

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.

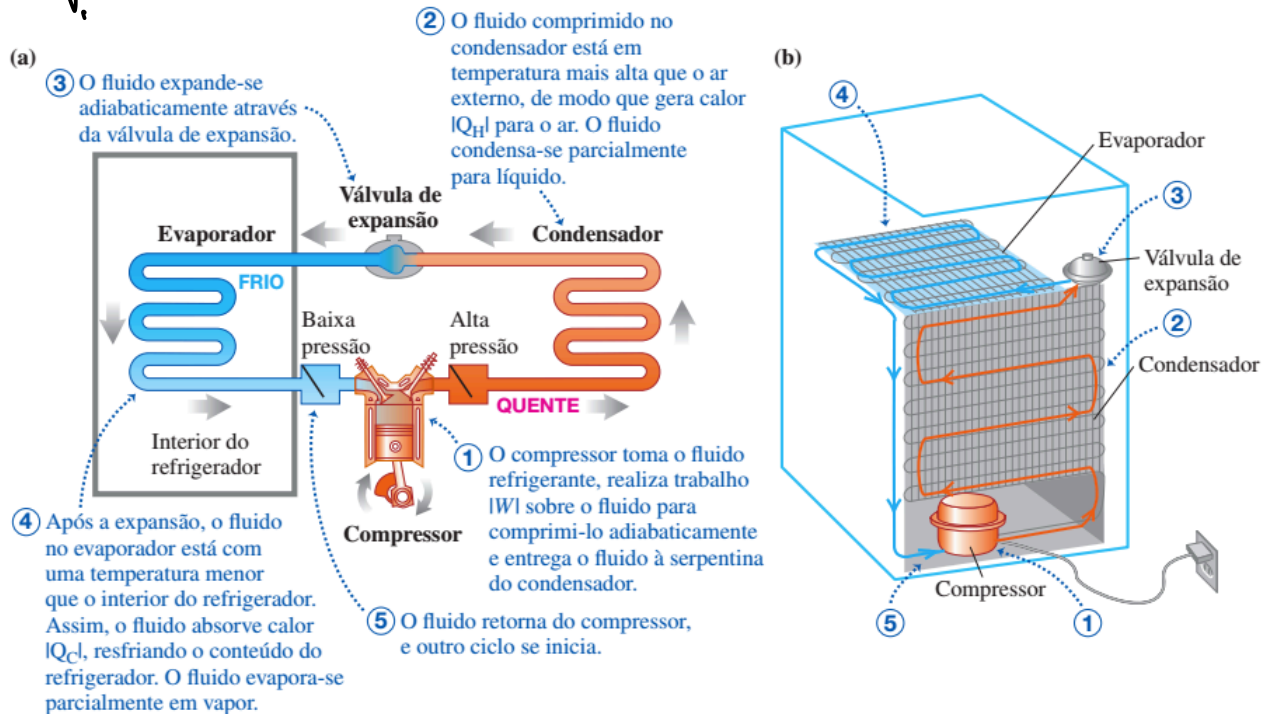


Figura 20.10 Um aparelho de ar-condicionado funciona conforme os mesmos princípios de um refrigerador.

