 \times 10^{-4}}{8{,}3 \times 300} = 4 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Pelo T.E.E. temos que $c_v = \frac{5}{2}R = \frac{5}{2} \times 8{,}3 = 20{,}75 \text{ J/mol.K}$

e $c_p = \frac{7}{2}R = \frac{7}{2} \times 8{,}3 = 29{,}05 \text{ J/mol.K}$

Resposta: $n = 4 \times 10^{-3}$ mol ; $c_v = \frac{5}{2}R = 20{,}75$ J/mol.K ; $c_p = \frac{7}{2}R = 29{,}05$ J/mol.K

b)

	T(K)	P(Pa)	V(m³)	
a	123	$0{,}043 \times 10^5$	$0{,}95 \times 10^{-3}$	$= V_{max}$
b	300	10^5	$0{,}1 \times 10^{-3}$	$= V_{min}$
c	$120{,}8 \times 10^3$	401×10^5	$0{,}1 \times 10^{-3}$	
d	$48{,}6 \times 10^3$	17×10^5	$0{,}95 \times 10^{-3}$	$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_a}{V_b} = \frac{V_d}{V_c}$

$V_a = 0{,}95 \text{ L} = 0{,}95 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = V_d$ processo isocórico

$V_b = V_c$ " "

Nos processos adiabáticos $(a \to b)$ e $(c \to d)$: $PV^\gamma = \text{const}$

$P_a V_a^\gamma = P_b V_b^\gamma \therefore P_a = P_b \left(\frac{V_b}{V_a}\right)^\gamma = \frac{P_b}{r^\gamma}$ $\qquad r^\gamma = \left(\frac{0{,}95 \times \cancel{10^{-3}}}{0{,}1 \times \cancel{10^{-3}}}\right)^{1{,}4}$

$r^\gamma = 23{,}38$ $\qquad P_a = \frac{10^5}{23{,}38} = 4{,}3 \times 10^3$

$$P_aV_a = nRT_a \quad \therefore \quad T_a = \frac{P_aV_a}{nR} = \frac{4{,}3\times\cancel{10^{3}}\times 0{,}95\times\cancel{10^{-3}}}{4\times10^{-3}\times 8{,}3} = 123K$$

$$P_cV_c^{\gamma} = P_dV_d^{\gamma} \quad \therefore \quad P_d = P_c\left(\frac{V_c}{V_d}\right)^{\gamma} \quad \therefore \quad P_d = \frac{P_c}{r^{\gamma}}$$

No processo isocórico $b \to c$: $Q_{bc} = 10000J$

$W_{b\to c} = 0 \Rightarrow$ Pela 1ª Lei $\Delta U_{bc} = Q_{bc}$

$$\Delta U_{bc} = nc_v\Delta T = nc_v(T_c - T_b) = Q_Q \quad \therefore \quad T_c = \frac{Q_Q}{nc_v} + T_b$$

$$T_c = \frac{10^4}{4\times10^{-3}\times 20{,}75} + 300 = 120782K \cong 120{,}8\times10^{3}K$$

$$P_cV_c = nRT_c \quad \therefore \quad P_c = \frac{nRT_c}{V_c} = \frac{4\times\cancel{10^{-3}}\times 8{,}3\times 120{,}8\times10^{3}}{0{,}1\times\cancel{10^{-3}}}$$

$$P_c = 401\times10^{5}\,Pa$$

$$P_d = \frac{P_c}{r^{\gamma}} = \frac{401\times10^{5}}{23{,}38} = 17\times10^{5}\,Pa$$

$$P_dV_d = nRT_d \quad \therefore \quad T_d = \frac{P_dV_d}{nR} = \frac{17\times10^{5}\times 0{,}95\times\cancel{10^{-3}}}{4\times\cancel{10^{-3}}\times 8{,}3}$$

$$T_b = \frac{17\times 0{,}95}{4\times 8{,}3}\times10^{5} = 48{,}6\times10^{3}K$$

