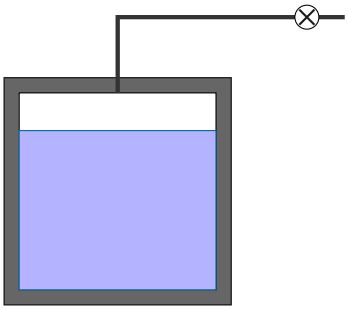
Gabarito do Trabalho T1 - Termodinâmica Ambiental

Professor: Emílio Graciliano Ferreira Mercuri, D.Sc.
Departamento de Engenharia Ambiental - DEA,
Universidade Federal do Paraná - UFPR
mercuri@ufpr.br

Questão 1) Um tanque rígido e isolado de 2 m^3 de volume inicialmente contém uma mistura bifásica líquido-vapor de amônia a 40°C e 2,1% de título. Vapor saturado é removido lentamente do tanque até que a mistura bifásica líquido-vapor de amônia alcance a temperatura de 25°C. Determine as massas inicial e final de amônia no tanque, ambas em kg.



Sugestões para resolver o problema:

1. Um volume de controle com uma saída deve ser considerado. O volume de controle pode ser definido pela superfície interna do tanque rígido.
2. Para o volume de controle, $\dot{Q}_{\text{vc}} = \dot{W}_{\text{vc}} = 0$, pois não há trabalho de fronteira, nem de eixo, nem elétrico, etc.. e o sistema é isolado. Além disso, a variação das energias cinética e potencial do sistema durante o processo é desprezível e podem ser ignoradas.
3. O valor da entalpia da massa que sai do tanque varia durante o processo, isso ocorre pois a entalpia do sistema está mudando durante a variação do título. Como simplificação, sugere-se considerar que a entalpia da vazão mássica de saída é igual à entalpia média: $h_s = \frac{1}{2}[h_v(40°\text{C}) + h_v(25°\text{C})]$

Análise: Fazendo o balanço de massa e o balanço de energia para um volume de controle com apenas uma vazão mássica de saída, temos:

$$\frac{dm_{\text{vc}}}{dt} = -\dot{m}_s$$

$$\frac{dU_{\text{vc}}}{dt} = -\dot{m}_s h_s$$

Combinando as duas equações, temos que:

$$\frac{dU_{\text{vc}}}{dt} = h_s \frac{dm_{\text{vc}}}{dt}$$

O termo h_s é constante na equação (valor médio), portanto podemos integrar no tempo para obter:

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = h_s(m_2 - m_1)$$

Rearranjando:

$$m_2(h_s - u_2) = m_1(h_s - u_1) \tag{1}$$

De acordo com as tabelas termodinâmicas, temos que:

$$h_s = \frac{1}{2}[h_v(40°\text{C}) + h_v(25°\text{C})] = \frac{1}{2}[1470{,}2 + 1463{,}5] = 1466{,}85\,\text{kJ/kg}$$

$$\nu_1 = \nu_l + x_1 \nu_{lv} = 0{,}001725 + (0{,}021)0{,}08141 = 0{,}00343461\,\mathrm{m^3/kg}$$

$$u_1 = u_l + x_1 u_{lv} = 368{,}74 + (0{,}021)972{,}2 = 389{,}1562\,\mathrm{kJ/kg}$$

$$m_1 = \frac{V}{\nu_1} = \frac{2}{0{,}00343461} = 582{,}31\,\mathrm{kg}$$

$$m_2 = \frac{V}{\nu_2} = \frac{2}{\nu_2}$$

Inserindo os valores tabelados na Equação 1, obtemos:

$$m_2(h_s - u_2) = m_1(h_s - u_1)$$

$$\frac{2}{\nu_2}(1466{,}85 - u_2) = 582{,}31(1466{,}85 - 389{,}1562)$$

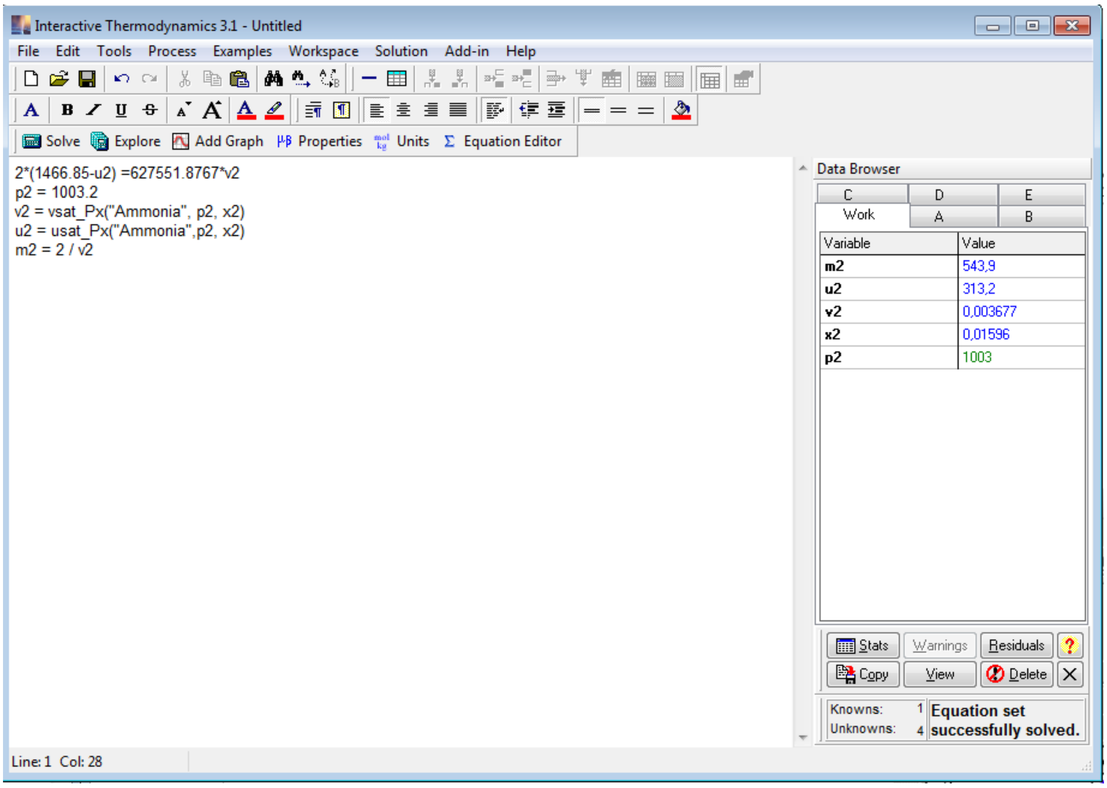
Reescrevendo:

$$2(1466{,}85 - u_2) = 627551{,}8767\,\nu_2 \tag{2}$$

Podemos continar a solução desse problema no Interactive Thermodynamics. Da tabela de saturação da Amônia a pressão no estado 2, $P_2(25°\mathrm{C}) = 1003{,}2$ kPa.

Código IT :

```
2*(1466.85-u2) = 627551,8767*v2
p2 = 1003.2
v2 = vsat_Px("Ammonia", p2, x2)
u2 = usat_Px("Ammonia",p2, x2)
m2 = 2 / v2
```



Portanto, as massas inicial e final de amônia no tanque são:

$$m1 = 582{,}31\,\mathrm{kg} \quad \blacksquare$$

$$m2 = 543{,}9\,\mathrm{kg} \quad \blacksquare$$

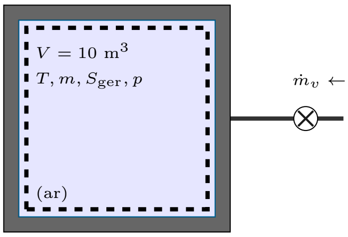
Questão 2) Um tanque rígido isolado com volume de 10 m^3 se encontra conectado por uma válvula a uma linha de alimentação de grande diâmetro que transporta ar a 227°C e 10 bar. O tanque está inicialmente evacuado. O ar escoa para o interior do tanque até que a pressão seja p. Utilizando o modelo de gás ideal com razão de calores específicos k constante, represente graficamente:

(a) a temperatura do tanque, em K, em função da pressão p em bar.

