

5.3) Pretende-se encher um tanque de 2,0 m³ com HFC-134a a partir de um reservatório cujas propriedades não variam durante o enchimento (1,0 MPa e 130°C). Inicialmente, o tanque contém vapor saturado de HFC-134a a 25°C. Qual deve ser o calor trocado para que a massa final dentro do tanque seja de 100kg de HFC-134a?

Resolução

Partindo do balanço de massa para sistemas abertos:

$$\frac{d(m_{VC} \bar{U}_{VC})}{dt} = \left(\bar{H}_E + \frac{1}{2} u_E + z_E g \right) \dot{m}_E - \left(\bar{H}_S + \frac{1}{2} u_S + z_S g \right) \dot{m}_S + \dot{Q} + \dot{W}$$

Desprezando as diferenças de energia cinética e potencial, o balanço se reduz a:

$$\frac{d(m_{VC} \bar{U}_{VC})}{dt} = \left(\bar{H}_E + \cancel{\frac{1}{2} u_E} + \cancel{z_E g} \right) \dot{m}_E - \left(\bar{H}_S + \cancel{\frac{1}{2} u_S} + \cancel{z_S g} \right) \dot{m}_S + \dot{Q} + \dot{W}$$

$$\frac{d(m_{VC} \bar{U}_{VC})}{dt} = \bar{H}_E \dot{m}_E - \bar{H}_S \dot{m}_S + \dot{Q} + \dot{W}$$

Como o volume de controle é o volume do tanque que será preenchido, não há saídas, nem trabalho. O que leva a:

$$\frac{d(m_{VC} \bar{U}_{VC})}{dt} = \bar{H}_E \dot{m}_E - \cancel{\bar{H}_S \dot{m}_S} + \dot{Q} + \cancel{\dot{W}}$$

$$\frac{d(m_{VC} \bar{U}_{VC})}{dt} = \bar{H}_E \dot{m}_E + \dot{Q}$$

Assim, propõe-se um balanço de massa sobre o volume de controle (o tanque que será enchido):

$$\{\text{Acúmulo de massa}\} = \{\text{Entrada de massa}\} - \{\text{Saída de massa}\} + \{\text{Geração de massa}\}$$

Não há, no tanque, nem saídas, nem geração de massa. O termo de acúmulo e de entrada de massa transformam o balanço em:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \dot{m}_E$$

Substituindo esta expressão no balanço de energia, vem que:

$$\frac{d(m_{VC} \bar{U}_{VC})}{dt} = \bar{H}_E \frac{dm_{VC}}{dt} + \dot{Q}$$

Integrando esta equação no tempo, é obtida a seguinte relação (lembrando que a entalpia mássica de entrada não varia com o tempo):

$$\Delta(m_{VC} \bar{U}_{VC}) = \bar{H}_E \Delta m_{VC} + Q$$

No diagrama PH do fluido HFC-134a, a energia interna não está representada. Desta forma, é conveniente expressá-la em termos de entalpia, pressão e volume. Dado que:

$$U = H - PV$$

Assim:

$$\Delta \left[m_{VC} \left(\bar{H}_{VC} - P_{VC} \bar{V}_{VC} \right) \right] = \bar{H}_E \Delta m_{VC} + Q$$

Porém, como o volume do tanque é constante, a seguinte manipulação torna-se conveniente:

$$V_{VC} = m_{VC} \bar{V}_{VC}$$

Isto leva a:

$$\Delta \left[m_{VC} \left(\bar{H}_{VC} \right) - P_{VC} V_{VC} \right] = \bar{H}_E \Delta m_{VC} + Q$$

A expressão para calor é, então, encontrada, como segue:

$$Q = \left(m_{VC} \bar{H}_{VC} \right)_{final} - \left(m_{VC} \bar{H}_{VC} \right)_{inicial} - V_{VC} \left[\left(P_{VC} \right)_{final} - \left(P_{VC} \right)_{inicial} \right] - \bar{H}_E \left[\left(m_{VC} \right)_{final} - \left(m_{VC} \right)_{inicial} \right]$$

Para calculá-lo, é necessário estabelecer as propriedades nos três estados do problema: Estado Inicial, Estado Final e Entrada do Tanque. As informações dadas pelo enunciado estão enumeradas na tabela a seguir:

Propriedades	Estado Inicial	Estado Final	Entrada
$T (^{\circ}\text{C})$	25	?	130
P (MPa)	?	?	1,0
\bar{H} (kJ/kg)	?	?	?
\bar{V} (m ³ /kg)	?	?	?
M (kg)	?	125	-
Estado Físico	Vapor Saturado	?	?

Estado Inicial:

A pressão, a entalpia e o volume mássico do estado inicial podem ser obtidos no diagrama do HFC-134a, já que a temperatura é conhecida e o estado físico de vapor saturado foi especificado no problema. Os valores destas propriedades são 0,7 MPa, 410 kJ/kg e 0,030 m³/kg, respectivamente.

Para o cálculo da massa inicial no tanque, é necessário utilizar o volume mássico e o volume do tanque. A massa é obtida a partir da expressão:

$$m_{inicial} = \frac{V_{VC}}{\bar{V}_{inicial}} = \frac{2}{0,030} = 66,7 \text{ kg}$$

Estado Final:

Para determinação das propriedades do estado final do sistema, é necessário fazer algumas considerações. No caso desta transferência, o fluido escoará para dentro do tanque enquanto a pressão do reservatório for maior do que a pressão no tanque. Logo, no estado final, a pressão do tanque será igual à pressão do reservatório: 1 MPa.

Outra propriedade do estado final pode ser obtida a partir da quantidade de massa que se deseja inserir no tanque. É sabido que no estado final haverá 100 kg de HFC-134a. Também é sabido que estes 100 kg ocuparão a totalidade do tanque: 2 m³. Assim, deduz-se que o volume mássico do tanque é de:

$$\bar{V}_{final} = \frac{V_{VC}}{m_{final}} = \frac{2}{100} = 0,02 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Assim, com as informações de volume mássico e pressão, é possível obter as propriedades restantes do estado final no diagrama PH. Convém notar que este estado corresponde a vapor saturado. Se uma quantidade um pouco maior de massa fosse requerida, o estado final seria um equilíbrio líquido-vapor, fazendo necessária a combinação de volumes mássicos de líquido e de vapor para a determinação do estado final do tanque.

Entrada:

A corrente de entrada é totalmente determinada a partir do diagrama PH e das informações do enunciado: 130°C e 1 MPa.

Propriedades	Estado Inicial	Estado Final	Entrada
$T (^{\circ}\text{C})$	25	-	130
P (MPa)	0,7	1,0	1,0
\bar{H} (kJ/kg)	410	420	515
\bar{V} (m ³ /kg)	0,030	0,020	-
M (kg)	66,667	125	-

Estado Físico	Vapor Saturado	Vapor Saturado	Vapor Superaquecido
Substituindo as informações no balanço: $Q = (100 \times 420) \times 1000 - (66,667 \times 410) \times 1000 - 2[1,0 - 0,7] \times 1000000$ $- 515 \times [100 - 66,667] \times 1000$ $Q = -3.099.965 \text{ J} = -3.099 \text{ kJ}$			