$\left.\begin{array}{l}\Delta U_{ab} = nc_v(T_b - T_a)\\ \Delta U_{cd} = nc_v(T_d - T_c)\end{array}\right\}$ pois $Q_{ab} = Q_{cd} = 0$ adiabaticas.

c) $W = W_{ab} + W_{cd} = ?$ $\qquad Q_F = Q_{da} = ?$

$$e = \frac{W}{Q_Q}$$

O trabalho só ocorre nos processos adiabáticos.
Então $Q_{ab} = Q_{cd} = 0$ e $\Delta U_{ab} = -W_{ab}$ e $\Delta U_{cd} = -W_{cd}$

$$\Delta U_{ab} = n c_v (T_b - T_a) = 4 \times 10^{-3} \times 20{,}75 \times (300 - 123) = 15\,J$$
$$\Delta U_{cd} = n c_v (T_d - T_c) = 4 \times \cancel{10^{-3}} \times 20{,}75 \times (48{,}6 - 120{,}8) \cancel{\times 10^{3}} = -5993\,J$$

$$W = W_{ab} + W_{cd} = -\Delta U_{ab} - \Delta U_{cd} = -15 + 5993 = 5978\ J$$

A perda de calor só ocorre no resfriamento isocórico $d \to a$ onde $W_{da} = 0$ $\Rightarrow$ pela 1ª Lei $\Rightarrow$ $\Delta U_{da} = Q_{da} = Q_F$

$$\Delta U_{da} = n c_v (T_a - T_d) = 4 \times 10^{-3} \times 20{,}75 (123 - 48600) = -4024\,J$$
$$Q_F = Q_{da} = -4024\,J$$

Note que $W = |Q_Q| - |Q_F| = 10000 - 4024 = 5976\,J$

A diferença entre $W = 5978\,J$ calculado via os trabalhos e $W = 5976\,J$ calculado via a diferença do calor que entra e sai no sistema é devido aos arredondamentos. Assim

$$e = \frac{W}{Q_Q} = \frac{5978}{10000} \approx \frac{5976}{10000} \cong 0{,}6 \quad \text{ou} \quad 60\%$$

Resposta: O trabalho realizado foi de $\sim 5980\,J$, o calor perdido foi de $\sim 4020\,J$ e a eficiência do ciclo de Otto foi de $\sim 60\%$.

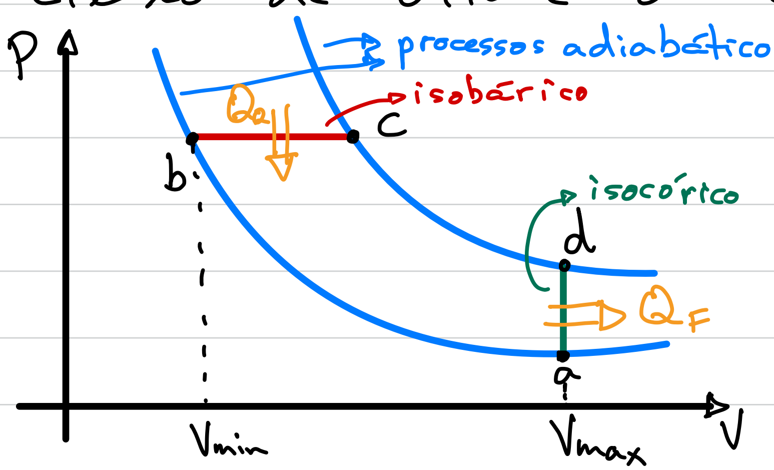
d) $e = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{9{,}5^{0{,}4}} \cong 0{,}6$

Resposta: Para o ciclo de Otto o rendimento pode ser calculado via a expressão geral $e = \frac{W}{Q_Q}$ ou por $e = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$ que é uma expressão que pode ser deduzida analiticamente apenas para o ciclo de Otto. Assim, ambas expressões dão o mesmo valor a menos dos erros de arredondamento no cálculo da expressão geral.