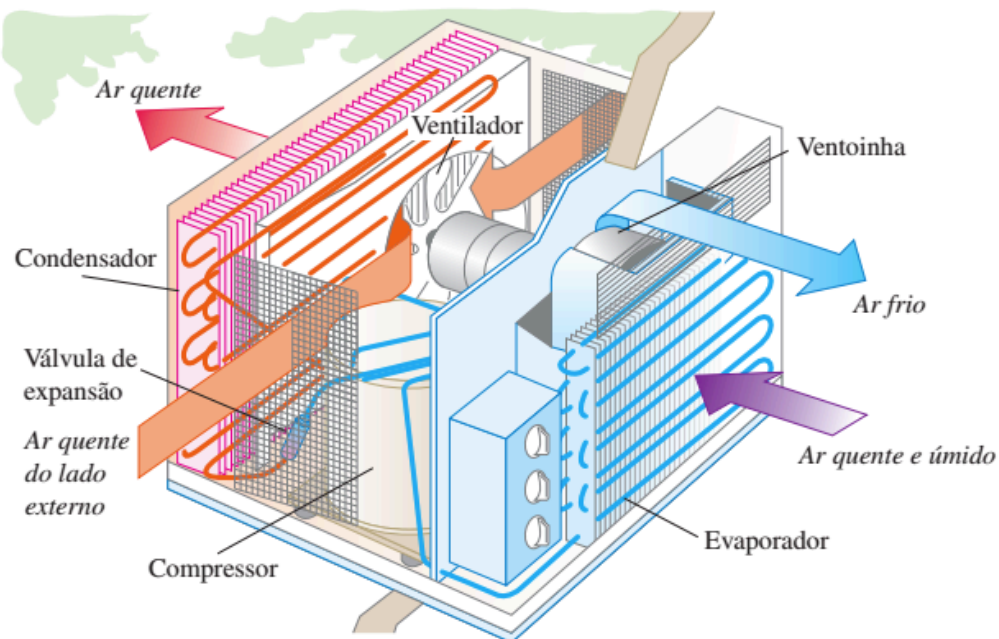
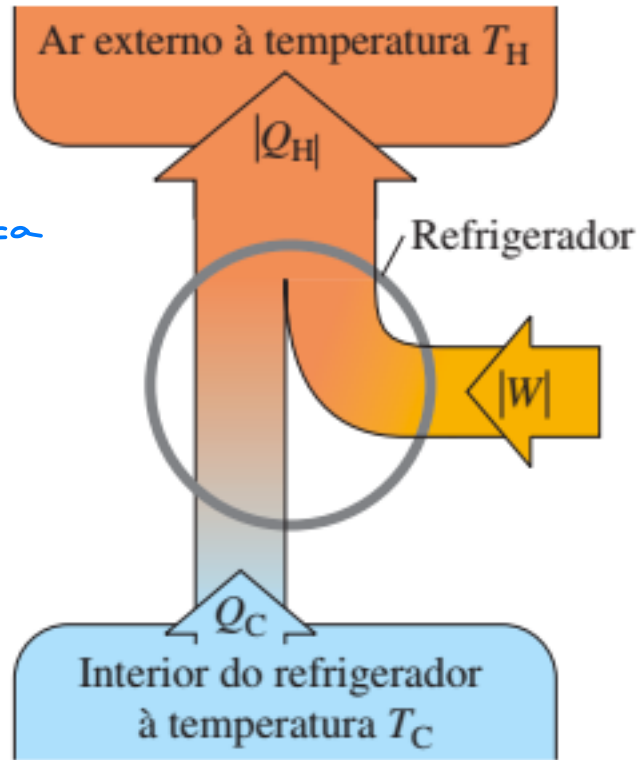


Figura 20.8 Diagrama esquemático do fluxo de energia de um refrigerador.



$$Q = |Q_F| - |Q_Q|$$

Ciclo $\Delta U = 0$
 1ª Lei $\Delta U = Q - W$
 $W = Q$
 $W = |Q_F| - |Q_Q|$

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.

Coeficiente de desempenho de um refrigerador

$$K = \frac{|Q_C|}{|W|} = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|}$$

