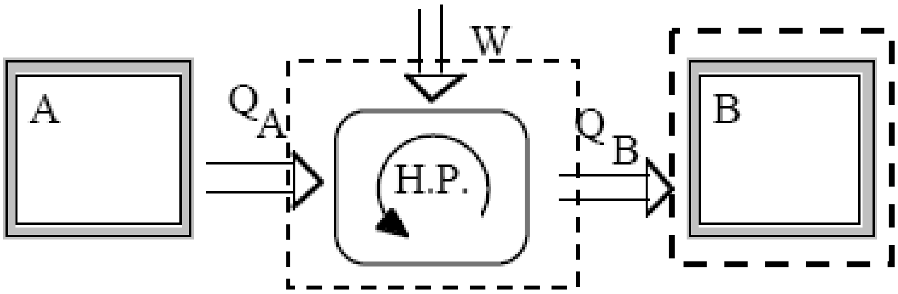
A figura mostra dois tanques conectados termicamente por uma bomba de calar reversível. Cada tanque contém 10 kg de nitrogênio e, inicialmente, ambos estão com temperatura e pressão uniformes de 1000 K e 500 kPa. A bomba de calor então inicia a operação que só é interrompida quando um dos tanques atinge a temperatura de 1500 K. Admitindo que ambos os tanques sejam isolados do meio (adiabáticos) e que o calor específico do nitrogênio seja constante, determine as pressões e temperaturas finais do tanque e o trabalho consumido na bomba de calor.



Solução:

Como a temperatura do nitrogênio é elevada e a pressão é moderada, pode-se admitir que o nitrogênio se comporte como gás perfeito. Passando um volume de controle pelo tanque B, conforme mostra a figura, pode-se escrever a primeira lei da termodinâmica como:

$Q_B = \Delta U$

uma vez que não há variação volumétrica. Desta forma, o calor fornecido para o tanque B pode ser determinado por:

$Q_B = m\ c_v\ \Delta T = 10.\ 0{,}7448.(1500 - 1000) = 3724$ J

A pressão no tanque B pode ser determinada a partir da equação de estado para os gases perfeitos como:

$$\left(P_f\right)_B = \left(\frac{T_f}{T_i}\right)_B \left(P_i\right)_B = \frac{1500}{1000} 500 = 750 \text{ kPa}$$

Como a bomba é reversível, pode-se assumir que o processo é reversível também. Desta forma, $\Delta S_{sistema} = 0$ ou:

$m_A\ (s_f - s_i)_A + m_B\ (s_f - s_i)_B = 0.$

A variação de entropia de cada tanque pode ser calculada como:

$$s_f - s_i = c_v \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + \underbrace{R \ln\left(\frac{v_f}{v_i}\right)}_{=0}$$

Desta forma, a temperatura final do tanque A pode ser calculada como:

$$\left(\frac{T_f}{T_i}\right)_A = \left(\frac{T_f}{T_i}\right)_B \therefore \left(T_f\right)_A = \left(\frac{T_f}{T_i}\right)_A \left(T_i\right)_B = \frac{1000}{1500}.1000 = 666,7 \text{ K}$$

A pressão no tanque A pode ser calculado então pela equação de estado para gases perfeitos como:

$$\left(P_f\right)_A = \left(\frac{T_f}{T_i}\right)_A \left(P_i\right)_A = \left(\frac{666,7}{1000}\right) 500 = 333,3 \text{ kPa}$$

Para achar o trabalho necessário a bomba de calor utiliza-se a primeira lei da termodinâmica aplicada a um volume de controle envolvendo a bomba de calor, conforme mostra a figura. Desta forma o trabalho pode ser calculado como:

$W = Q_A – Q_B$

O calor perdido pelo reservatório A pode ser determinado de forma similar ao da bomba B, ou seja:

$Q_A = m.c_v.\Delta T = 10.0,7448.(666,7 – 1000) = - 2482$ kJ

Desta forma, o trabalho necessário a bomba será:

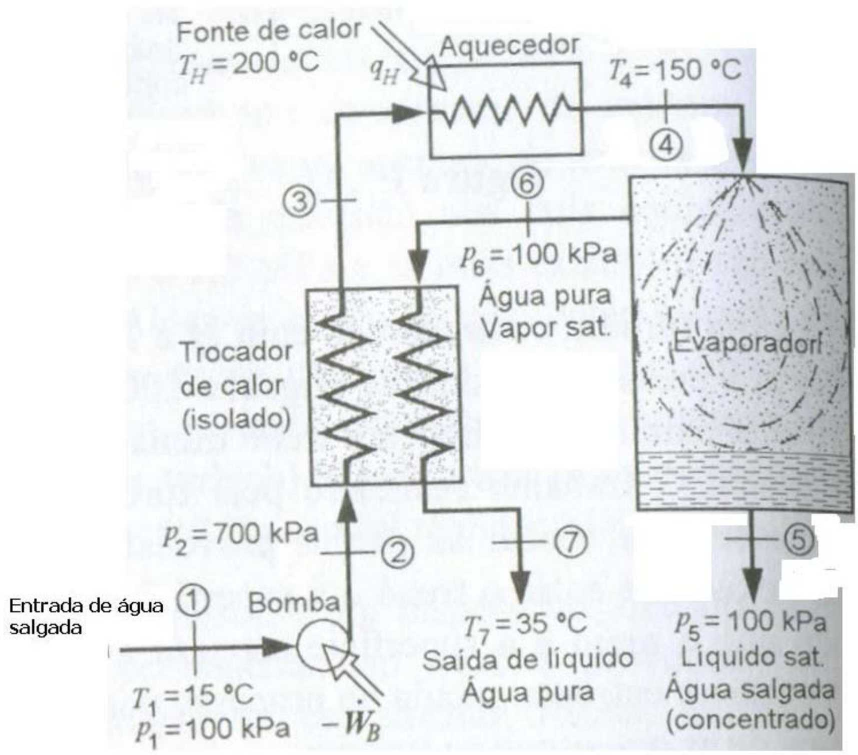
$W = Q_A – Q_B = 2482 – 3724 = - 1242$ kJ.