Hoje: Ciclo de Diesel 11/06/21

No ciclo de Diesel o processo de aquecimento isocórico é modificado pelo processo de aquecimento isobárico.

Exercício: Vamos resolver o exercicio anterior com os mesmos dados mas utilizando o ciclo de Diesel, lembrando apenas que na queima da gasolina existe uma liberação de calor menor que na queima do Diesel. Então para compararmos a eficiencia da troca de combustível deveríamos levar isto em consideração. Porém aqui queremos apenas comparar a máquina térmica com o ciclo de Otto e o ciclo de Diesel.



a→b compressão adiabática (aquecimento)

b→c expansão isobárica (aquecimento)

c→d expansão adiabática (resfriamento)

d→c resfriamento isocórico

$T_b = 300K$ $P_b = 1\times10^5 Pa$ $V_b = 0{,}1\times10^{-3} m^3$

$Q_Q = Q_{bc} = 10\,000\ J$

diatômico (T.E.E.)

$\hookrightarrow C_V = \frac{5}{2}R$; $C_P = \frac{7}{2}R$; $\gamma = \frac{7}{5} = 1{,}4$

Estados	T(K)	P(Pa)	V (m³)
a	122,4	$4,277 \times 10^3$	$0,9500 \times 10^{-3}$
b	300,0	$1,000 \times 10^5$	$0,1000 \times 10^{-3}$
c			
d			$0,9500 \times 10^{-3}$

4 alg. sign.

$\Rightarrow P_b V_b = n R T_b$

$n = 4,000 \times 10^{-3}$ mol

$a \to b$ processo adiabatico com compressaõ de

$V_a = 0,95L \to V_b = 0,1L$

já tinhamos calculado $\left.\begin{matrix} V_a \\ P_a \end{matrix}\right\}$ $P_a V_a^\gamma = P_b V_b^\gamma$

e $P_a V_a = n R T_a \Rightarrow T_a = \dfrac{P_a V_a}{nR} = \dfrac{4,277 \times \cancel{10^3} \times 0,95 \times \cancel{10^{-3}}}{4 \times 10^{-3} \times 8,3}$

$b \to c$ expansaõ isobárica $Q_{bc} = 10000\,J$

$P_c = P_b = 4,277 \times 10^3\,Pa$

1ª Lei $\Rightarrow \Delta U_{bc} = Q_{bc} - W_{bc}$

$\Delta U_{bc} = n c_v (T_c - T_b)$; $Q_{bc} = n c_p (T_c - T_b)$

$W_{bc} = P_b (V_c - V_b)$

$10000 = 4 \times 10^{-3} \times 29,05\,(T_c - 300) \therefore T_c = \dfrac{10^4}{4 \times 10^{-3} \times 29,05} + 300$

$T_c = 8,636 \times 10^4\,K$

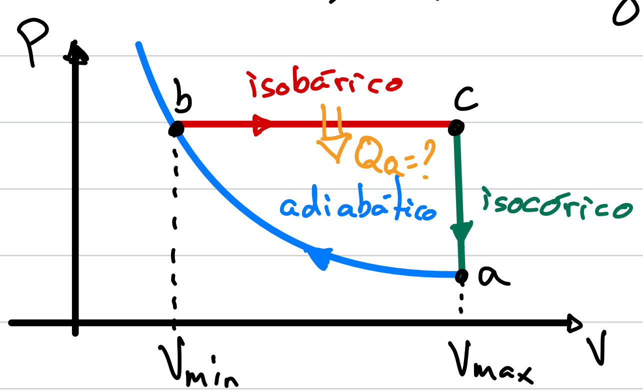
$P_c V_c = n R T_c \therefore V_c = \dfrac{nRT_c}{P_c} = \dfrac{4 \times 10^{-3} \times 8,3 \times 8,636 \times 10^4}{10^5}$

$V_c = 4 \times 8,3 \times 8,636 \times 10^{-4} = 2,867 \times 10^{-2}\,m^3 = 28,67 \times 10^{-3}\,m^3$

$V_c > V_{max}$ do cilindro $\Rightarrow$ Naõ é possível absorver $Q = 10000\,J$ mantendo a pressaõ constante.

