Professor: Valter Salles do Nascimento Jr
email: nascimento.valter@usp.br

14º e 15º Semanas

- Variação de entropia em proc. Int. reversíveis / Balanço de entropia para sistemas fechados e para Volumes de controle / Processos isentrópicos
- Eficiência isentrópica de turbinas, bocais, compressores e bombas / Calor e trab. em processos de esc. int. revers. em reg. Permanente

agosto

d	s	t	q	q	s	s
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31	1	2	3	4	5

setembro

d	s	t	q	q	s	s
30	31	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10

outubro

d	s	t	q	q	s	s
27	28	29	30	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31
1	2	3	4	5	6	7

novembro

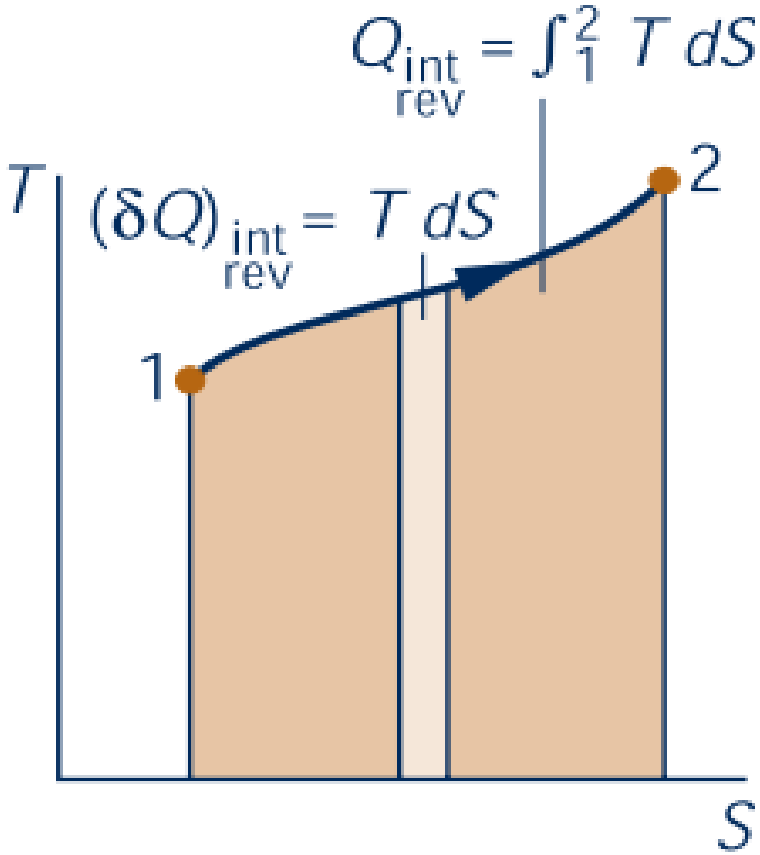
d	s	t	q	q	s	s
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12

24 - Aniversário de São Carlos

dezembro

d	s	t	q	q	s	s
29	30	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	1	2
3	4	5	6	7	8	9