Entrada de trabalho do refrigerador

Calor removido de dentro do refrigerador

Calor rejeitado para o ar externo

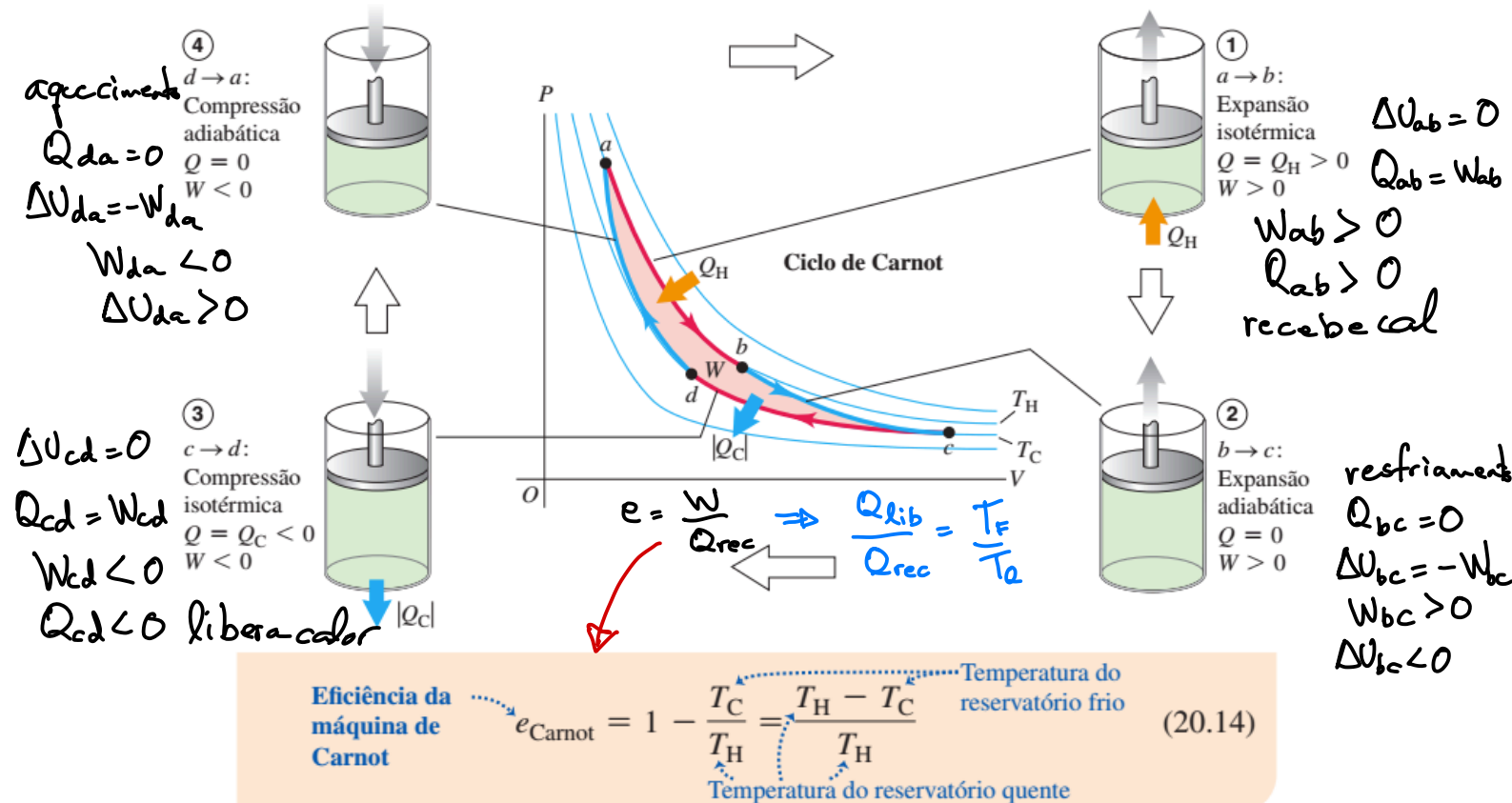
(20.9)

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).



$$e_{carnot} = \frac{W}{Q_{re}} = \frac{Q_{rec} - |Q_{lib}|}{Q_{rec}} = 1 - \frac{|Q_{lib}|}{Q_{rec}} = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$

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.

1) $Q_{\text{rec}} = Q_R = 2000 \text{ J}$ $T_a = 500 \text{ K}$ $T_F = 350 \text{ K}$

$W = ?$

$Q_{\text{lib}} = Q_F = ?$

$e = ?$

$$e = 1 - \frac{T_F}{T_a} = 1 - \frac{350}{500} = \frac{150}{500} = 0,3$$

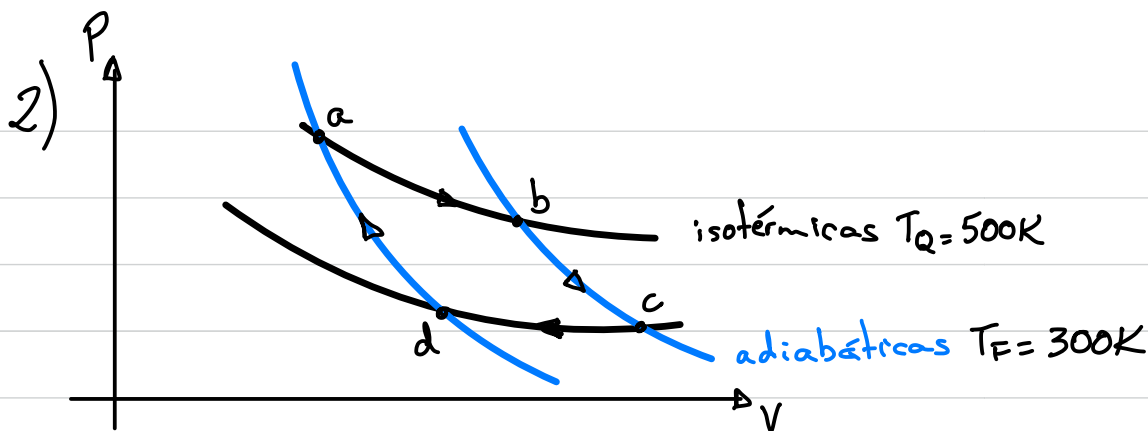
ou 30% de eficiência.

