

Refrigerador (máquina térmica invertida)

Figura 20.9 (a) Diagrama do princípio de funcionamento do ciclo de um refrigerador. (b) Como os elementos-chave são dispostos em um refrigerador comum.

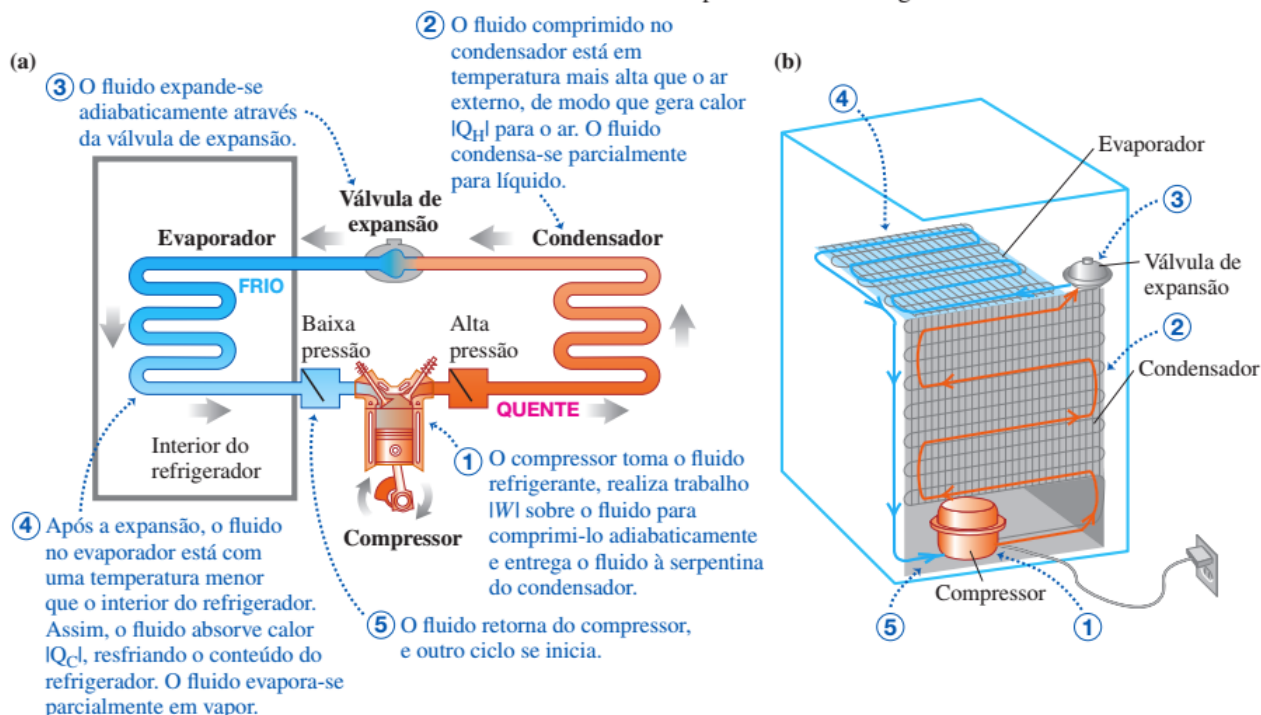


Figura 20.10 Um aparelho de ar-condicionado funciona conforme os mesmos princípios de um refrigerador.

