Termodinâmica

6) Primeira Lei da Termodinâmica para volume de controle

Introdução

Os princípios básicos que nos são importantes estão escritos para um sistema. Assim, temos as expressões a seguir para a conservação da massa e da energia:

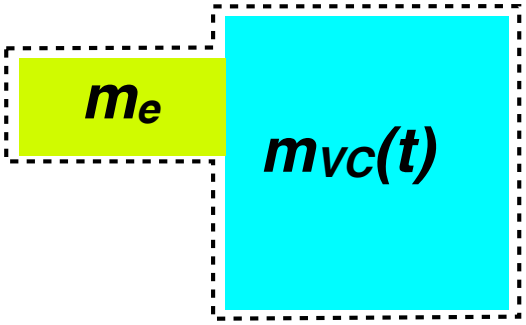
m = constante	$\frac{dm}{dt} = 0$
$E_2 - E_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$	$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$

Conservação da massa

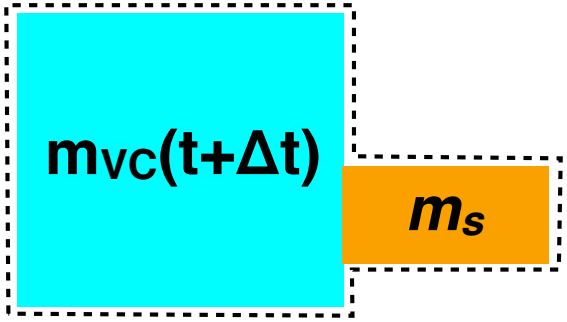
Vamos escrever expressões equivalentes para um volume de controle.

Podemos fazer isso considerando um sistema com fronteira móvel:

No instante t



No instante t+Δt



$$sistema \equiv m(t) = m_{vc}(t)+m_e$$

$$sistema \equiv m(t+\Delta t) = m_{vc}(t+\Delta t)+m_s$$

$$m_{vc}(t)+m_e = m_{vc}(t+\Delta t)+m_s$$

Conservação da massa

Agrupando os termos e dividindo por Δt:

$$\frac{m_{vc}(t+\Delta t) - m_{vc}(t) = m_e - m_s}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta t \to 0} \frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

vazão mássica (massa/tempo)

Generalizando para outras entradas e saídas:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s$$

Conservação da massa

Deduzimos:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_{e} \dot{m}_e - \sum_{s} \dot{m}_s$$

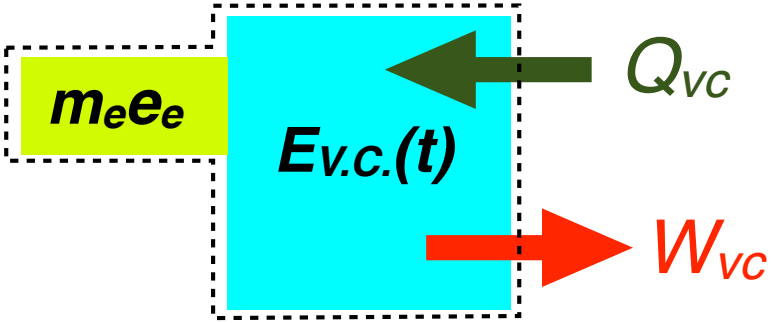
De fato fizemos a seguinte conta:

Taxa de variação da massa contida no VC no instante *t* = Taxa com que massa entra no VC − Taxa com que massa sai do VC

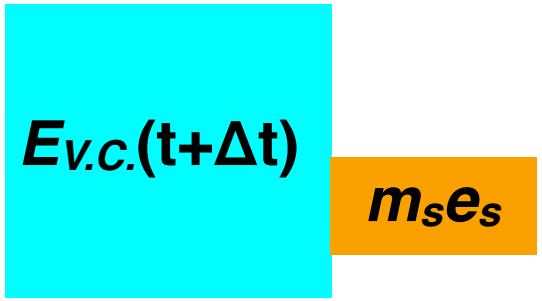
Conservação da energia

De forma análoga podemos deduzir a expressão da conservação da energia para um volume de controle:

No instante t



No instante t+Δt



$$E = E_{vc}(t) + m_e\left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e\right)$$

$$E = E_{vc}(t+\Delta t) + m_s\left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s\right)$$

$$E_{vc}(t) + m_e\left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e\right) + Q_{vc} - W = E_{vc}(t+\Delta t) + m_s\left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s\right)$$

Conservação da energia

Agrupando os termos:

$$E_{vc}(t+\Delta t)-E_{vc}(t)=m_e\left(u_e+\frac{V_e^2}{2}+gz_e\right)-m_s\left(u_s+\frac{V_s^2}{2}+gz_s\right)+Q_{vc}-W$$

Dividindo por Δt e aplicando o limite ($\Delta t \rightarrow 0$):

$$\frac{dE_{vc}}{dt}=\dot{m}_e\left(u_e+\frac{V_e^2}{2}+gz_e\right)-\dot{m}_s\left(u_s+\frac{V_s^2}{2}+gz_s\right)+\dot{Q}_{vc}-\dot{W}$$

A potência pode ser dividida em dois componentes:

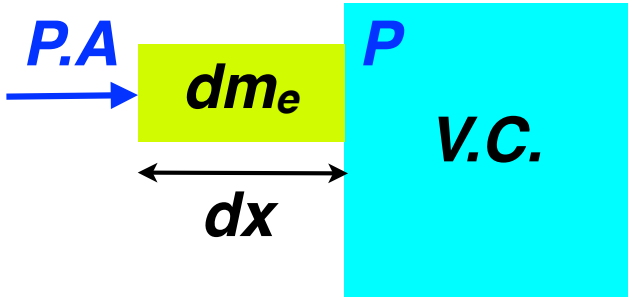
$$\dot{W}=\dot{W}_{vc}+\dot{W}_{fluxo}$$

O que é essa tal de potência de fluxo?

Trabalho de fluxo

Para entender o porque da divisão e a introdução do trabalho de fluxo, considere as figuras a seguir:

No instante t



O trabalho realizado pela vizinhança para que dm_e entre no sistema é: P.A.dx

Por sua vez a potência é dada: P.A.V

V é a velocidade média com dm_e entre no sistema.

Analogamente poderíamos repetir a análise para uma saída. Dessa forma, chegamos na expressão da potência de fluxo:

$$\dot{W} = p_s A_s V_s - p_e A_e V_e = \dot{m}_s p_s \upsilon_s - \dot{m}_e p_e \upsilon_e$$

Por que o sinal negativo associado à entrada?

Expressão para volume de controle

Substituindo o resultado anterior na expressão da 1ª Lei:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{m}_e\left(u_e + p_e v_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e\right) - \dot{m}_s\left(u_s + p_s v_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s\right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

Lembrando da definição de entalpia e generalizando para várias entradas e saídas:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e\left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e\right) - \sum_s \dot{m}_s\left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s\right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

Resumo

Princípios de conservação para volume de controle:

Conservação da massa

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s$$

Conservação da energia

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

Caso particular

Regime permanente:

★O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;

★O estado da massa em cada ponto do VC não varia com o tempo;

★O fluxo e o estado da massa em cada área discreta de escoamento na superfície de controle não variam com o tempo;

★As taxas nas quais o calor e o trabalho cruzam a superfície de controle permanecem constantes.

