

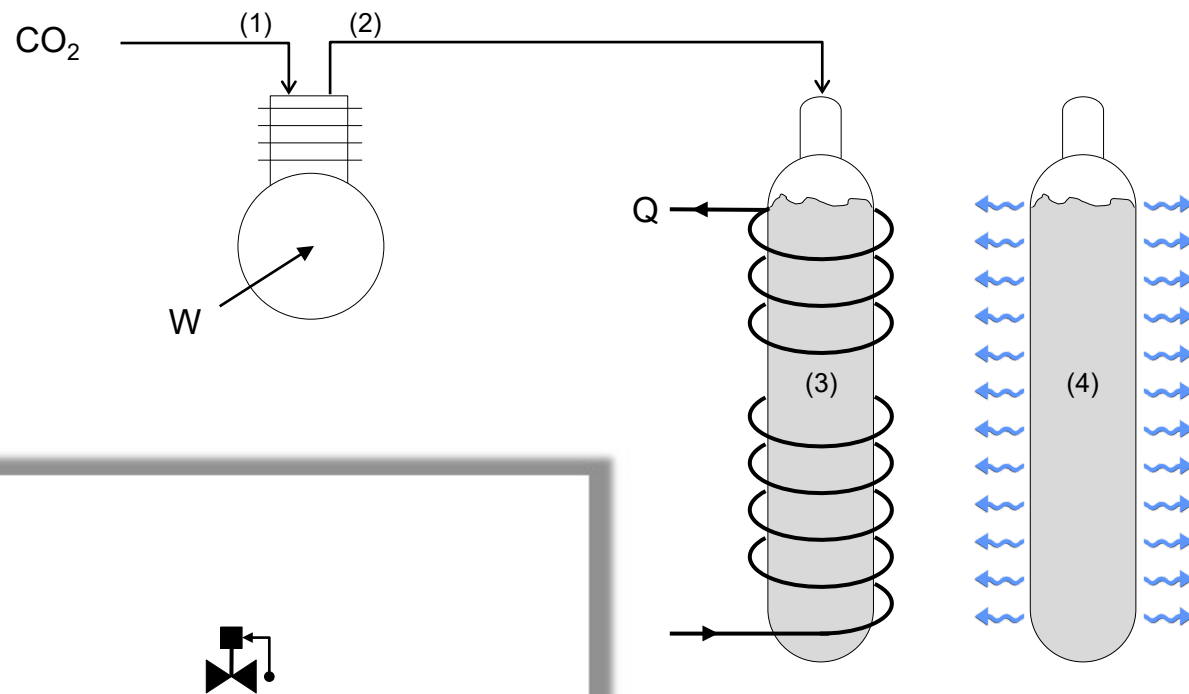
EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

Módulo: TERMODINÂMICA

**Paulo Seleglim Jr.
Universidade de São Paulo**



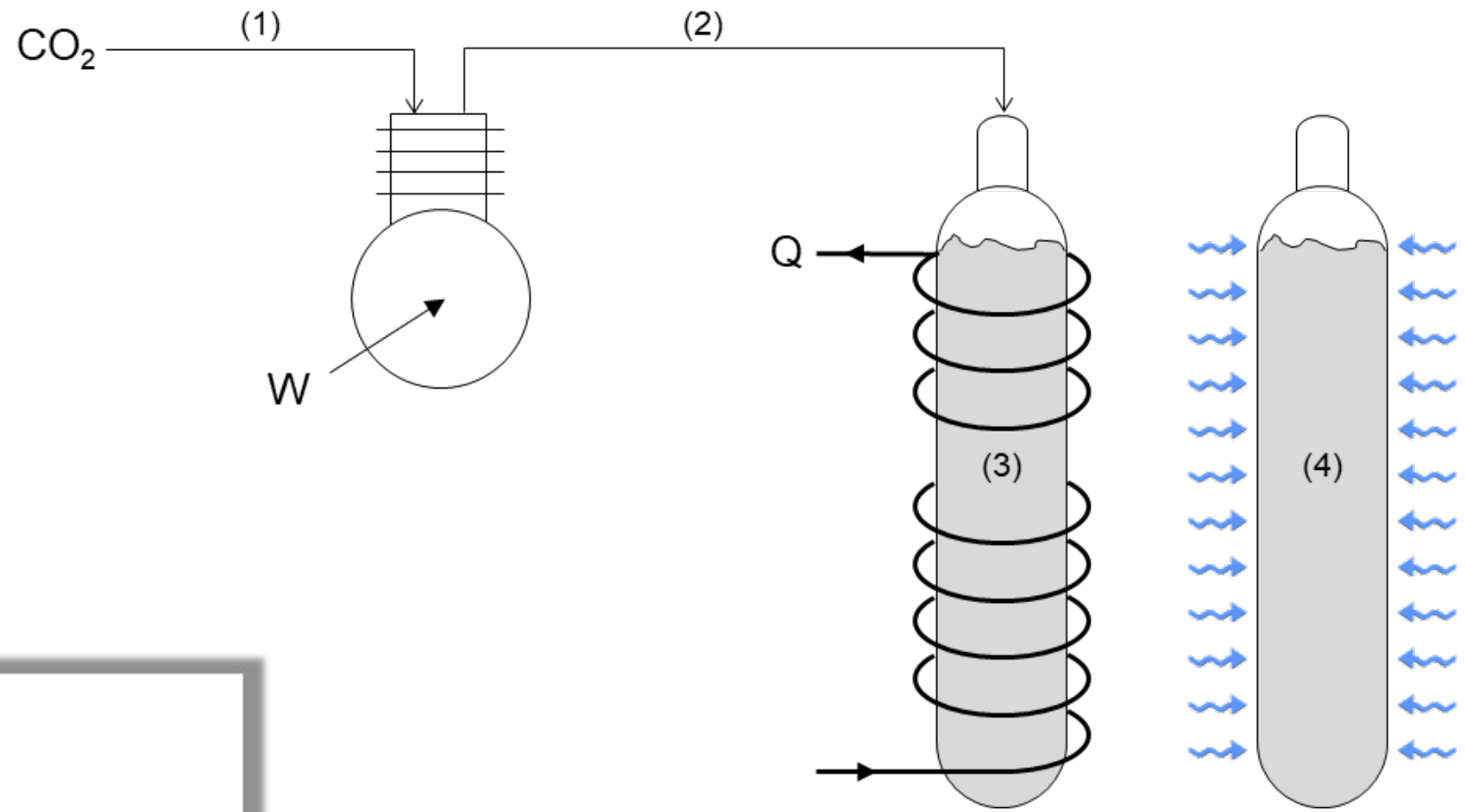
Um sistema de liquefação de CO₂, aspirado puro nas condições ambiente (1bar e 25°C) é composto por um compressor alternativo, uma serpentina de resfriamento e uma garrafa de 50 litros, conforme mostrados na figura. Após o enchimento a garrafa é retirada da serpentina e troca calor com o ambiente. O processo de compressão é ideal, i.e. sem atritos e adiabático, e a potência elétrica do compressor é de 5000W. A pressão de enchimento da garrafa é de 50bar e sua temperatura é mantida constante na condição de saturação correspondente.



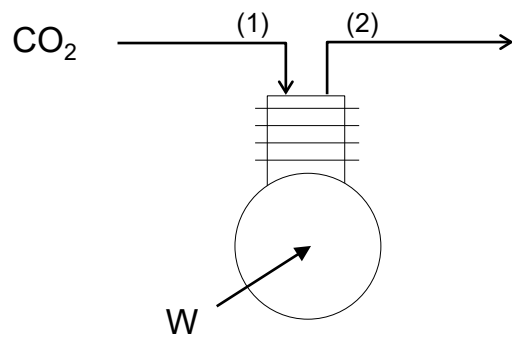
Represente as transformações no diagrama de equilíbrio T-s indicando cada um dos estados e calcule o seguinte:

- 1) A temperatura do CO₂ após a compressão (°C)
- 2) A densidade do CO₂ após a compressão (kg/m³)
- 3) A temperatura do CO₂ na garrafa (°C)
- 4) A densidade do CO₂ liquefeito na garrafa (kg/m³)
- 5) A massa de CO₂ liquefeito na garrafa (kg)
- 6) O valor absoluto da variação de entalpia do CO₂ no compressor (kJ)
- 7) O valor absoluto da variação de entalpia do CO₂ no arrefecimento (kJ)
- 8) A vazão mássica de CO₂ (kg/s)
- 9) A potência de arrefecimento (W)
- 10) O tempo necessário para encher a garrafa de líquido (minutos)
- 11) A pressão na garrafa após entrar em equilíbrio térmico com o ambiente (bar)

ENCHIMENTO DE UMA GARRAFA COM CO2 LIQUEFEITO



Um sistema de liquefação de CO₂, aspirado puro nas condições ambiente (1bar e 25°C) é composto por um compressor alternativo, uma serpentina de resfriamento e uma garrafa de 50 litros, conforme mostrados na figura. Após o enchimento a garrafa é retirada da serpentina e troca calor com o ambiente. O processo de compressão é ideal, i.e. sem atritos e adiabático, e a potência elétrica do compressor é de 5000W....

