

**Ex. 4.1)**

1a. Lei:  $Q - W = \Delta U$ ; tanque é rígido  $\rightarrow dV=0 \rightarrow W=0$

$$Q = \Delta U = mC_v\Delta T = 10.0,7165.100 = 716,5 \text{ kJ}$$

Taxa de transferência de calor:  $Q / \Delta t = 716500/1000 = 716,5 \text{ J/s} = \mathbf{716,5 \text{ W}}$

**Ex. 4.3)** 1a. Lei:  $Q - W = \Delta U$ ; Pressão constante  $p = 1 \text{ atm}$ . O trabalho realizado pelo gás durante o processo de expansão é:

$${}_1W_2 = \int_1^2 p dV = p \int_1^2 dV = p(V_2 - V_1)$$

$$\text{Mas } pv = RT \rightarrow \frac{V}{M} = \frac{RT}{p} \rightarrow V = \frac{MRT}{p}$$

$$\text{Assim, } {}_1W_2 = MR(T_2 - T_1) = 10 \cdot 287 \cdot (130 - 30)$$

$${}_1W_2 = 287 \text{ kJ} \rightarrow \text{Potência} = \dot{{}_1W_2} = \frac{{}_1W_2}{\Delta t} = \frac{287 \text{ kJ}}{1000 \text{ s}} = 287 \text{ W}$$

A variação da energia interna do gás é dada por:

$$\Delta U = MC_v \Delta T = 10 \cdot 716,5 \cdot (130 - 30) = 716,5 \text{ kJ}$$

Assumindo taxa constante de transferência de energia,

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{716,5 \text{ kJ}}{1000 \text{ s}} = 716,5 \text{ W}$$

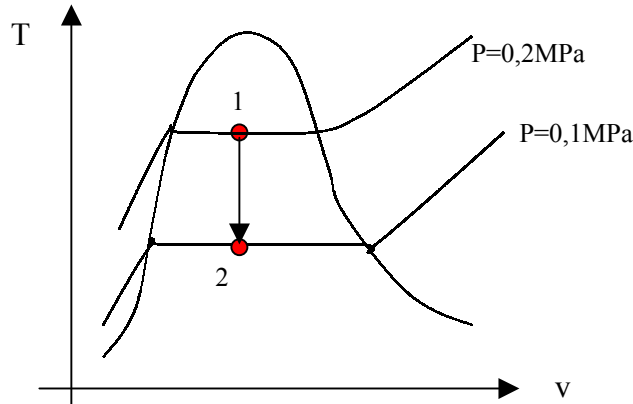
Assim, a taxa de transferência de calor é:

$$\dot{Q} = \dot{W} + \frac{dU}{dt} = 287 + 716,5 = 1003,5 \text{ kJ}$$

O sinal positivo indica que calor foi **adicionado** ao sistema

**Ex. 4.6)** Panela de pressão: Estado 1:  $V=2L$ ,  $p=2 \text{ atm}$ ,  $x=0,5$

Estado 2:  $p=1 \text{ atm}$



Da Tab. A 1.2:

P [Mpa]	Tsat [°C]	$v_l$ [m³/kg]	$v_v$ [m³/kg]	$u_l$ [kJ/kg]	$u_v$ [kJ/kg]
0,2	120,23	0,001061	0,8857	504,49	2529,5
0,1	99,63	0,001043	1,6940	417,36	2506,1

$$v_1 = (1 - x_1)v_{l1} + x_1v_{v1} = 0,443 \text{ m}^3 / \text{kg} \quad \text{Como o processo é a volume constante, } v_2 = v_1 :$$

$$v_2 = (1 - x_2)v_{l2} + x_2v_{v2} = 0,443 \text{ m}^3 / \text{kg} \rightarrow x_2 = \frac{v_2 - v_{l2}}{v_{v2} - v_{l2}} = 0,262.$$

$$\text{Assim, } M = \frac{V}{v} = \frac{0,002 \text{ m}^3}{0,443 \text{ m}^3 / \text{kg}} = 4,515 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$1a. \text{ Lei: } \frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}. \text{ Como o volume é fixo, } \dot{W} = \int p dv = 0.$$

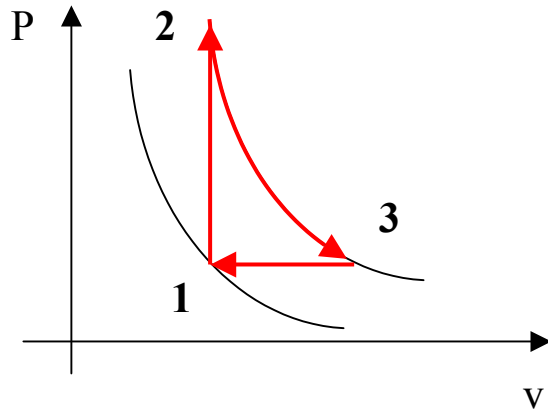
Do enunciado,  $\dot{Q} = -50W$ . A variação da energia interna pode ser calculada como :

$$\frac{dU}{dt} = -50 \rightarrow \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{M(u_2 - u_1)}{\Delta t}; u_1 = (1 - x_1)u_{l1} + x_1u_{v1} = 1516 \text{ kJ} / \text{kg}; u_2 = (1 - x_2)u_{l2} + x_2u_{v2} = 964 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$\Rightarrow \frac{4,515 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot (964 - 1516) \cdot 10^3 \text{ J} / \text{kg}}{\Delta t} = -50 \text{ J} / \text{s} \Rightarrow \Delta t = 49,8 \text{ s}$$

## Ex 4.8 - Sistema com Ar que opera em um ciclo de 3 processos

a)



