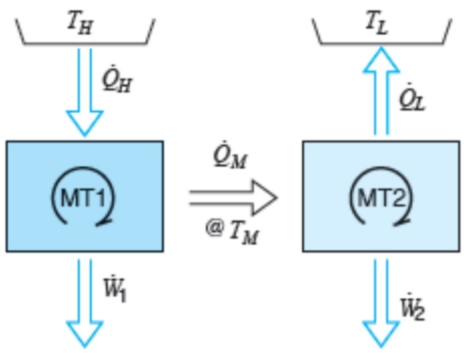
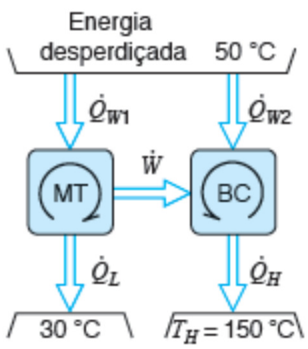
<u>Lista de exercícios resolvidos 05 – 2ª Lei da Termodinâmica</u>

1- Considere a combinação de duas centrais de potência, como mostrado na figura. A turbina MT1 opera no nível mais alto de temperatura e a turbina MT2 no nível mais baixo de temperatura. Admita que ambos os ciclos tenham eficiência térmica de 32%. Admitindo que Q_L do ciclo da turbina MT1 seja igual ao Q_H do ciclo da turbina MT2, qual é e eficiência térmica global do ciclo combinado?



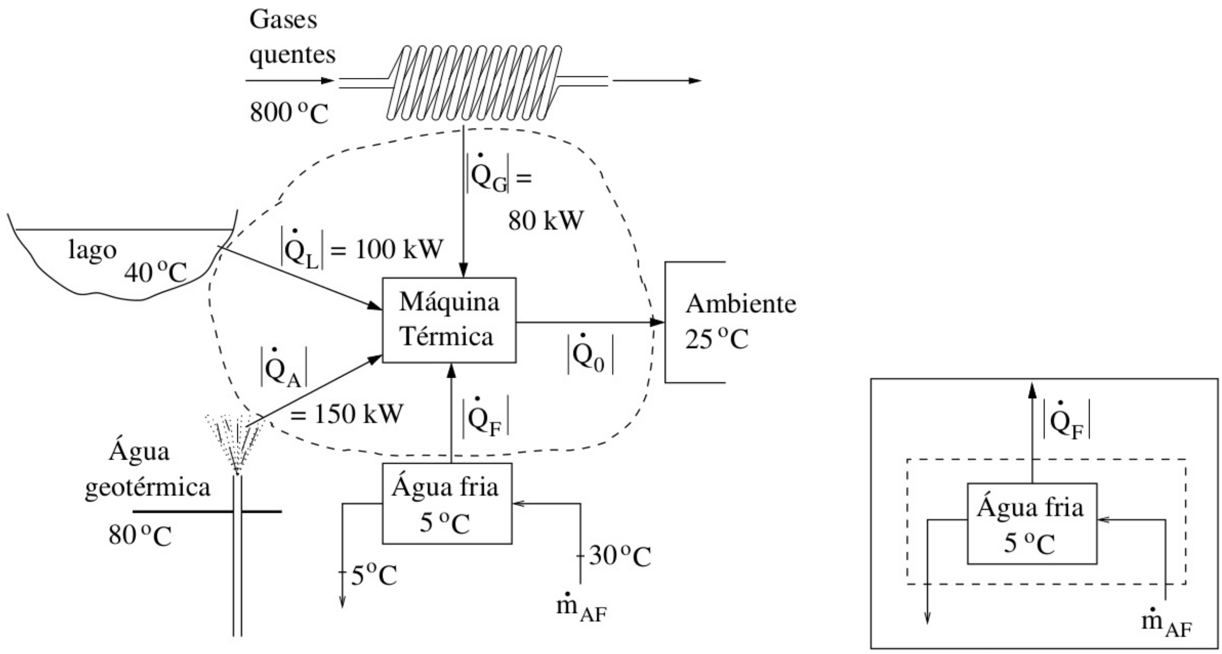
2- A fim de aproveitar energia que é atualmente desperdiçada numa planta industrial, propõe-se a instalação de uma combinação de motor térmico acionando uma bomba de calor, conforme esquematizado na figura. O motor térmico absorveria o calor de um reservatório térmico a 50 °C e rejeitaria calor em um reservatório que apresenta temperatura igual a 30 °C. Já a bomba de calor absorveria calor do mesmo reservatório térmico a 50 °C e forneceria calor a um processo que apresenta temperatura igual a 150 °C. Sabendo que potência disponível, atualmente desperdiçada no reservatório a 50 °C, é 5 MW, determine qual é o máximo valor possível para a taxa de transferência de calor para o processo que está a 150 °C.