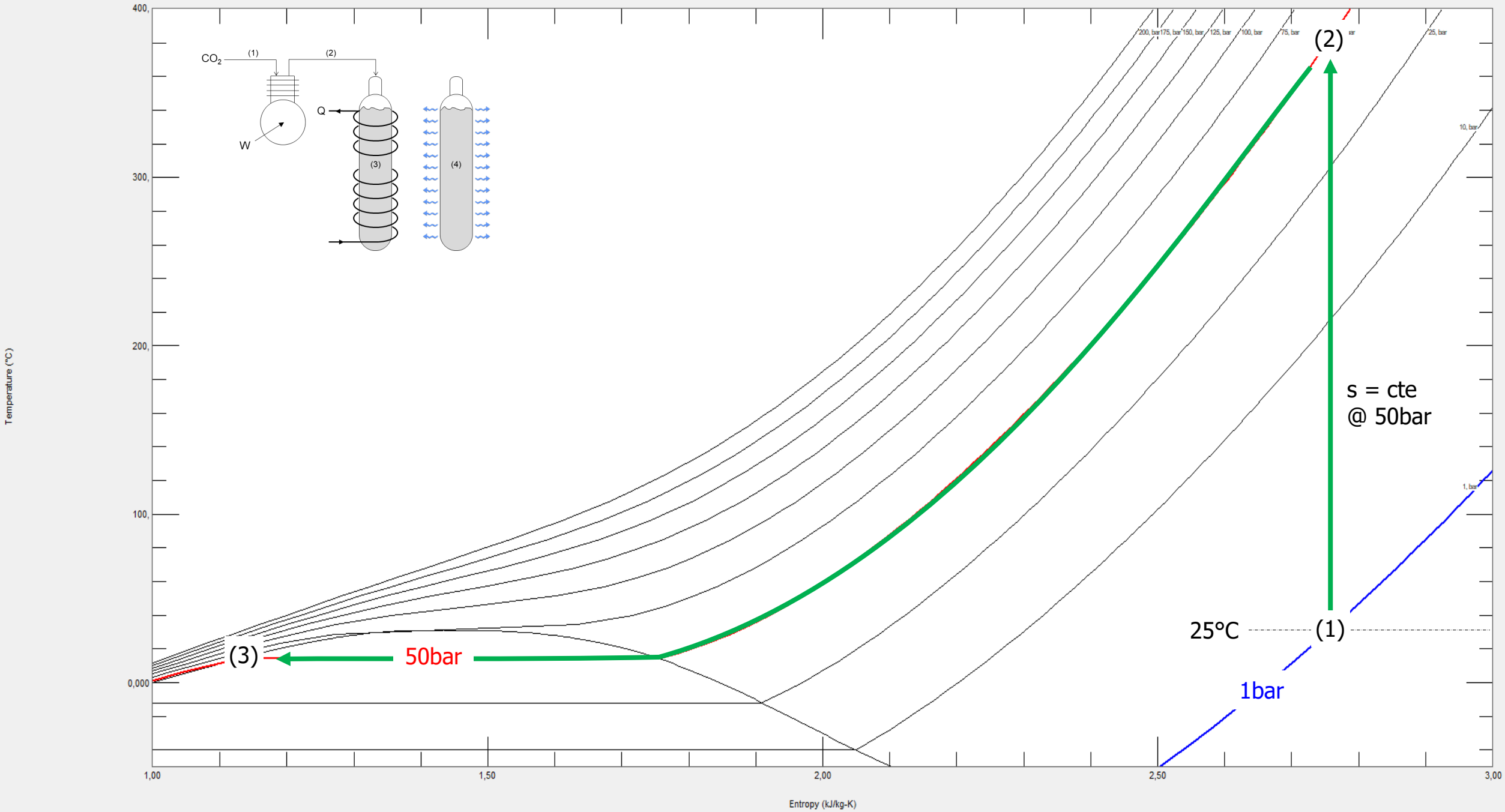


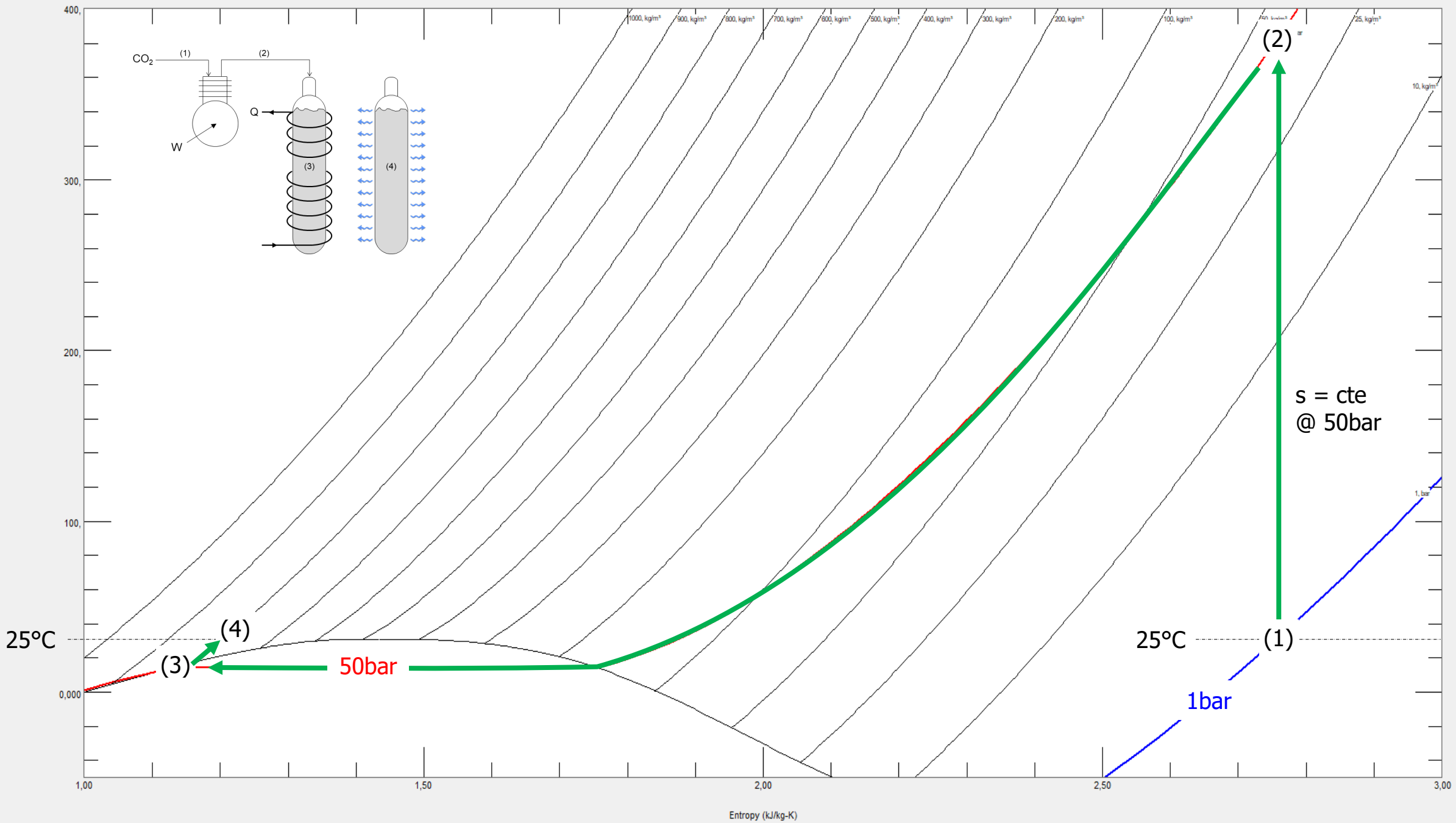
$$ideal \rightarrow s = cte \xrightarrow{GP} P \cdot v^k = cte, k = C_P / C_v$$

$$real \rightarrow s \neq cte \xrightarrow{real} P \cdot v^n = cte \left. \vphantom{P \cdot v^n = cte} \right\} \begin{array}{l} n \\ par. politrópicos \end{array}$$

$$C_v \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_{v=cte}$$

$$C_P \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_{P=cte}$$





REFPROP

miniREFPROP - NIST Reference Fluid Properties

File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help Cautions

3: carbon dioxide: Specified state points

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
1	25,000	1,0000	1,7842	0,56047	505,85	2,7393	Superheated
2	372,31	50,000	41,229	0,024255	840,56	2,7393	Superheated
3	25,000	106,30	827,32	0,0012087	254,91	1,1638	Subcooled
4							

4: carbon dioxide: Saturation points (at equilibrium)

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Liquid Density (kg/m³)	Vapor Density (kg/m³)	Liquid Volume (m³/kg)	Vapor Volume (m³/kg)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
1	14,284	50,000	827,32	156,67	0,0012087	0,0063827	237,87	417,66	1,1289	1,7544
2										

1) A temperatura do CO2 após a compressão (°C)

$$T_2 = 372,31 \text{ °C}$$

2) A densidade do CO2 após a compressão (kg/m3)

$$\rho_2 = 41,229 \text{ kg/m}^3$$

3) A temperatura do CO2 na garrafa (°C)

$$T_3 = 14,284 \text{ °C}$$

4) A densidade do CO2 liquefeito na garrafa (kg/m3)

$$\rho_3 = 827,32 \text{ °C}$$

5) A massa de CO2 liquefeito na garrafa (kg)

$$m = \rho_3 \cdot V = 827,32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{50 \text{ l}}{1000 \frac{\text{l}}{\text{m}^3}} = 41,366 \text{ kg}$$

miniREFPROP - NIST Reference Fluid Properties

File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help Cautions

3: carbon dioxide: Specified state points

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
1	25,000	1,0000	1,7842	0,56047	505,85	2,7393	Superheated
2	372,31	50,000	41,229	0,024255	840,56	2,7393	Superheated
3	25,000	106,30	827,32	0,0012087	254,91	1,1638	Subcooled
4							

4: carbon dioxide: Saturation points (at equilibrium)

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Liquid Density (kg/m³)	Vapor Density (kg/m³)	Liquid Volume (m³/kg)	Vapor Volume (m³/kg)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
1	14,284	50,000	827,32	156,67	0,0012087	0,0063827	237,87	417,66	1,1289	1,7544
2										

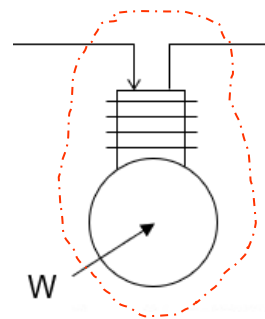
6) O valor absoluto da variação de entalpia do CO2 no compressor (kJ)

$$m \cdot |h_2 - h_1| = 41,366 \cdot |840,56 - 505,85| = 13845,9 \text{ kJoules}$$

7) O valor absoluto da variação de entalpia do CO2 no arrefecimento (kJ)

$$m \cdot |h_3 - h_2| = 41,366 \cdot |237,87 - 840,56| = 24931,4 \text{ kJoules}$$

8) A vazão mássica de CO2 (kg/s)



$$Q - W = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$\dot{m} = \frac{W}{h_1 - h_2} = \frac{-5000/1000}{505,85 - 840,56}$$

$$\dot{m} = 0,01494 \text{ kg/s}$$

miniREFPROP - NIST Reference Fluid Properties

File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help Cautions

3: carbon dioxide: Specified state points

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
1	25,000	1,0000	1,7842	0,56047	505,85	2,7393	Superheated
2	372,31	50,000	41,229	0,024255	840,56	2,7393	Superheated
3	25,000	106,30	827,32	0,0012087	254,91	1,1638	Subcooled
4							

4: carbon dioxide: Saturation points (at equilibrium)

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Liquid Density (kg/m³)	Vapor Density (kg/m³)	Liquid Volume (m³/kg)	Vapor Volume (m³/kg)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
1	14,284	50,000	827,32	156,67	0,0012087	0,0063827	237,87	417,66	1,1289	1,7544
2										

9) A potência de arrefecimento (W)

$$Q - W = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) = \dots$$

$$= 0,01494 \cdot |237,87 - 840,56| = -9,0 \text{ kW}$$

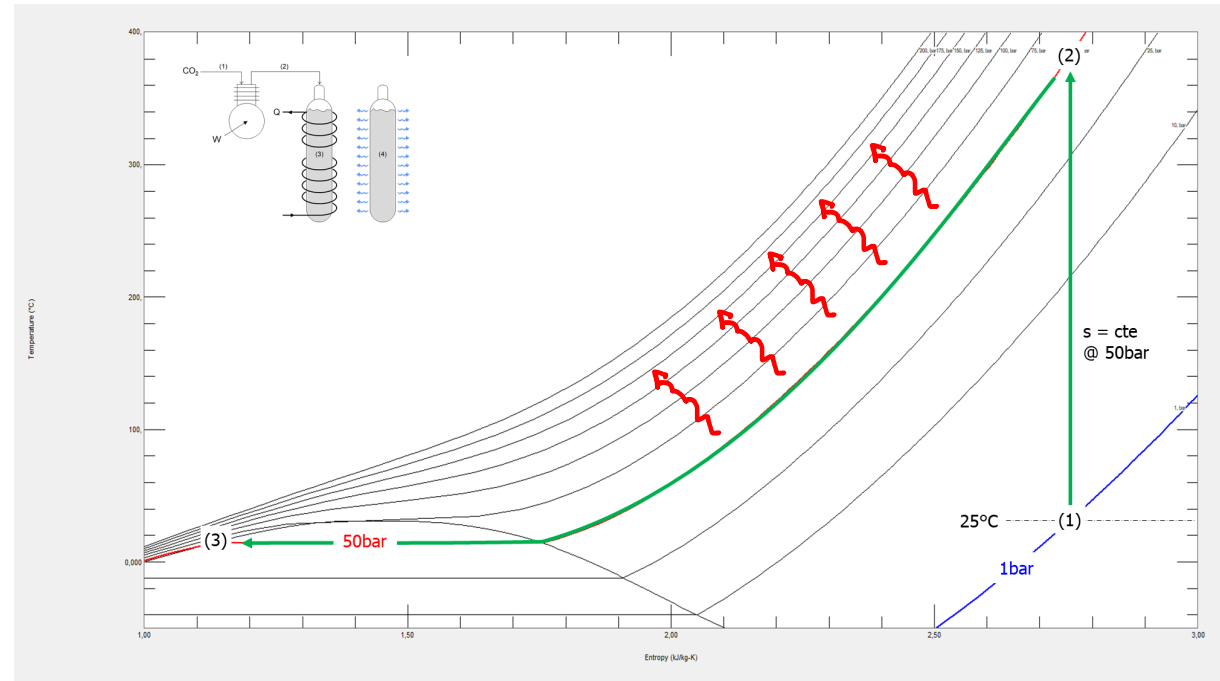
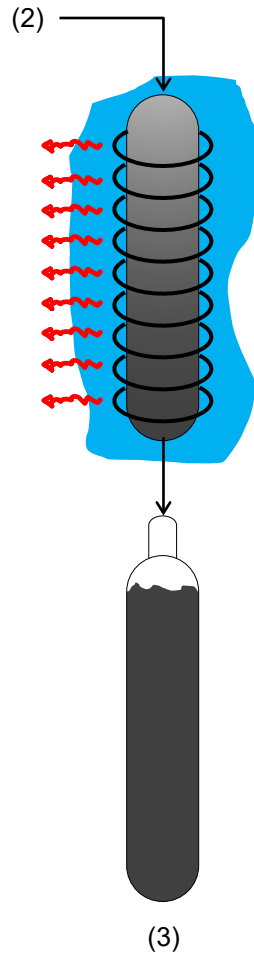
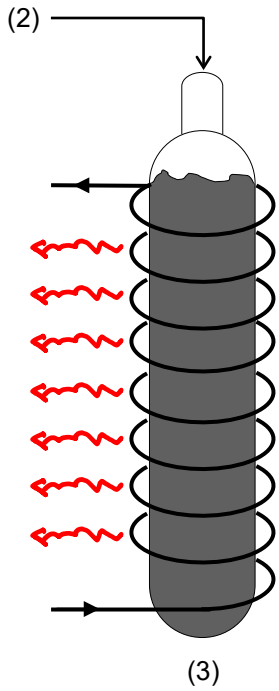
10) O tempo necessário para encher a garrafa de líquido (minutos)

$$T = \frac{M}{\dot{m}} = \frac{41,3658}{0,01494} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 46,153 \text{ min}$$