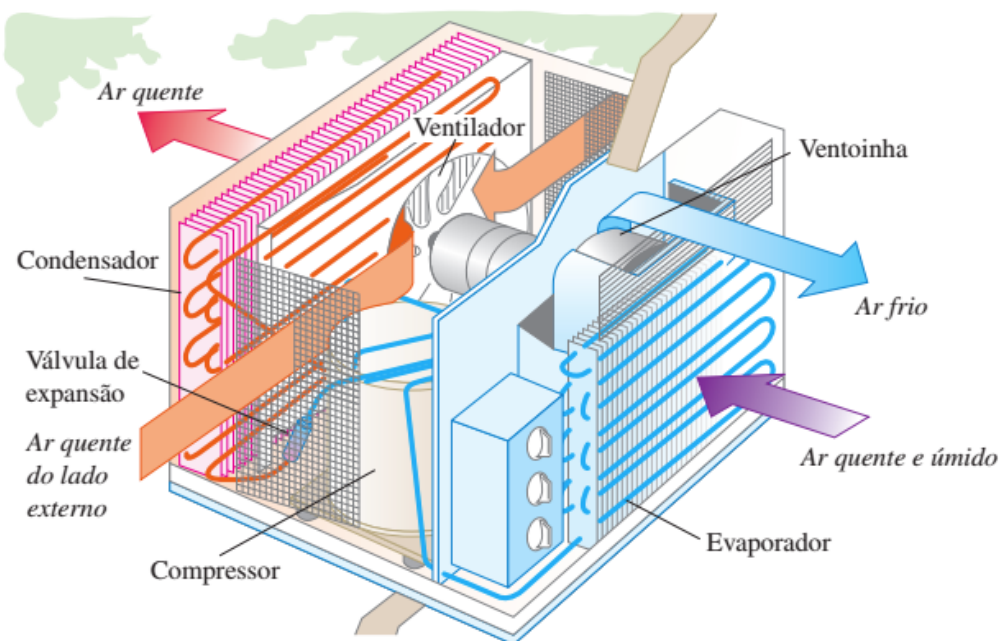
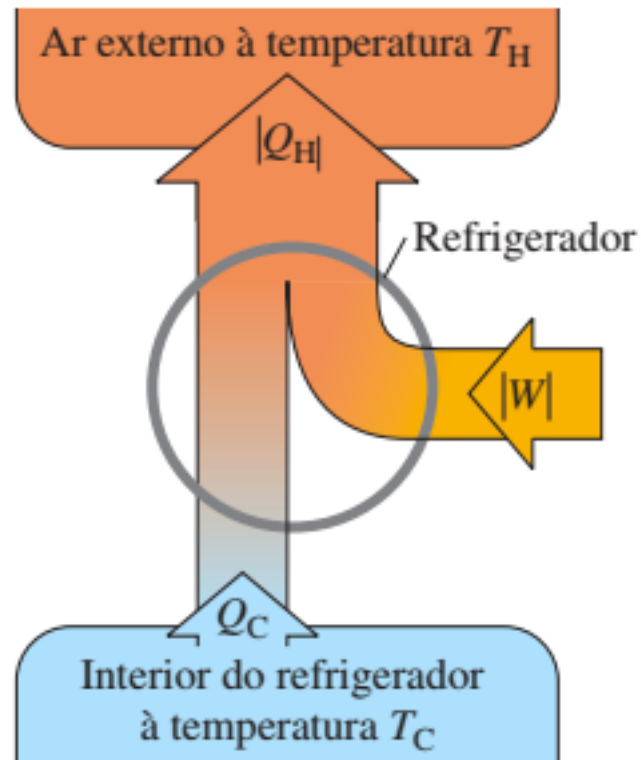


Figura 20.8 Diagrama esquemático do fluxo de energia de um refrigerador.



Sempre é preciso realizar um trabalho para transferir calor de um corpo frio para um corpo quente. O calor flui espontaneamente de um corpo quente para um corpo mais frio, e o fluxo inverso necessita de um trabalho externo. A segunda Lei da Termodinâmica mostra que é impossível fazer um refrigerador que transporte calor de um corpo frio para um corpo quente sem realização de trabalho.