3- Tendo em vista a atual preocupação com a questão ambiental, um industrial resolveu aumentar a eficiência energética de sua indústria. Ele precisa resfriar água de 30°C a 5°C, retirando dela uma taxa de calor, $|\dot{Q}_F|$. Para isso instalou uma máquina térmica que aproveita calor de água geotérmica e de um lago aquecido. O resto da energia necessária é obtido retirando calor de gases quentes a 800°C. A máquina tem que rejeitar uma taxa de calor $|\dot{Q}_0|$ para o ambiente. Considerando operação em regime permanente, pede-se:

(a) O máximo valor de $|\dot{Q}_F|$ produzido e também o valor de $|\dot{Q}_0|$, ambos em kW;

(b) Utilizando o volume de controle apresentado no destaque, determine a máxima vazão de água fria produzida.



VC em destaque

4- Considere um motor térmico de Carnot que opera no espaço. A única maneira desse motor rejeitar calor é por radiação térmica. Assim, a taxa de transferência de calor no radiador desse motor é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do radiador e à área da superfície de radiação do dispositivo, ou seja, $\dot{Q}_{rad} = K.A.T^4$. Encontre a razão entre temperaturas T_L/T_H que minimiza a área do radiador para uma dada potência do motor e valor de T_H.

PME3398 – Fundamentos de Termodinâmica e Transferência de Calor
Professores Bruno Carmo e Antonio Pacífico

Soluções da Lista de Exercícios 05

1) O rendimento do ciclo combinado é dado por $\eta_c = \dfrac{\dot{W}_1 + \dot{W}_2}{\dot{Q}_H}$. Pela 1ª Lei, $\dot{Q}_H = \dot{W}_1 + \dot{W}_2 + \dot{Q}_L$. Então,

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}.$$

Sendo η_1 o rendimento do ciclo da turbina MT1, tem-se que

$$\eta_1 = 1 - \frac{\dot{Q}_M}{\dot{Q}_H} \quad \Rightarrow \quad \dot{Q}_M = (1 - \eta_1)\dot{Q}_H.$$

Sendo η_2 o rendimento do ciclo da turbina MT2, temos

$$\eta_2 = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_M} \quad \Rightarrow \quad \dot{Q}_L = (1 - \eta_2)\dot{Q}_M = (1 - \eta_2)(1 - \eta_1)\dot{Q}_H.$$

Substituindo na expressão do rendimento do ciclo combinado e utilizando os valores numéricos de η_1 e η_2 fornecidos,

$$\eta_c = 1 - \frac{(1 - \eta_2)(1 - \eta_1)\cancel{\dot{Q}_H}}{\cancel{\dot{Q}_H}} = 1 - (1 - 0{,}32) \times (1 - 0{,}32) = 0{,}5376 = 53{,}76\%$$

2) O máximo valor possível para $\dot{Q}_H$ é aquele obtido quando tanto o motor térmico quanto a bomba de calor operam como ciclos reversíveis (ciclos de Carnot). Neste caso, e considerando os reservatórios térmicos dados, o rendimento do motor térmico, η, e o coeficiente de desempenho da bomba de calor, β, são, respectivamente,

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_E} = 1 - \frac{303{,}15}{323{,}15} = 0{,}0619 \qquad \text{e} \qquad \beta = \frac{T_H}{T_H - T_E} = \frac{423{,}15}{423{,}15 - 323{,}15} = 4{,}231.$$

Da definição de rendimento de motor térmico,

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{W1}} \quad \Rightarrow \quad \dot{W} = \eta \dot{Q}_{W1} = 0{,}0619 \dot{Q}_{W1}.$$

E da definição de coeficiente de desempenho para bomba de calor,

$$\beta = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_{W2} + \dot{W}}{\dot{W}} = 1 + \frac{\dot{Q}_{W2}}{\dot{W}} \quad \Rightarrow \quad \dot{W} = \frac{\dot{Q}_{W2}}{\beta - 1} = \frac{\dot{Q}_{W2}}{3{,}231}.$$

Igualando as duas expressões obtidas para $\dot{W}$, e usando a informação de que a energia total disponível do reservatório a 50 °C, obtemos o sistema de equações

$$\begin{cases} 0{,}0619\dot{Q}_{W1} = \dfrac{\dot{Q}_{W2}}{3{,}231} \quad \Rightarrow \quad \dot{Q}_{W1} = \dfrac{\dot{Q}_{W2}}{0{,}200} \\ \dot{Q}_{W1} + \dot{Q}_{W2} = 5\,\text{MW} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad 1{,}200\dot{Q}_{W2} = 1\,\text{MW}$$

$$\dot{Q}_{W2} = 0{,}833\,\text{MW}$$

Usando novamente a expressão de coeficiente de desempenho da bomba de calor,

$$\beta = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_{W2}} \quad \Rightarrow \quad \dot{Q}_H = \frac{\beta \dot{Q}_{W2}}{\beta - 1} = \frac{4{,}231 \times 0{,}833}{4{,}231 - 1} = 1{,}091\,\text{MW}$$

3) Deve-se observar que a fronteira do sistema a ser considerado já está marcada com linha pontilhada na figura do enunciado.

a. Para este sistema, a 1^a Lei da Termodinâmica permite escrever:

$$|\dot{Q}_L| + |\dot{Q}_A| + |\dot{Q}_F| + |\dot{Q}_G| - |\dot{Q}_0| = |\dot{W}_{liq}| = 0$$

$$100 + 150 + |\dot{Q}_F| + 80 - |\dot{Q}_0| = 0 \Rightarrow |\dot{Q}_F| - |\dot{Q}_0| = -330 \text{ (I)}$$