	1	2	3
<b>P</b>	0,1	0,2	0,1
<b>T</b>	293	586	586
<b>Vol. Esp.</b>	0,841	0,841	1,681

b)

Processo de 1 – 2: Como  $dV = 0$  então  $W = 0$

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = \Delta U$$

$${}_1q_2 = C_V(T_2 - T_1)$$

$${}_1q_2 = 716,5(586 - 293)$$

$${}_1q_2 = 210\text{kJ/kg}$$

Processo de 2 - 3: Isotérmico, então  $\Delta = 0$

$${}_2w_3 = -RT_2 \ln(P_3/P_2)$$

$${}_2w_3 = -287.586 \cdot \ln(0,5)$$

$${}_2w_3 = 115,8\text{kJ/kg}$$

$${}_2q_3 = {}_2w_3 = 115,8\text{kJ/kg}$$

## Ex 4.8 - Continuação...

Processo de 3 - 1:

$${}_3q_1 - {}_3w_1 = \Delta u$$

$${}_3w_1 = P_1(v_1 - v_3)$$

$${}_3w_1 = 0,1 \times 10^6 (0,841 - 1,682)$$

$${}_3w_1 = -84,1 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta u = C_v(T_1 - T_3)$$

$$\Delta u = 716,5 \cdot (293 - 586)$$

$$\Delta u = -210 \text{ kJ/kg}$$

$${}_3q_1 = \Delta u + {}_3w_1$$

$${}_3q_1 = -294,1 \text{ kJ/kg}$$

Ou, como o processo ocorre à pressão constante, pode-se utilizar

$${}_3q_1 = h_3 - h_1 = C_p \cdot (T_1 - T_3)$$

$${}_3q_1 = 1,003 \cdot (293 - 586)$$

$${}_3q_1 = -293,5 \text{ kJ/kg}$$

c) Qual o trabalho líquido, transf. de calor líquida e a eficiência térmica?

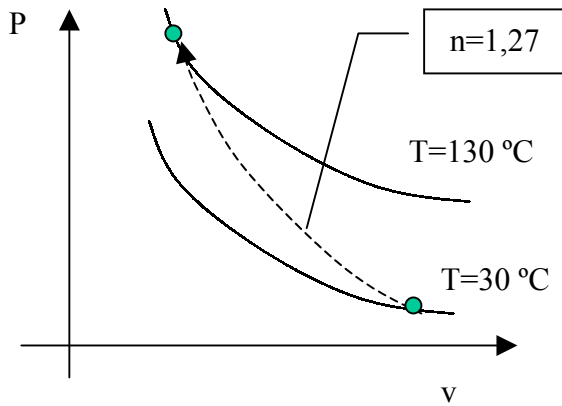
	w (kJ/kg)	q (kJ/kg)
1 - 2	0	210
2 - 3	115,8	115,8
3 - 1	-84,1	-293,8

W (liq)	q (liq)
31,7	32

Eficiência térmica:

$$\eta = \frac{W_{\text{Liq}}}{Q_H} = \frac{31,7}{210 + 115,8} \cong 10\%$$

**Ex. 4.10)** Compressão de ar (gás perfeito) em um dispositivo pistão cilindro em um processo politrópico com  $n=1,27$ .  $T_1=30^\circ\text{C}$ ,  $T_2=130^\circ\text{C}$



Processo politrópico:  $pv^n = \text{constante} \rightarrow p = c/v^n$

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n$$

$$pv = RT \rightarrow \left(\frac{T_1}{T_2}\right) = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1} ; \left(\frac{T_1}{T_2}\right) = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{n-1}$$

Como não se sabe a massa do sistema, faz-se o balanço da 1a. Lei por unidade de massa:  $q - w = \Delta u$ . **(Atenção: q e w não são propriedades!!)**

$$\Delta u = C_v \Delta T = 716,5 \cdot (130 - 30) = 71,65 \text{ kJ / kg}$$

Cálculo do Trabalho por unidade de massa realizado no Processo :

$$w = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{c}{v^n} dv$$

Como a constante é  $pv^n$  em qualquer ponto do processo, pode-se avaliá-la no ponto 1. Assim,

$$w = p_1 v_1^n \int_1^2 \frac{1}{v^n} dv = p_1 v_1^n \left[ \frac{v^{1-n}}{1-n} \right]_1^2 = p_1 v_1^n \left[ \frac{v_2^{1-n} - v_1^{1-n}}{1-n} \right].$$

Colocando  $v_1^{1-n}$  em evidência,

$$w = \frac{p_1 v_1^n}{1-n} v_1^{1-n} \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{1-n} - 1 \right] = \frac{p_1 v_1}{1-n} \left[ \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - 1 \right] = \frac{RT_1}{1-n} \left[ \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - 1 \right].$$

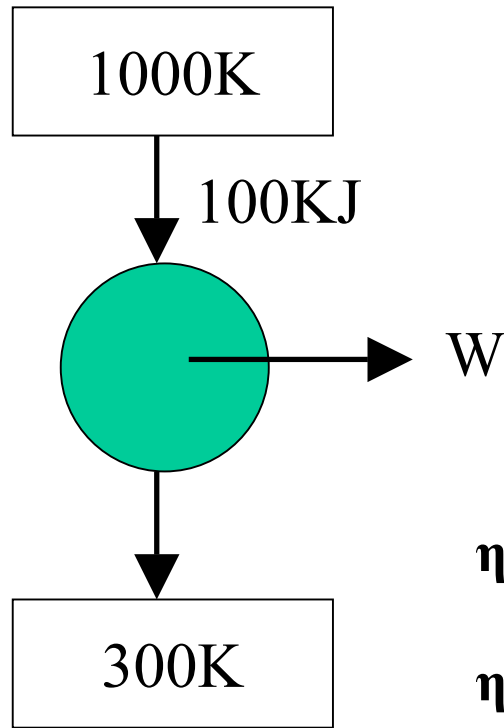
$$w = \frac{287 \text{kJ/kg} \cdot 303 \text{K}}{1,27} \left[ \frac{403}{303} - 1 \right] = -106,3 \text{kJ/kg}$$

Como o valor é negativo, significa que o trabalho foi realizado sobre o sistema

O calor transferido é  $Q = \Delta U + W = 71,6 - 106,3 = -34,7 \text{kJ/kg}$ ,

ou seja, calor foi transferido do sistema para a vizinhança.