Caso particular

Regime permanente:

★O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;

As velocidades do fluido nas entradas e saídas são velocidades relativas ao VC, portanto, nesse caso, absolutas

★O estado da massa em cada ponto do VC não varia com o tempo;

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = 0 \qquad \frac{dE_{vc}}{dt} = 0$$

Regime permanente

Resumos das equações com uma entrada e uma saída:

$$\cancel{\frac{dm_{vc}}{dt}} = \cancel{\sum_e} \dot{m}_e - \cancel{\sum_s} \dot{m}_s \qquad \Rightarrow \dot{m} = \dot{m}_e = \dot{m}_s$$

$$\cancel{\frac{dE_{vc}}{dt}} = \cancel{\sum_e} \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \cancel{\sum_s} \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

Combinando com a conservação da massa

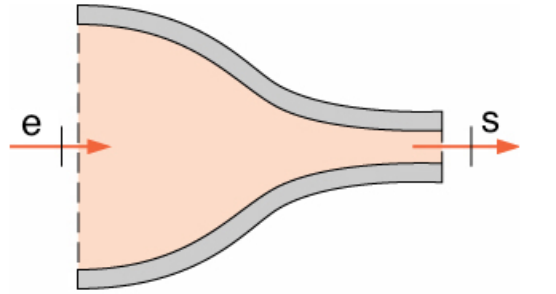
$$\dot{m} \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{m} \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} = 0$$

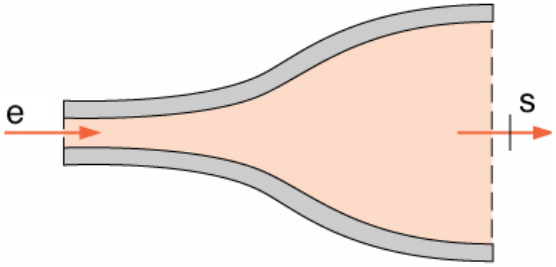
Dividindo pela vazão mássica

$$h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + q_{vc} - w_{vc} = h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s$$

Exemplos de aplicação

Bocal / Difusor

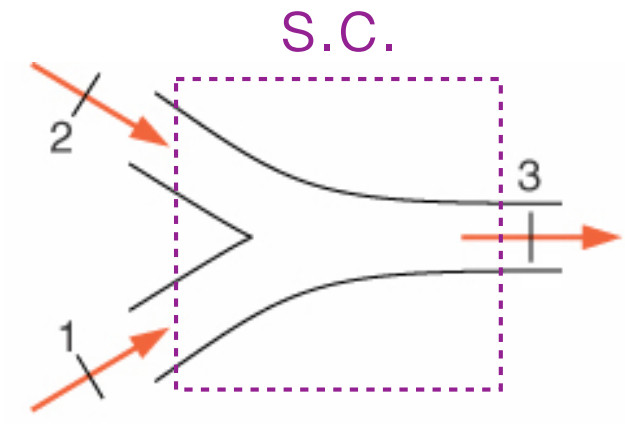




$$h_e + \frac{V_e^2}{2} + \cancel{gz_e} + \cancel{q_{vc}} - \cancel{w_{vc}} = h_s + \frac{V_s^2}{2} + \cancel{gz_s}$$

$$h_e + \frac{V_e^2}{2} = h_s + \frac{V_s^2}{2}$$

Misturador



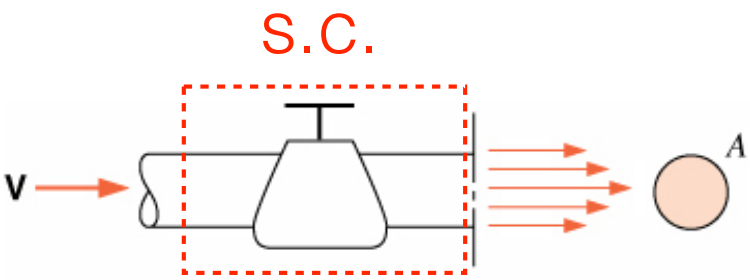
$$\sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_s \dot{m}_s h_s + \cancel{\dot{Q}_{vc}} - \cancel{\dot{W}_{vc}} = 0$$

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$$

Exemplos de aplicação

Restrição

Exemplos: válvula e tubo capilar.

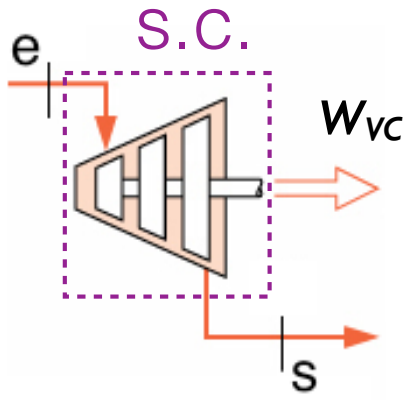


Ia Lei: $$h_e + \cancel{\frac{V_e^2}{2}} + \cancel{gz_e} + \cancel{q_{vc}} - \cancel{w_{vc}} = h_s + \cancel{\frac{V_s^2}{2}} + \cancel{gz_s}$$

$h_e = h_s$ isentálpica

Exemplos de aplicação

Turbina

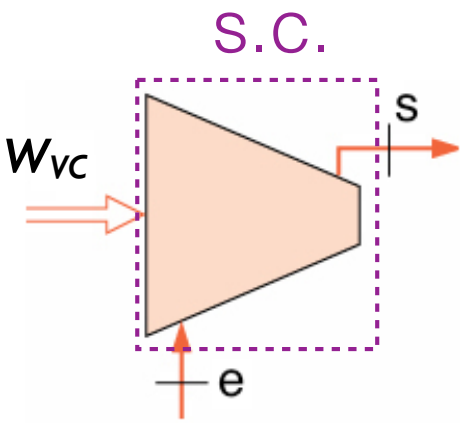


$$h_e + \cancel{\frac{V_e^2}{2}} + \cancel{gz_e} + \cancel{q_{vc}} - w_{vc} = h_s + \cancel{\frac{V_s^2}{2}} + \cancel{gz_s}$$

$w_{vc} = h_e - h_s$

Note que resulta $w_{vc} > 0$ e que a vazão mássica dita a potência

Compressor / Bomba



$$h_e + \cancel{\frac{V_e^2}{2}} + \cancel{gz_e} + \cancel{q_{vc}} - w_{vc} = h_s + \cancel{\frac{V_s^2}{2}} + \cancel{gz_s}$$

$w_{vc} = h_e - h_s$

Note que resulta $w_{vc} < 0$ e que a vazão mássica dita a potência

Como funciona uma bomba centrífuga?

CENTRIFUGAL PUMPS

www.LearnEngineering.org

Fonte: https://www.patreon.com/LearnEngineering
https://www.youtube.com/watch?v=BaEHVpKc-1Q

Tipos de turbinas hidráulicas

Fonte: https://www.patreon.com/LearnEngineering
https://www.youtube.com/watch?v=k0BLOKEZ3KU

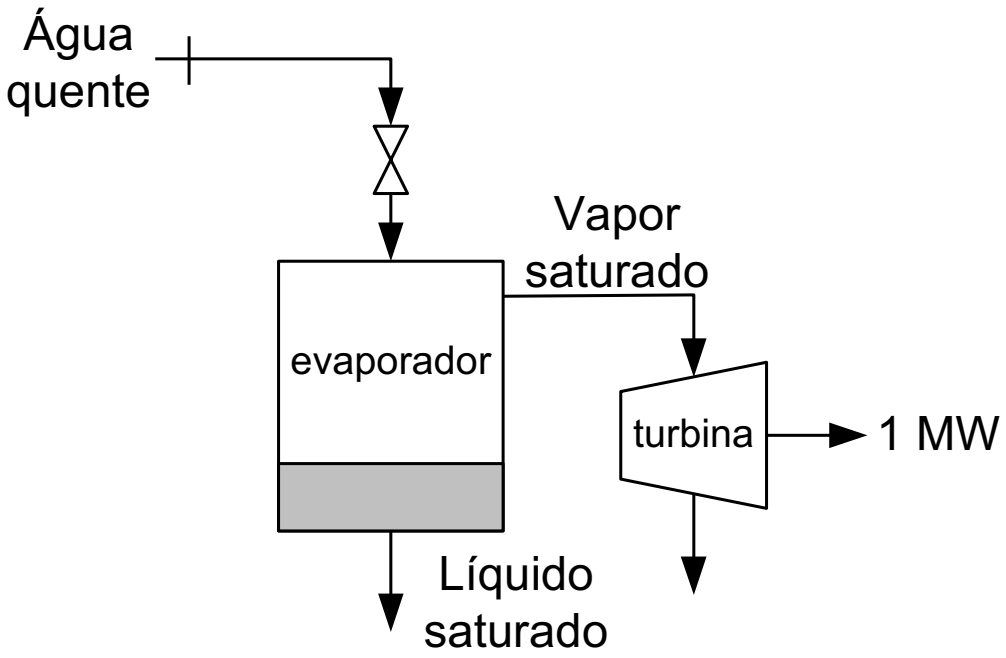
Como funciona um foguete?

