

Exercícios resolvidos

- Ar está contido em um recipiente rígido, adiabático, a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 200 kPa . Uma hélice inserida no interior realiza 720 kJ de trabalho. Se o recipiente tem 2 m^3 , calcule o aumento da entropia assumindo calores específicos constantes

- Ar no interior de um cilindro se encontra inicialmente a 1200 kPa e 350 °C. O ar é expandido para 140 kPa em um processo adiabático reversível. Calcule o trabalho específico realizado pelo gás assumindo que ele possua calor específico constante.

- Ex. 4.1)
- 1a. Lei: $Q - W = \Delta U$; tanque é rígido $\rightarrow dV=0 \rightarrow W=0$
- $Q = \Delta U = mC_v\Delta T = 10 \cdot 0,7165 \cdot 100 = 716,5 \text{ kJ}$
- Taxa de transferência de calor: $Q / \Delta t = 716500/1000 = 716,5 \text{ J/s} = 716,5 \text{ W}$

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:

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

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

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

$${}_1W_2 = 287 \text{ kJ} \rightarrow \text{Potência} = \dot{W}_2 = \frac{{}_1W_2}{\Delta t} = \frac{287 \text{ kJ}}{1000 \text{ s}} = 287 \text{ W}$$

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,

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

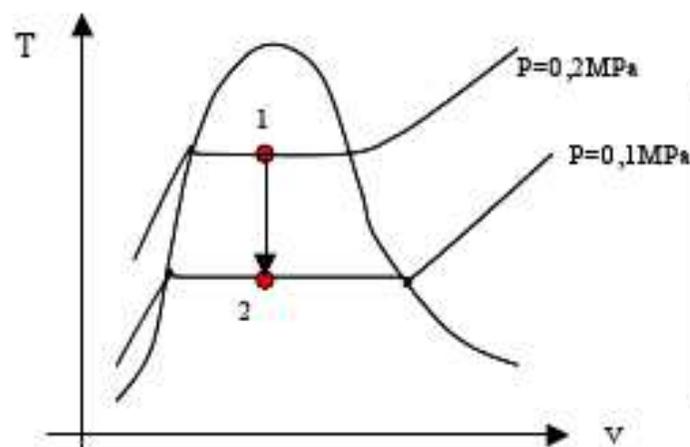
Assim, a taxa de transferência de calor é:

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

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_f [m ³ /kg]	v_g [m ³ /kg]	u_f [kJ/kg]	u_g [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

$$v_1 = (1-x_1)v_{f1} + x_1v_{g1} = 0,443 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \text{Como o processo é a volume constante, } v_2 = v_1:$$

$$v_2 = (1-x_2)v_{f2} + x_2v_{g2} = 0,443 \text{ m}^3/\text{kg} \rightarrow x_2 = \frac{v_2 - v_{f2}}{v_{g2} - v_{f2}} = 0,262.$$

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

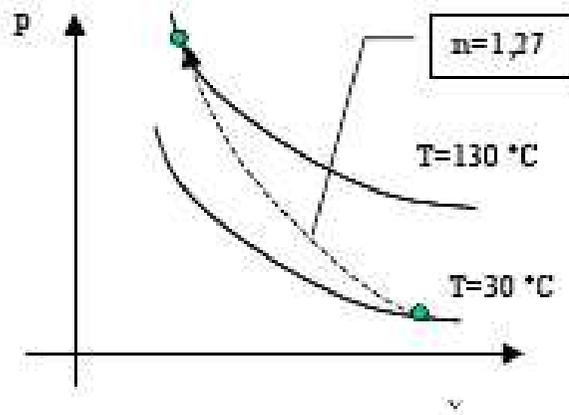
$$1^a \text{ Lei: } \frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}. \text{ Como o volume é fixo, } W = \int p dv = 0.$$