Sendo assim para continuar comparando as máquinas vamos considerar um combustível menos eficiente que com a mesma quantidade ($n = 4\times10^{-3}$ mol) vai gerar menos calor com 2 possibilidades: (i) Q_{bc} faz $V_c = V_{max}$ assim não teremos o processo 3 que é a expansão adiabática. (ii) Q_{bc} faz $V_c = \frac{V_{max}}{2}$

No (i) ⇒



$V_{min} = 0{,}1\,L = 0{,}1\times10^{-3}\,m^3$
$V_{max} = 0{,}95\,L = 0{,}95\times10^{-3}\,m^3$

No estado c $\left.\begin{array}{l} P_c = P_b = 1\times10^5\,Pa \\ V_c = V_a = 0{,}95\times10^{-3}\,m^3 \end{array}\right\}$ $P_cV_c = nRT_c$, $T_c = \frac{P_cV_c}{nR}$

$$T_c = \frac{1\times10^5 \times 0{,}95\times10^{-3}}{4\times10^{-3}\times 8{,}3} = 2\,861\ K$$

$$Q_Q = Q_{bc} = n\,c_p\,(T_c - T_b) = 4\times10^{-3}\times 29{,}05\,(2861 - 300)$$
$$Q_Q = 297{,}6\ J$$

$W = W_{ab} + W_{bc}$ pois $W_{ca} = 0$ (isocórico)

$W_{ab} = -\Delta U_{ab}$ pois $Q_{ab} = 0$ (adiabático)

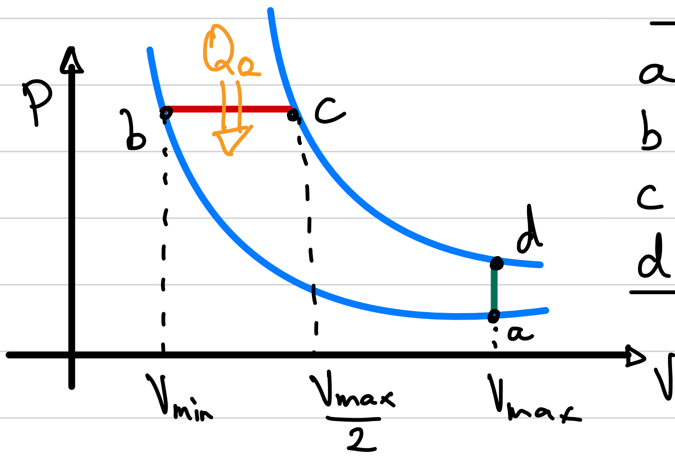
$$W_{ab} = -n\,c_v\,(T_b - T_a) = -4\times10^{-3}\times 20{,}75\times(300 - 122{,}4)$$
$$W_{ab} = -14{,}74\ J$$

$$W_{bc} = P_b(V_c - V_b) = 1\times10^5\,(0{,}95 - 0{,}1)\times10^{-3} = 0{,}85\times10^2\,J$$
$$W_{bc} = 85{,}00\,J$$

$$W = W_{ab} + W_{bc} = -14{,}74 + 85{,}00 = 70{,}26\,J$$

$$e = \frac{W}{Q_Q} = \frac{70{,}26}{297{,}6} = 0{,}23 \Rightarrow 23\%$$

No (ii)



	T	P	V
a	122,4	$4{,}277\times10^3$	$0{,}95\times10^{-3}$
b	300	1×10^5	$0{,}1\times10^{-3}$
c	1431	1×10^5	$0{,}475\times10^{-3}$
d	1084	$3{,}789\times10^4$	$0{,}95\times10^{-3}$