A relação entre calores e temperaturas nas quais se dá a troca de calor, para um ciclo reversível ($Q_H/Q_L = T_H/T_L$), sugere que para uma máquina térmica (reversível) operando segundo um ciclo, que troque calor com mais de duas fontes também possa ser escrita na forma:

$$\sum_{i=1}^{M} \frac{Q_{H,i}}{T_{H,i}} = \sum_{j=1}^{N} \frac{Q_{L,i}}{T_{L,i}}$$

Aplicando ao problema específico deste exercício:

$$\frac{|\dot{Q}_L|}{T_{lago}} + \frac{|\dot{Q}_A|}{T_{agua,geo}} + \frac{|\dot{Q}_F|}{T_{agua,fria}} + \frac{|\dot{Q}_G|}{T_{gases}} = \frac{|\dot{Q}_0|}{T_{amb}} \text{ (II)}$$

Multimplicando a Eq. (II) por T_{amb}, resulta:

$$|\dot{Q}_L| \cdot \frac{T_{amb}}{T_{lago}} + |\dot{Q}_A| \cdot \frac{T_{amb}}{T_{agua,geo}} + |\dot{Q}_F| \cdot \frac{T_{amb}}{T_{agua,fria}} + |\dot{Q}_G| \cdot \frac{T_{amb}}{T_{gases}} = |\dot{Q}_0|$$

$$100 \cdot \frac{(25+273)}{(40+273)} + 150 \cdot \frac{(25+273)}{(80+273)} + |\dot{Q}_F| \cdot \frac{(25+273)}{(5+273)} + 80 \cdot \frac{(25+273)}{(800+273)} = |\dot{Q}_0|$$

$$1{,}0719.|\dot{Q}_F| - |\dot{Q}_0| = -244{,}0546 \text{ (III)}$$

Subtraindo a Eq. (I) da Eq. (III):

$$0{,}0719.|\dot{Q}_F| = 85{,}9492 \Rightarrow |\dot{Q}_F| = 1195{,}3463\,\mathrm{kW}$$

Como $|\dot{Q}_F|$ foi calculado sob a hipótese de um ciclo reversível, segue-se que:

$$|\dot{Q}_{F,max}| \approx 1195{,}35\,\mathrm{kW}$$

Substituindo este resultado nas Eqs. (I) ou (III):

$$|\dot{Q}_0| = 1525{,}3463\,\mathrm{kW} \approx 1525{,}35\,\mathrm{kW}$$

b. Admitindo que as entalpias específicas da água fria na entrada e na saída possam ser aproximadas pelos valores das entalpias específicas do líquido saturado nas temperaturas de entrada e saída: $h_e = 125{,}77\,\mathrm{kJ/kg}$; e $h_s = 20{,}98\,\mathrm{kJ/kg}$.

Aplicando a 1^a da Termidinâmica para o volume de controle sugerido:

$$\dot{Q}_F = \dot{m}_{a,F}.(h_s - h_e) \Rightarrow m_{a,F} = \frac{\dot{Q}_F}{h_s - h_e}$$

$$m_{a,F} = \frac{-1195{,}3463}{20{,}98 - 125{,}77} = 11{,}4071\,\mathrm{kg/s} \approx 11{,}4\,\mathrm{kg/s}$$

4) Para um motor de Carnot, vale $\dfrac{T_L}{T_H} = \dfrac{Q_L}{Q_H}$.

Como neste caso $Q_L = KAT_L^4$ e, pela 1ª Lei, $Q_H = W + Q_L$, temos: $\dfrac{T_L}{T_H} = \dfrac{KAT_L^4}{W + KAT_L^4}$.

Rearranjando: $W\dfrac{T_L}{T_H} + KA\dfrac{T_L^5}{T_H} = KAT_L^4$.

Dividindo todos os termos por T_H^4: $W\dfrac{T_L}{T_H^5} + KA\left[\left(\dfrac{T_L}{T_H}\right)^5 - \left(\dfrac{T_L}{T_H}\right)^4\right] = 0$

Definindo $x = T_L/T_H$ e substituindo na equação: $\dfrac{W}{T_H^4}x + KA(x^5 - x^4) = 0$.

Isolando a área A: $A = -\dfrac{W}{KT_H^4}\dfrac{x}{(x^5 - x^4)}$.

Para achar o valor de x que minimiza A, derivamos a expressão de A em relação à x e igualamos a 0:

$$\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}x} = -\frac{W}{KT_H^4}\left[\frac{(x^5 - x^4) - x(5x^4 - 4x^3)}{(x^5 - x^4)^2} =\right] = -\frac{W}{KT_H^4}\left[\frac{-4x^5 + 3x^4}{(x^5 - x^4)^2} =\right] = 0$$

Dessa forma, $-4x^5 + 3x^4 = 0 \quad \Rightarrow \quad x = \dfrac{T_L}{T_H} = \dfrac{3}{4}$