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

$$\frac{dU}{dt} = -50 \rightarrow \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{M(u_2 - u_1)}{\Delta t}; u_1 = (1-x_1)u_{f1} + x_1u_{g1} = 1516 \text{ kJ/kg}; u_2 = (1-x_2)u_{f2} + x_2u_{g2} = 964 \text{ kJ/kg}$$

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

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

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

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

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,

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

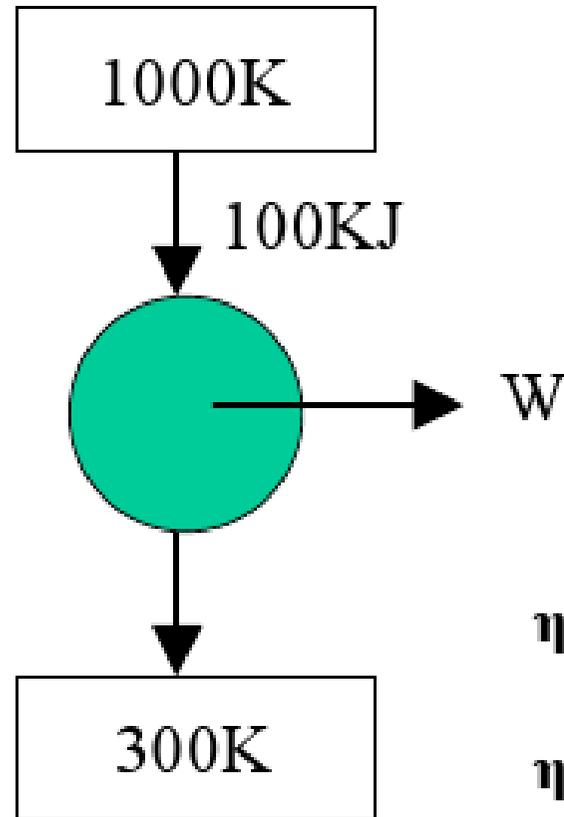
$$w = \frac{287 \text{ kJ / kg} \cdot 303 \text{ K}}{1,27} \left[\frac{403}{303} - 1 \right] = -106,3 \text{ kJ / kg}$$

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)

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

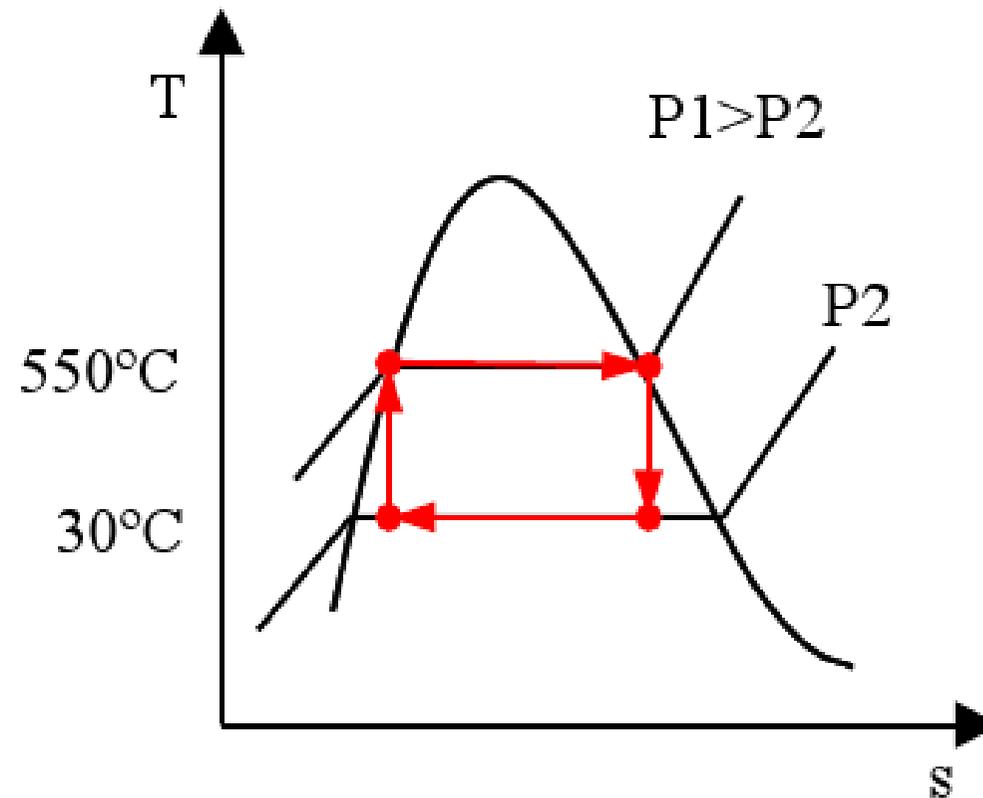
$$\dot{Q}_h = \frac{1000\text{MW}}{0,4} = 2500\text{MW}$$