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Fonte: https://www.patreon.com/LearnEngineering
https://www.youtube.com/watch?v=QQB1Iw3zJbc

Exercício 1 - Evaporador "flash"

Propõem-se usar um suprimento geotérmico de água quente para acionar uma turbina a vapor d'água utilizando o dispositivo esquematizado na figura. Água a alta pressão, 1,5 MPa e 180 °C, é estrangulada e segue para um evaporador instantâneo ("flash") adiabático, de modo a se obter líquido e vapor à pressão de 400kPa. O líquido sai pela parte inferior do evaporador, enquanto o vapor é retirado para alimentar a turbina. O vapor sai da turbina a 10 kPa e com título igual a 90%. Sabendo que a turbina produz uma potência de 1 MW, qual é a vazão necessária de água quente que deve ser fornecida pela fonte geotérmica.



Exercício 1

Estado 1: conhecemos P e T

Tabela de saturação a 1500 kPa, T_{sat} = 198,32 °C, como $T_1 < T_{sat}$, temos líquido comprimido.

$v_1 \approx v_l = 0{,}001154\ m^3/kg$

$u_1 \approx u_l$ = 843,14 kJ/kg

$h_1 \approx u_1 + P_1.v_1$ = 844,9 kJ/kg

Estado 2: vapor saturado seco a 400 kPa e T_{sat} = 143,63 °C

$h_2 = h_v$ = 2738,53 kJ/kg

Estado 3: líquido e vapor saturados a 10 kPa e x_3 = 0,9

$h_3 = (1 - x_3).h_l + x_3.h_v = (1 - 0{,}9).191{,}81 + 0{,}9.2584{,}63$ = 2345,3 kJ/kg

Exercício 1

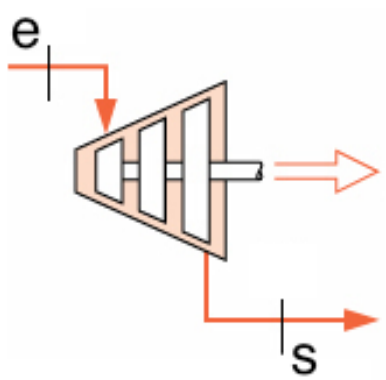
VC ≡ turbina

Hipóteses:

1) Processo adiabático (2 - 3);

2) Variações de energia cinética e potencial desprezível;

3) Regime permanente



$w_t = h_2 - h_3 = 393{,}23\ kJ/kg$

$$\dot{W}_t = w_t \cdot \dot{m}_t \Rightarrow \dot{m}_t = \frac{\dot{W}_t}{w_t} = \frac{1000}{393{,}23} = 2{,}54\, kg/s$$

$w_{vc} = h_e - h_s$

Exercício 1

No evaporador temos líquido e vapor saturados com título desconhecido.

Esse título permite determinar a relação entre as vazões mássicas na entrada e saídas do evaporador. Por que?

$$x = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$$

Podemos determinar o título aplicando a 1ª lei à válvula.

Hipóteses:

1) Válvula adiabática; → $h_e = h_s$

2) Variações de energia cinética e potencial desprezível.

$$h_s = h_1 = 763{,}8 \text{ kJ/kg}$$

h_l @ 400 kPa = 604,73 kJ/kg

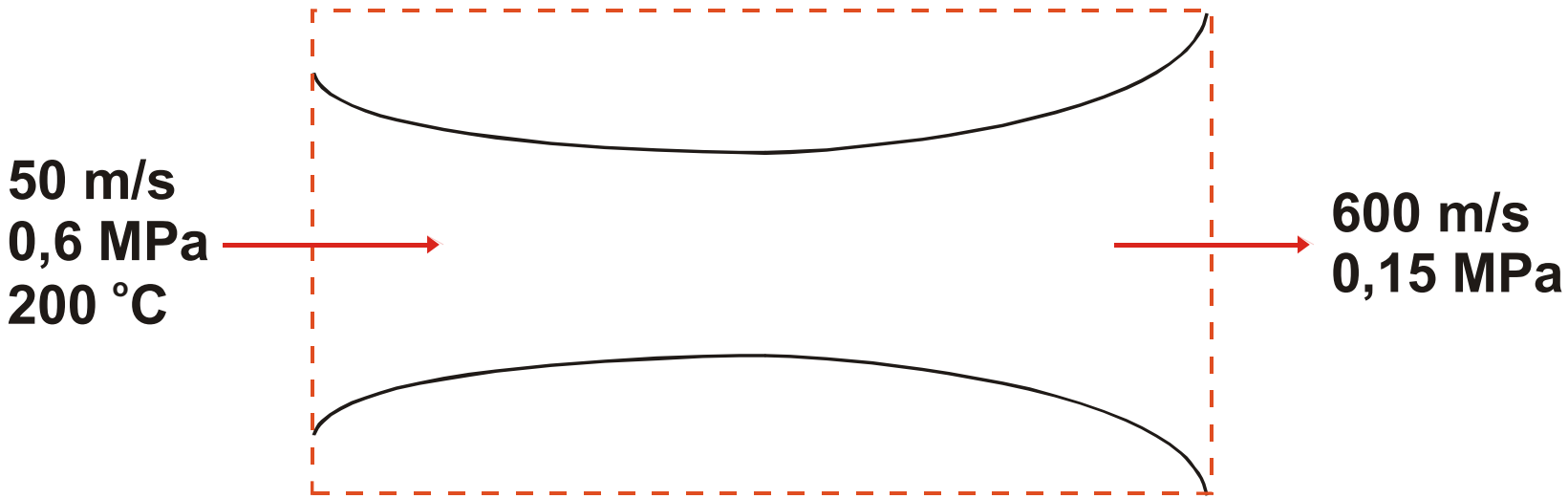
h_V @ 400 kPa = 2738,53 kJ/kg

→ $x = 0{,}07447$

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_2}{x} = \frac{2{,}54}{0{,}07447} \rightarrow \dot{m}_1 = 34{,}1 kg/s$$

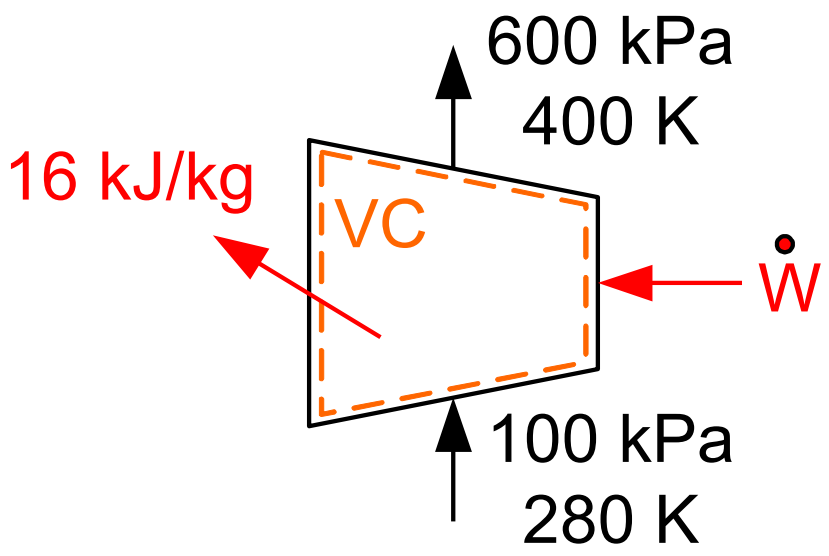
Exercício 2 - Bocal convergente-divergente