É impossível a realização de qualquer processo que tenha como única etapa a transferência de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.

$$K = \frac{|Q_C|}{|W|} = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|} \quad (20.9)$$

Coeficiente de desempenho de um refrigerador

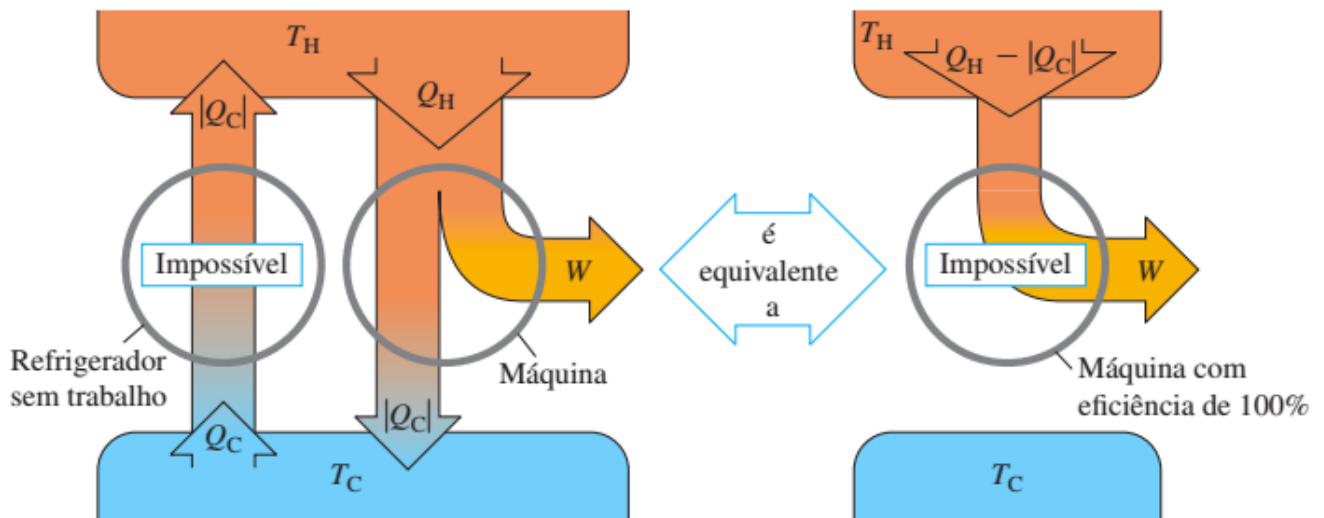
Calor removido de dentro do refrigerador

Entrada de trabalho do refrigerador

Calor rejeitado para o ar externo

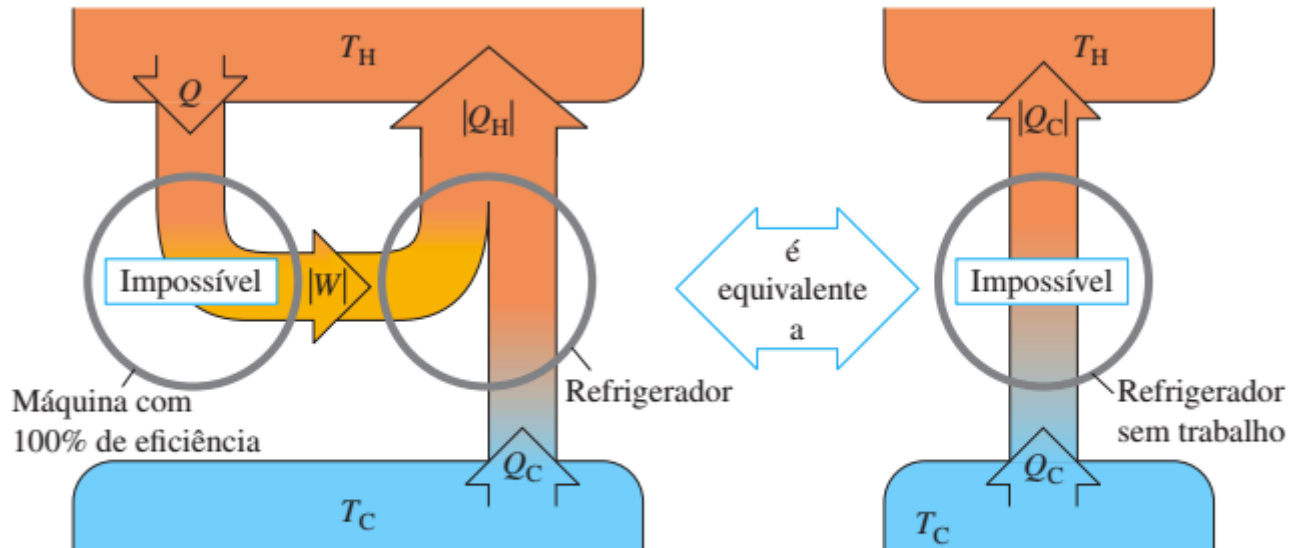
Figura 20.11 Diagrama esquemático do fluxo de energia para enunciados equivalentes da segunda lei da termodinâmica.