11) A pressão na garrafa após entrar em equilíbrio térmico com o ambiente (bar)

$$P_4 = 106,30 \text{ bar}$$

“PLUS A MAIS”: transferência de entropia pelo fluxo de calor



$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum_k \dot{m}_{e,k} \cdot s_{e,k} - \sum_k \dot{m}_{s,k} \cdot s_{s,k} + \dot{S}_{gen}$$

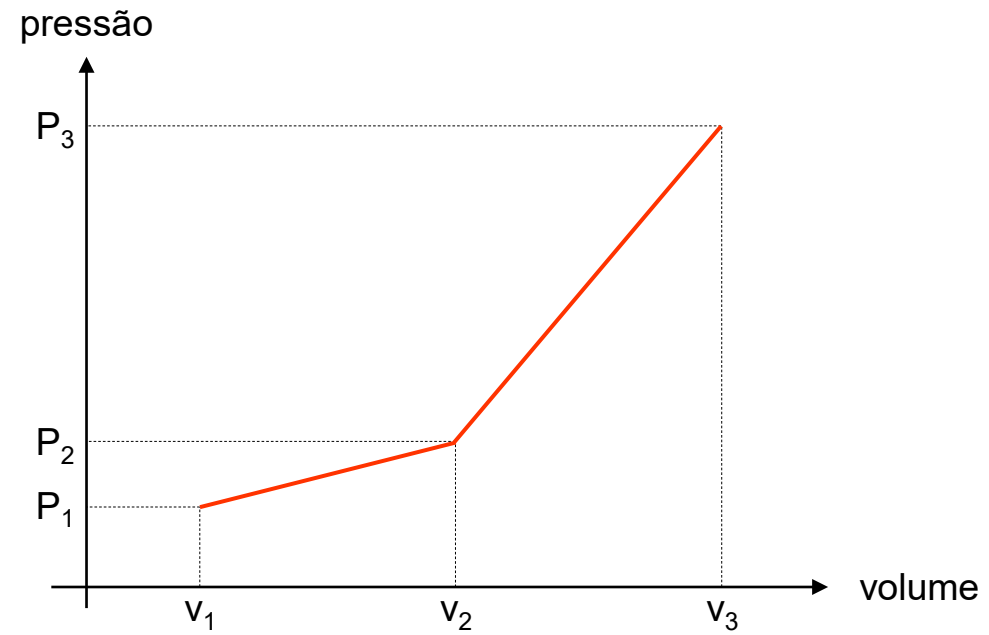
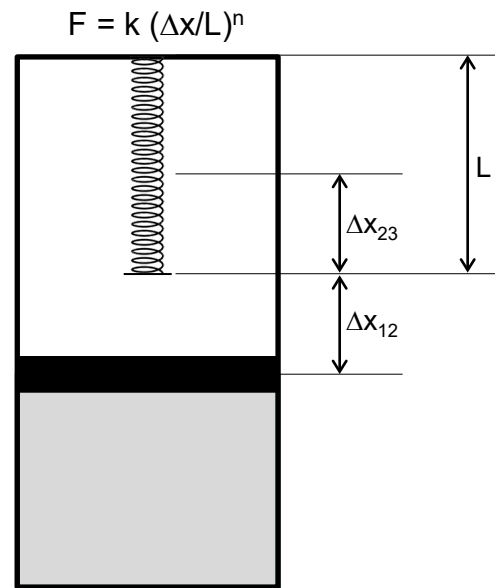
EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

Módulo: TERMODINÂMICA

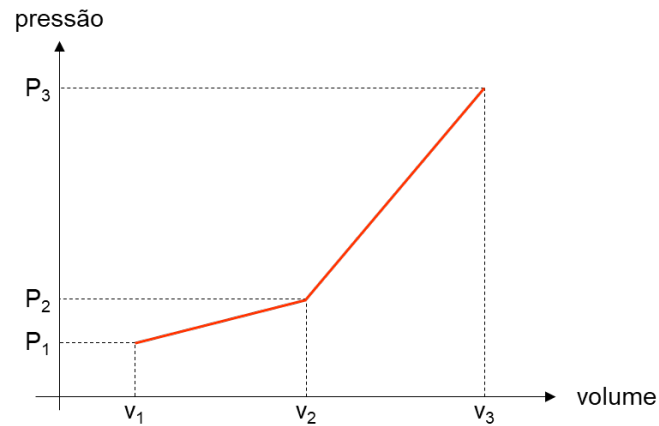
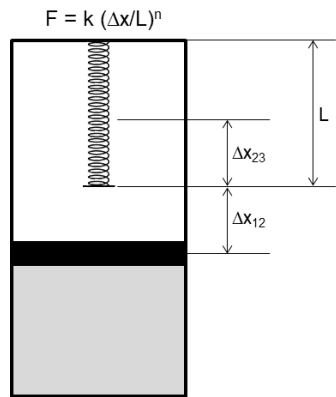
**Paulo Seleglim Jr.
Universidade de São Paulo**



SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA (DUPLA AÇÃO)



Um sistema pistão-cilindro contendo 50 litros de nitrogênio a 25 °C opera no interior de uma câmara de vácuo. A pressão interna é definida pelo peso do êmbolo, cuja massa e diâmetro são respectivamente iguais a 80 kg e 10 cm. O cilindro é aquecido lentamente até que o êmbolo se desloque 5 cm onde ele está na eminência de tocar uma mola não linear. O aquecimento continua até que a mola seja comprimida de 7cm. A relação entre a força exercida (F) e sua deformação (Δx) é dada por $F = k (\Delta x/L)^n$, em que os parâmetros são definidos como $k = 2500 \text{ N}$, $n = 1,7$ e $L = 10 \text{ cm}$.



Calcule o seguinte para a primeira fase de aquecimento:

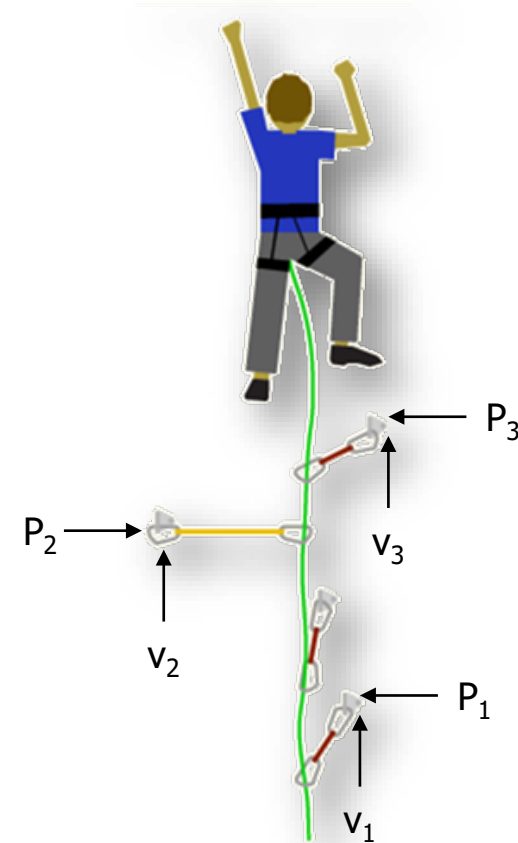
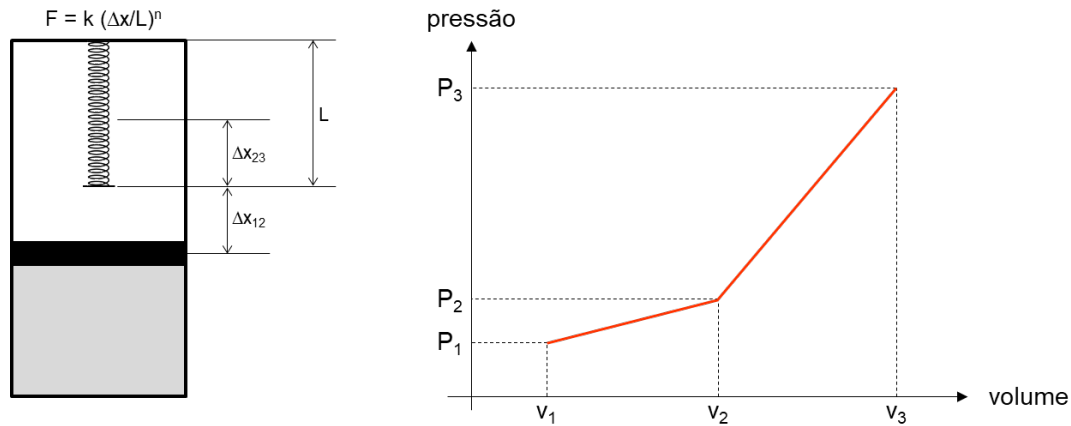
- 1) A massa de nitrogênio (em kg)
- 2) O volume específico do nitrogênio (em m³/kg)
- 3) A temperatura do nitrogênio (em °C)
- 4) O trabalho executado sobre o êmbolo (em J)
- 5) O calor absorvido (em J)

Calcule o seguinte para a segunda fase de aquecimento:

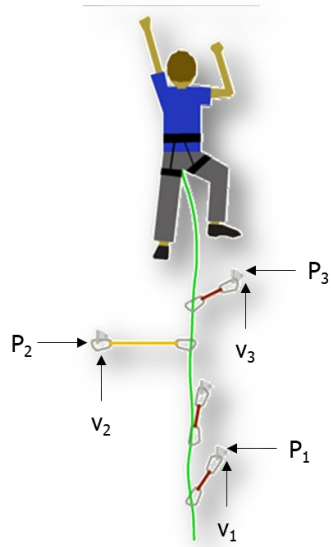
- 6) A pressão do nitrogênio (em bar)
- 7) A temperatura do nitrogênio (em °C)
- 8) O trabalho adicional executado sobre o êmbolo+mola (em J)
- 9) O calor adicional absorvido (em J)

Um sistema pistão-cilindro contendo 50 litros de nitrogênio a 25 °C opera no interior de uma câmara de vácuo. A pressão interna é definida pelo peso do êmbolo, cuja massa e diâmetro são respectivamente iguais a 80 kg e 10 cm. O cilindro é aquecido lentamente até que o êmbolo se desloque 5 cm onde ele está na eminência de tocar uma mola não linear. O aquecimento continua até que a mola seja comprimida de 7cm. A relação entre a força exercida (F) e sua deformação (Δx) é dada por $F = k (\Delta x/L)^n$, em que os parâmetros são definidos como $k = 2500 \text{ N}$, $n = 1,7$ e $L = 10 \text{ cm}$.