Vapor a 0,6 MPa e 200 °C entra em um bocal isolado com velocidade de 50 m/s. O fluido deixa o bocal com pressão de 0,15 MPa e velocidade de 600 m / s. Determine a temperatura final, se o estado na saída for de vapor superaquecido, e o título se mistura saturada. (*)



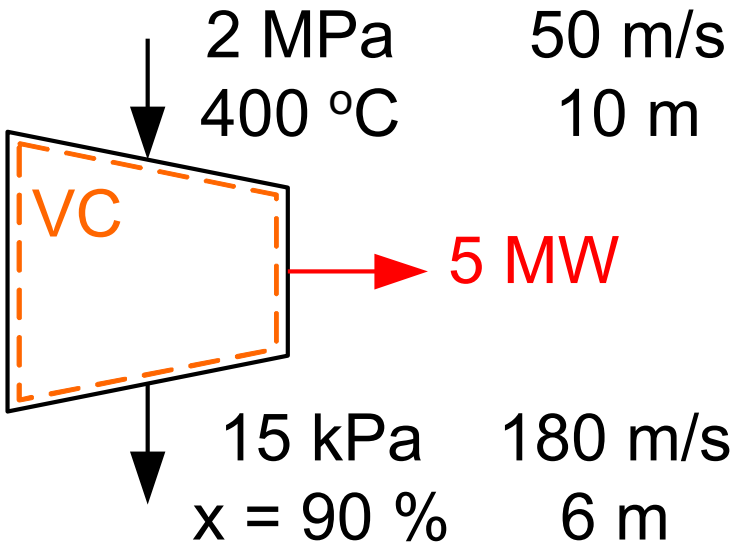
Exercício 3 - Compressor

Ar a 100 kPa e 280 K é comprimido continuamente até 600 kPa e 400K. A vazão mássica é de 0,02 kg/s, e ocorre, durante o processo, uma perda de calor de 16 kJ / kg. Assumindo que as variações de energia cinética e potencial são nulas, determine a potência fornecida pelo compressor. (*)



Exercício 4 - Turbina a vapor

A potência gerada por uma turbina é de 5 MW. Pede-se para: a) comparar as magnitudes de Δh, ΔEc e ΔEp; b) determinar o trabalho por unidade de massa e c) a vazão mássica. (*)

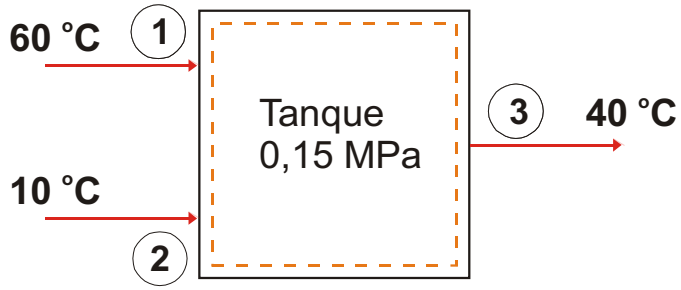


Exercício 5 - Tubo Capilar

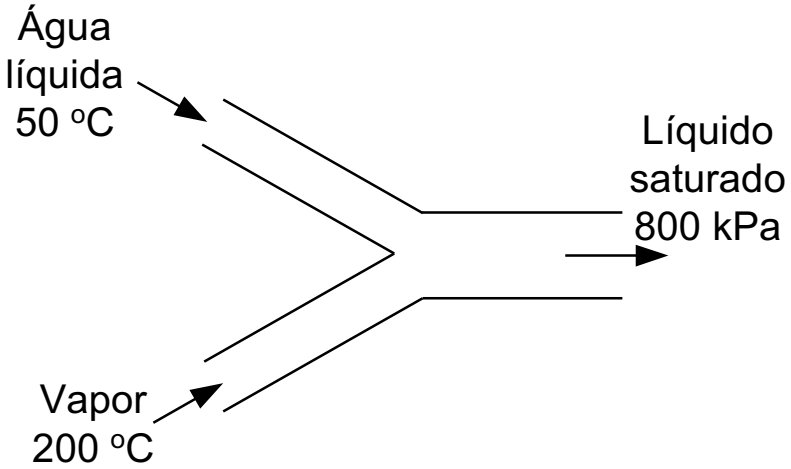
Fluido refrigerante R134a entra em um tubo capilar de um refrigerador no estado de líquido saturado a 0,8 MPa, saindo à pressão de 0,122 MPa. Determine o título do fluido no estado final e a queda de temperatura ao longo do processo. (*)

Exercício 6 - Misturador

Considere um chuveiro em que água quente a 60 °C é misturada com água fria a 10 °C. Sabendo que a temperatura na saída deve ser de 40°C, determine a relação entre as vazões mássica de água quente e fria.

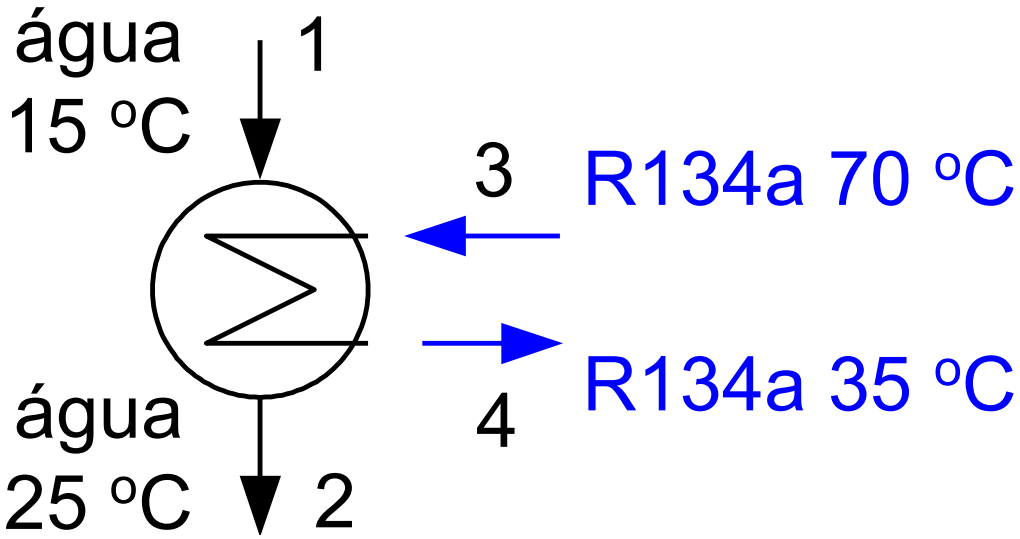


Em centrais termoelétricas a vapor, utiliza-se, freqüentemente, vapor extraído da turbina para pré-aquecer a água de entrada da caldeira. Considere que a mistura se processa a 800 kPa. A água a 50 °C deve ser aquecida através de vapor saturado a 200°C. Em um processo ideal, a mistura sai como líquido saturado. Determine a relação entre as vazões mássicas de água e vapor superaquecido. (Resp. 4,05) (*)



Exercício 7 - Trocador de Calor

R134a é resfriado por água em um condensador. O fluido entra com vazão mássica de 6 kg/min a 1 MPa e 70 °C, deixando-o a 35°C. A água entra com 300 kPa e 15 °C, saindo a 25 °C. Desprezando qualquer perda de carga, determine: a) a vazão mássica necessária de água e a taxa de transferência de calor do fluido para a água. (*)



Caso particular

Regime uniforme

★O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;

★O estado da massa dentro do VC pode variar com o tempo, mas é uniforme ao longo de todo o VC;

★o estado da massa que atravessa cada uma das áreas de fluxo na superfície de controle é constante e uniforme, embora as vazões possam variar com o tempo.