(b) a quantidade de massa no tanque, em kg, em função da pressão p em bar.

(c) a quantidade de entropia gerada, em kJ/K, em função da pressão p em bar.

Considere o desenho esquemático do tanque sendo enchido por ar:



Análise: Para o volume de controle da figura acima tem-se que: $\dot{Q}_{\text{vc}} = 0$ (tanque isolado), $\dot{W}_{\text{vc}} = 0$ (tanque rígido) e a os efeitos das variações de energia potencial e cinética são desprezíveis. O estado do ar na vazão de entrada permanece constante.

Fazendo o balanço de massa e o balanço de energia para o volume de controle com apenas uma vazão mássica de entrada, temos:

$$\frac{dm_{\text{vc}}}{dt} = \dot{m}_e$$

$$\frac{dU_{\text{vc}}}{dt} = \dot{m}_e h_e$$

Combinando as duas equações, temos que:

$$\frac{dU_{\text{vc}}}{dt} = h_e \frac{dm_{\text{vc}}}{dt}$$

Integrando:

$$\int_1^2 \frac{dU_{\text{vc}}}{dt}\,dt = \int_1^2 h_e \frac{dm_{\text{vc}}}{dt}\,dt$$

$$\int_1^2 dU_{\text{vc}} = h_e \int_1^2 dm_{\text{vc}}$$

$$\Delta U_{\text{vc}} = h_e \Delta m_{\text{vc}}$$

$$U_2 - U_1 = h_e(m_2 - m_1)$$

No início $m_1 = U_1 = 0$, portanto:

$$U_2 = h_e m_2 \qquad \rightarrow \qquad u_2 = \frac{U_2}{m_2} = h_e$$

$$h_e(T_e) = u(T) \tag{3}$$

Da definição de entalpia: $h = u + P\nu$. Para um gás ideal, temos que $P\nu = RT$, portanto:

$$h = u + RT$$

Para o fluxo de entrada:

$$h_e = u_e + RT_e \tag{4}$$

Substituindo 3 em 4, tem-se:

$$u(T) = u_e + RT_e \tag{5}$$

Para gases ideais:

$$c_{\nu 0} = \frac{du}{dT}$$
$$du = c_{\nu 0} dT$$

Integrando do estado do fluxo de entrada até o estado do fluido após ter entrado no tanque:

$$u(T) - u_e = c_{\nu 0}(T - T_e) \tag{6}$$

Substituindo 5 em 6:

$$u_e + RT_e - u_e = c_{\nu 0}(T - T_e) \tag{7}$$
$$RT_e = c_{\nu 0}(T - T_e) \tag{8}$$

Para gases ideais $R = c_{p0} - c_{\nu 0}$

$$(c_{p0} - c_{\nu 0})T_e = c_{\nu 0}(T - T_e)$$

Dividindo por $c_{\nu 0}$

$$\frac{(c_{p0} - c_{\nu 0})}{c_{\nu 0}} T_e = (T - T_e)$$

Mas $k = \frac{c_{p0}}{c_{\nu 0}}$:

$$(k-1)T_e = (T - T_e)$$
$$(k-1)T_e + T_e = T$$
$$kT_e = T$$

Como a corrente de entrada tem temperatura constante, a equação acima mostra que a temperatura do tanque também deve ser constante, independente da pressão p.