**Ex. 4.13)**



**Ciclo de  
Carnot**

$$W=?$$

$$Q_c=?$$

$$\eta_c = \frac{W}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{3}{10}$$

$$\eta_c = 0,7 \rightarrow W = 0,7 \times 100$$

$$W = 70\text{KJ}$$

$$\oint Q = \oint W \rightarrow (100 - Q_c) = 70$$

$$Q_c = 30\text{KJ}$$



**Ex. 4.14)**

$$\eta_T = 0,4 = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_h}$$

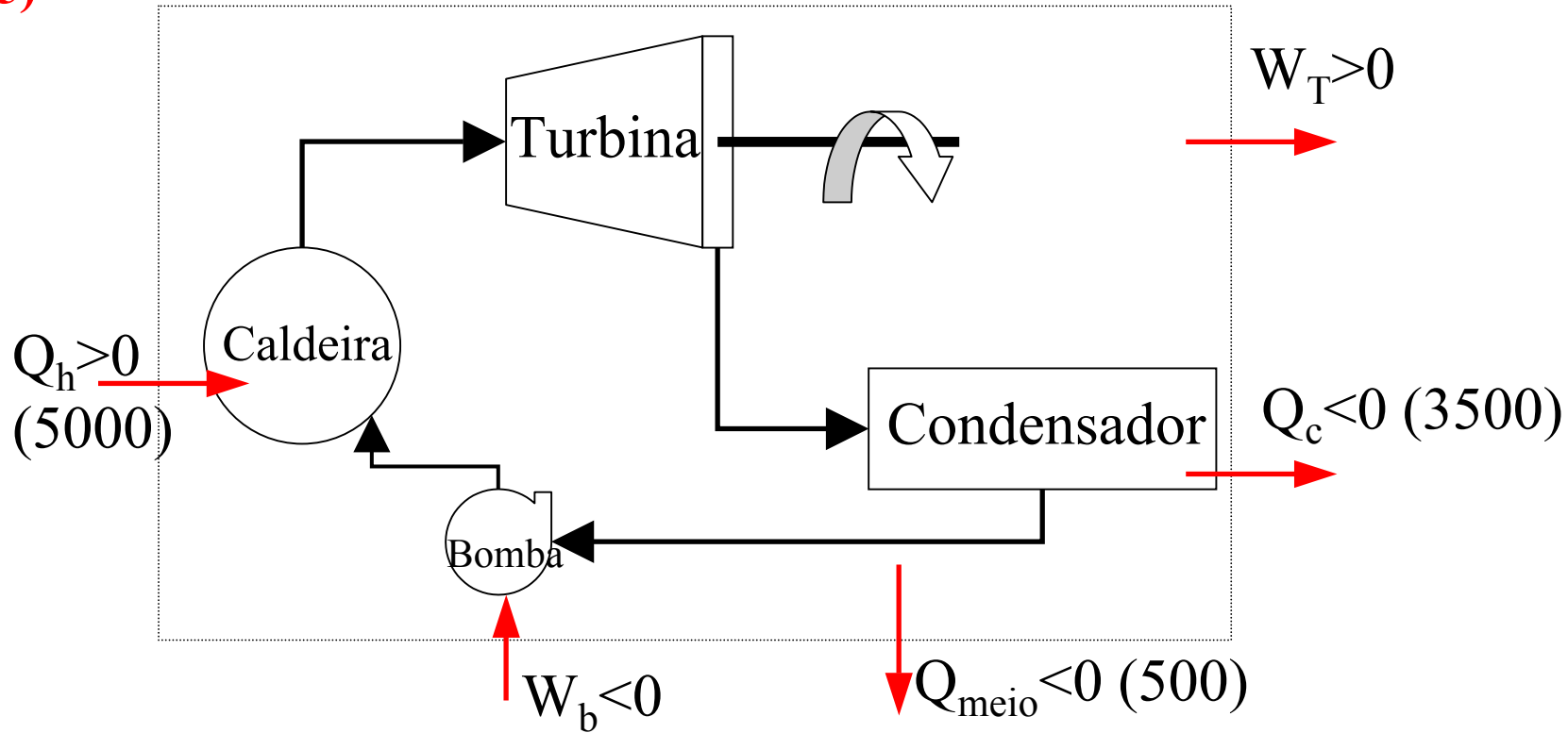
$$\dot{Q}_h = \frac{1000\text{MW}}{0,4} = 2500\text{MW}$$

