PME3398 – Fundamentos de Termodinâmica e Transferência de Calor
1º semestre / 2016 – Profs. Bruno Souza Carmo e Antonio Luiz Pacífico

Gabarito da Prova 2

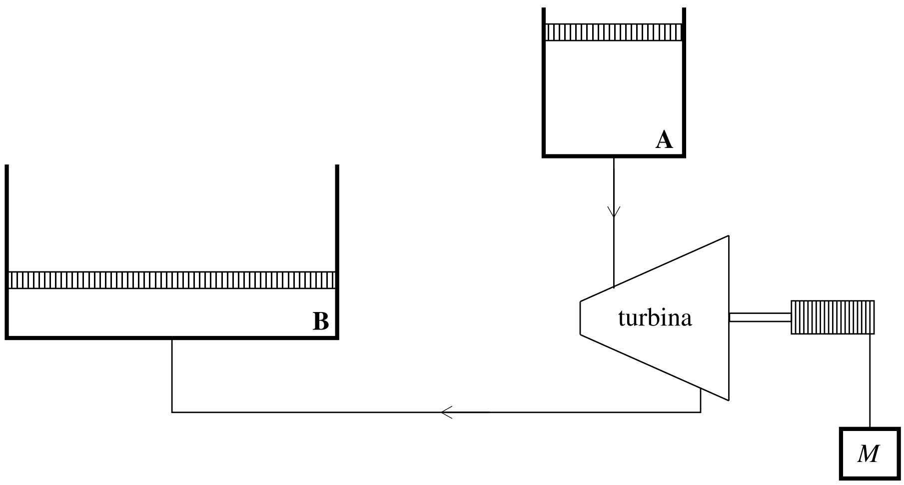
Questão 1: Considere o dispositivo indicado abaixo destinado ao levantamento de uma massa M. Nele dois cilindros bem isolados A e B contendo pistões sem atrito são conectados por meio de uma turbina. Os efeitos da pressão atmosférica e dos pesos dos pistões são tais que pressões de p_A e p_B são necessárias para suportar, respectivamente, os pistões dos cilindros A e B. Inicialmente, o cilindro A contém uma massa m de uma substânica pura a T_A e o cilindro B está vazio. A substância começa, então, a escoar do cilindro A para o cilindro B através da turbina até que o pistão A atinja o fundo do cilindro A. A temperatura final da substância no cilindro B é T_B. A turbina troca calor com o meio que está a temperatura T_0. Supondo que os volumes da turbina e da tubulação que conecta os cilindros sejam desprezíveis, demonstre que:

(a) $\dfrac{H_A - H_B - W_t}{T_0} + S_B - S_A \geqslant 0$ **(1,5 ponto)**

(b) $z_{máx} = \dfrac{H_A - T_0.S_A - (H_B - T_0.S_B)}{M.g}$ **(1,5 ponto)**

(c) $z_{máx} - z_{real} = \dfrac{T_0.S_{ger}}{M.g}$ **(2,0 pontos)**

onde H_A e H_B são as entalpias da massa m no estado inicial em A e final em B, respectivamente; S_A e S_B são as entropias da massa m no estado inicial em A e final em B, respectivamente; W_t é o trabalho produzido pela turbina; $z_{máx}$ e z_{real} são as alturas máxima e real a que a turbina consegue elevar a massa M; g é o módulo da aceleração da gravidade local; e S_{ger} é a entropia gerada durante o processo.



Solução: Adotando o conjunto dos cilindros mais turbina como um sistema, cuja fronteira acompanha o movimento dos pistões A e B, a 1^a Lei aplicada a este sistema resulta:

$$\Delta U = Q - W$$

onde Q é o calor rejeitado somente na turbina, uma vez que os cilindros encontram-se isolados;

W é a soma dos trabalhos dos pistões mais o da turbina; e ΔU é a diferença entre as energias internas finais em B e em A, uma vez que a turbina não acumula massa, como dito no enunciado. Assim,

$$U_B - U_A = Q_t - W_A - W_B - W_t$$

onde o subscrito t refere-se à turbina.