Hipótese principal

Regime Uniforme

Vamos integrar as expressões a seguir de um instante inicial (1) até um instante *t* (2) de forma a eliminar a equação diferencial:

$$\int_1^2 \frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad \text{dt}$$

$$\int_1^2 \frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} \quad \text{dt}$$

Regime uniforme

Vamos integrar termo a termo a expressão da conservação da massa e energia:

$$\int_1^2 \frac{dm_{vc}}{dt}\, dt = m_2 - m_1$$

$$\int_1^2 \sum_e \dot{m}_e\, dt = \sum_e m_e$$

$$\int_1^2 \sum_s \dot{m}_s\, dt = \sum_s m_s$$

Combinando as expressões anteriores:

$$m_2 - m_1 = \sum_e m_e - \sum_s m_s$$

Regime uniforme

$$\int_1^2 \frac{dE_{vc}}{dt}\,dt = E_2 - E_1$$

$$\int_1^2 \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) dt = \sum_e m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$\int_1^2 \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) dt = \sum_s m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$$

$$\int_1^2 \dot{Q}_{vc}\,dt = Q_{vc}$$

$$\int_1^2 \dot{W}_{vc}\,dt = W_{vc}$$

Combinando as expressões anteriores:

$$E_2 - E_1 = \sum_e m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + Q_{vc} - W_{vc}$$

Regime uniforme

Resumo das equações:

$$\left(m_2 - m_1\right)_{VC} = \sum m_e - \sum m_s$$

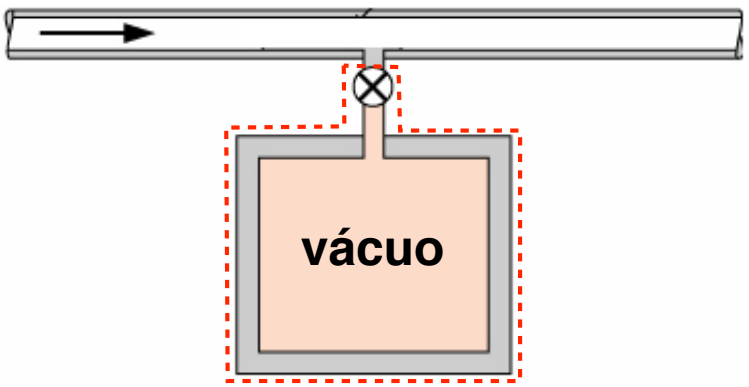
$$m_2\left(u_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2\right) - m_1\left(u_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1\right) = \sum_e m_e\left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e\right)$$

$$-\sum_s m_s\left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s\right) + Q_{vc} - W_{vc}$$

Exemplo

Enchimento de um tanque com um gás perfeito (T_{final} ?)

gás a P_0, T_0
(estado constante)



Hipóteses:

- Gás perfeito;
- Calores específicos constantes;
- Regime uniforme;
- Processo adiabático;
- Estado final de equilíbrio.

Sobre o estado final conhecemos apenas uma propriedade intensiva independente, a pressão (P_0). A outra será determinada pela aplicação dos princípios de conservação.

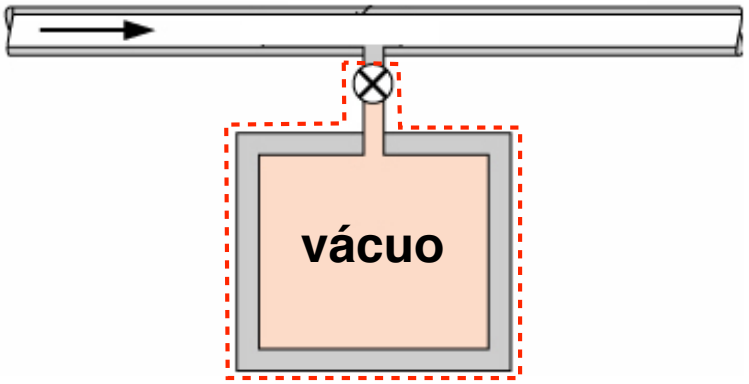
$$\left(m_2 - \cancel{m_1}\right)_{VC} = \cancel{\sum m_e} - \cancel{\sum m_s} \rightarrow m_2 = m_e$$

$$E_2 - \cancel{E_1} = \cancel{\sum_e} m_e \left(h_e + \cancel{\frac{V_e^2}{2}} + \cancel{g z_e} \right) - \cancel{\sum_s m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + g z_s \right)} + \cancel{Q_{vc}} - \cancel{W_{vc}} \rightarrow m_2 u_2 = m_e h_e$$

Exemplo

Enchimento de um tanque com um gás perfeito (T_{final} ?)

gás a P_0, T_0
(estado constante)



$$m_2 = m_e$$

$$m_2 u_2 = m_e h_e$$

Combinando as expressões, obtém-se: $u_2 = h_e$

Considerando calores específicos constantes: $c_{v0} T_2 = c_{p0} T_0$

Quais são as demais considerações usadas nessa equação?

$T_2 = k T_0$ Portanto T_2 será maior que T_0, pois k é maior que um.

Resolva novamente o exercício usando a abordagem de sistema.

Exercício 8

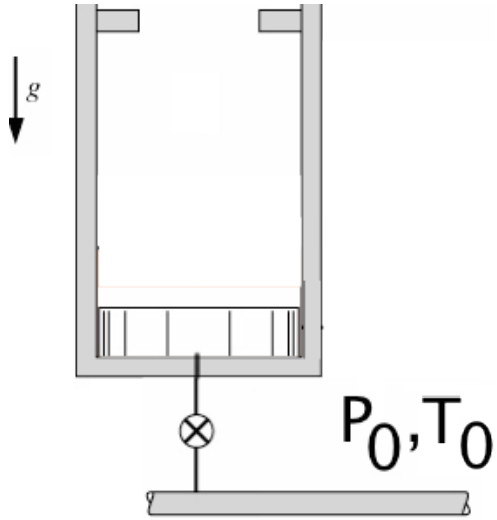
Considere a situação proposta em que um reservatório inicialmente evacuado é enchido lentamente com ar oriundo de uma grande linha de ar comprimido (P_0 = 1 MPa e T_0 = 27°C) após a abertura da válvula. A pressão necessária para erguer o pistão é de 100 kPa. O volume do reservatório quando o pistão encontra os batentes é de 1 m³. O reservatório e o êmbolo estão isolados termicamente. Determine:

a) o trabalho realizado pelo gás no tanque;

b) a temperatura e massa do ar no reservatório quando o pistão encosta nos batentes;

c) a temperatura e a pressão do ar no reservatório na condição de equilíbrio, momento em que a válvula é fechada;

d) a pressão e o calor trocado entre o ambiente a 27°C e o ar no tanque, após a remoção do isolante e até a nova condição de equilíbrio (ponto de partida é o estado do item c).



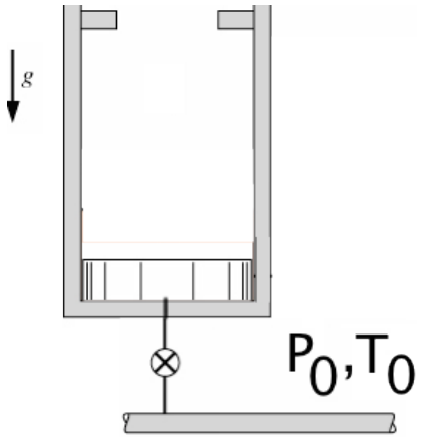
Exercício 8

Estado 1: início

Estado 2: pistão toca batentes

Estado 3: fim do enchimento

Estado 4: Equilíbrio com ambiente



Hipóteses:

1) O volume de controle envolve o ar no interior do tanque;

2) Os estados 1, 2, 3 e 4 são estados de equilíbrio;

3) O processo de enchimento é quase-estático;

4) Não há atrito entre o pistão e o cilindro;

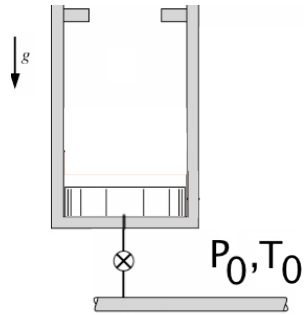
5) Condições de regime uniforme;

6) Comportamento de gás perfeito;

7) Calores específicos constantes avaliados em 300 K.