Variação de Entropia em processos Int. Reversíveis



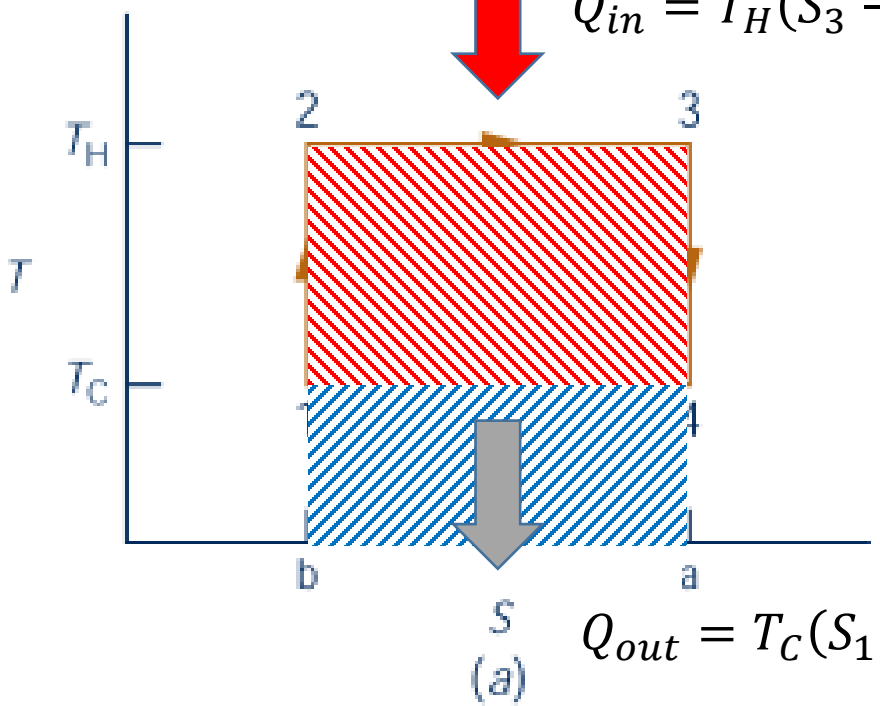
$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{\substack{int \\ rev}}$$

$$Q_{\substack{int \\ rev}} = \int_1^2 T dS$$

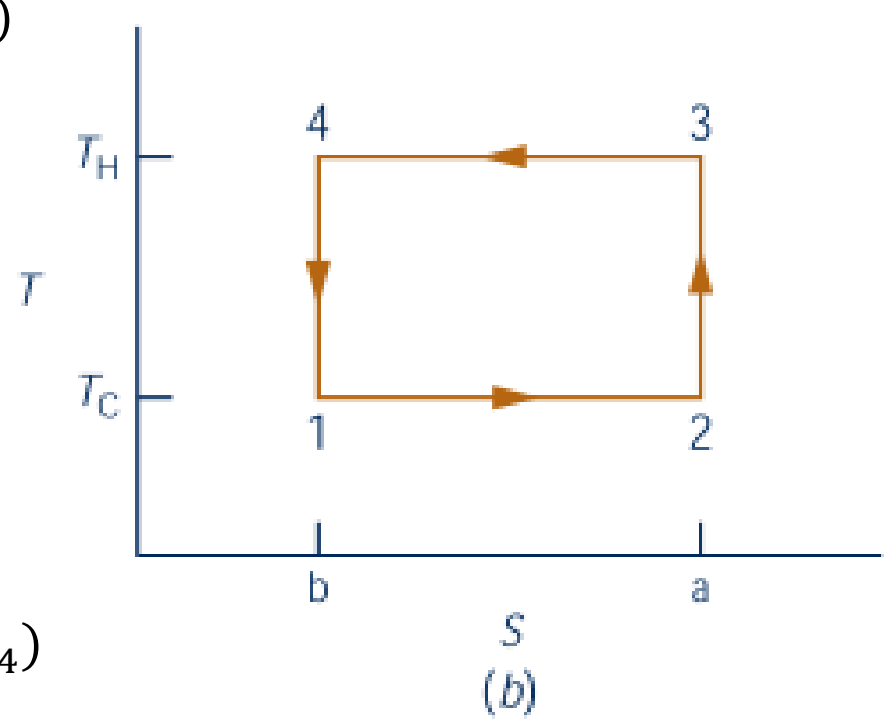
* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Variação de Entropia em processos Int. Reversíveis