$$U_B - U_A = Q_t - (-p_A.\cancel{V}_A) - p_B.\cancel{V}_B - W_t$$

$$Q_t = U_B + p_B.\cancel{V}_B - (U_A + p_A.\cancel{V}_A) + W_t$$

$$Q_t = H_B - H_A + W_t$$

(a) O balanço de entropia para este sistema é dado por:

$$S_f - S_i = \int \frac{\delta Q}{T} + S_{ger}$$

onde os subscritos f, i e ger referem-se à final, inicial e gerada, respectivamente. Como o sistema cede calor proveniente da turbina ao meio à T_0, o termo da transferência de entropia fica:

$$\int \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_t}{T_0} = \frac{H_B - H_A + W_t}{T_0}$$

As entropias inicial, S_i, e final, S_f, correspondem às entropias da massa m da substância no início em A, S_A, e no final em B, S_B, respectivamente. Assim,

$$S_B - S_A = \frac{H_B - H_A + W_t}{T_0} + S_{ger}$$

$$\frac{H_A - H_B - W_t}{T_0} + S_B - S_A = S_{ger} \geqslant 0$$

$$\frac{H_A - H_B - W_t}{T_0} + S_B - S_A \geqslant 0 \quad \boxed{\textbf{1,5 pt}}$$

(b) Tomando o resultando do item (a) e igualando a zero o lado esquerdo da inequação, resulta na condição para a qual $S_{ger} = 0$ que é aquela para a qual W_t é máximo, $W_{t,máx}$

$$\frac{H_A - H_B - W_{t,máx}}{T_0} + S_B - S_A = 0$$

Multiplicando por T_0 e desenvolvendo:

$$H_A - H_B - W_{t,máx} + T_0.S_B - T_0.S_A = 0$$

$$W_{t,máx} = H_A - T_0.S_A - (H_B - T_0.S_B)$$

Ao levantar a massa M, a altura atingida é aquela para a qual a variação de energia potencial é igual ao trabalho fornecido pela turbina. Assim, na condição de máximo trabalho extraído da turbina:

$$M.g.z_{máx} = W_{t,máx} = H_A - T_0.S_A - (H_B - T_0.S_B)$$

$$z_{máx} = \frac{H_A - T_0.S_A - (H_B - T_0.S_B)}{M.g} \quad \boxed{\textbf{1,5 pt}}$$

(c) Voltando ao desenvolvimento do item (a), tinha-se:

$$\frac{H_A - H_B - W_t}{T_0} + S_B - S_A = S_{ger}$$

Multiplicando por T_0 e desenvolvendo:

$$T_0.S_{ger} = H_A - H_B - W_t + T_0.S_B - T_0.S_A$$

Rearranjando,

$$T_0.S_{ger} = H_A - T_0.S_A - (H_B - T_0.S_B) - W_t$$

$$T_0.S_{ger} = W_{t,máx} - W_t$$

O W_t na equação acima é o $W_{t,real}$, pois para $S_{ger} = 0$ resulta $W_{t,máx}$, como visto no item anterior. Assim,

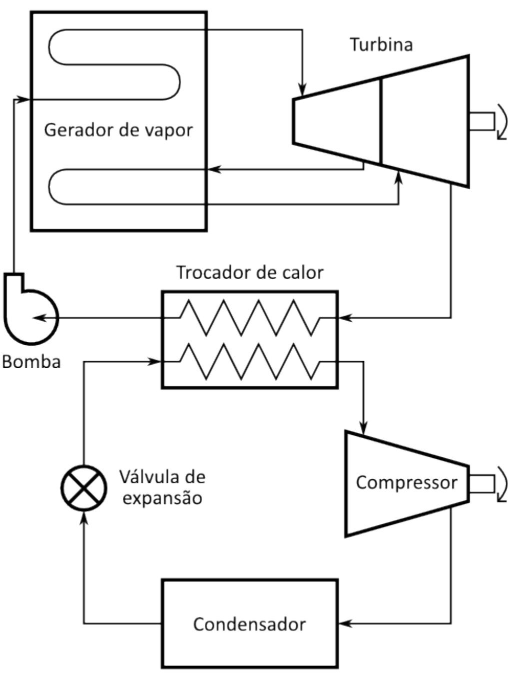
$$T_0.S_{ger} = W_{t,máx} - W_{t,real}$$