No estado c $\quad P_c = P_b = 1\times10^5\,Pa$

$$V_c = \frac{V_a}{2} = 0{,}475\times10^{-3}\,m^3$$

$$T_c = \frac{P_c V_c}{nR} = \frac{1\times10^5\times0{,}475\times10^{-3}}{4\times10^{-3}\times8{,}3} = 1431\,K$$

$$Q_Q = Q_{bc} = nc_p(T_c - T_b) = 4\times10^{-3}\times29{,}05\,(1431-300)$$
$$Q_Q = 131{,}4\,J$$

$W = W_{ab} + W_{bc} + W_{cd}$ $\quad$ pois $W_{da} = 0$ (isocórico)

$W_{ab} = -14{,}74\,J$

$W_{bc} = P_b(V_c - V_b) = 1\times10^5\,(0{,}475 - 0{,}1)\times10^{-3} = 37{,}50\,J$

$W_{cd} = -\Delta U_{cd} = -nc_v(T_d - T_c)$ $\quad$ pois $Q_{cd} = 0$ (adiabática)

$W_{cd} = -4\times10^{-3} \times 20{,}75\,(T_d - 1431)$

Falta calcular a T_d

c→d adiabático $P_c V_c^{\gamma} = P_d V_d^{\gamma} \therefore P_d = P_c \left(\frac{V_c}{V_d}\right)^{\gamma}$

$$P_d = 1\times10^5 \left(\frac{0{,}475}{0{,}95}\right)^{1,4} = 1\times10^5 \left(\frac{1}{2}\right)^{1,4} = 3{,}789\times10^4 \text{ Pa}$$

$$T_d = \frac{P_d V_d}{nR} = \frac{3{,}789\times10^4 \times 0{,}95\times10^{-3}}{4\times10^{-3} \times 8{,}3} = 1084\text{ K}$$

$$W_{cd} = -4\times10^{-3} \times 20{,}75\,(1084 - 1431) = 28{,}80\text{ J}$$

$$W = -14{,}74 + 37{,}50 + 28{,}80 = 51{,}56\text{ J}$$

$$e = \frac{W}{Q_Q} = \frac{51{,}56}{131{,}4} = 0{,}39 \quad \text{ou} \quad 39\%$$

Neste caso, manter o terceiro processo, que é o adiabático, é importante e melhora o rendimento da máquina de Diesel.

Nas mesmas condições o ciclo de Diesel é mais eficiente que o ciclo de Otto. Analisando o exercício novamente percebi que o problema está no enunciado, pois ambos ciclos

(Otto e Diesel) devem iniciar no estado termodinâmico "a" e não no "b" como fizemos pois o volume inicial deve ser o V_{max}.

Assim o enunciado correto deve ter os seguintes dados:

$V_a = 0{,}95\,L = 0{,}95 \times 10^{-3}\,m^3$ $\qquad R = 8{,}3\ J/mol.K$

$T_a = 27°C = 300\,K$

$P_a = 1\,atm = 1 \times 10^5\,Pa$

$V_b = 0{,}10\,L = 0{,}10 \times 10^{-3}\,m^3$

$Q_{recebido} = 10000\,J$

Gás diatômico

Ver resolução a seguir

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

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

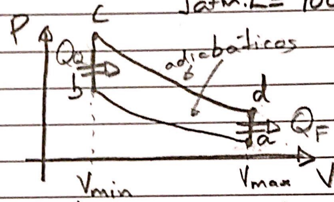
$V_b = 0{,}10L$ $1 atm.L \cong 100J$

(1) compressão adiabática

(2) aquecimento isocórico

(3) expansão adiabática

(4) resfriamento isocórico



$Q_Q = 10.000J$ substância $\Rightarrow$ 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.)