(a) O enunciado da “máquina” da segunda lei da termodinâmica



Se existisse um refrigerador que não precisasse de trabalho, ele poderia ser usado com uma máquina comum para formar um dispositivo com 100% de eficiência, convertendo o calor $Q_H - |Q_C|$ completamente em trabalho.

(b) O enunciado do “refrigerador” da segunda lei da termodinâmica



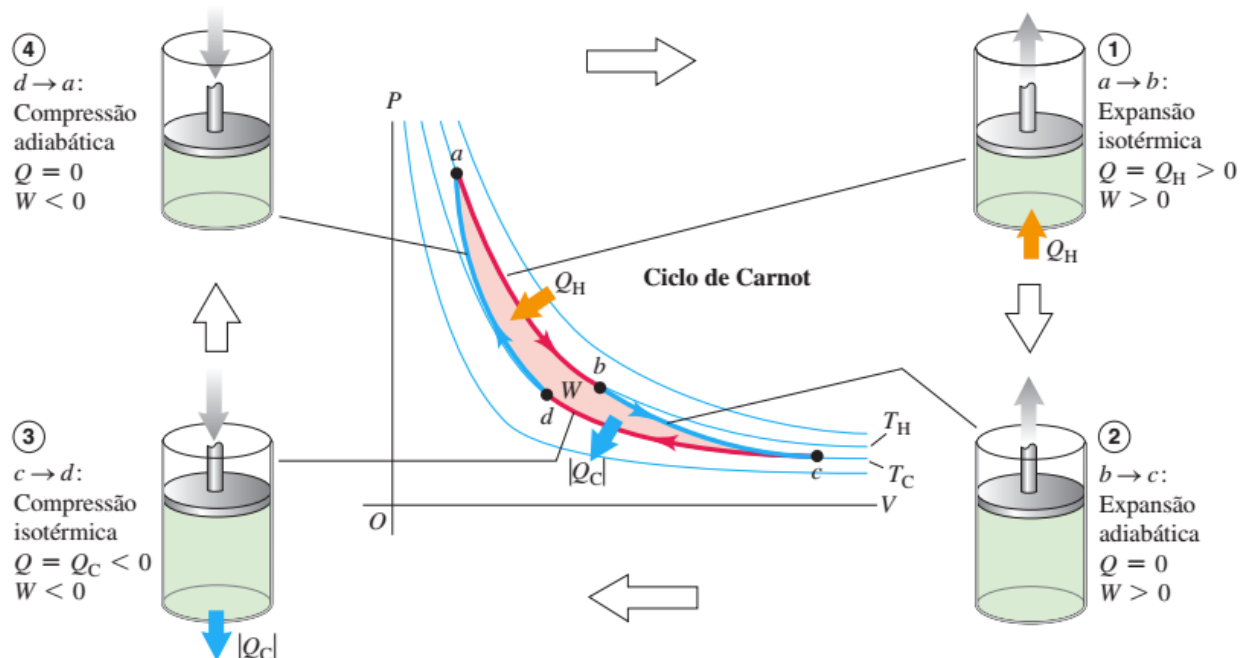
Se uma máquina com eficiência de 100% fosse possível, ela poderia ser usada com um refrigerador comum para formar um refrigerador que não precisa de trabalho, transferindo o calor Q_C de um reservatório frio para um reservatório quente sem precisar de nenhum trabalho realizado sobre o sistema.