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

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

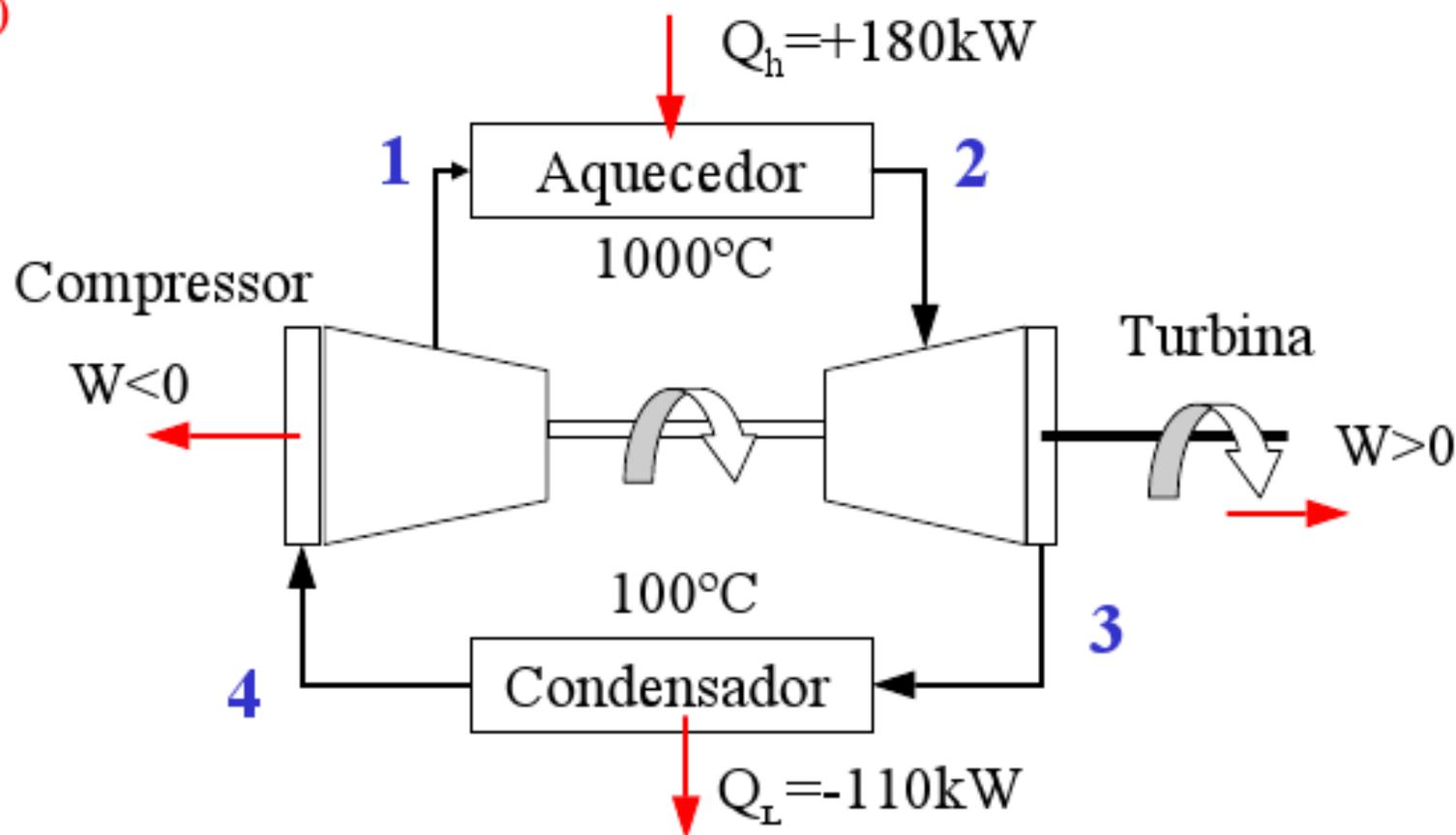
$$\dot{Q}_c = 1500\text{MW}$$

Ex. 4.16)



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

Ex. 4.17)

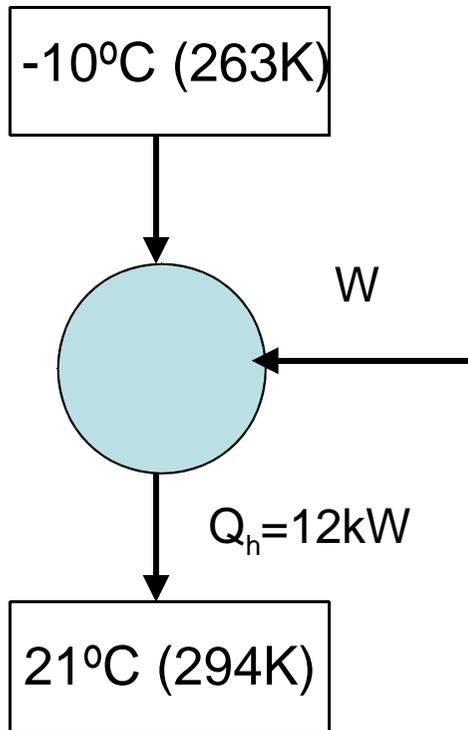


$$1^{\circ} \text{ Lei: } \oint Q = \oint W$$

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