$$\frac{Q_{\text{lib}}}{Q_{\text{rec}}} = \frac{T_F}{T_a} \Rightarrow \frac{Q_{\text{lib}}}{2000} = \frac{350}{500} \therefore Q_{\text{lib}} = 2000 \times \frac{350}{500} = 1400 \text{ J}$$

Calor liberado é de 1400 J

$W = |Q_{\text{rec}}| - |Q_{\text{lib}}| = 2000 - 1400 = 600 \text{ J}$

Trabalho realizado é de 600 J



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

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

$$P_a = 10^6 \text{ Pa} \quad e \quad V_b = 2 V_a \quad n = 0,2 \text{ mol} \quad \text{diatômico } \nu = 5$$

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

Estados	T (K)	P (Pa)	V (m ³)
a	500	10^6	$V_a =$
b	500		$2V_a =$
c	300		$V_c = \left(\frac{T_a}{T_F}\right)^{1/\gamma-1} 2V_a$
d	300		$V_d = \left(\frac{T_a}{T_F}\right)^{1/\gamma-1} V_a$

$$\Rightarrow V_a = \frac{n R T_a}{P_a}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_c = \left(\frac{T_a}{T_F}\right)^{1/\gamma-1} 2V_a \\ V_d = \left(\frac{T_a}{T_F}\right)^{1/\gamma-1} V_a \end{array} \right\} P = \frac{n R T}{V}$$

Processos	$\Delta U \text{ (J)}$	$Q \text{ (J)}$	$W \text{ (J)}$	
a $\rightarrow$ b exp. isotérm.	0	$n R T_Q \ln 2$	$n R T_Q \ln 2$	$Q_{ab} = W_{ab}$
b $\rightarrow$ c exp. adiab.	$-n c_v (T_a - T_F)$	0	$n c_v (T_a - T_F)$	
c $\rightarrow$ d comp. isotérm.	0	$-n R T_F \ln 2$	$-n R T_F \ln 2$	$Q_{cd} = W_{cd}$
d $\rightarrow$ a comp adiab.	$n c_v (T_a - T_F)$	0	$-n c_v (T_a - T_F)$	

Isotérmico $P = \frac{n R T}{V} \Rightarrow W = \int_{V_i}^{V_f} P dV = n R T \int_{V_i}^{V_f} \frac{1}{V} dV = n R T \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$

$$W_{ab} = n R T_Q \ln \left(\frac{V_b}{V_a} \right) = n R T_Q \ln 2$$

$$W_{cd} = n R T_F \ln \left(\frac{V_d}{V_c} \right)$$

Adiabáticas: (1) $P_b V_b^\gamma = P_c V_c^\gamma$
 (2) $P_a V_a^\gamma = P_d V_d^\gamma$ } $P = \frac{n R T}{V}$

$$(1) \quad \left(\frac{nRT_a}{V_b} \right) V_b^\gamma = \left(\frac{nRT_F}{V_c} \right) V_c^\gamma \Rightarrow T_a V_b^{\gamma-1} = T_F V_c^{\gamma-1}$$

$$T_a (2V_a)^{\gamma-1} = T_F V_c^{\gamma-1}$$

$$V_c = \left(\frac{T_a}{T_F} (2V_a)^{\gamma-1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \Rightarrow V_c = \left(\frac{T_a}{T_F} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} 2V_a$$

$$(2) \quad \left(\frac{nRT_a}{V_a} \right) V_a^\gamma = \left(\frac{nRT_F}{V_d} \right) V_d^\gamma \Rightarrow T_a V_a^{\gamma-1} = T_F V_d^{\gamma-1}$$

$$V_d = \left(\frac{T_a}{T_F} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} V_a$$