$U = \frac{5}{2}nRT = nc_VT \Rightarrow c_V = \frac{5}{2}R$ $c_p = c_V + R = \frac{7}{2}R$

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

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 $PV^\gamma = const$ $P_bV_b^\gamma = P_aV_a^\gamma$ $\therefore$ $P_b = P_a\left(\frac{V_a}{V_b}\right)^\gamma$

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

$P_bV_b = nRT_b$ $T_b = \frac{P_bV_b}{nR} = \frac{23{,}37 \times 0{,}1}{0{,}004 \times 0{,}082} = 7125K$

$\hookrightarrow 6852°C$

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

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

$Q_{b\to c} = 10.000J \stackrel{=}{\scriptstyle 100atm L} \Rightarrow \Delta U_{b\to c} = 10000 = nc_V(T_c - T_b)$

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

$T_c = 114826\ K$

S T Q Q S S D   __/__/__

a ⇒ $V_a = 0,95L$; $T_a = 300K$; $P_a = 1atm$
b ⇒ $V_b = 0,10L$; $T_b = 7125K$; $P_b = 23,4 atm$
c ⇒ $V_c = 0,10L$; $T_c = 114826K$; $P_c = 376,6 atm$

$P_c V_c = nRT_c$ ∴ $P_c = \frac{nRT_c}{V_c} = \frac{0,004 \times 0,082 \times 114826}{0,1}$

$P_c = 376,6 atm$

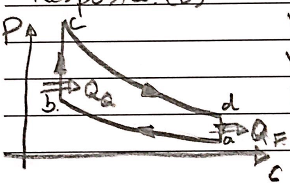
d ⇒ $V_d = 0,95L$ c→d adiabático $PV^\gamma = const$

$P_c V_c^\gamma = P_d V_d^\gamma$ $P_d = P_c\left(\frac{V_c}{V_d}\right)^\gamma = P_c\left(\frac{V_{min}}{V_{max}}\right)^\gamma = \frac{P_c}{r^\gamma}$

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

$T_d = \frac{V_d P_d}{nR} = 0,95 \times 16,1 / 0,004 \times 0,082 = 46.631 K$

Resposta: (b)
$V_a = 0,95L$; $P_a = 1atm$; $T_a = 300K$
$V_b = 0,10L$; $P_b = 23,4atm$; $T_b = 7125K$
$V_c = 0,10L$; $P_c = 376,6 atm$; $T_c = 114826K$
$V_d = 0,95L$; $P_d = 16,1 atm$; $T_d = 46631K$



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

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

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

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

$e = \frac{W}{Q_Q} = \frac{6200}{10000} = 0,62$ Resposta (c) $W = 6200J$
$Q_F = -3800J$
$e = 0,62$

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

Esta diferença se deve ao fator de conversão entre atm.L e J que usamos aproximado de 1atm.L=101,2J.

Eficiência de cerca de 60%

S T Q Q S S D ___/___/___

Ciclo de Diesel $a \xrightarrow{(1)} b \xrightarrow{(2)} c \xrightarrow{(3)} d \xrightarrow{(4)} a$ $R = 0{,}082\ \text{atm.L/molK}$

$V_a = 0{,}95L$ $T_a = 27°C = 300K$ $P_a = 1\text{atm}$ $1\text{atm.L} \cong 100J$

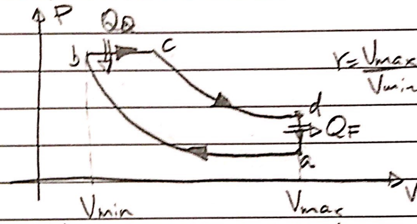
$V_b = 0{,}10L$

(1) compressão adiabática

(2) aquecimento isobárico

(3) expansão adiabática

(4) resfriamento isocórico



$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = 9{,}5$

$Q_a = 10000J \cong 100\ \text{atm.L}$ substância ⇒ gás diatômico rígido

a) igual ao anterior $n = 0{,}004\text{mol}$ $c_v = \frac{5}{2}R$ e $c_p = \frac{7}{2}R$

b) Os estados a e b são os mesmos

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

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

$Q_a = Q_{b\to c} = 100\ \text{atm.L} = n c_p (T_c - T_b) \therefore T_c = T_b + \frac{Q_{b\to c}}{n c_p}$

$T_c = 7125 + \frac{100}{0{,}004 \times \frac{7}{2} \times 0{,}082} = 94233K$ e $P_b = P_c = 23{,}4\text{atm}$

$P_c V_c = nRT_c \therefore V_c = \frac{nRT_c}{P_c} = \frac{0{,}004 \times 0{,}082 \times 94233}{23{,}4} = 1{,}32L$

Como este volume calculado é maior que o volume máximo de 0,95L então não é possível para este motor absorver 10.000J.