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

Ex4.18)



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

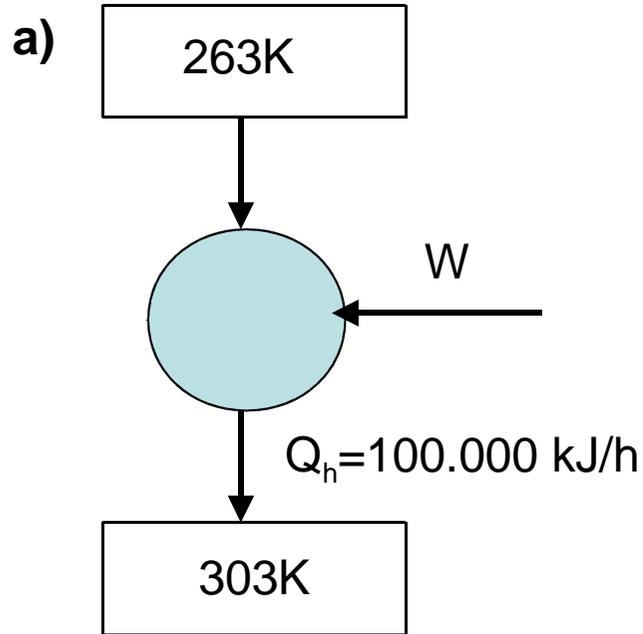
$$\eta_{bc} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} = 9,484$$

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

O trabalho mínimo necessário é aquele do ciclo operando reversivelmente.