FASE 0: DETERMINAÇÃO DOS ESTADOS TERMODINÂMICOS



Um sistema pistão-cilindro contendo 50 litros de nitrogênio a 25 °C opera no interior de uma câmara de vácuo. A pressão interna é definida pelo peso do êmbolo, cuja massa e diâmetro são respectivamente iguais a 80 kg e 10 cm. O cilindro é aquecido lentamente até que o êmbolo se desloque 5 cm onde ele está na eminência de tocar uma mola não linear. O aquecimento continua até que a mola seja comprimida de 7cm. A relação entre a força exercida (F) e sua deformação (Δx) é dada por $F = k (\Delta x/L)^n$, em que os parâmetros são definidos como $k = 2500 \text{ N}$, $n = 1,7$ e $L = 10 \text{ cm}$.



$$P_1 = \frac{m_{emb} \cdot g}{\pi D^2 / 4} = \frac{80 \cdot 9,81}{\pi 0,1^2 / 4} \cdot 10^{-5} = 0,999 \text{ bar}$$

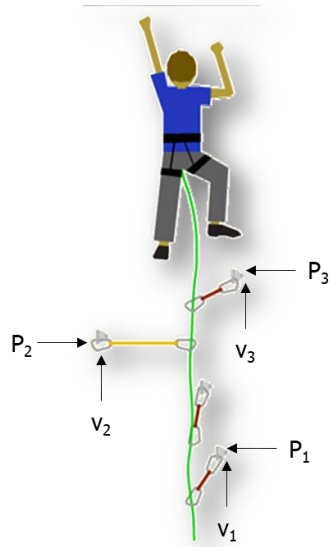
$$P_1 = P_2 = 0,999 \text{ bar}$$

$$F_{mola} = 2500 \cdot \left(\frac{7}{10}\right)^{1,7} = 1363,347 \text{ N}$$

$$P_3 = P_2 + \frac{F_{mola}}{\pi D^2 / 4} = 0,999 + \frac{1363,347}{\pi 0,1^2 / 4} \cdot 10^{-5} \frac{\text{bar}}{\text{Pa}}$$

$$P_3 = 2,735 \text{ bar}$$

Um sistema pistão-cilindro contendo 50 litros de nitrogênio a 25 °C opera no interior de uma câmara de vácuo. A pressão interna é definida pelo peso do êmbolo, cuja massa e diâmetro são respectivamente iguais a 80 kg e 10 cm. O cilindro é aquecido lentamente até que o êmbolo se desloque 5 cm onde ele está na eminência de tocar uma mola não linear. O aquecimento continua até que a mola seja comprimida de 7cm. A relação entre a força exercida (F) e sua deformação (Δx) é dada por $F = k (\Delta x/L)^n$, em que os parâmetros são definidos como $k = 2500 \text{ N}$, $n = 1,7$ e $L = 10 \text{ cm}$.



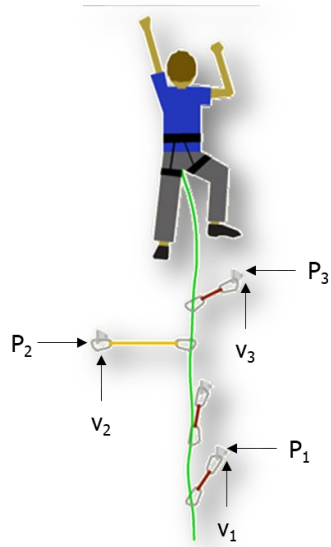
$$V_2 = V_1 + \Delta x_{12} \cdot \pi D^2 / 4$$

$$V_2 = \frac{50}{1000 \text{ m}^3/\text{l}} + \frac{5}{100 \text{ m}/\text{cm}} \cdot \pi 0,1^2 / 4$$

$$V_2 = 0,05039 \text{ m}^3$$

$$V_3 = V_2 + \Delta x_{23} \cdot \pi D^2 / 4 \quad \dots = 0,05094 \text{ m}^3$$

Um sistema pistão-cilindro contendo 50 litros de nitrogênio a 25 °C opera no interior de uma câmara de vácuo. A pressão interna é definida pelo peso do êmbolo, cuja massa e diâmetro são respectivamente iguais a 80 kg e 10 cm. O cilindro é aquecido lentamente até que o êmbolo se desloque 5 cm onde ele está na eminência de tocar uma mola não linear. O aquecimento continua até que a mola seja comprimida de 7cm. A relação entre a força exercida (F) e sua deformação (Δx) é dada por $F = k (\Delta x/L)^n$, em que os parâmetros são definidos como $k = 2500 \text{ N}$, $n = 1,7$ e $L = 10 \text{ cm}$.



$$P_1 = 0,999 \text{ bar} \quad \Rightarrow \quad v_1 = 0,88542 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_1 = 25 \text{ °C} \quad \Rightarrow \quad u_1 = 220,795 \text{ kJ/kg}$$

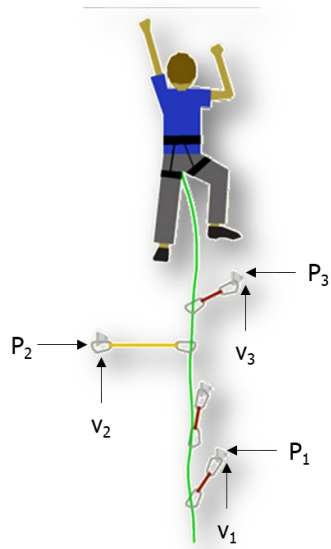
$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{l}}{0,88542} = 0,05647 \text{ kg}$$

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{0,05039 \text{ m}^3}{0,05647 \text{ kg}} = 0,89238 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_2 = 0,999 \text{ bar} \quad \Rightarrow \quad T_2 = 27,3358 \text{ °C}$$

$$v_2 = 0,89238 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \Rightarrow \quad u_2 = 222,533 \text{ kJ/kg}$$

Um sistema pistão-cilindro contendo 50 litros de nitrogênio a 25 °C opera no interior de uma câmara de vácuo. A pressão interna é definida pelo peso do êmbolo, cuja massa e diâmetro são respectivamente iguais a 80 kg e 10 cm. O cilindro é aquecido lentamente até que o êmbolo se desloque 5 cm onde ele está na eminência de tocar uma mola não linear. O aquecimento continua até que a mola seja comprimida de 7cm. A relação entre a força exercida (F) e sua deformação (Δx) é dada por $F = k (\Delta x/L)^n$, em que os parâmetros são definidos como $k = 2500 \text{ N}$, $n = 1,7$ e $L = 10 \text{ cm}$.

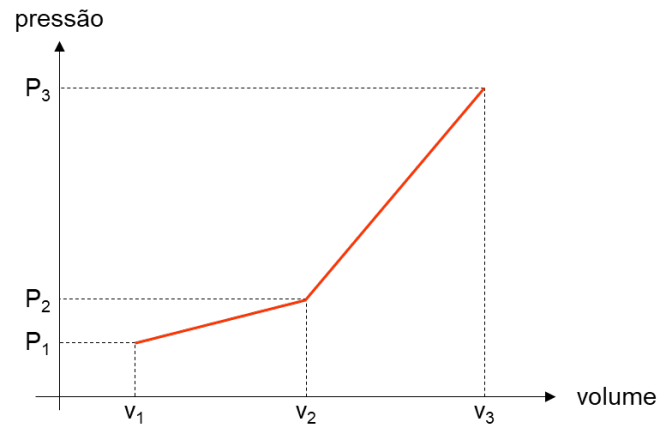
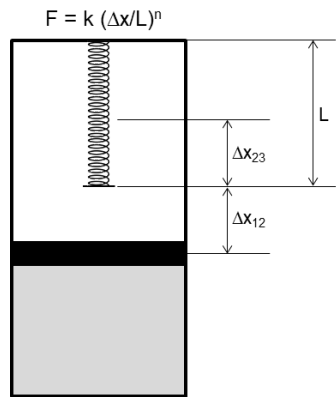


$$v_3 = \frac{V_2}{m} = \frac{0,05094 \text{ m}^3}{0,05647 \text{ kg}} = 0,90211 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_3 = 2,735 \text{ bar} \quad \Rightarrow \quad T_3 = 557,286 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_3 = 0,90211 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \Rightarrow \quad u_3 = 634,254 \text{ kJ/kg}$$

Um sistema pistão-cilindro contendo 50 litros de nitrogênio a 25 °C opera no interior de uma câmara de vácuo. A pressão interna é definida pelo peso do êmbolo, cuja massa e diâmetro são respectivamente iguais a 80 kg e 10 cm. O cilindro é aquecido lentamente até que o êmbolo se desloque 5 cm onde ele está na eminência de tocar uma mola não linear. O aquecimento continua até que a mola seja comprimida de 7cm. A relação entre a força exercida (F) e sua deformação (Δx) é dada por $F = k (\Delta x/L)^n$, em que os parâmetros são definidos como $k = 2500 \text{ N}$, $n = 1,7$ e $L = 10 \text{ cm}$.



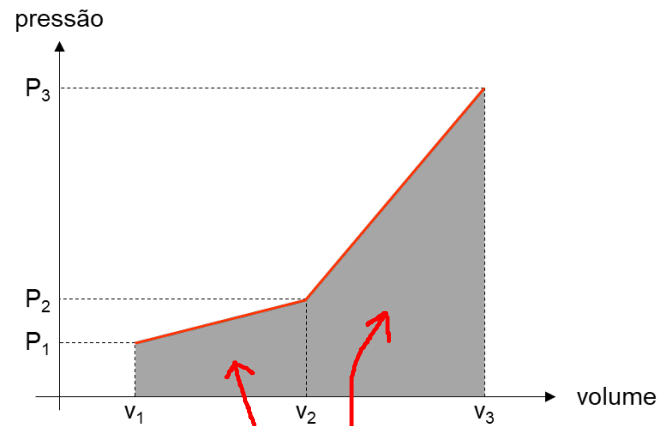
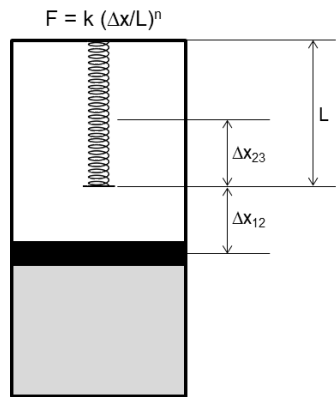
Calcule o seguinte para a primeira fase de aquecimento:

- 1) A massa de nitrogênio (em kg) = 0,05647 kg
- 2) O volume específico do nitrogênio (em m³/kg) = 0,8924 m³/kg
- 3) A temperatura do nitrogênio (em °C) = 27,34 °C
- 4) O trabalho executado sobre o êmbolo (em J)
- 5) O calor absorvido (em J)

Calcule o seguinte para a segunda fase de aquecimento:

- 6) A pressão do nitrogênio (em bar) = 2,735 bar
- 7) A temperatura do nitrogênio (em °C) = 557,28 °C
- 8) O trabalho adicional executado sobre o êmbolo+mola (em J)
- 9) O calor adicional absorvido (em J)

Um sistema pistão-cilindro contendo 50 litros de nitrogênio a 25 °C opera no interior de uma câmara de vácuo. A pressão interna é definida pelo peso do êmbolo, cuja massa e diâmetro são respectivamente iguais a 80 kg e 10 cm. O cilindro é aquecido lentamente até que o êmbolo se desloque 5 cm onde ele está na eminência de tocar uma mola não linear. O aquecimento continua até que a mola seja comprimida de 7cm. A relação entre a força exercida (F) e sua deformação (Δx) é dada por $F = k (\Delta x/L)^n$, em que os parâmetros são definidos como $k = 2500 \text{ N}$, $n = 1,7$ e $L = 10 \text{ cm}$.