Exercício 8

a) o trabalho realizado pelo gás no tanque.



$W_{14} = \int P.dV = P_2.V_2 = 100.1$ **W_{14} = 100 kJ**

b) a temperatura e massa do ar no reservatório quando o pistão encosta nos batentes.

1ª lei (regime uniforme): $U_2 - U_1 = Q_{12} - W_{12} + \sum m_{in}.h_{in} - \sum m_{out}.h_{out}$

Simplificando: $U_2 = - W_{12} + m_{in}.h_0$

C.M.: $m_2 = m_{in}$ → $U_2 = - W_{1\text{-}2} + m_2.h_0$

$m_2.c_v.T_2 = - W_{1\text{-}2} + m_2.c_p.T_0$ → $\cancel{P_2.V_2}/(R.T_2).c_v.T_2 = - \cancel{P_2.V_2} + \cancel{P_2.V_2}/(R.T_2).c_p.T_0$

$1/R.c_v = - 1 + 1/(R.T_2).c_p.T_0$ → (**x** R) $c_v = - R + c_p.T_0/T_2$ → (**÷** c_v) $1 = - R/c_v + k.T_0/T_2$

$1 = 1 - k + k.T_0/T_2$ → **$T_0 = T_2$** $m_2 = P_2.V_2/(R.T_2)$ → **m_2 = 1,16 kg**

Exercício 8

c) a temperatura e a pressão do ar no reservatório na condição de equilíbrio, momento em que a válvula é fechada.

1ª lei (regime uniforme): $U_3 - U_1 = Q_{12} - W_{12} + \sum m_{in}.h_{in} - \sum m_{out}.h_{out}$

Simplificando: $U_3 = - W_{12} + m_3.h_0$

$m_3.c_v.T_3 = - W_{1\text{-}2} + m_3.c_p.T_0$

Após alguma álgebra → $T_3 = k.T_0 / [1 - W_{1\text{-}2}.(1-k) / (P_3.V_3)]$

$\mathbf{P_3 = P_0 = 1\ MPa}$

$\mathbf{T_3 = 404\ K}$

Exercício 8

d) a pressão e o calor trocado entre o ambiente a 27°C e o ar no tanque, após a remoção do isolante e até a nova condição de equilíbrio (ponto de partida é o estado do item c).

1ª lei (regime uniforme): $U_4 = Q_{3\text{-}4} - W_{1\text{-}4} + m_3.h_0$

ou, 1ª lei para sistema: $U_4 - U_3 = Q_{3\text{-}4}$

$$Q_{3\text{-}4} = m_3.c_v.(T_4 - T_3)$$

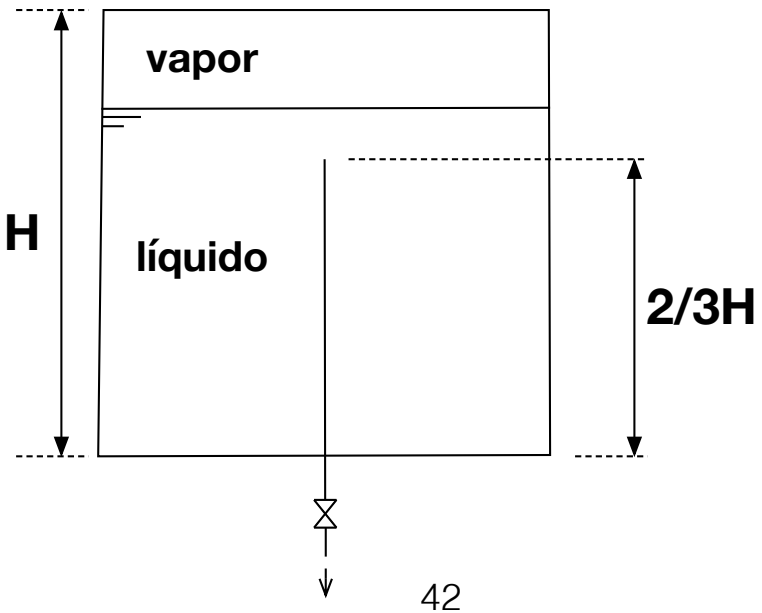
$$Q_{3\text{-}4} = P_3.V_3/(R.T_3).c_v.(T_4 - T_3)$$

$$Q_{3\text{-}4} = P_3.V_3.(T_4 / T_3 - 1) / (k - 1)$$

$$\mathbf{Q_{3\text{-}4} = -\ 644\ kJ}$$

Exercício 9

Um vaso de pressão cilíndrico, com volume de 900 litros, contém água saturada a 300º C, sendo 70% do volume ocupado por líquido. Retiram-se lentamente 90% da massa de água pela parte inferior, por um tubo vertical no centro do cilindro, o qual dispõe de uma válvula de descarga e cuja tomada de fluido está a 2/3 da altura do tanque. Durante o processo, transfere-se calor de forma a manter a temperatura nesse tanque constante. Defina o estado final da água no tanque. Calcule a quantidade de calor transferida. Determine a temperatura do fluido na saída da tubulação. Despreze as variações de energia potencial e cinética.



Exercício 9

Estado 1: início

Estado 2: líquido atinge o dreno

Estado 3: fim do esvaziamento

Hipóteses:

1) O volume de controle envolve o fluido no interior do tanque;

2) Os estados 1, 2 e 3 são estados de equilíbrio;

3) O processo de esvaziamento é quase-estático;

4) Condições de regime uniforme;

6) Modelo de substância pura.

Exercício 9 - Estado 1

Estado 1: mistura líquido - vapor saturados (x_{vol} = 0,3)

Da tabela de saturação a 300 °C:

P_1 = 8581 kPa

v_l = 0,001404 m³/kg

v_v = 0,02167 m³/kg

u_l = 1331,97 kJ/kg

u_v = 2562,96 kJ/kg

h_l = 1344,01 kJ/kg

h_v = 2748,9 kJ/kg

Massas de líquido e vapor no estado 1

$$m_{l,1} = \frac{V_{l,1}}{v_l} = \frac{0,7 \cdot 900 \times 10^{-3}}{0,001404} = 448,7 kg$$

$$m_{v,1} = \frac{V_{v,1}}{v_v} = \frac{0,3 \cdot 900 \times 10^{-3}}{0,02167} = 12,46 kg$$

$$m_1 = m_{l,1} + m_{v,1} = 461,2 kg$$

Demais propriedades do estado 1

$$x_1 = \frac{m_{v,1}}{m_1} = 0,02702 \quad \Rightarrow \quad u_1 = (1 - x_1)u_{l,1} + x_1 u_{v,1} = 1365 kJ/kg$$

Exercício 9 - Estado 2

Processo 1 - 2: extraímos apenas líquido saturado do tanque

Estado 2: mistura líquido - vapor saturados (x_{vol} = 1/3) a 300 ^oC

Massas de líquido e vapor no estado 2

$$m_{l,2} = \frac{V_{l,2}}{v_l} = \frac{2/3 \cdot 900 \times 10^{-3}}{0{,}001404} = 427{,}4\,kg$$

$$m_{v,2} = \frac{V_{v,2}}{v_v} = \frac{1/3 \cdot 900 \times 10^{-3}}{0{,}02167} = 13{,}84\,kg$$

$$m_2 = m_{l,2} + m_{v,2} = 441{,}2\,kg$$

Massa e entalpia correspondente do líquido saturado que deixa o volume de controle

$$m_{s,12} = m_1 - m_2 = 20\,kg$$

$$h_{s,12} = h_l @ 300\,^oC = 1344{,}01\,kJ/kg$$

Exercício 9 - Estado 3

Processo 2 - 3: extraímos apenas vapor saturado do tanque?