A figura mostra o esquema de uma instalação utilizada para a produção de água doce a partir da água salgada. As condições de operação da instalação também são mostradas na figura. Admitindo que as propriedades da água salgada sejam idênticas as da água doce e que a bomba é adiabática reversível, determine:

a) a relação entre o fluxo de massa em 7 e 1 (fração de água salgada purificada no processo);

b) A potência de bombeamento (w_B) e o calor trocado no aquecedor (q_H);

c) Calcule a entropia gerada na instalação.



Solução:

a) Para conhecer a relação entre os fluxos de massa em 7 e 1 basta aplicar a primeira lei da termodinâmica no evaporador e considerar que não realização de trabalho, não há variação de energia cinética e potencial e o mesmo é adiabático. Desta forma pode-se escrever que:

$$\dot{m}_7 h_6 + \left(\dot{m}_1 - \dot{m}_7\right) h_5 = \dot{m}_1 h_4$$

uma vez que pela conservação de massa $\dot{m}_4 = \dot{m}_1$ e $\dot{m}_7 = \dot{m}_6$. Da tabela termodinâmica para água pode-se obter as entalpias no ponto 5 (liquido saturado a 100 kPa), 6 (vapor saturado a 100 kPa) e 4 (liquido comprimido a 700 kPa e 150ºC) o estado esta determinado. Desta forma, pode-se escrever obter a relação entre os fluxos de massa como:

$$\dot{m}_1 / \dot{m}_7 = \frac{h_6 - h_5}{h_4 - h_5} = \frac{2675 - 417,45}{632,3 - 417,45} = 10,50$$

b) Para se calcular a potência na bomba aplica-se um volume de controle na bomba e aplica-se a primeira lei da termodinâmica e despreza-se o calor trocado e a variação de energia cinética e potencial entre a entrada e saída da bomba. Dessa forma pode-se escrever que a potência consumida na bomba por unidade de fluxo de massa é:

$$\dot{w} = h_1 - h_2$$

As propriedades no ponto 1 estão determinadas, pois o estado é conhecido, contudo o ponto 2 não por só se conhecer a pressão. Contudo se derivarmos a expressão acima obtemos que:

$$d\dot{w} = dh$$

Da definição de entalpia pode-se escrever que:

$$d\dot{w} = d\left(u + p.v\right) = du + d\left(p.v\right) = du + vdp + pdv$$

Como a bomba só trabalha com liquido e considerando o fluido como sendo incompressível ($dv = 0$) e o processo isotérmico ($du = 0$), a equação anterior pode ser reescrita como:

$$d\dot{w} = vdp$$

Integrando entre a entrada e saída da bomba pode-se escrever que a potencia de bombeamento é:

$$\dot{w} = v\Delta p = 0,001001.\left(100 - 700\right).10^3 = -0,6 \text{ kJ / kg}$$

A entalpia na saída da bomba pode então ser determinada como:

$$h_2 = h_1 - \dot{w} = 62,99 + 0,6 = 63,6 \text{ kJ / kg}$$

Para achar o calor trocado no trocado é necessário se determinar o estado 3 e para isso aplica-se a primeira lei da termodinâmica no trocador de calor isolado (adiabático) e considerando que não haja variação de energia cinética e potencial entre suas entradas e saídas. Da primeira lei da termodinâmica pode-se escrever que:

$$\dot{m}_1 \left(h_2 - h_3\right) + \dot{m}_7 \left(h_6 - h_7\right) = 0 \therefore h_3 = h_2 + \dot{m}_7 / \dot{m}_1 \left(h_6 - h_7\right)$$

$$h_3 = 63,6 + 1/10,50\left(2675 - 146,7\right) = 304,4 \text{ kJ/kg}$$

O calor na caldeira pode então ser determinado pela primeira lei da termodinâmica como:

$q_H = h_4 - h_3 = 632,4 - 304,4 = 328$ kJ/kg

c) a entropia gerada na instalação pode ser calculada pela relação:

$$S_{ger} = -\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T} - \sum_e \dot{m}_e s_e + \sum_s \dot{m}_s s_s = -\frac{\dot{Q}_H}{T_H} - \dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_7 s_7$$

$$S_{ger} = -\frac{\dot{Q}_H}{T_H} - \dot{m}_1 s_1 + \left(\dot{m}_1 - \dot{m}_7\right) s_5 + \dot{m}_7 s_7 = -\frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_1 T_H} - s_1 + \left(1 - \dot{m}_7 / \dot{m}_1\right) s_5 + \dot{m}_7 / \dot{m}_1 \, s_7$$

$$S_{ger} = -\frac{q_H}{T_H} - s_1 + \left(1 - \dot{m}_7 / \dot{m}_1\right) s_5 + \dot{m}_7 / \dot{m}_1 \, s_7$$

$$S_{ger} = -\frac{328}{200 + 273{,}15} - 0{,}2244 + \left(1 - 1/10{,}5\right) 1{,}303 + 1/10{,}5 . 0{,}5052$$

$$S_{ger} = 0{,}3093 \text{ kJ/Kg de } \dot{m}_1$$