Trabalho
fornecido pelo
nitrogênio = ...
... = Trabalho
mecânico (mola
+ êmbolo)

Calcule o seguinte para a primeira fase de aquecimento:

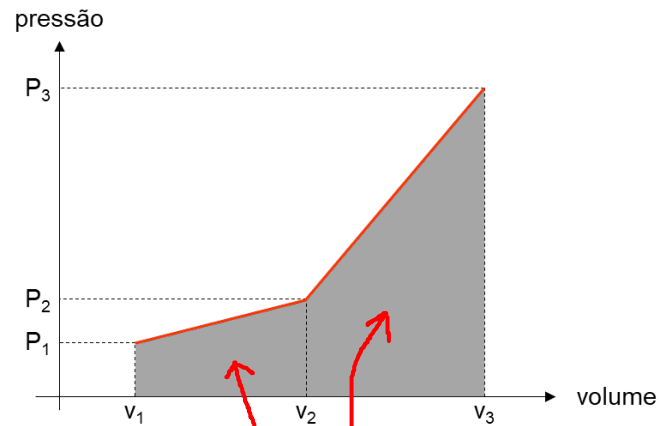
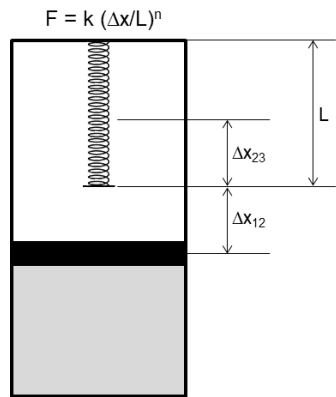
- 1) A massa de nitrogênio (em kg) = 0,05647 kg
- 2) O volume específico do nitrogênio (em m³/kg) = 0,8924 m³/kg
- 3) A temperatura do nitrogênio (em °C) = 27,34 °C
- 4) **O trabalho executado sobre o êmbolo** (em J)
- 5) O calor absorvido (em J)

Calcule o seguinte para a segunda fase de aquecimento:

- 6) A pressão do nitrogênio (em bar) = 2,735 bar
- 7) A temperatura do nitrogênio (em °C) = 557,28 °C
- 8) **O trabalho adicional executado sobre o êmbolo+mola** (em J)
- 9) O calor adicional absorvido (em J)

$$W_{23} = \int_{V_2}^{V_3} P dV = F_{emb} \Delta x_{23} + \int_{x_2}^{x_3} F_{mola} dx + \int_{V_{\emptyset,2}}^{V_{\emptyset,3}} P_{amb} dV$$

Um sistema pistão-cilindro contendo 50 litros de nitrogênio a 25 °C opera no interior de uma câmara de vácuo. A pressão interna é definida pelo peso do êmbolo, cuja massa e diâmetro são respectivamente iguais a 80 kg e 10 cm. O cilindro é aquecido lentamente até que o êmbolo se desloque 5 cm onde ele está na eminência de tocar uma mola não linear. O aquecimento continua até que a mola seja comprimida de 7cm. A relação entre a força exercida (F) e sua deformação (Δx) é dada por $F = k (\Delta x/L)^n$, em que os parâmetros são definidos como $k = 2500 \text{ N}$, $n = 1,7$ e $L = 10 \text{ cm}$.



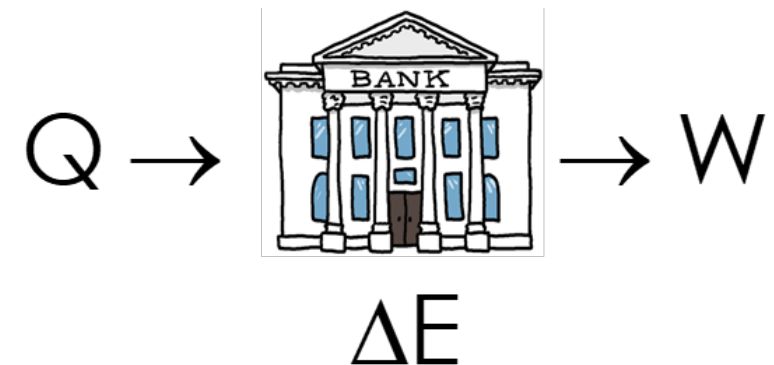
Trabalho
fornecido pelo
nitrogênio = ...
... = Trabalho
absorvido pela
mola

$$W_{12} = P_{1=2} \cdot (V_2 - V_1) = \dots = 39,24 \text{ J}$$

$$Q_{12} - W_{12} = \Delta E_{12} \dots = 137,356 \text{ J}$$

$$W_{23} = m_{emb} g \Delta x_{23} + \int_0^{7 \text{ cm}} k \left(\frac{\Delta x}{L} \right)^n dx = \dots 90,282 \text{ J}$$

$$Q_{23} - W_{23} = \Delta E_{23} \dots = 23340,3 \text{ J}$$



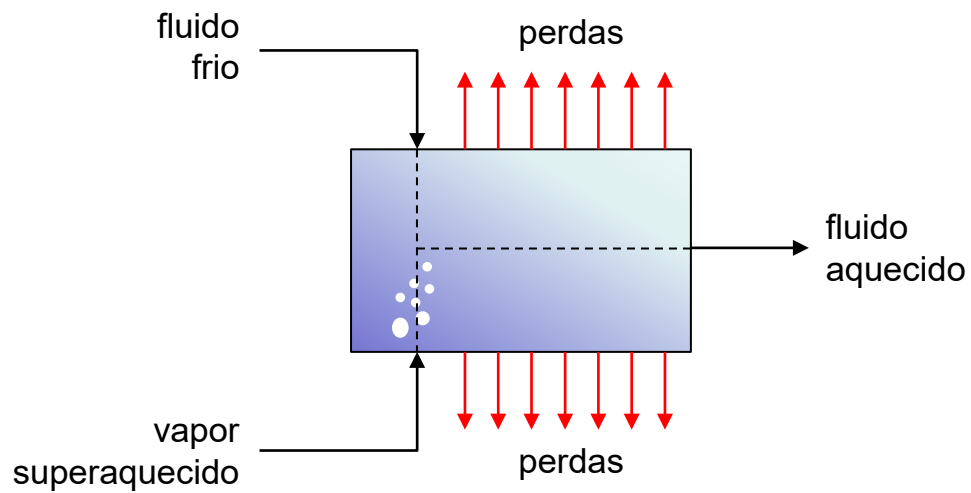
EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

Módulo: TERMODINÂMICA

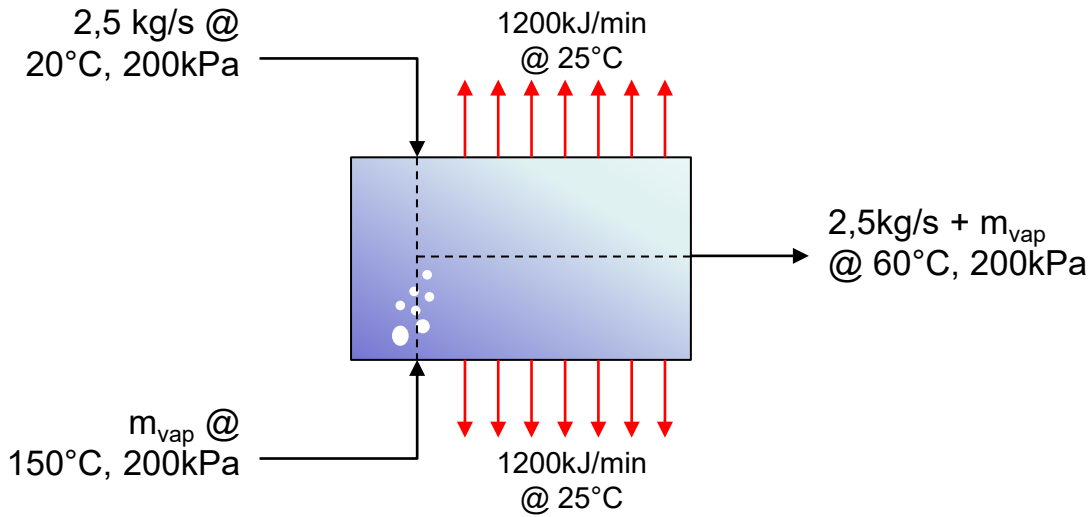
**Paulo Seleglim Jr.
Universidade de São Paulo**



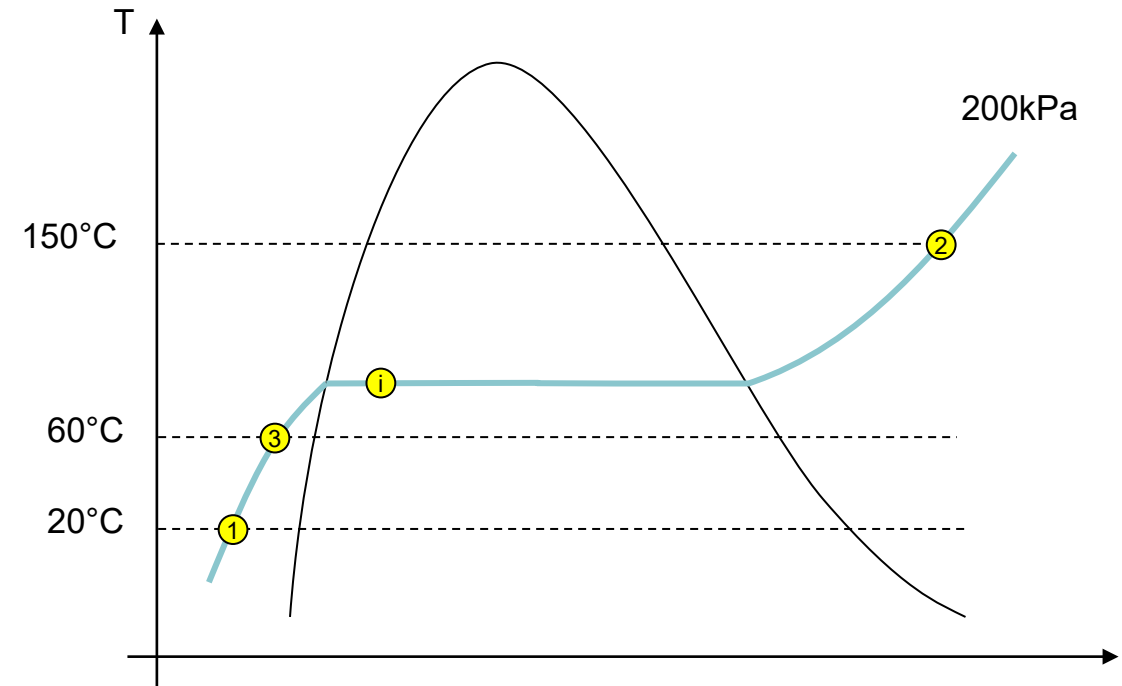
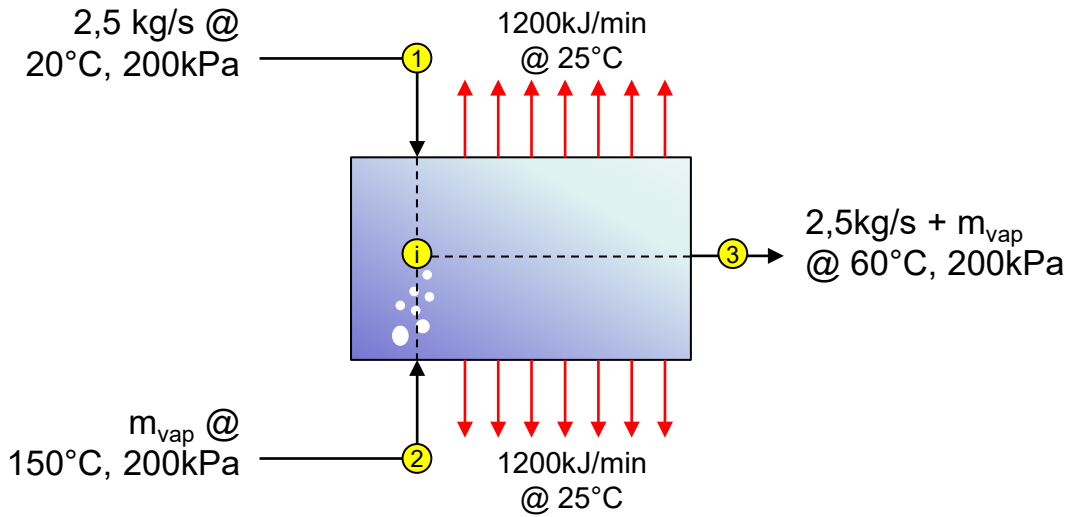
AQUECIMENTO POR BORBOTAGEM (INJEÇÃO DE VAPOR)