$$\oint \dot{Q} = \oint \dot{W}$$

$$(\dot{Q}_h - \dot{Q}_c) = \dot{W}_{\text{liq}}$$

$$\dot{Q}_c = 1500\text{MW}$$

**Ex. 4.15)**

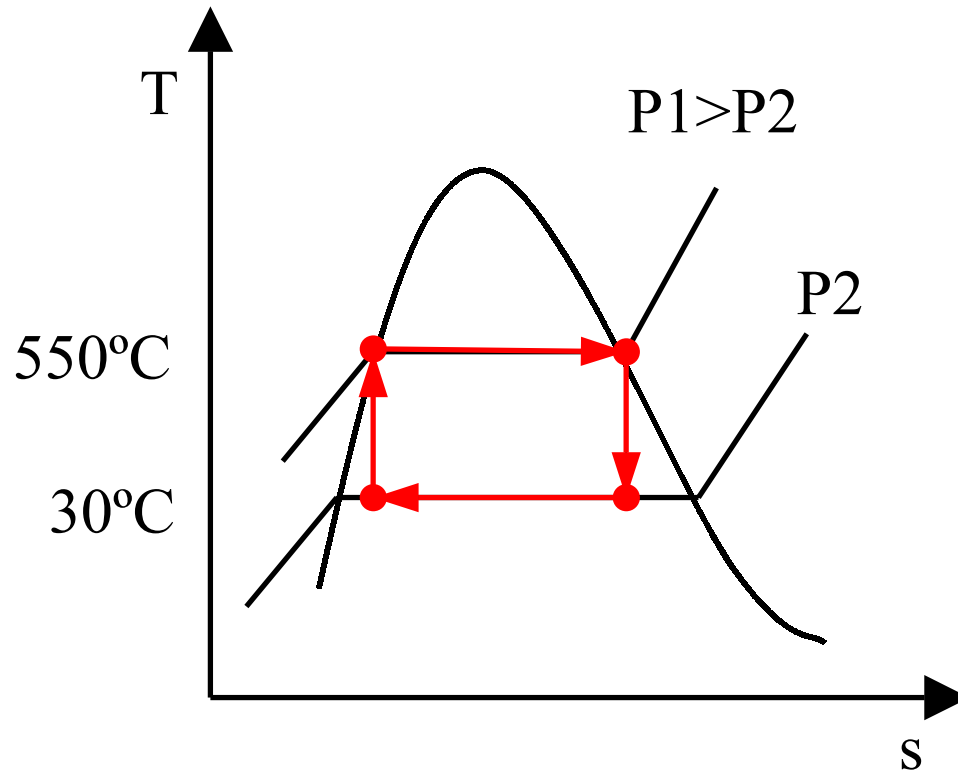


$$\oint \dot{Q} = \oint \dot{W} \rightarrow 5000 - 4000 = 1000 \text{ MW}$$

$$\eta_T = \frac{W_{liq}}{Q_h} = \frac{1000}{5000} = 25\%$$

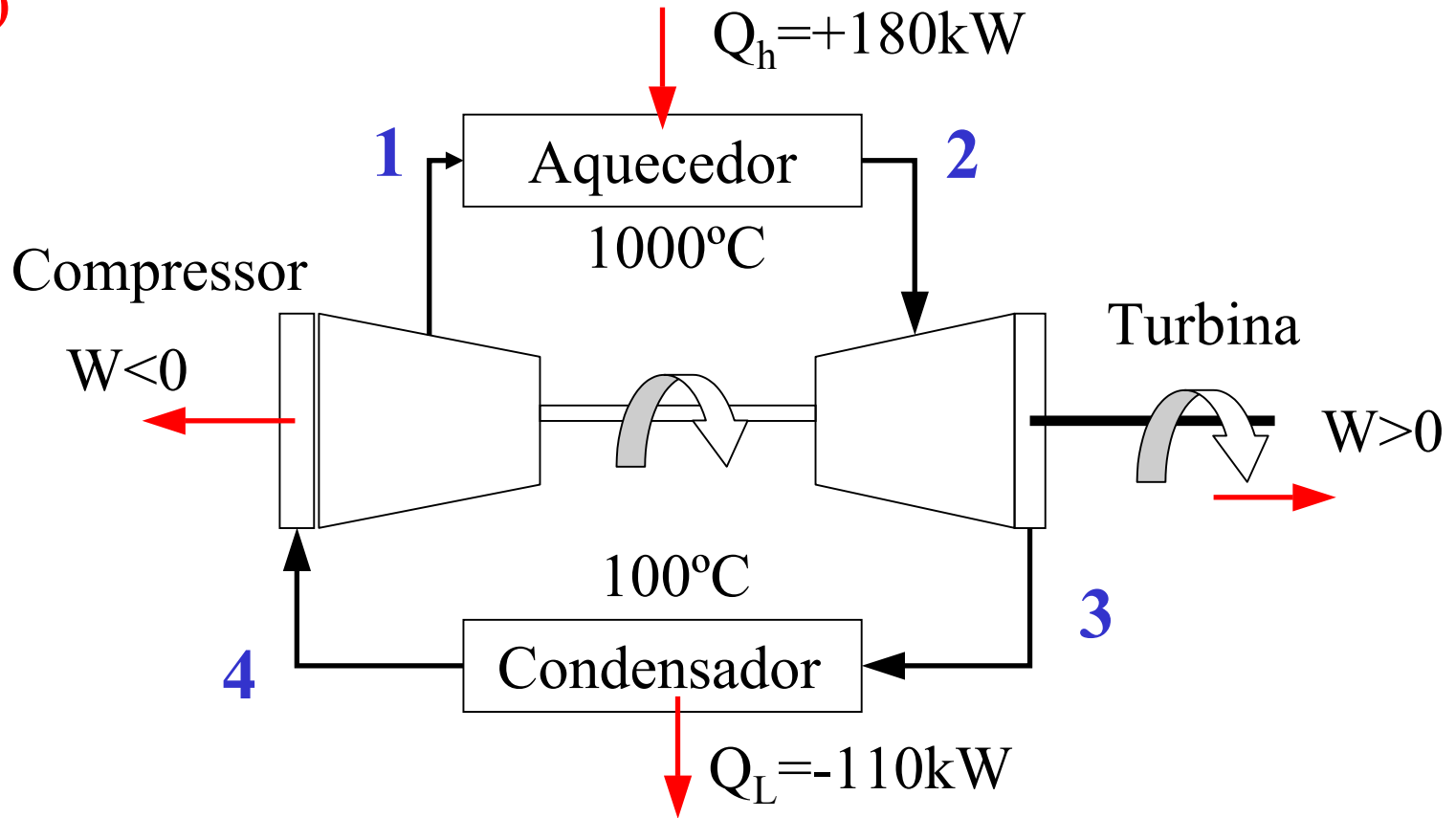
$$W_{liq} = W_T - W_b \rightarrow 1000 = W_T - 1 \rightarrow W_T = 1001 \text{ MW}$$