Estado 3

$$m_3 = 0{,}1 m_1 = 46{,}12 kg$$

$$v_3 = \frac{V}{m_3} = 0{,}01952 m^3 / kg$$

$$v_l < v_3 = 0{,}01952 < \mathrm{v_v} = 0{,}02167 \ \mathrm{m^3/kg} \therefore \text{mistura}$$

$$x_3 = \frac{v_3 - v_l}{v_v - v_l} = 0{,}8937 \quad \Rightarrow \quad u_3 = (1 - x_3) u_{l,3} + x_3 u_{v,3} = 2432 kJ / kg$$

Massa e entalpia correspondente do vapor saturado que deixa o volume de controle

$$m_{s,23} = m_2 - m_3 = 395{,}1 kg$$

$$h_{s,23} = h_v @ 300^o C = 2748{,}9 kJ / kg$$

Exercício 9 - Calor transferido

Cálculo do calor transferido no processo 1 para 3

1ª lei em regime uniforme:

$$U_2 - U_1 = Q_{12} - \cancel{W_{12}} + \cancel{\sum m_{in}.h_{in}} - \sum m_{out}.h_{out}$$

$$U_3 - U_2 = Q_{23} - \cancel{W_{23}} + \cancel{\sum m_{in}.h_{in}} - \sum m_{out}.h_{out}$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12} - m_{s,12}\,.\,h_{s,12}$$

$$+$$

$$U_3 - U_2 = Q_{23} - m_{s,23}\,.\,h_{s,23}$$

$$U_3 - U_1 = Q_{13} - m_{s,12}\,.\,h_{s,12} - m_{s,23}\,.\,h_{s,23}$$

$$Q_{13} = U_3 - U_1 + m_{s,12}\,.\,h_{s,12} + m_{s,23}\,.\,h_{s,23}$$

$$Q_{13} = m_3.u_3 - m_1.u_1 + m_{s,12}.h_{s,12} + m_{s,23}.h_{s,23}$$

Q_{13} = 595400 kJ

Exercício 9 - Estado na saída

Para determinar o estado do fluido na saída vamos fazer duas hipóteses adicionais:

- válvula isentálpica;
- pressão atmosférica igual a 100 kPa.

Para o processo 1–2: $T_{out,12} = T$ @ $h_{s,12} = 1344{,}01$ kJ/kg e P_{atm}

como $h_l = 417{,}44 < h_{s,12} < h_v = 2675{,}46$ kJ/kg@ 100 kPa temos uma <u>mistura</u> na saída:

$$\therefore \mathbf{T_{out,12} = 99{,}62\ ^{o}C}$$

Exercício 9 - Estado na saída

Para o processo 2–3: $T_{out,23}$ = T @ $h_{s,23}$ = 2748,9 kJ/kg e P_{atm}

como $h_{s,23} > h_v$ = 2675,46 kJ/kg @100 kPa temos <u>vapor superaquecido</u> na saída:

T	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
		P = 100 kPa (99,62)		
Sat.	1,69400	2506,06	2675,46	7,3593
50	-	-	-	-
100	-	-	-	-
150	1,93636	2582,75	2776,38	7,6133
200	2,17226	2658,05	2875,27	7,8342
250	2,40604	2733,73	2974,33	8,0332
300	2,63876	2810,41	3074,28	8,2157
400	3,10263	2967,85	3278,11	8,5434
500	3,56547	3131,54	3488,09	8,8341
600	4,02781	3301,94	3704,72	9,0975
700	4,48986	3479,24	3928,23	9,3398
800	4,95174	3663,53	4158,71	9,5652
900	5,41353	3854,77	4396,12	9,7767
1000	5,87526	4052,78	4640,31	9,9764
1100	6,33696	4257,25	4890,95	10,1658
1200	6,79863	4467,70	5147,56	10,3462
1300	7,26030	4683,47	5409,49	10,5182

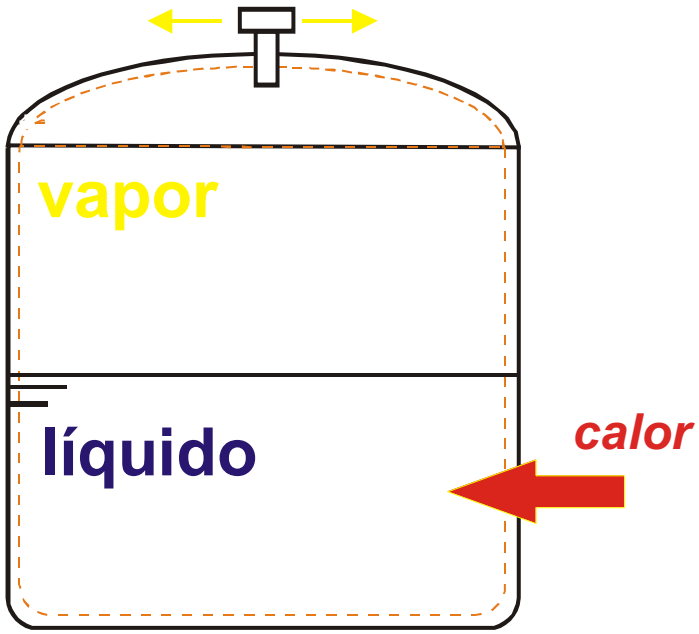
interpolando →

$T_{out,23}$ = 136,3 °C

Mesma temperatura obtida com software!

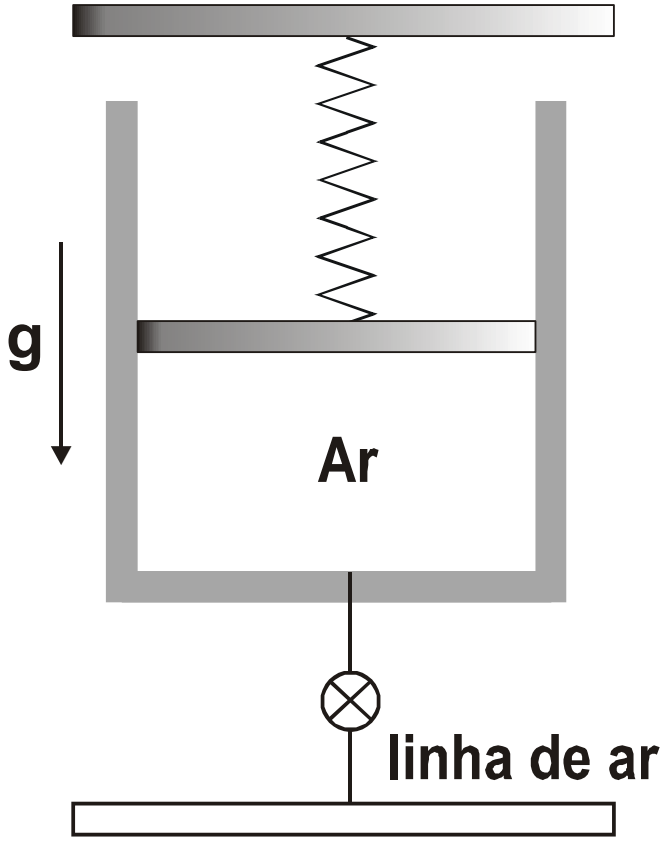
Exercício 10 - Panela de Pressão

Uma panela de pressão cozinha alimentos muito mais rapidamente, pois mantém uma pressão e temperatura superior. A pressão no interior é controlada através de uma válvula que mantém um valor constante, ao permitir a saída periódica de vapor, evitando o aumento da pressão. Uma dada panela tem um volume de 6 L e uma pressão manométrica de 75 kPa, contendo inicialmente 1 kg de água. Fornece-se calor à taxa constante de 500 W por 30 min, depois de alcançada a pressão de funcionamento. Assumindo uma pressão atmosférica de 100 kPa, determine: (a) a temperatura de cozimento, (b) a quantidade de água na panela no fim do processo.