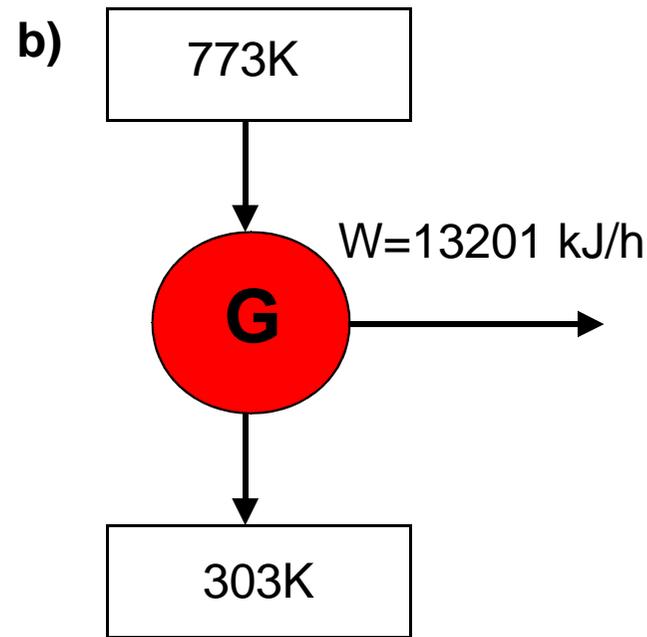
Causas irreversibilidades: atrito mecânico do fluido, expansões no ciclo, diferenças de temperaturas, ...

Ex4.22)



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

Potência necessária para aquecimento elétrico:
100.000kJ/h
razão elet/min = 7,58



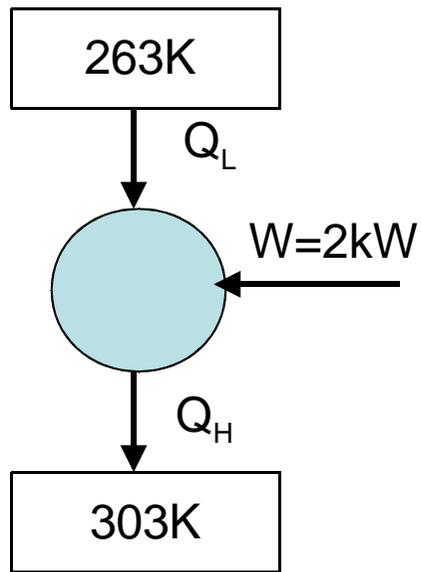
$$\eta_{T \text{ Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 0,608$$

$$\eta_{T \text{ Carnot}} = \frac{W}{Q_H} \rightarrow Q_H = \frac{13201}{0,608}$$

$$Q_H = 21711 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Razão gas/central = 4,6

Ex4.23)



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

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

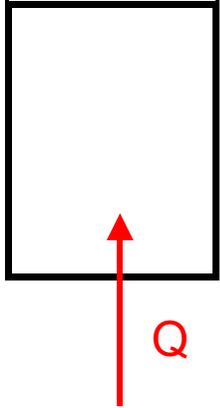
$$Q_L = 13,15 \text{ kW}$$

$$Q_H = W + Q_L$$

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

Ex4.24)

$V = \text{cte.}$



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:

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

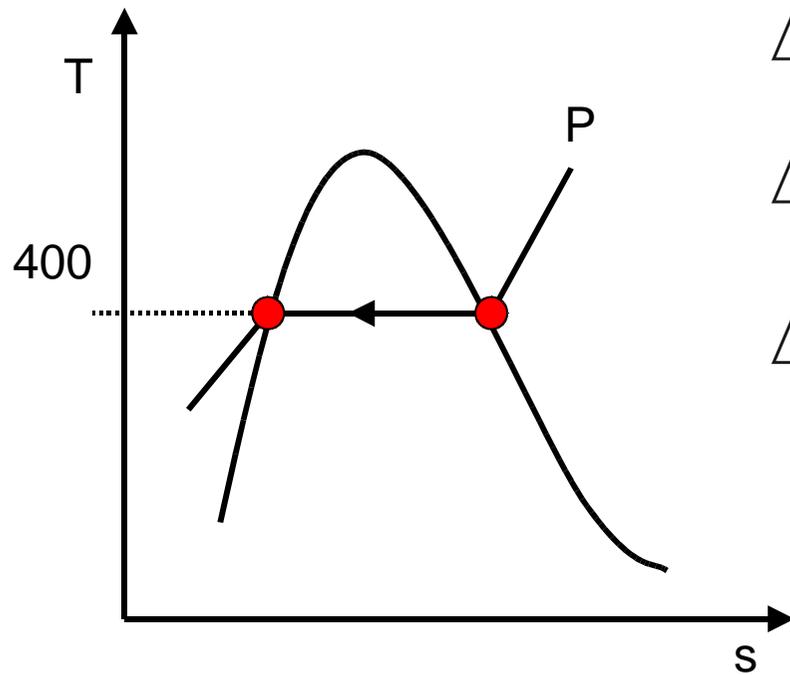
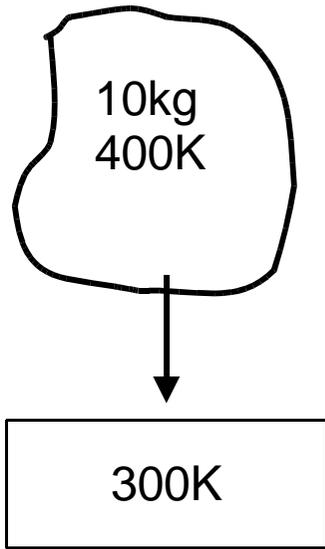
$$\Delta S > 0 \rightarrow T_2 > T_1$$

**Troca de calor com
diferença de temperatura**

→ Processo Irreversível

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

Ex4.27)



$$\int dS = \oint \frac{\partial Q}{T} + \int dI$$

$$\Delta S_{\text{sist}} = \frac{-100}{400} = -0,25 \frac{\text{kJ}}{\text{°K}}$$

$$\Delta S_{\text{viz}} = \frac{+100}{300} = +0,33 \frac{\text{kJ}}{\text{°K}}$$

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sist}} + \Delta S_{\text{viz}}$$

$$\Delta S_{\text{univ}} = \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4} \right) = \frac{1}{12} = 83,33 \frac{\text{J}}{\text{°K}}$$

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

$$1^{\circ} \text{ Lei: } \cancel{Q_2 - Q_1} \overset{0}{W_2} = (U_2 - U_1)$$

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

$$2^{\circ} \text{ Lei: } dS = \int_1^2 \frac{\cancel{\delta Q}}{T} + dP_s \overset{0}{}$$

$$dS \geq 0$$

Varição Entropia H₂O

$$TdS = dU + PdV$$

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

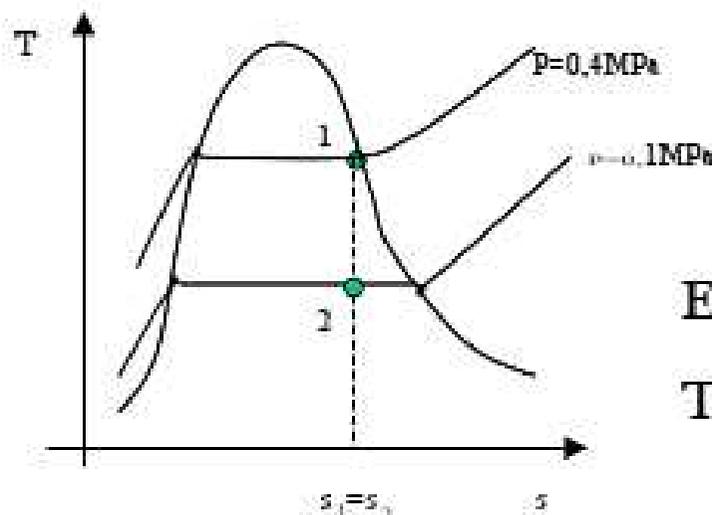
$$TdS = dU \rightarrow \Delta S = \int \frac{dU}{T} \geq 0, \text{ então:}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