Vamos assumir que neste processo isobárico a expansão é até 50% do Vmax. Quanto de calor seria recebido pela máquina?

$T_c = \frac{V_c P_c}{nR} = \frac{0{,}475 \times 23{,}4}{0{,}004 \times 0{,}082} = 33887K$

$Q_{bc} = n c_p (T_c - T_b) = 0{,}004 \times \frac{7}{2} \cdot 0{,}082 (33887 - 7125) = 30{,}72\ \text{atm.L}$

ou 3072J.

S T Q Q S S D __/__/__

$c \Rightarrow V_c = 0{,}475\,L;\ P_c = 23{,}4\,atm;\ T_c = 33887\,K$

$d \Rightarrow V_d = 0{,}95\,L$ adiabático $P_d V_d^{\gamma} = P_c V_c^{\gamma}$

$P_d = P_c\left(\frac{V_c}{V_d}\right)^{\gamma} = 23{,}4\left(\frac{0{,}475}{0{,}95}\right)^{1{,}4} = \frac{23{,}4}{2^{1{,}4}} = 8{,}9\,atm$

$P_d V_d = nRT_d \quad \therefore \quad T_d = \frac{P_d V_d}{nR} = \frac{8{,}9 \times 0{,}475}{0{,}004 \times 0{,}082} = 12889\,K$

$d \Rightarrow V_d = 0{,}95\,L;\ P_d = 8{,}9\,atm;\ T_d = 12889\,K$

Resposta
$a \Rightarrow V_a = 0{,}95\,L;\ P_a = 1\,atm;\ T_a = 300\,K$
$b \Rightarrow V_b = 0{,}10\,L;\ P_b = 23{,}4\,atm;\ T_b = 7125\,K$
$Q_a = 3072\,J \Rightarrow c \Rightarrow V_c = 0{,}475\,L;\ P_c = 23{,}4\,atm;\ T_c = 33887\,K$
$d \Rightarrow V_d = 0{,}95\,L;\ P_d = 8{,}9\,atm;\ T_d = 12889\,K$

	ΔU [J]	W [J]	Q [J]
a→b	560	-560	0
b→c	2194,5	877,5	3072
c→d	-1722	1722	0
d→a	-1032,5	0	-1032,5

$\Delta U_{ab} = nc_v(T_b - T_a)$
$\Delta U_{ab} = 0{,}004 \times \frac{5}{2} \times 0{,}082\,(7125 - 300)$
$\Delta U_{ab} = 0{,}00082 \times 6825$
$\Delta U_{ab} = 5{,}60\,atm.L = 560\,J$

$\Delta U = Q - W$
$W_{bc} = P_b(V_c - V_b) = 23{,}4\,(0{,}475 - 0{,}10) = 8{,}775\,atm.J = 877{,}5\,J$
$Q_{bc} = Q_a = 3072\,J \qquad \Delta U_{bc} = Q_{bc} - W_{bc} = 3072 - 877{,}5$
$\Delta U_{cd} = nc_v(T_d - T_c) = 0{,}004 \times \frac{5}{2} \times 0{,}082\,(12889 - 33887)$
$\Delta U_{cd} = 0{,}00082 \times -20998 = -17{,}22\,atm.L = -1722\,J$

$\Delta U = \Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_{cd} + \Delta U_{da} = 0 \Rightarrow \Delta U_{da} = -(\Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_{cd})$
$\Delta U_{cd} = -W_{cd}$

$e = \frac{W}{Q_a} = \frac{W_{ab} + W_{bc} + W_{cd} + W_{da}}{Q_a} = \frac{(-560 + 877{,}5 + 1722)}{3072} = 0{,}66$

Eficiência de cerca de 66%