**Ex. 4.16)**



$$\eta_T = 1 - \frac{303}{823} = 0,63$$

Ex. 4.17)

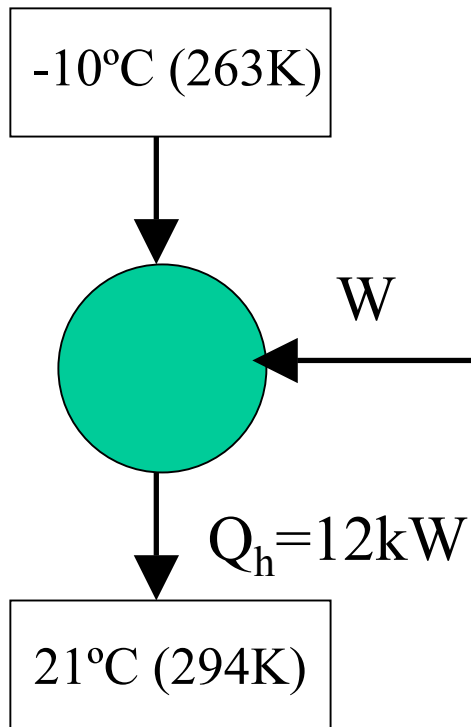


$$1^\circ \text{ Lei: } \oint Q = \oint W$$

$$W_{\text{liq}} = 180 - 110 = 70 \text{ kW}$$

$$\eta_T = \frac{W_{\text{liq}}}{Q_h} = \frac{70}{180} = 0,39$$

**Ex. 4.18)**



$$\eta_{bc} = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

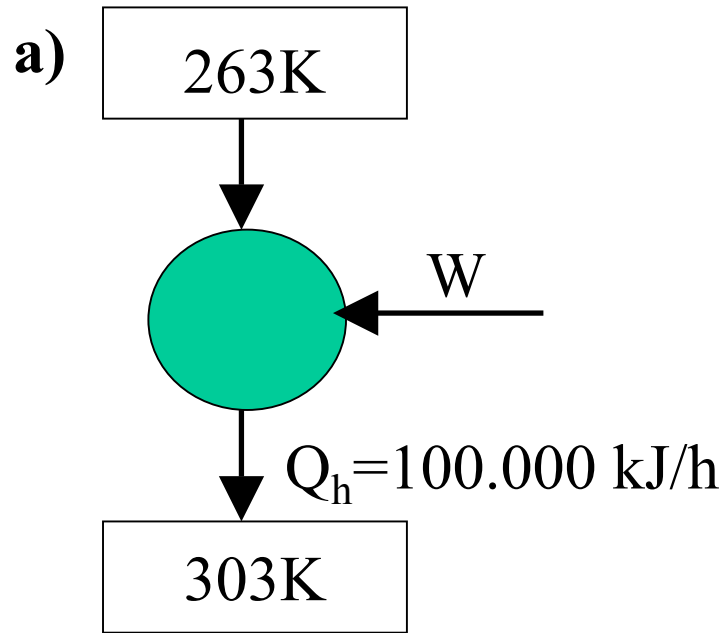
$$\eta_{bc} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} = 9,484$$

$$W = \frac{Q_H}{\eta_{bc}} = 1,265 \text{ kW}$$

**O trabalho mínimo necessário é aquele do ciclo operando reversivelmente.**

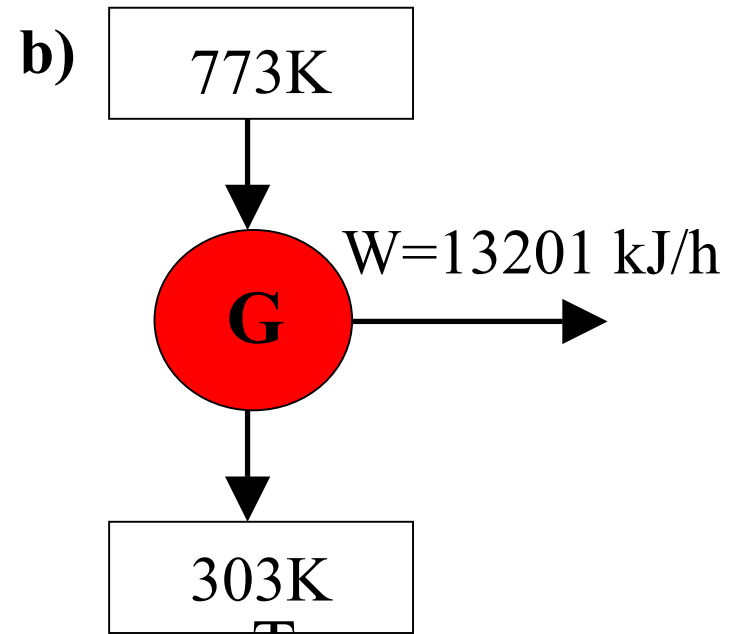
**Causas irreversibilidades: atrito mecânico do fluido, expansões no ciclo, diferenças de temperaturas, ...**

**Ex. 4.22)**



$$\eta_{bc} = 7,575 \rightarrow W \geq 13201 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