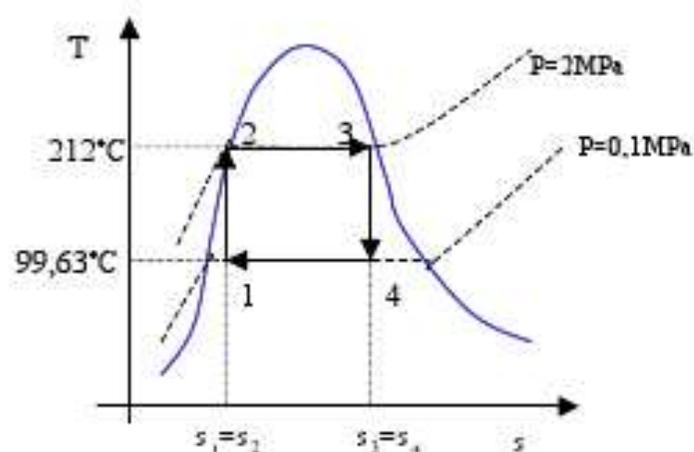
Obs. : Também seria possível calcular o trabalho pela expressão $w = \int p dv$

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

$$T ds = du + P dv \rightarrow ds = 0 \rightarrow du = -p dV \rightarrow w = -\int du = -\Delta u, \text{ que é a expressão}$$

que foi utilizada.

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



Ciclo de Potência de Carnot

1 → 2 : $W < 0$ adiabático reversível

2 → 3 : $Q > 0$ isotérmico reversível

3 → 4 : $W > 0$ adiabático reversível

4 → 1 : $Q < 0$ isotérmico reversível

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

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

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

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

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

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

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:

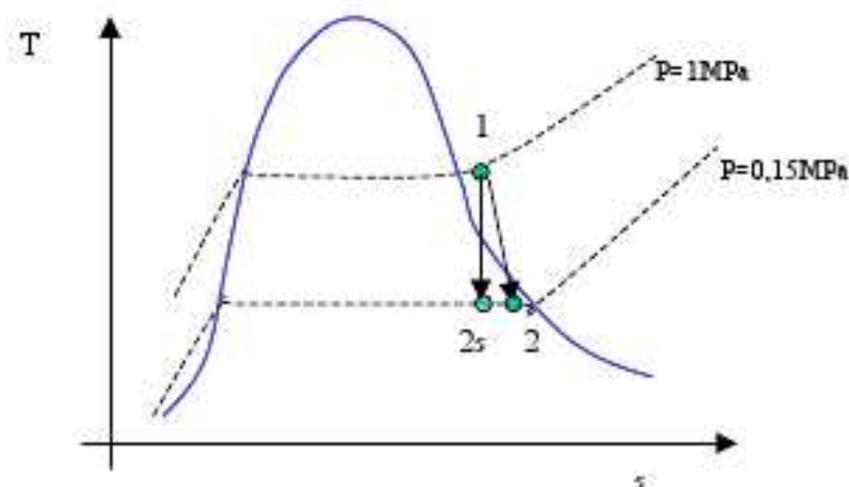
$$\eta = \frac{\text{Trabalho líquido}}{\text{Calor adicionado}} = \frac{w_{liq}}{{}_2q_3} = \frac{0,436}{1888,5} = 0,231$$

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.



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

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

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

$U_2 = U_1 - W = 271 - 26 = 245\text{kJ}$

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

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)

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

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

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 processos politrópicos para diversos valores de n