Ciclo de Carnot

De acordo com a segunda lei, nenhuma máquina térmica pode ter 100% de eficiência. Qual é a eficiência máxima que uma dada máquina pode ter, a partir de dois reservatórios de calor a temperaturas T_Q e T_F ?

Essa pergunta foi respondida em 1824 pelo engenheiro francês Sadi Carnot (1796-1832), que desenvolveu uma máquina hipotética ideal que fornece a eficiência máxima permitida pela segunda lei. O ciclo dessa máquina é conhecido como **ciclo de Carnot** e o objetivo desta máquina térmica é obter a conversão de calor em trabalho com a maior eficiência possível. Portanto, deve-se evitar todo processo irreversível. Como o fluxo de calor entre o sistema e o reservatório com temperatura diferente é um processo irreversível, a transferência de calor no ciclo de Carnot, não deve existir nenhuma diferença de temperatura, ou seja, um **processo isotérmico**. Por outro lado, em qualquer processo no qual a temperatura da substância do sistema deve mudar (exemplo: de T_Q para T_F) não pode ocorrer nenhuma transferência de calor, porque essa transferência de calor não poderia ser reversível. Portanto, qualquer processo no qual a temperatura T do sistema varia deve ser um **processo adiabático**.

Figura 20.13 Ciclo de Carnot para um gás ideal. No diagrama PV , as linhas finas azuis são isotermas (curvas com temperatura constante) e as linhas grossas azuis são curvas adiabáticas (curvas com transferência de calor igual a zero).



Eficiência da máquina de Carnot $e_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = \frac{T_H - T_C}{T_H}$

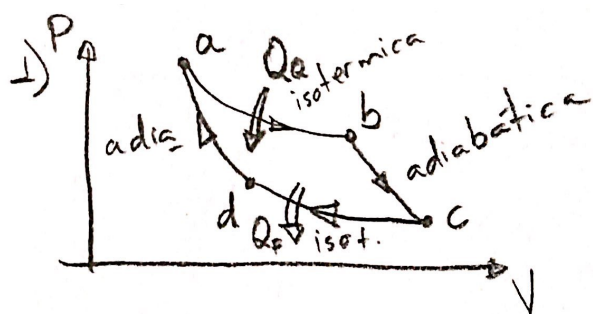
Temperatura do reservatório quente T_H e Temperatura do reservatório frio T_C

(20.14)

ATENÇÃO Use a escala Kelvin em todos os cálculos de Carnot. Em todos os cálculos envolvendo o ciclo de Carnot, você deve tomar cuidado e usar sempre temperaturas *absolutas* (escala Kelvin). A razão é que o conjunto formado pelas equações 20.10 até 20.14 foi deduzido a partir da equação do gás ideal $PV = nRT$, em que T é a temperatura absoluta.

Exercícios

- 1) Uma certa máquina de Carnot absorve 2.000 J de calor de um reservatório a 500 K, realiza trabalho e descarta calor para um reservatório a 350 K. Qual foi o trabalho realizado, qual a quantidade de calor rejeitada e qual a eficiência dessa máquina?
- 2) Suponha que 0,200 mol de um gás ideal diatômico ($\gamma = 1,40$) passe por um ciclo de Carnot (4 processos quase-estáticos: expansão isotérmica, expansão adiabática, compressão isotérmica e compressão adiabática) com temperaturas entre 227°C e 27°C, começando na pressão inicial de 10^6 Pa. O volume dobra durante a etapa de expansão isotérmica. Determine:
 - (a) os valores de temperatura, pressão e volume ao final de cada processos termodinâmico da máquina;
 - (b) a quantidade de trabalho realizado, a quantidade de calor dissipado e a eficiência teórica do maquina.
 - (c) a eficiência da máquina com os valores obtidos do item anterior e compare com o valor obtido a partir da Equação 20.14.