**Potência necessária para aquecimento elétrico:  
100.000kJ/h**

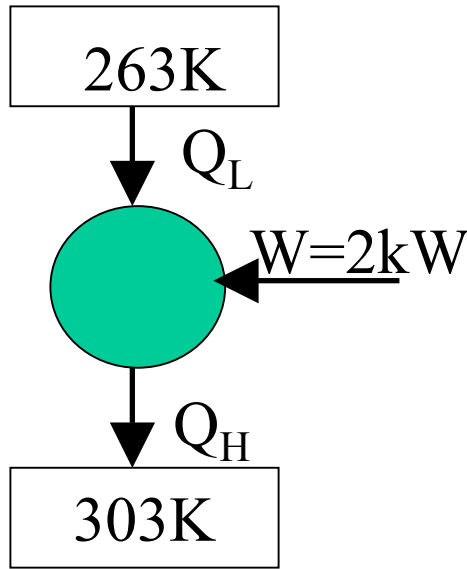


$$\eta_T = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 0,608$$

$$\eta_T = \frac{W}{Q_H} \rightarrow Q_H = \frac{13201}{0,608}$$

$$Q_H = 21711 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \quad \begin{array}{l} \text{Razão} \\ \text{Consumo Gás:} \\ 21711/100.000 \\ \approx 1:5 \end{array}$$

Ex. 4.23)



$$\eta_R = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

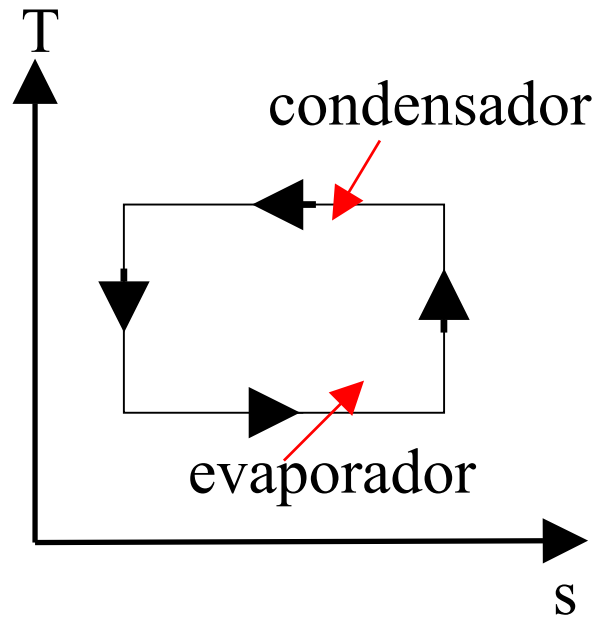
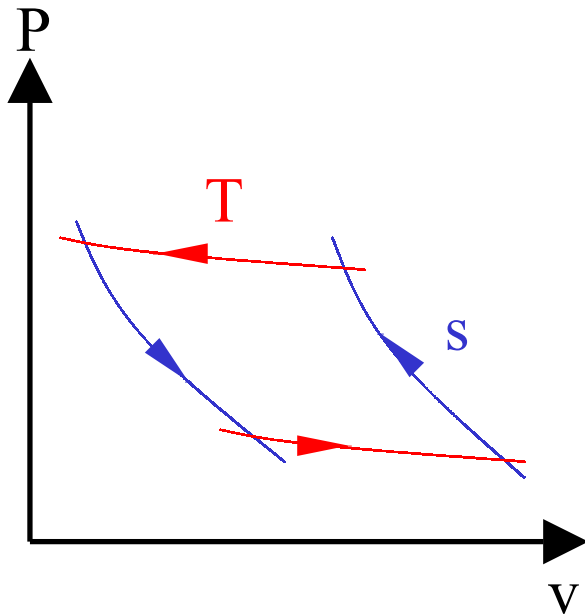
$$\eta_R = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} = \frac{1}{\frac{303}{263} - 1} = 6,57$$

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H}$$

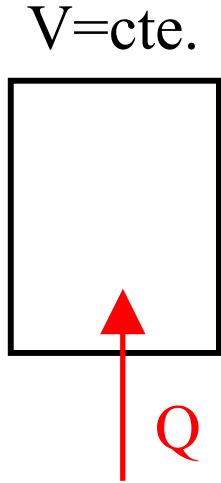
$$Q_H = \frac{T_H}{T_L} Q_L$$

$$Q_H = \frac{303}{263} 6,57 \times 2$$

$$Q_H = 15,14 \text{ kW}$$



**Ex. 4.24)**



**Adição de calor a volume constante**

**1º Lei:  $Q - W = \Delta U$  onde:  $[W = 0]$**

$$\Delta U = C_v \Delta T = Q$$

**Energia Interna aumenta ( $Q > 0$ )**

**Temperatura aumenta ( $\Delta U > 0$ )**

**Pressão aumenta ( $PV = MRT$ )  $[T \uparrow]$**

**Entalpia aumenta ( $H = U + PV$ )**

**Entropia:**

$$\Delta S = c_v \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) + k \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

$$\Delta S > 0 \rightarrow T_2 > T_1$$

**Troca de calor com  
diferença de temperatura  
→ Processo Irreversível**

$$\Delta S_{\text{sist+viz}} > 0$$



**Ex. 4.27)** Remoção de 100kJ de calor de um sistema com 10 kg de vapor a 400K para uma fonte fria a 300K por meio de um processo isotérmico reversível.