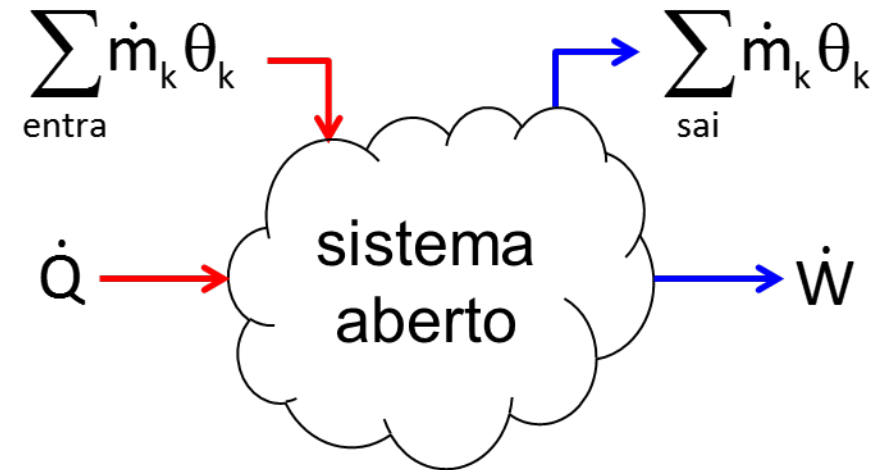
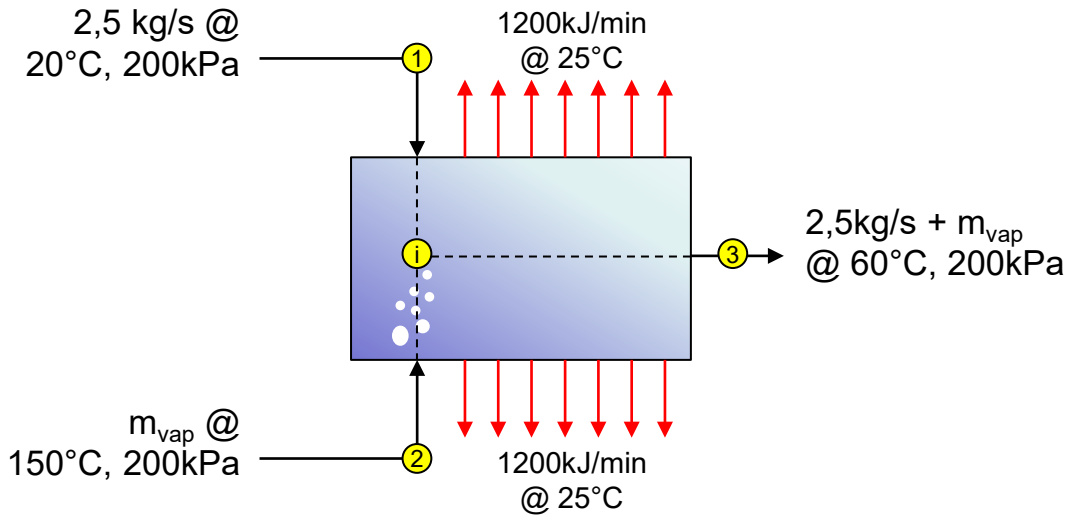
7.164: Água líquida a 200kPa e 20°C é aquecida em uma câmara pela mistura com uma corrente de vapor superaquecido a 200 kPa e 150°C (“borbotagem”). A água líquida entra na câmara com uma vazão de 2,5 kg/s, e estima-se que a câmara perca calor para o ambiente a 25°C a uma taxa de 1200 kJ/min. Considerando que a mistura sai da câmara a 200kPa e 60°C, determine: a) a vazão mássica de vapor superaquecido e b) a taxa de geração de entropia durante o processo de mistura.



7.164: Água líquida a 200kPa e 20°C é aquecida em uma câmara pela mistura com uma corrente de vapor superaquecido a 200 kPa e 150°C (“borbotagem”). A água líquida entra na câmara com uma vazão de 2,5 kg/s, e estima-se que a câmara perca calor para o ambiente a 25°C a uma taxa de 1200 kJ/min. Considerando que a mistura sai da câmara a 200kPa e 60°C, determine: a) a vazão mássica de vapor superaquecido e b) a taxa de geração de entropia durante o processo de mistura.



7.164: Água líquida a 200kPa e 20°C é aquecida em uma câmara pela mistura com uma corrente de vapor superaquecido a 200 kPa e 150°C (“borbotagem”). A água líquida entra na câmara com uma vazão de 2,5 kg/s, e estima-se que a câmara perca calor para o ambiente a 25°C a uma taxa de 1200 kJ/min. Considerando que a mistura sai da câmara a 200kPa e 60°C, determine: a) a vazão mássica de vapor superaquecido e b) a taxa de geração de entropia durante o processo de mistura.



$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\text{sai}} \dot{m}_k \theta_k - \sum_{\text{entra}} \dot{m}_k \theta_k$$

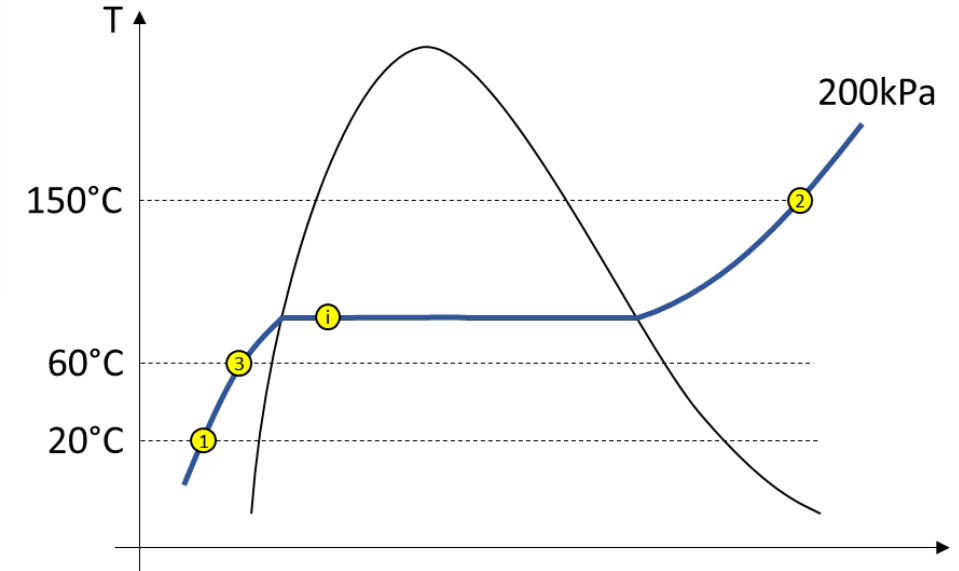
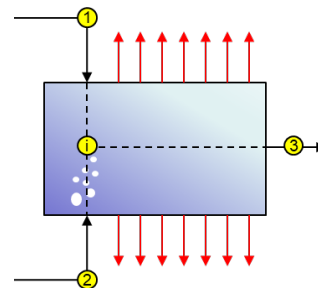
7.164: Água líquida a 200kPa e 20°C é aquecida em uma câmara pela mistura com uma corrente de vapor superaquecido a 200 kPa e 150°C (“borbotagem”). A água líquida entra na câmara com uma vazão de 2,5 kg/s, e estima-se que a câmara perca calor para o ambiente a 25°C a uma taxa de 1200 kJ/min. Considerando que a mistura sai da câmara a 200kPa e 60°C, determine: a) a vazão mássica de vapor superaquecido e b) a taxa de geração de entropia durante o processo de mistura.

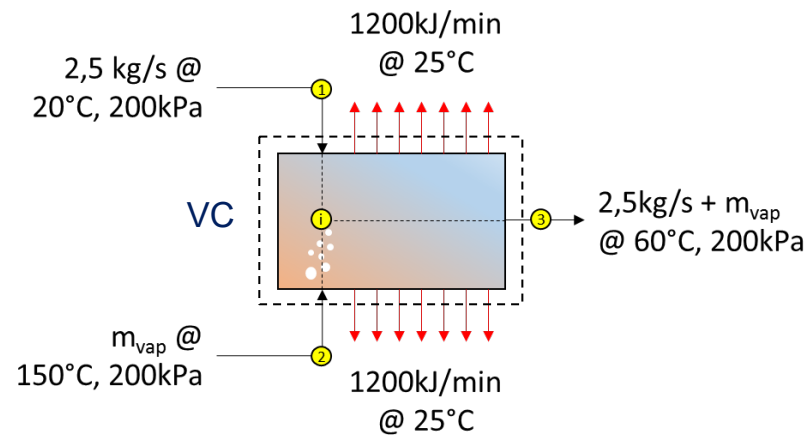
$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\text{sai}} \dot{m}_k \cdot \left(h_k + gz_k + \frac{v_k^2}{2} \right) - \sum_{\text{entra}} \dot{m}_k \cdot \left(h_k + gz_k + \frac{v_k^2}{2} \right)$$

7.164: Água líquida a 200kPa e 20°C é aquecida em uma câmara pela mistura com uma corrente de vapor superaquecido a 200 kPa e 150°C (“borbotagem”). A água líquida entra na câmara com uma vazão de 2,5 kg/s, e estima-se que a câmara perca calor para o ambiente a 25°C a uma taxa de 1200 kJ/min. Considerando que a mistura sai da câmara a 200kPa e 60°C, determine: a) a vazão mássica de vapor superaquecido e b) a taxa de geração de entropia durante o processo de mistura.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\text{sai}} \dot{m}_k \cdot (h_k + gz_k + v_k^2/2) - \sum_{\text{entra}} \dot{m}_k \cdot (h_k + gz_k + v_k^2/2)$$

	Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)	Flow Exergy (kJ/kg)
1	20,00000	200,0000	998,2523	84,10016	0,2964424	4,183743	Subcooled	158,9751
2	150,0000	200,0000	1,041824	2769,098	7,281001	2,065609	Superheated	761,5267
3	60,00000	200,0000	983,2390	251,3316	0,8311973	4,184734	Subcooled	166,7693
4								
5								



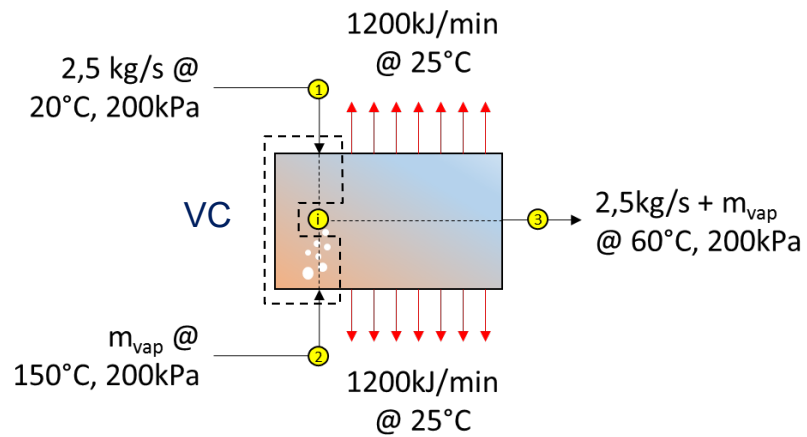


1: water: Specified state points

	Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)	Flow Exergy (kJ/kg)
1	20,00000	200,0000	998,2523	84,10016	0,2964424	4,183743	Subcooled	158,9751
2	150,0000	200,0000	1,041824	2769,098	7,281001	2,065609	Superheated	761,5267
3	60,00000	200,0000	983,2390	251,3316	0,8311973	4,184734	Subcooled	166,7693
4								
5								

$$-1200 \frac{\text{kJ}}{60\text{s}} = \left[(2,5\text{kg/s} + m_{\text{vap}}) \cdot 251,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] - \left[2,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 84,100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + m_{\text{vap}} \cdot 2769,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$m_{\text{vap}} = 0,17399 \text{ kg/s}$$