Ciclo $\Delta U = 0 \Rightarrow 0 = Q - W$
 $Q = W$

$Q_Q = 2000 \text{ J}$

$Q_F = ?$

$Q = |Q_Q| - |Q_F|$

$T_Q = 500 \text{ K} \text{ e } T_F = 350 \text{ K}$

$$e = \frac{W}{Q_Q} = 1 - \left| \frac{Q_F}{Q_Q} \right|$$

qualquer máquina

$$e = 1 - \frac{T_F}{T_Q} = 1 - \frac{350}{500} = 0,3$$

só para máquina de Carnot

$$0,3 = \frac{W}{2000} \Rightarrow W = 600 \text{ J}$$

$$W = |Q_Q| - |Q_F|$$

$$600 = 2000 - |Q_F|$$

$$|Q_F| = 1400 \text{ J}$$

O trabalho é de 600 J, o calor rejeitado é de 1400 J e a eficiência é de 0,3, ou seja, 30% de eficiência.

2) Ciclo de Carnot $R = 8,3 \text{ J/mol K}$

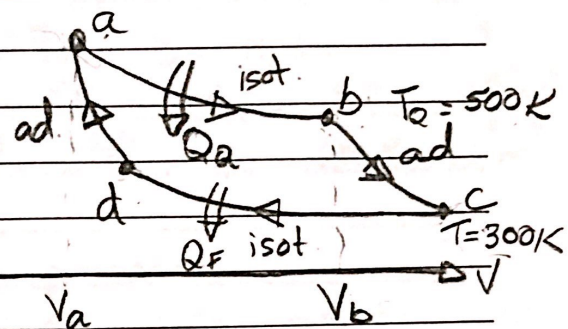
$$n = 0,2 \text{ mol}$$

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

$$T_a = 227^\circ \text{C} = 500 \text{K}$$

$$T_f = 27^\circ \text{C} = 300 \text{K}$$

$$P_a = 10^6 \text{ Pa} \quad V_b = 2V_a$$



$$a \rightarrow b \text{ isotérmica} \Rightarrow T = \text{const.} \Rightarrow \Delta U_{a \rightarrow b} = 0 \Rightarrow Q_{ab} = W_{ab} > 0$$

$$a \Rightarrow T_a = 500 \text{K}; P_a = 10^6 \text{ Pa} \Rightarrow V_a = \frac{nRT_a}{P_a} = \frac{0,2 \times 8,3 \times 500}{10^6}$$

$$V_a = 8,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$b \Rightarrow T_b = 500 \text{K}; V_b = 2V_a = 16,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3; P_b = 0,5 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$P_b = \frac{nRT_b}{V_b} = \frac{0,2 \times 8,3 \times 500}{16,6 \times 10^{-4}} = 0,5 \times 10^6 \text{ Pa} = \frac{P_a}{2}$$

$$b \rightarrow c \text{ adiabático} \Rightarrow Q_{bc} = 0 \Rightarrow PV^\gamma = \text{const. e } TV^{\gamma-1} = \text{const.}$$

$$P_b V_b^\gamma = P_c V_c^\gamma$$

$$T_b V_b^{\gamma-1} = T_c V_c^{\gamma-1}$$

$$d \rightarrow a \text{ adiabático} \Rightarrow Q_{da} = 0 \Rightarrow PV^\gamma = \text{const.}$$

$$P_a V_a^\gamma = P_d V_d^\gamma$$

$$c \rightarrow d \text{ isotérmica} \Rightarrow T = \text{const.} \Rightarrow \Delta U_{cd} = 0 \Rightarrow Q_{cd} = W_{cd} < 0$$