Ao converter os trabalhos, máximo e real, em energia potencial levantando a massa M:

$$T_0.S_{ger} = M.g.z_{máx} - M.g.z_{real}$$

$$z_{máx} - z_{real} = \frac{T_0.S_{ger}}{M.g} \quad \boxed{\textbf{2,0 pts}}$$

Questão 1: Você trabalha para uma empresa de energia que dispõe de uma central de potência a vapor que funciona segundo um ciclo Rankine, com pressões máxima e mínima iguais a 3 MPa e 10 kPa, respectivamente, e temperatura máxima igual a 600 řC, produzindo 5 MW de potência líquida. Um dos seus superiores vislumbra aumentar o rendimento desta central de potência baixando a pressão na saída da turbina para 3 kPa, mantendo a pressão e temperatura máximas inalteradas, através da combinação com um ciclo de refrigeração e introdução de reaquecimento para evitar que o título na saída da turbina seja demasiadamente baixo. O ciclo de refrigeração utilizaria R-134a e teria uma pressão máxima de 1200 kPa e temperatura mínima de 0 řC. A proposta de ciclo combinado é ilustrada na figura. Pede-se que você avalie a proposta.



(a) Calcule o rendimento e a vazão mássica do ciclo Rankine atual. **(1,5 ponto)**

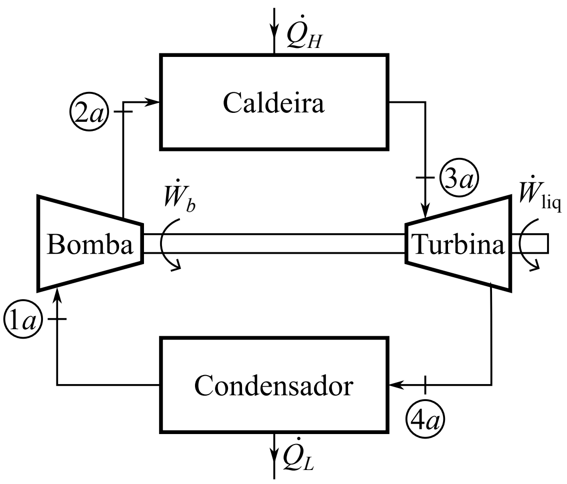
(b) Quanto deverá ser a pressão do vapor na extração intermediária da turbina no ciclo com reaquecimento para garantir que o título na extração final da turbina não fique abaixo de 0,9, admitindo que o vapor saia do reaquecimento também a 600 řC? **(0,5 ponto)**

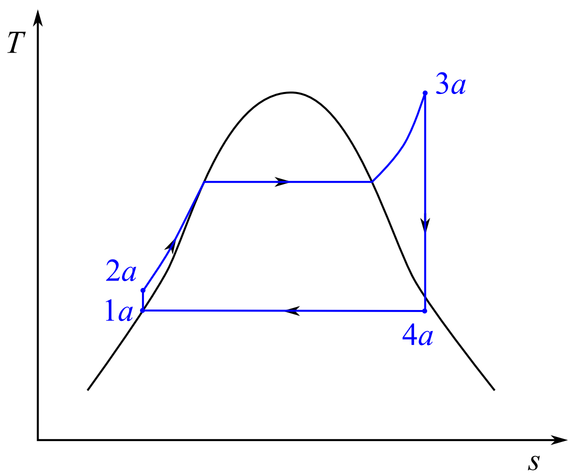
(c) Calcule as vazões mássicas dos ciclos com reaquecimento e de refrigeração para que a potência líquida produzida no ciclo combinado seja igual à potência líquida produzida no ciclo atual. **(2,5 pontos)**

(d) Obtenha o rendimento do ciclo combinado. A modificação vale a pena? **(0,5 ponto)**

Solução:

(a) Ciclo Rankine atual (a).





Estado $1a$: $p_{1a} = 10\,\text{kPa}$, $x_{1a} = 0.0$

tabelas: $h_{1a} = 191{,}81\,\text{kJ/kg}$, $v_{1a} = 0{,}001010\,\text{m}^3/\text{kg}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

Estado $2a$: $p_{2a} = 3000\,\text{kPa}$, $w_{ba} = h_{2a} - h_{1a} \approx v_{1a}(p_{2a} - p_{1a})$

$h_{2a} = 191{,}81 + 0{,}001010 \times (3000 - 10) = 194{,}83\,\text{kJ/kg}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

<u>Estado 3a</u>: $p_{3a} = 3000\,\text{kPa}$, $T_{3a} = 600\,°\text{C}$

tabelas: $h_{3a} = 3682{,}34\,\text{kJ/kg}$, $s_{3a} = 7{,}5084\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ **0,2 pt**