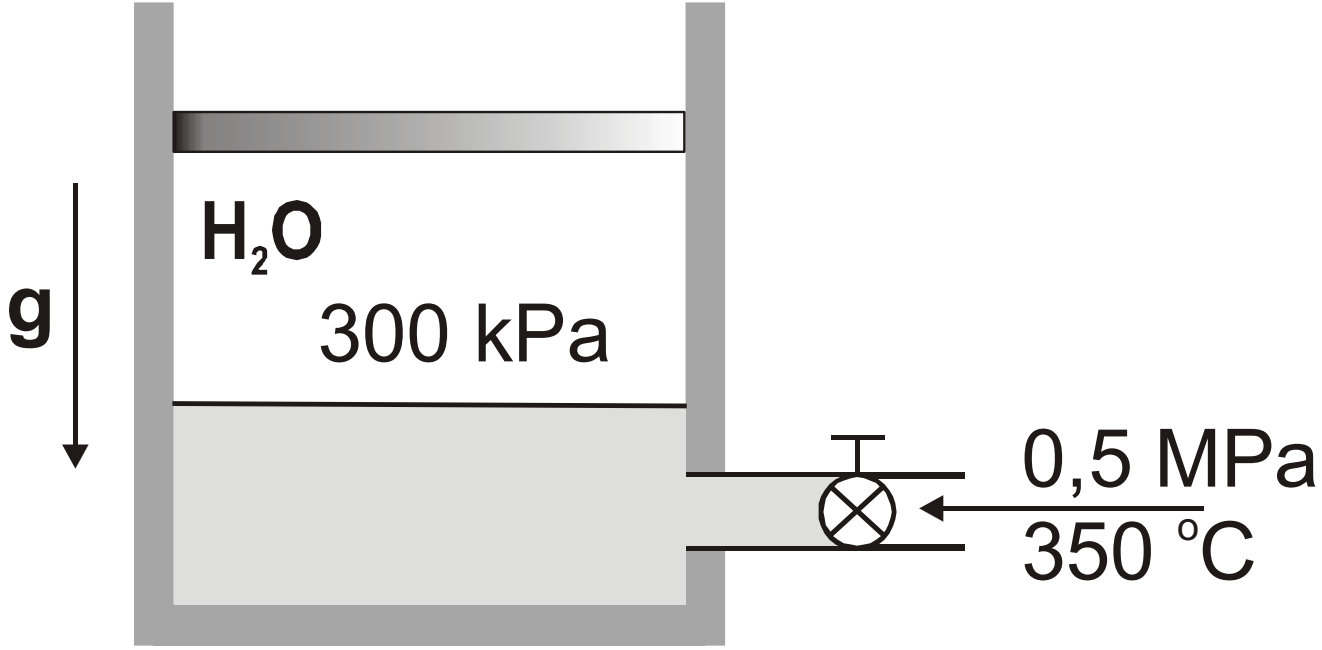
Exercício 11

Ar está contido em um cilindro isolado. Nesta situação, o ar está a 140 kPa e 25°C, e o cilindro tem um volume de 15 L. A área da seção transversal do cilindro é de 0,045 m^2 e a molar é linear, com constante de 35 kN/m. A válvula é aberta e ar da linha a 700 kPa e 25 °C flui para o interior do cilindro até que a pressão atinja 700kPa, neste instante a válvula é fechada. Determine a temperatura final. (Resp.77,8 °C) (***)



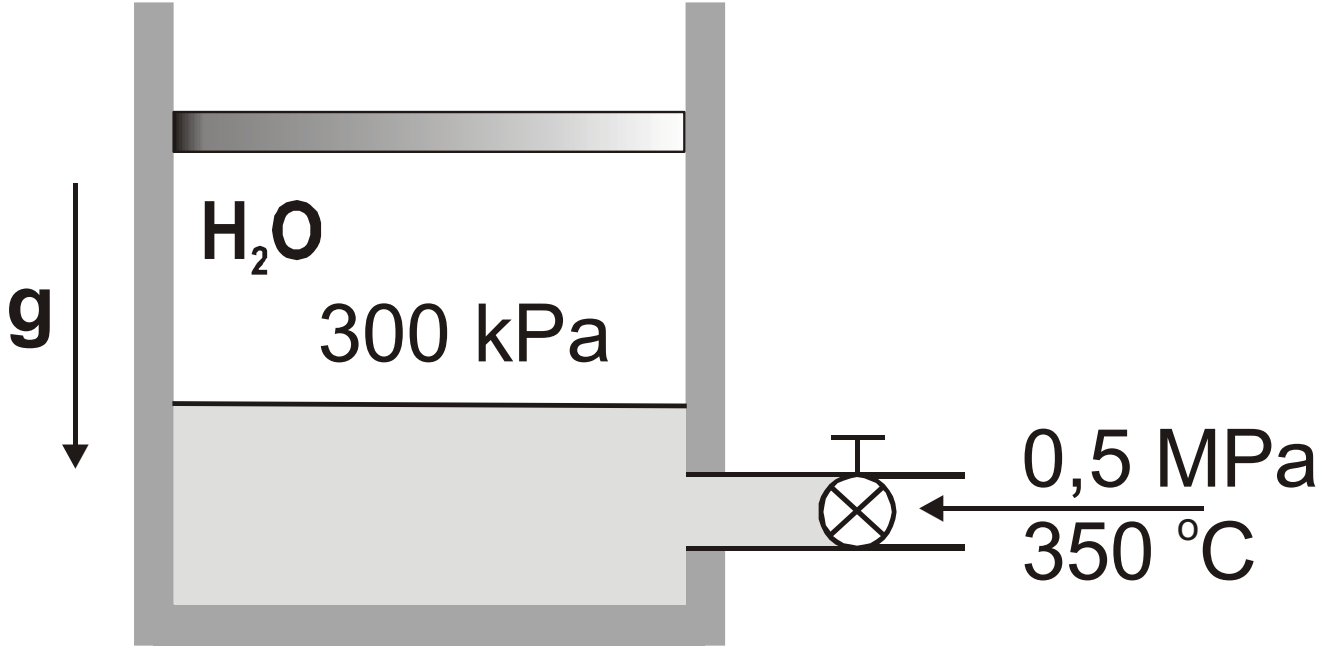
Exercício 12

Um dispositivo cilindro êmbolo vertical contém inicialmente 10 kg de água, 8 dos quais na fase vapor. A massa do êmbolo é tal que mantém uma pressão constante no interior de 300 kPa. Permite-se a entrada de vapor a 0,5 MPa e 350 °C, até que o volume interno duplique. Desprezando qualquer transferência de calor, determine a temperatura final do cilindro e a quantidade de massa que entrou. (Resp. 133,55 °C e 6,64 kg) (***)



Exercício 13

Considere uma sala de aulas grande, em um dia quente de verão, com 150 alunos, cada um dissipando 60 W de calor. Todas as luzes são mantidas acesas e apresentam 4 kW de potência nominal. A sala é bem isolada termicamente. Ar frio está disponível a 15 °C, e a temperatura de retorno não deve exceder 25 °C. Determine a vazão mássica necessária, de modo a manter a temperatura média da sala constante. (Resp. 1,29 kg/s) (*)



Mensagem final

Encerramos o conteúdo para a primeira prova.

Alguma dúvida?