$$T_d = 300 \text{K} \text{ e } T_c = 300 \text{K}$$

$$\hookrightarrow P_a V_a = nRT_d \quad \hookrightarrow P_c V_c = nRT_c \Rightarrow P_a V_a = P_c V_c$$

$$* T_b V_b^{\gamma-1} = T_c V_c^{\gamma-1} \quad V_c = V_b \left(\frac{T_b}{T_c} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = 16,6 \times 10^{-4} \left(\frac{500}{300} \right)^{\frac{1}{0,4}}$$

$$V_c = 16,6 \times 10^{-4} \left(\frac{5}{3} \right)^{2,5} = 59,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad P_c = \frac{nRT_c}{V_c} = \frac{0,2 \times 8,3 \times 300}{59,5 \times 10^{-4}}$$

$$P_c = 0,084 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$* T_a V_a^{\gamma-1} = T_d V_d^{\gamma-1} \quad V_d = V_a \left(\frac{T_a}{T_d} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = 8,3 \times 10^{-4} \left(\frac{500}{300} \right)^{\frac{1}{0,4}} = 29,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$P_d = \frac{nRT_d}{V_d} = \frac{0,2 \times 8,3 \times 300}{29,8 \times 10^{-4}} = 0,167 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Resposta: $a \Rightarrow T_a = 500\text{K}; P_a = 10^6\text{Pa}; V_a = 8,3 \times 10^{-4}\text{m}^3$
 $b \Rightarrow T_b = 500\text{K}; P_b = 0,5 \times 10^6\text{Pa}; V_b = 16,6 \times 10^{-4}\text{m}^3$
 $c \Rightarrow T_c = 300\text{K}; P_c = 0,084 \times 10^6\text{Pa}; V_c = 59,6 \times 10^{-4}\text{m}^3$
 $d \Rightarrow T_d = 300\text{K}; P_d = 0,168 \times 10^6\text{Pa}; V_d = 29,8 \times 10^{-4}\text{m}^3$

	$\Delta U [\text{J}]$	$Q [\text{J}]$	$W [\text{J}]$	processo
$a \rightarrow b$	0	575,3	575,3 J	exp. isoter. $\Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow Q = W$
$b \rightarrow c$	-830	0	830	exp. adiab $\Rightarrow Q = 0 \Rightarrow \Delta U = -W$
$c \rightarrow d$	0	-345,3	-345,3 J	comp. isoter. $\Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow Q = W$
$d \rightarrow a$	830	0	-830	comp. adiab $\Rightarrow Q = 0 \Rightarrow \Delta U = -W$

7

$$\Delta U_{bc} = n C_V (T_c - T_b) = 0,2 \times \frac{5}{2} \times 8,3 (300 - 500) = -830\text{J}$$

$$W_{ab} = \int_{V_a}^{V_b} P dV = n R T_a \int_{V_a}^{V_b} \frac{1}{V} dV = n R T_a \ln \left(\frac{V_b}{V_a} \right) = 0,2 \times 8,3 \times 500 \ln 2$$

$$W_{ab} = 575,3\text{J}$$

$$W_{cd} = n R T_c \ln \left(\frac{V_d}{V_c} \right) = 0,2 \times 8,3 \times 300 \ln \left(\frac{1}{2} \right) = -345,3\text{J}$$

$$W = W_{ab} + W_{bc} + W_{cd} + W_{da} = 575,3 + 830 - 345,3 - 830 = 230\text{J}$$

$$e = \frac{W}{Q_a} = \frac{230}{575,3} = 0,4$$

O trabalho realizado pela máquina é de 230J, o calor dissipado é de 345,3J e a eficiência de 0,4.

$$c) e = 1 - \frac{T_F}{T_Q} = 1 - \frac{300}{500} = 0,4$$

Pi 2 $\Rightarrow$ 22/05 próxima sexta