Usando a equação do gás ideal podemos encontrar a massa dentro do tanque:

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{P_e}{P_e}\frac{PV}{R(kT_e)}$$

Fazendo $r = P/P_e$

$$m = \frac{P}{P_e}\frac{P_e V}{R(kT_e)} = r\frac{P_e V}{R(kT_e)} = 50{,}14r\,\text{kg}$$

O balanço de entropia é:

$$\frac{dS_{\text{cv}}}{dt} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{\text{ger}}$$

Não há fluxo de saída, portanto $\dot{m}_s = 0$. Há somente um fluxo de entrada. Integrando:

$$\int_1^2 \frac{dS_{\text{cv}}}{dt}\,dt = \int_1^2 \dot{m}_e s_e\,dt + \int_1^2 \dot{S}_{\text{ger}}\,dt$$

$$\int_1^2 dS_{\text{cv}} = s_e \int_1^2 dm_e + \int_1^2 dS_{\text{ger}}$$

$$S_2 - S_1 = s_e m_e + {}_1S_{2,\text{ger}}$$

No início (estado 1) não há massa dentro do tanque, portanto: $S_1 = 0$:

$$S_2 = s_2 m_2 = s_e m_e + {}_1S_{2,\text{ger}}$$

A massa no estado 2 é igual a massa que entrou: $m_2 = m_e$:

$${}_1S_{2,\text{ger}} = m(s_2 - s_e)$$

Para um gás ideal, a variação da entropia é:

$$\Delta s = s_2 - s_e = c_{p0}\ln\frac{T_2}{T_e} - R\ln\frac{P_2}{T_e}$$

Portanto:

$${}_1S_{2,\text{ger}} = m(s_2 - s_e) = m\left(c_{p0}\ln\frac{T_2}{T_e} - R\ln\frac{P_2}{T_e}\right)$$

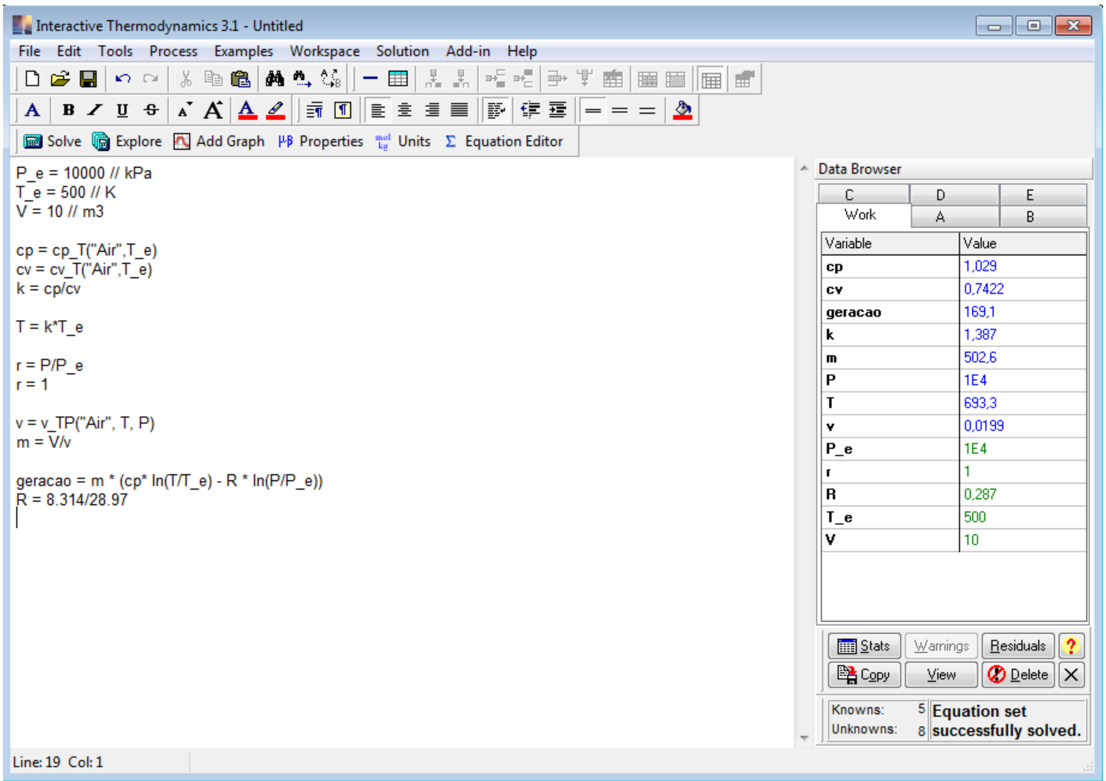
Chamando s_2, T_2 e P_2 de s, T e P, respectivamente:

$$_1S_{2,\text{ger}} = 50{,}14r\left(c_{p0}\ln\frac{T}{T_e} - R\ln r\right)$$

$$_1S_{2,\text{ger}} = 14{,}39r\,(1{,}174 - \ln r)$$

Código IT :

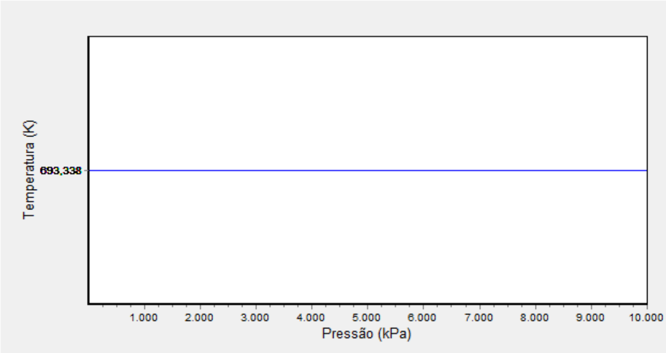
```
P_e = 10000 // kPa
T_e = 500 // K
V = 10 // m3

cp = cp_T("Air",T_e)
cv = cv_T("Air",T_e)
k = cp/cv

T = k*T_e

r = P/P_e
r = 1

v = v_TP("Air", T, P)
m = V/v

geracao = m * (cp* ln(T/T_e) - R * ln(P/P_e))
R = 8.314/28.97
```



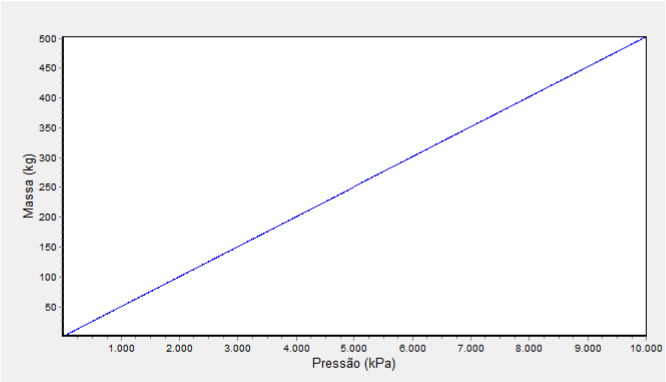
Após escrever o código podemos gerar os gráficos no Interactive Thermodynamics. Para isso é preciso gerar os dados do gráfico clicando em *Explore*, esolhendo:

- **Variable to Sweep**: r
- **Starting Value**: 1E-3
- **Ending Value**: 1
- **Step**: 1E-3

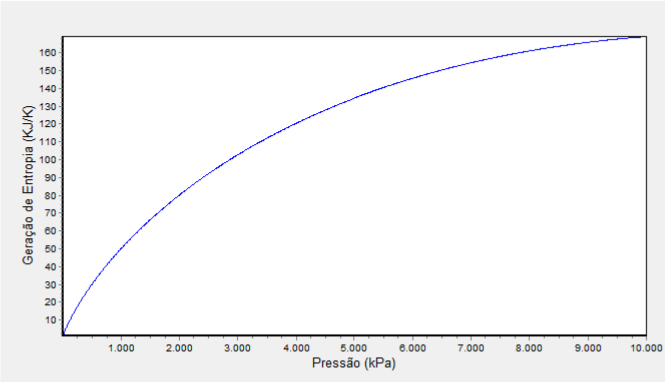
Após isso fazer os gráficos:



■



■



■