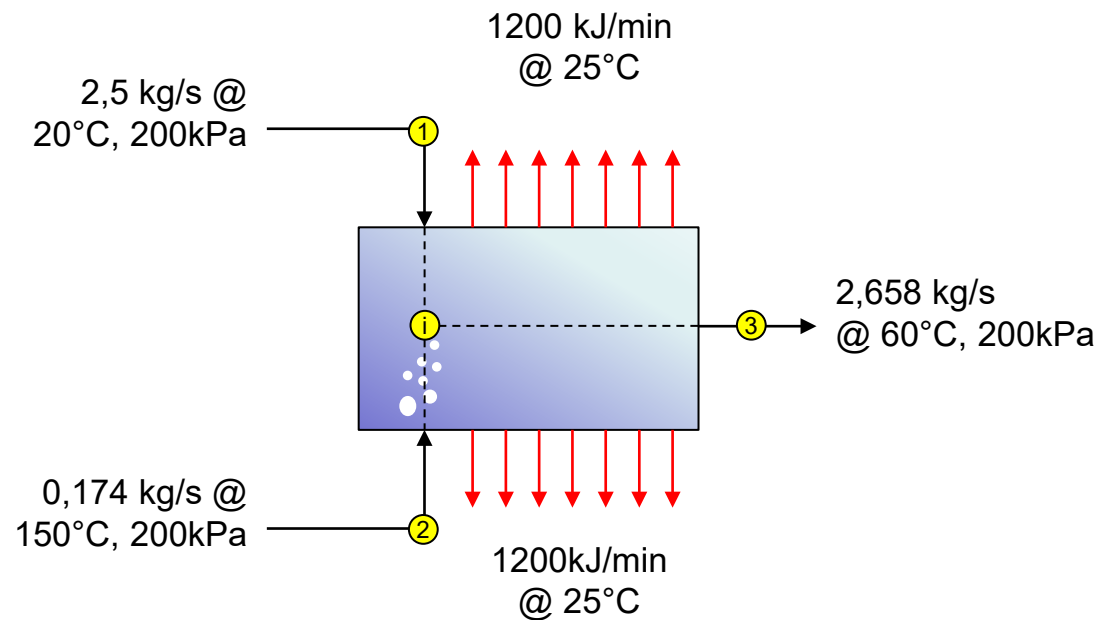
1: water: Specified state points

	Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)	Flow Exergy (kJ/kg)
1	20,00000	200,0000	998,2523	84,10016	0,2964424	4,183743	Subcooled	158,9751
2	150,0000	200,0000	1,041824	2769,098	7,281001	2,065609	Superheated	761,5267
3	60,00000	200,0000	983,2390	251,3316	0,8311973	4,184734	Subcooled	166,7693
4	61,78700	200,0000	982,3103	258,8104	0,8535861	4,185539	Subcooled	167,5729
5								

$$0 = \left(2,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + m_{\text{vap}} \right) \cdot h_i - \left(2,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 84,100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + m_{\text{vap}} \cdot 2769,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$h_i = 258,809 \text{ kJ/kg}$$

$$T_i = 61,787^\circ\text{C}$$



Fontes de irreversibilidades:

- Transferência de calor ΔT finito
- Atritos internos
- Compressão/expansão não resistida
- Mistura de substâncias em diferentes em estados
- Reações químicas espontâneas
- Passagem de corrente elétrica por uma resistência finita
- Deformação inelástica de sólidos

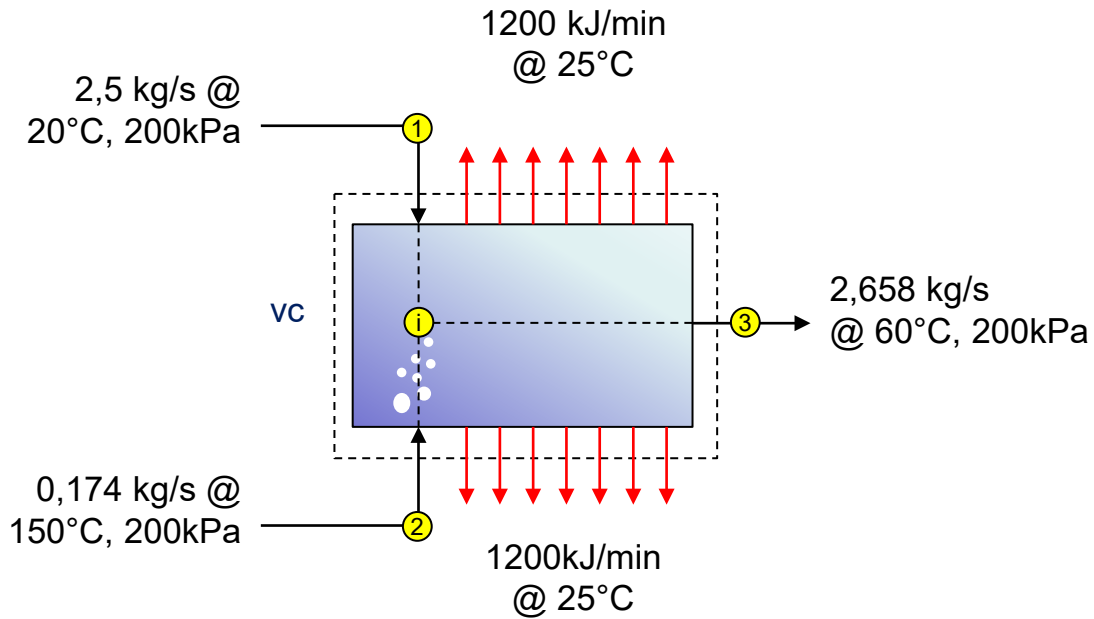
taxa de variação da entropia no vc

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \underbrace{\sum_k \dot{m}_{e,k} \cdot s_{e,k} - \sum_k \dot{m}_{s,k} \cdot s_{s,k}}_{\text{entropia associada aos fluxos de massa}} + \dot{S}_{gen}$$

↑ entropia associada aos fluxos de calor
↑ taxa de geração de entropia no vc

Fontes de irreversibilidades:

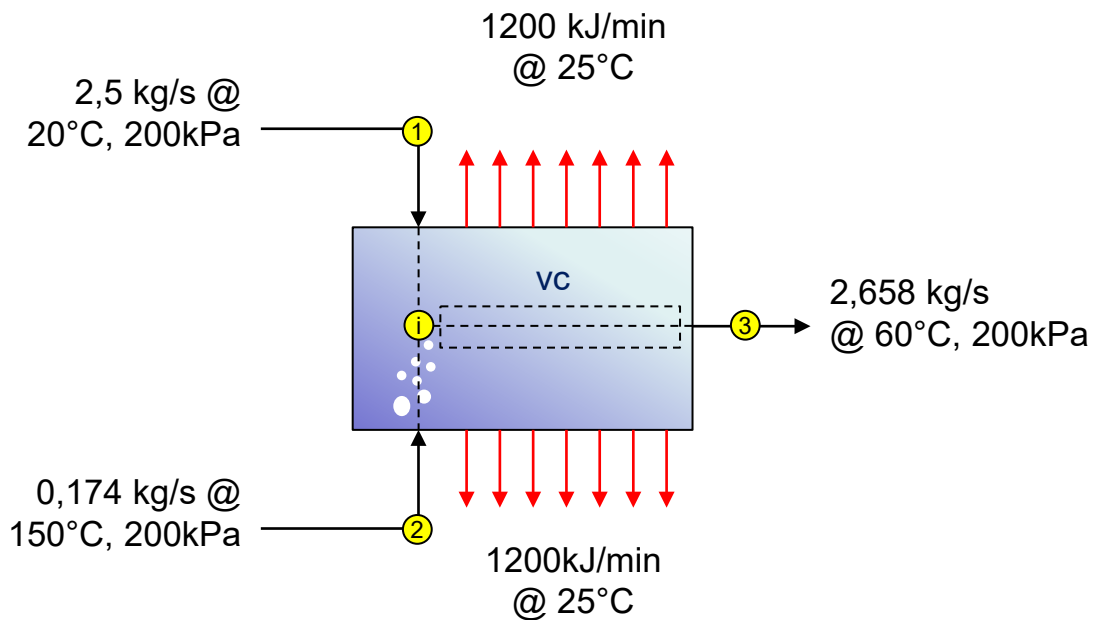
- Transferência de calor ΔT finito
- Atritos internos
- Compressão/expansão não resistida
- **Mistura de substâncias em diferentes em estados**
- Reações químicas espontâneas
- Passagem de corrente elétrica por uma resistência finita
- Deformação inelástica de sólidos



taxa de variação da entropia no vc

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \underbrace{\sum_k \dot{m}_{e,k} \cdot s_{e,k} - \sum_k \dot{m}_{s,k} \cdot s_{s,k}}_{\text{entropia associada aos fluxos de massa}} + \dot{S}_{gen}$$

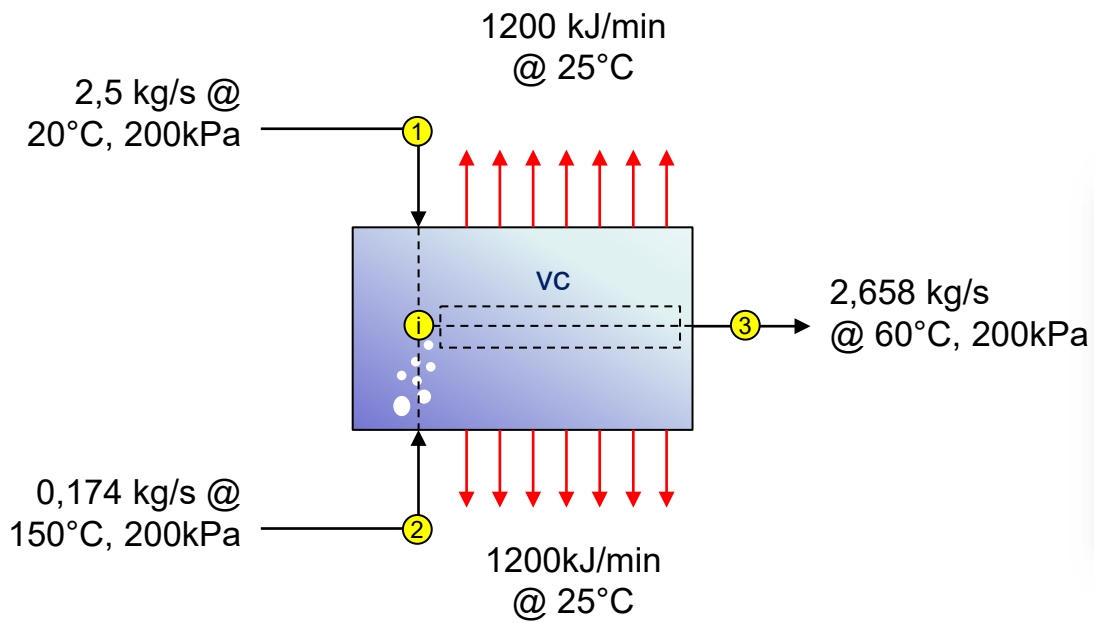
↑ entropia associada aos fluxos de calor
↑ taxa de geração de entropia no vc



Fontes de irreversibilidades:

- ~~Transferência de calor ΔT finito~~
- ~~Atritos internos~~
- ~~Compressão/expansão não resistida~~
- ~~Mistura de substâncias em diferentes em estados~~
- ~~Reações químicas espontâneas~~
- ~~Passagem de corrente elétrica por uma resistência finita~~
- ~~Deformação inelástica de sólidos~~

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum_k \dot{m}_{e,k} \cdot s_{e,k} - \sum_k \dot{m}_{s,k} \cdot s_{s,k} + \dot{S}_{gen}$$