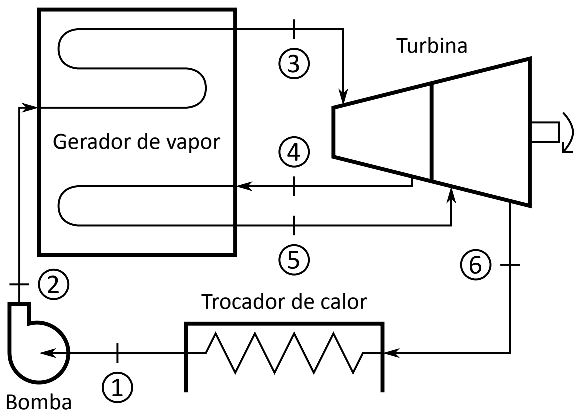
<u>Estado 4a</u>: $p_{4a} = 10\,\text{kPa}$, $s_{4a} = s_{3a} = 7{,}5084\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \rightarrow$ mudança de fase:

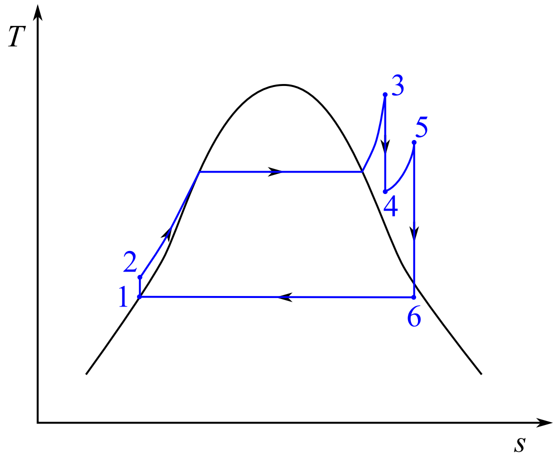
$x_{4a} = \dfrac{s_{4a} - s_l}{s_{lv}} = 0{,}914$, $h_4 = h_l + x_{4a} h_{lv} = 2379{,}90\,\text{kJ/kg}$ **0,2 pt**

Rendimento: $\eta_a = \dfrac{w_{ta} - w_{ba}}{q_{Ha}} = \dfrac{(h_{3a} - h_{4a}) - (h_{2a} - h_{1a})}{h_{3a} - h_{2a}} = 0{,}373$ **0,3 pt**

Vazão mássica: $\dot{m}_a = \dfrac{\dot{W}_{\text{liq}}}{(h_{3a} - h_{4a}) - (h_{2a} - h_{1a})} = 3{,}848\,\text{kg/s}$ **0,4 pt**

(b) Ciclo com reaquecimento. Buscamos o valor de $p_4 = p_5$.





<u>Estado 6</u>: $p_6 = 3\,\text{kPa}$, $x_6 = 0{,}9$

$h_6 = h_l + x_6 h_{lv} = 2301{,}05\,\text{kJ/kg}$, $s_6 = s_l + x_6 s_{lv} = 7{,}7553\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ **0,2 pt**

<u>Estado 5</u>: $T_5 = 600\,°\text{C}$, $s_5 = s_6 = 7{,}7553\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

Interpolando na tabela: $h_5 = 3691{,}77\,\text{kJ/kg}$, $p_5 = 1789\,\text{kPa}$ **0,3 pt**
(também será aceito 1800 kPa)

(c) É preciso determinar os estados dos ciclos de reaquecimento e refrigeração para achar as vazões mássicas nesses ciclos ($\dot{m}_p$ é a vazão no ciclo de potência e $\dot{m}_r$ a vazão no ciclo de refrigeração).

Continuando a determinar os estados do ciclo de reaquecimento.

<u>Estado 1</u>: $p_1 = 3\,\text{kPa}$, $x_1 = 0{,}0$

tabelas: $h_1 = 101{,}03\,\text{kJ/kg}$, $v_1 = 0{,}001003\,\text{m}^3\text{/kg}$ **0,2 pt**

<u>Estado 2</u>: $p_2 = 3000\,\text{kPa}$, $w_b = h_2 - h_1 \approx v_1(p_2 - p_1)$

$h_2 = 101{,}03 + 0{,}001003 \times (3000 - 3) = 104{,}04\,\text{kJ/kg}$ **0,2 pt**