a) Variação de entropia do sistema

$$ds = \oint \frac{\delta Q}{T} + Ps. \text{ Processo reversível} \rightarrow Ps = 0$$

$$(s_2 - s_1)_{sistema} = \frac{-100kJ}{400K} = -0,25kJ / K$$

b) Variação de entropia do meio

$$ds = \oint \frac{\delta Q}{T} + Ps. \text{ Processo reversível} \rightarrow Ps = 0$$

$$(s_2 - s_1)_{meio} = \frac{100kJ}{300K} = 0,33J / K$$

b) Variação de entropia do universo

$$(s_2 - s_1)_{universo} = (s_2 - s_1)_{sistema} + (s_2 - s_1)_{meio} = -0,25 + 0,33 = 0,083kJ / kg$$

**Ex. 4.31)** Água líquida (incompressível) passa por um processo adiabático

$$1^{\circ} \text{ Lei: } \cancel{Q}_{2-1} - W_2 = (U_2 - U_1)$$

$$(U_2 - U_1) = -W_2$$

$$2^{\circ} \text{ Lei: } dS = \int_1^2 \frac{\cancel{\delta Q}}{T} + dP_s$$

$$dS \geq 0$$

**Varição Entropia  $H_2O$**

$$TdS = dU + PdV$$

$$\text{Incompressível} \rightarrow dV = 0$$

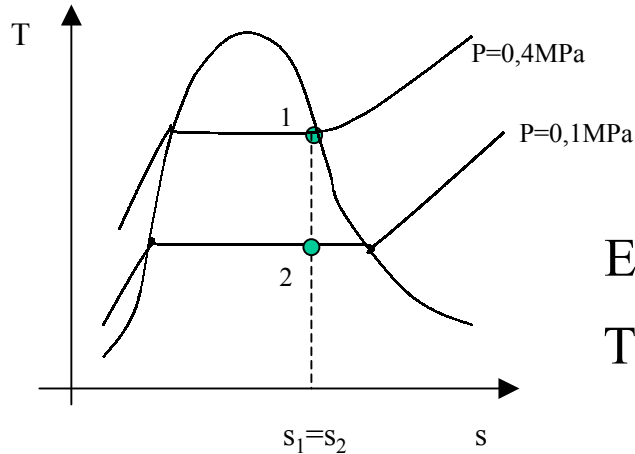
$$TdS = dU \rightarrow \Delta S = \int \frac{dU}{T} \geq 0, \text{ então:}$$

$$U_2 - U_1 > 0 \rightarrow \text{irreversível}$$

$$U_2 - U_1 = 0 \rightarrow \text{reversível}$$

$$U_2 - U_1 < 0 \rightarrow \text{impossível}$$

**Ex. 4.32)** Expansão adiabática reversível de vapor saturado de 0,40MPa a 0,10MPa



$$ds = \oint \frac{\delta Q}{T} + P_s. \text{ Processo reversível} \rightarrow P_s = 0$$

$$\text{Processo adiabático} \rightarrow \delta Q = 0$$

$\Rightarrow$  Processo adiabático e reversível  $\rightarrow$  isoentrópico!

Estado 1 : vapor saturado a 0,4MPa

Tab. A -1.2 :  $v_{v1} = 0,001084m^3 / kg$ ;  $s_{v1} = 6,8959kJ / kg \cdot K$

Estado 2 : mistura líquido - vapor a 0,1MPa com título  $x_2$  tal que :

$$s_2 = (1 - x_2)s_{l2} + x_2s_{v2} = s_1 = 6,8959 kJ / kg \cdot K \quad (\text{Processo Isoentrópico})$$

Tab. A -1.2 :  $v_{l1} = 0,001043m^3 / kg$ ;  $v_{v1} = 1,694m^3 / kg$

$$s_{l1} = 1,3026kJ / kg \cdot K; s_{v1} = 7,3594kJ / kg \cdot K$$

$$\text{Portanto, } x_2 = \frac{6,8959 - 1,3026}{6,0568} \rightarrow x_2 = 0,923$$

Cálculo do trabalho de expansão realizado :

Da 1ª. Lei,  $\Delta U = Q - W$ ; Como o processo é adiabático,  $Q = 0 \rightarrow W = -\Delta U$

Tab. A -1.2 :  $u_1 = 2553,6 \text{ kJ/kg}$ ;  $u_{2l} = 417,36 \text{ kJ/kg}$ ;  $u_{2v} = 2506,1 \text{ kJ/kg}$

$$u_2 = (1 - x_2)u_{2l} + x_2u_{2v} = 0,077 \cdot 417,36 + 0,923 \cdot 2506,1 = 2345,3 \text{ kJ / kg}$$

or

Portanto, o trabalho realizado no processo (por unidade de massa) é :

$$w = \Delta u = (2345,3 - 2553,6) = -208,37 \text{ kJ / kg},$$

o que indica que o trabalho foi realizado sobre o sistema.

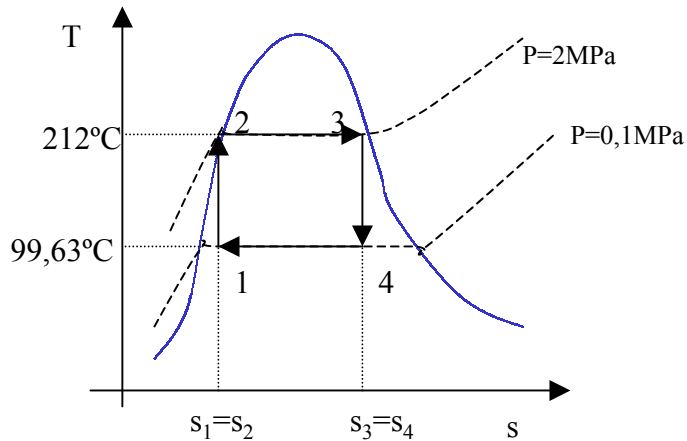
Obs. : Também seria possível calcular o trabalho pela expressão  $w = \int p dv$

Apesar de não dispormos de uma expressão para  $p$  em função de  $v$ , sabemos que :

$$Tds = du + Pdv \rightarrow ds = 0 \rightarrow du = -pdV \rightarrow w = -\int du = -\Delta u, \text{ que é a expressão}$$

que foi utilizada.