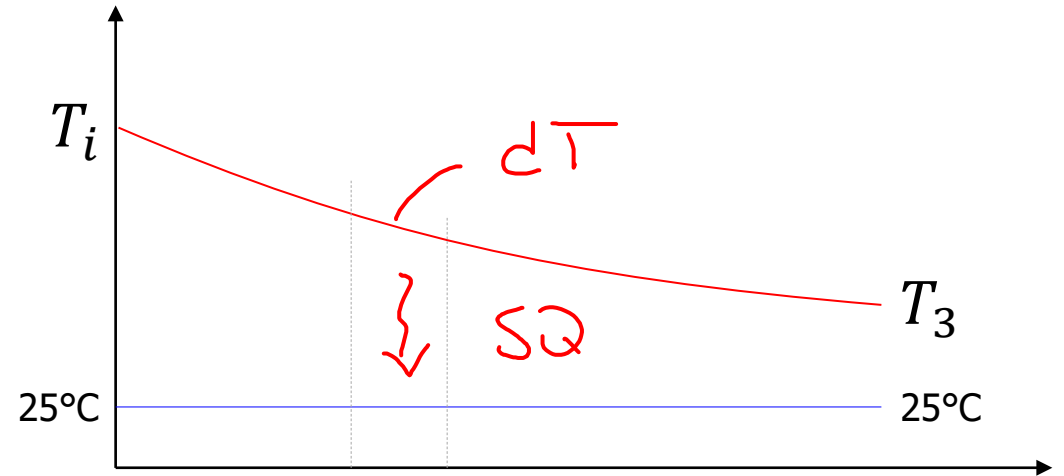
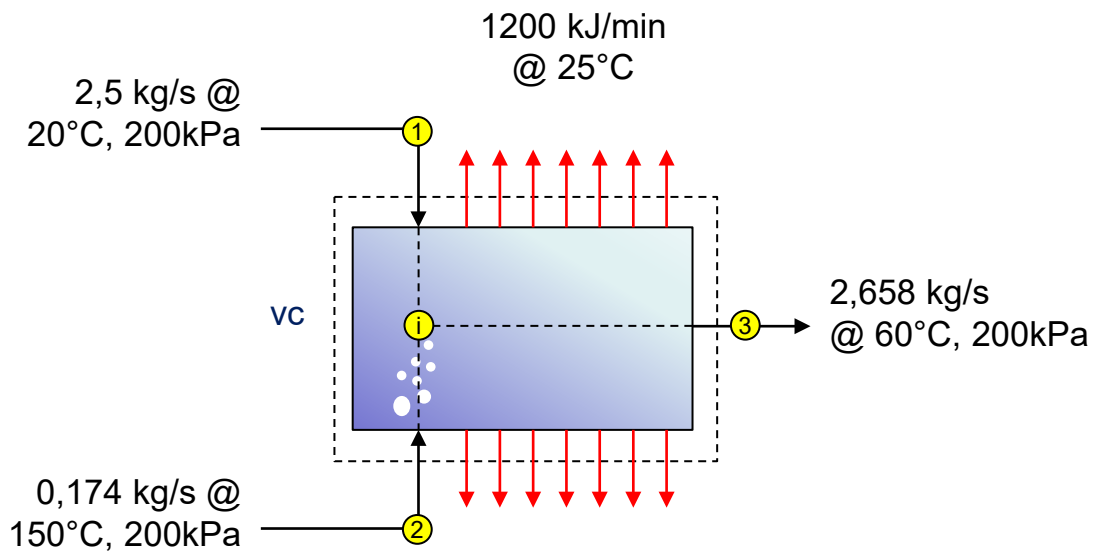


1: water: Specified state points

	Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)	Flow Exergy (kJ/kg)
1	20,00000	200,0000	998,2523	84,10016	0,2964424	4,183743	Subcooled	158,9751
2	150,0000	200,0000	1,041824	2769,098	7,281001	2,065609	Superheated	761,5267
3	60,00000	200,0000	983,2390	251,3316	0,8311973	4,184734	Subcooled	166,7693
4	61,78700	200,0000	982,3103	258,8104	0,8535861	4,185539	Subcooled	167,5729
5								

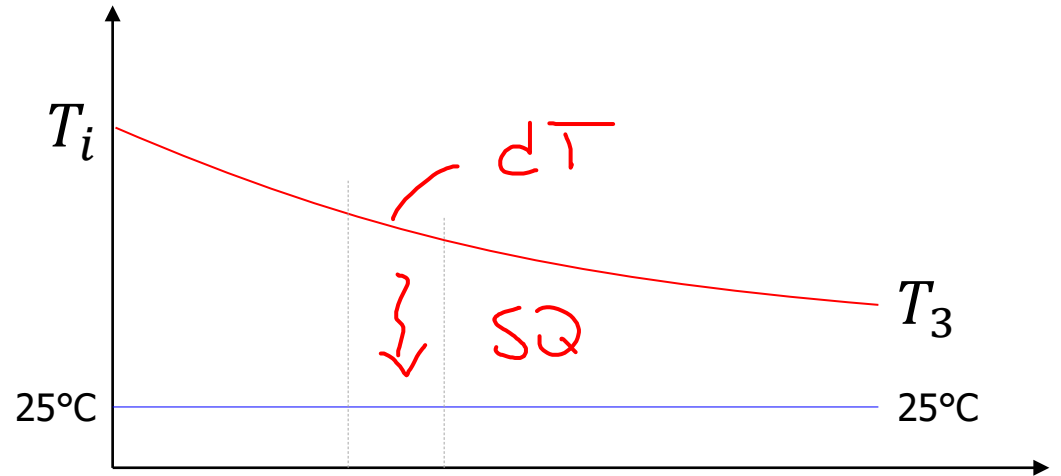
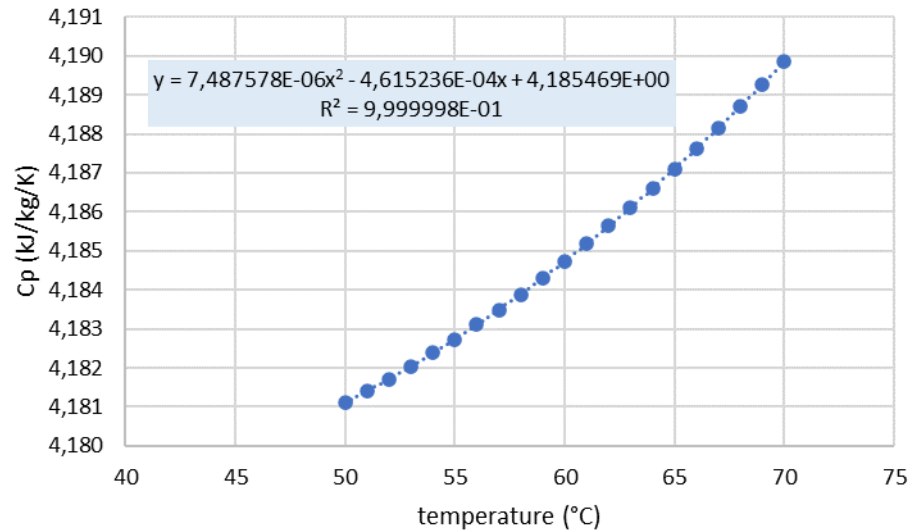
$$0 = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + (2,5 + 0,174) \cdot 0,8535861 - (2,5 + 0,174)0,8311973 = -0,059872 \text{ kW/K}$$

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum_k \dot{m}_{e,k} \cdot s_{e,k} - \sum_k \dot{m}_{s,k} \cdot s_{s,k} + \dot{S}_{gen}$$



$$\sum_{k \rightarrow \infty} \frac{\dot{Q}_k}{T_k} = \int_{T_i}^{T_3} \frac{\delta Q}{T} \Big|_{P=cte} = \int_{T_i}^{T_3} \frac{Cp(T)}{T} dT$$

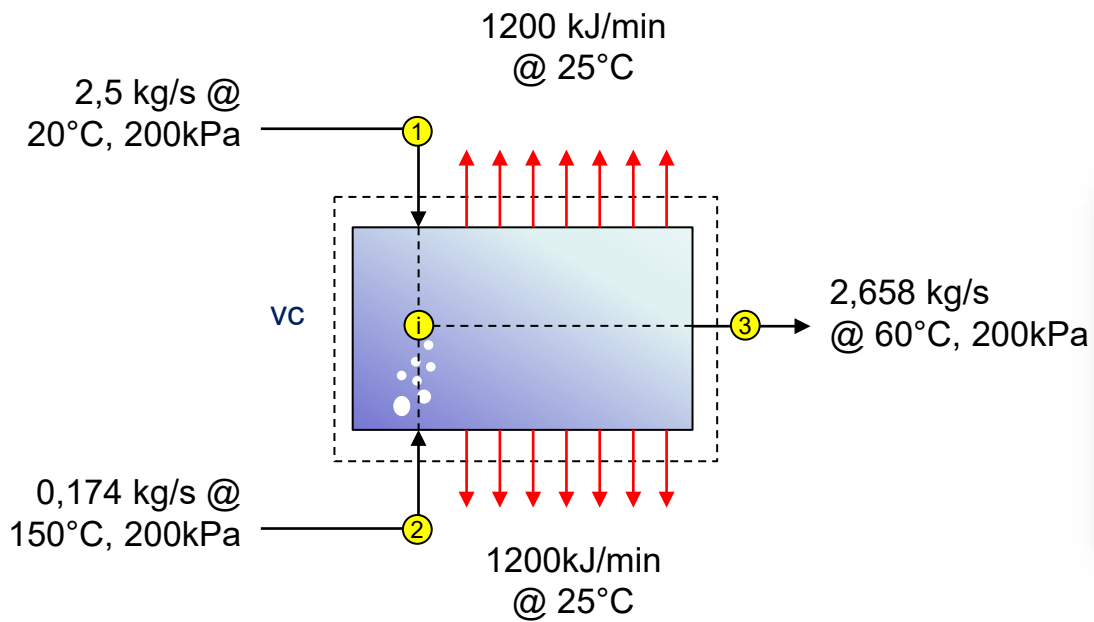
$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum_k \dot{m}_{e,k} \cdot s_{e,k} - \sum_k \dot{m}_{s,k} \cdot s_{s,k} + \dot{S}_{gen} \neq 0$$



$$\int_{T_i}^{T_3} \frac{C_p(T)}{T} dT = \int_{61,787}^{60} \frac{7,48757 \times 10^{-6} T^2 - 4,18546 \times 10^{-4} T + 4,18546}{T + 273,15} dT = -0,059868 \text{ kW/K}$$

$$\dots = -0,059872 \text{ kW/K}$$

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum_k \dot{m}_{e,k} \cdot s_{e,k} - \sum_k \dot{m}_{s,k} \cdot s_{s,k} + \dot{S}_{gen}$$



1: water: Specified state points

	Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)	Flow Exergy (kJ/kg)
1	20,00000	200,0000	998,2523	84,10016	0,2964424	4,183743	Subcooled	158,9751
2	150,0000	200,0000	1,041824	2769,098	7,281001	2,065609	Superheated	761,5267
3	60,00000	200,0000	983,2390	251,3316	0,8311973	4,184734	Subcooled	166,7693
4	61,78700	200,0000	982,3103	258,8104	0,8535861	4,185539	Subcooled	167,5729
5								

$$0 = -0,59872 + 2,5 \cdot 0,2964424 + 0,174 \cdot 7,281001 - (2,5 + 0,174) \cdot 0,8311973 + \dot{S}_{gen}$$

$$\dot{S}_{gen} = 0,2745216 \text{ kW/K}$$

resposta Livro

$$S_{gen} = 0,334 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum_k \dot{m}_{e,k} \cdot s_{e,k} - \sum_k \dot{m}_{s,k} \cdot s_{s,k} + \dot{S}_{gen}$$

7.164: Água líquida a 200kPa e 20°C é aquecida em uma câmara pela mistura com uma corrente de vapor superaquecido a 200 kPa e 150°C (“borbotagem”). A água líquida entra na câmara com uma vazão de 2,5 kg/s, e estima-se que a câmara perca calor para o ambiente a 25°C a uma taxa de 1200 kJ/min. Considerando que a mistura sai da câmara a 200kPa e 60°C, determine:

- a) a vazão mássica de vapor superaquecido e
- b) a taxa de geração de entropia durante o processo de mistura.

$$m_{vap} = 0,17399 \text{ kg/s}$$

$$\dot{S}_{gen} = 0,2745216 \text{ kW/K}$$