$$W_{cd} = nRT_F \ln \left(\frac{V_d}{V_c} \right) = nRT_F \ln \left(\frac{\left(\frac{T_a}{T_F} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} V_a}{\left(\frac{T_a}{T_F} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} 2V_a} \right) = -nRT_F \ln 2$$

$$Q_{ad} = Q_a = Q_{rec} = nRT_a \ln 2$$

$$Q_{cd} = Q_F = Q_{lib} = -nRT_F \ln 2$$

$$\frac{|Q_{lib}|}{Q_{rec}} = \frac{nRT_F \ln 2}{nRT_a \ln 2}$$

Demonstramos a relação
válida para o ciclo de
Carnot

$$\frac{|Q_{lib}|}{Q_{rec}} = \frac{T_F}{T_a}$$

Agora vamos substituir os valores de P e V os estados:

$$V_a = \frac{nRT_a}{P_a} = \frac{0,2 \times 8,3 \times 500}{10^6} = 0,83 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 0,83 \text{ L}$$

$$V_b = 2V_a = 1,66 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1,66 \text{ L}$$

$$V_c = \left(\frac{T_a}{T_F} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} 2V_a = \left(\frac{500}{350} \right)^{\frac{1}{1,4-1}} 2 \times 0,83 \times 10^{-3} = 1,94 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1,94 \text{ L}$$

$$V_d = \left(\frac{T_a}{T_F} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} V_a = \frac{V_c}{2} = 0,97 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 0,97 \text{ L}$$

$$P_b = \frac{nRT_a}{V_b} = \frac{0,2 \times 8,3 \times 500}{1,66 \times 10^{-3}} = 5 \times 10^5 \text{ Pa} = 5 \text{ atm}$$

$$P_c = \frac{nRT_F}{V_c} = \frac{0,2 \times 8,3 \times 350}{1,94 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^5 \text{ Pa} = 3 \text{ atm}$$

$$P_d = \frac{nRT_F}{V_d} = \frac{0,2 \times 8,3 \times 350}{0,97} = 6 \times 10^5 \text{ Pa} = 6 \text{ atm}$$

Resposta do item (a)

Estados	T(K)	P(atm)	V(L)
a	500	10	0,83
b	500	5	1,66
c	350	3	1,94
d	350	6	0,97

$$\Delta U_{bc} = \Delta U_{da} = nC_V(T_a - T_F) = 0,2 \times \frac{5}{2} \times 8,3 \times (500 - 350) = -622,5 \text{ J}$$

$$Q_{ab} = nRT_a \ln 2 = 0,2 \times 8,3 \times 500 \ln 2 = 575,3 \text{ J}$$

$$Q_{cd} = -nRT_F \ln 2 = -0,2 \times 8,3 \times 350 \times \ln 2 = -402,7 \text{ J}$$

Resposta do item (b)

Processos	$\Delta U \text{ (J)}$	$Q \text{ (J)}$	$W \text{ (J)}$
$a \rightarrow b$ exp. isotherm.	0	575,3	575,3
$b \rightarrow c$ exp. adiab.	-622,5	0	622,5
$c \rightarrow d$ comp. isotherm.	0	-402,7	-402,7
$d \rightarrow a$ comp. adiab.	622,5	0	-622,5

d) TOTAL $\Delta U_{\text{total}} = 0$ $Q_{\text{total}} = 1726 \text{ J}$ $W_{\text{total}} = 1726 \text{ J} \Rightarrow$ máquina térmica

$$e = \frac{W_{\text{total}}}{Q_{\text{rec}}} = \frac{1726}{575,3} = 0,3 \quad \text{ou} \quad \underline{30\% \text{ de eficiência}}$$

$$e = 1 - \frac{T_F}{T_Q} = 1 - \frac{350}{500} = 0,3 \quad \text{ou} \quad \underline{30\% \text{ de eficiência}}$$

Ambos procedimentos mostram uma eficiência de 30% para esta máquina térmica. Sendo a expressão $e = W_{\text{total}}/Q_{\text{rec}}$ válido para qualquer máquina térmica, enquanto a expressão $e = 1 - T_F/T_Q$ só pode ser aplicada para máquina térmica como o ciclo de Carnot, que apresenta a máxima eficiência de uma máquina térmica que trabalha com reservatórios de temperatura 350 e 500 K.