**Ex. 4.34)** Máquina térmica operando hipoteticamente em um ciclo de Carnot.



Ciclo de Potência de Carnot

$1 \rightarrow 2 : W < 0$  adiabático reversível

$2 \rightarrow 3 : Q > 0$  isotérmico reversível

$3 \rightarrow 4 : W > 0$  adiabático reversível

$4 \rightarrow 1 : Q < 0$  isotérmico reversível

a) Calor transferido nos processos:  $1 \rightarrow 2$  e  $3 \rightarrow 4$  são adiabáticos  $\rightarrow Q=0$

$$ds = \oint \frac{\delta Q}{T}$$

$$s_3 - s_2 = \frac{{}_2Q_3}{T}; \text{Tab. A-1.2} : s_2 = 2,4474 \text{ kJ/kg}, s_3 = 6,3409 \text{ kJ/kg}$$

$$\Rightarrow {}_2Q_3 = (212 + 273) \text{ K} \cdot (6,3409 - 2,4474) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 1888,35 \text{ kJ/kg}$$

$$s_4 - s_1 = \frac{{}_4Q_1}{T}; s_4 = s_3, s_2 = s_1$$

$$\Rightarrow {}_4Q_1 = (99,63 + 273) \text{ K} \cdot (2,4474 - 6,3409) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = -1451,6 \text{ kJ/kg}$$

b) Cálculo do trabalho líquido:

$$\text{Em um ciclo, } \oint w = \oint q \Rightarrow w_{liq} = q_{liq} = {}_4q_1 + {}_2q_3$$

$$w_{liq} = 1885,5 - 1451,6 = 0,436 \text{ kJ / kg}$$

b) Cálculo da eficiência:

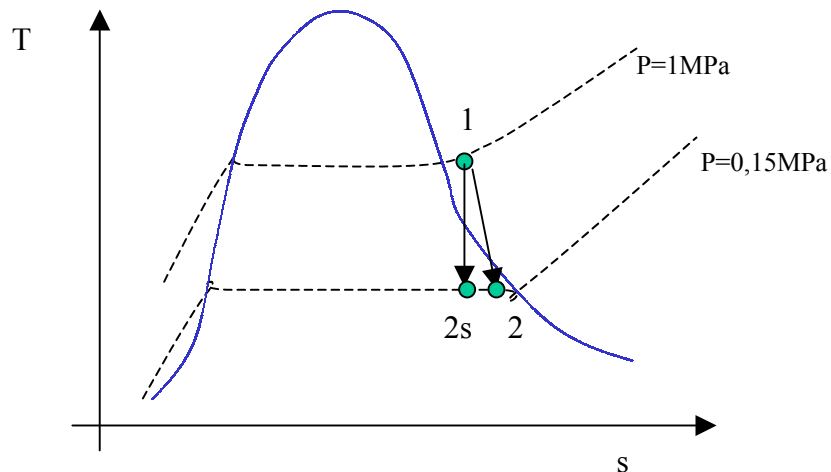
$$\eta = \frac{\text{Trabalho líquido}}{\text{Calor adicionado}} = \frac{w_{liq}}{{}_2q_3} = \frac{0,436}{1888,5} = 0,231$$

A eficiência máxima teórica é:

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{fonte fria}}}{T_{\text{fonte quente}}} = 1 - \frac{373}{485} = 0,231,$$

o que era de se esperar, pois foi dito que a máquina opera em um ciclo de Carnot

**Ex. 4.37)** Expansão adiabática de 0,1kg de vapor de 1,0MPa e 250°C a 0,15MPa, com realização de 26kJ de trabalho.



$p_1 = 1MPa \Rightarrow T_{sat} = 179,91^\circ C$ . Como  $T_1 > T_{sat}$ , o estado é vapor superaquecido

Como a expansão é adiabática,  $W = -\Delta U$  (1a. Lei)

Tab. A -1.3 :  $u_1 = 2709,9kJ / kg \Rightarrow U_1 = Mu_1 = 271kJ$

$U_2 = U_1 - W = 271 - 26 = 245kJ$

$p_2 = 0,15MPa \Rightarrow u_v = 2519,7kJ / kg, u_l = 466,94kJ / kg$ .

Como  $u_l < u_2 < u_v$ , o estado é mistura líquido vapor.

$$x_2 = \frac{u_2 - u_l}{u_v - u_l} = \frac{2450 - 466,94}{2519,7 - 466,94} = 0,966$$

Se a expansão fosse reversível,  $s_1 = s_2$ .

Vamos definir o estado 2 ideal como 2s(isoentrópico)

$$x_{2s} = \frac{s_{2s} - s_{2sl}}{s_{2sv} - s_{2sl}}. \text{Tab. A-1.2 : } u_{2l} = 466,94 \text{ kJ / kg} \cdot K; u_{2v} = 2519,7 \text{ kJ / kg} \cdot K$$

$$x_{2s} = 0,948 \Rightarrow u_{2s} = (1 - x_{2s})u_{2sl} + x_{2s}u_{2sv} = 2412,9 \text{ kJ / kg}$$

O trabalho ideal realizado (caso o processo fosse adiabático e reversível) seria :

$$W = -U = M(u_1 - u_2) = 0,1(2709,9 - 2412,9) = 29,7 \text{ kJ}$$

Assim, a eficiência isentrópica do processo é :

$$\eta = \frac{W_{real}}{W_{isoentrópico}} = \frac{26}{29,7} = 0,875$$



**Ex. 4.38)** Diagrama esquemático de procesos politrópicos para diversos valores de  $n$