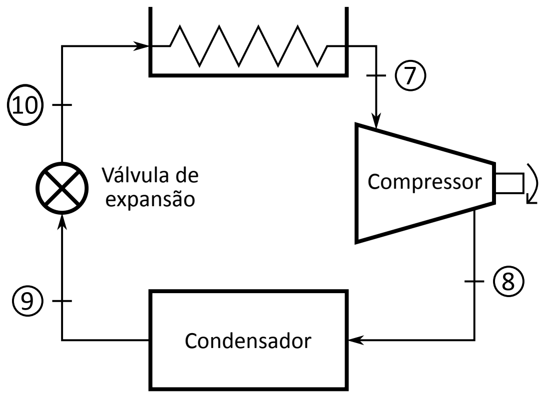
<u>Estado 3</u>: Igual ao estado $3a$

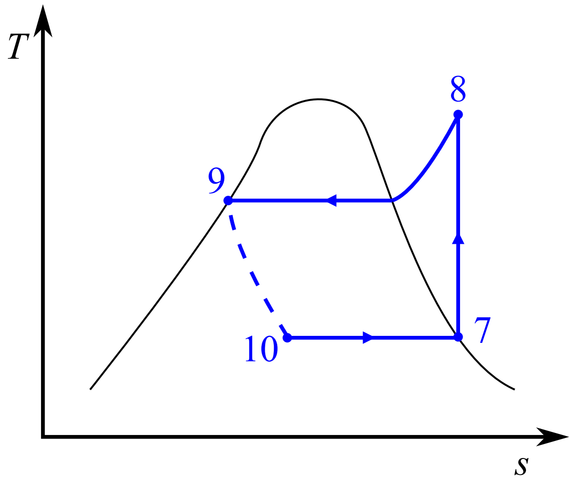
tabelas: $h_3 = 3682{,}34\,\text{kJ/kg}$, $s_3 = 7{,}5084\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ **0,2 pt**

<u>Estado 4</u>: $s_4 = s_3 = 7{,}5084\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, $p_4 = p_5 = 1789\,\text{kPa}$

Interpolando na tabela: $h_4 = 3488{,}75\,\text{kJ/kg}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

Ciclo de refrigeração.





Estado 7: $T_7 = 0\,°\text{C}$, $x_7 = 1{,}0$

tabelas: $h_7 = 398{,}36\,\text{kJ/kg}$, $s_7 = 1{,}7262\,\text{kJ/kg}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

Estado 8: $p_8 = 1200\,\text{kPa}$, $s_8 = s_7 = 1{,}7262\,\text{kJ/kg}$

Interpolando na tabela: $h_8 = 427{,}66\,\text{kJ/kg}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

Estado 9: $p_9 = 1200\,\text{kPa}$, $x_9 = 0{,}0$

Interpolando na tabela: $h_9 = 266{,}06\,\text{kJ/kg}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

Estado 10: $T_{10} = 10\,°\text{C}$, $h_{10} = h_9 = 266{,}06\,\text{kJ/kg}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

1ª Lei aplicada ao trocador de calor: $\dot{m}_p(h_6 - h_1) = \dot{m}_r(h_7 - h_{10})$

$$\dot{m}_r = \frac{(h_6 - h_1)}{(h_7 - h_{10})}\dot{m}_p = 16{,}63\dot{m}_p \quad \boxed{\textbf{0,3 pt}}$$

Potência líquida desenvolvida no ciclo combinado: $\dot{W}_{\text{liq}} = \dot{W}_t - \dot{W}_b - \dot{W}_c$

$$\dot{W}_{\text{liq}} = \dot{m}_p[(h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)] - \dot{m}_p(h_2 - h_1) - \dot{m}_r(h_8 - h_7)$$

$$\dot{W}_{\text{liq}} = \dot{m}_p[(h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)] - \dot{m}_p(h_2 - h_1) - 16{,}63\dot{m}_p(h_8 - h_7)$$

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{W}_{\text{liq}}}{(h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) - (h_2 - h_1) - 16{,}63(h_8 - h_7)} = 4{,}57\,\text{kg/s} \quad \boxed{\textbf{0,5 pt}}$$

$$\dot{m}_r = 16{,}63\dot{m}_p = 75{,}99\,\text{kg/s} \quad \boxed{\textbf{0,1 pt}}$$

(c) Rendimento do ciclo combinado: $\eta_c = \dfrac{\dot{W}_{\text{liq}}}{\dot{Q}_H} = \dfrac{\dot{W}_{\text{liq}}}{\dot{m}_p[(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)]} = 0{,}289$

O rendimento do ciclo combinado é menor do que o do original, portanto a modificação não vale a pena. $\boxed{\textbf{0,5 pt}}$