$$Q_{in} = T_H(S_3 - S_2)$$



$$Q_{out} = T_C(S_1 - S_4)$$

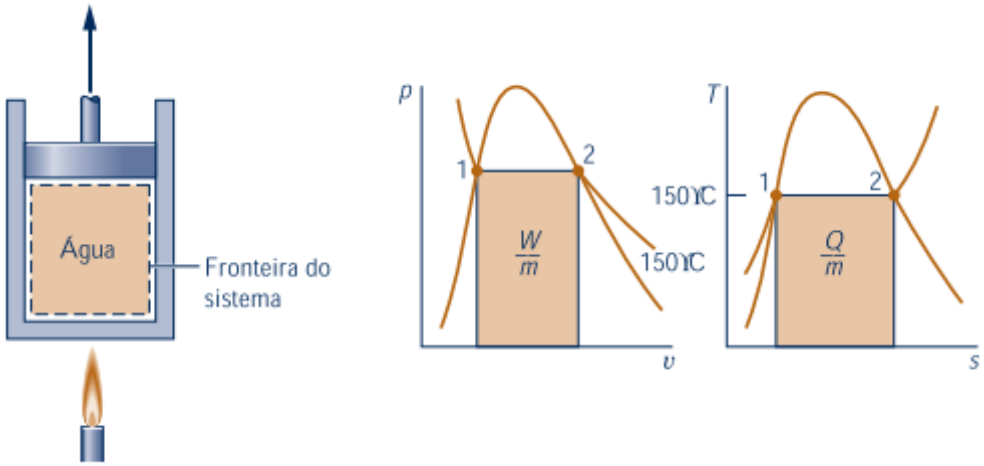


$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_C(S_1 - S_4)}{T_H(S_3 - S_2)} = \frac{\text{área } 1-2-3-4-1}{\text{área } 2-3-a-b-2}$$

Para um processo isentrópico $\Rightarrow$ $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$

Avaliando W e Q em processos Int. Reversíveis

Água, inicialmente como líquido saturado a 150° C (423,15 K), está contida em um conjunto cilindro - pistão. A água é submetida a um processo que a leva ao estado correspondente de vapor saturado, durante o qual o pistão se move livremente ao longo do cilindro. Considerando que a mudança de estado acontece em virtude do aquecimento da água à medida que esta percorre um processo internamente reversível a pressão e temperatura constantes, determine o trabalho e a quantidade de calor transferida por unidade de massa, em kJ/kg.



* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Avaliando W e Q em processos Int. Reversíveis

Análise: para pressão constante, o trabalho se torna

$$\frac{W}{m} = \int_1^2 p\,dv = p(v_2 - v_1)$$

Com os valores obtidos na Tabela A-2 para 150°C

$$\frac{W}{m} = (4{,}758\ \text{bar})(0{,}3928 - 1{,}0905 \times 10^{-3})\left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)\left|\frac{10^5\ \text{N/m}^2}{1\ \text{bar}}\right|\left|\frac{1\ \text{kJ}}{10^3\ \text{N}\cdot\text{m}}\right|$$

$$= 186{,}38\ \text{kJ/kg}$$

Uma vez que o processo é internamente reversível e a temperatura constante, a Eq. 6.23 fornece

$$Q = \int_1^2 T\,dS = m\int_1^2 T\,ds$$

ou

$$\frac{Q}{m} = T(s_2 - s_1)$$

Com os valores da Tabela A-2

1 $$\frac{Q}{m} = (423{,}15\ \text{K})(6{,}8379 - 1{,}8418)\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K} = 2114{,}1\ \text{kJ/kg}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

6.26 Nitrogênio (N_2) inicialmente ocupando 0,1 m^3 a 6 bar, 247°C, é submetido a uma expansão internamente reversível durante a qual $pV^{1,20}$ = *constante* a um estado final em que a temperatura é 37°C. Admitindo o modelo de gás ideal, determine

(a) a pressão no estado final, em bar.

(b) o trabalho e a quantidade de calor transferida, ambos em kJ.

(c) a variação de entropia, em kJ/K.

6.27 Ar em um conjunto cilindro-pistão e modelado como um gás ideal passa por dois processos internamente reversíveis em série do estado 1, onde T_1 = 290 K e p_1 = 1 bar.

Processo 1-2: compressão até p_2 = 5 bar, durante a qual $pV^{1,19}$ = *constante*

Processo 2-3: expansão isentrópica até p_3 = 1 bar

(a) Esboce os dois processos em série em coordenadas T–s.

(b) Determine a temperatura no estado 2, em K.

(c) Determine o trabalho líquido, em kJ.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

6.26 Nitrogênio (N_2) inicialmente ocupando 0,1 m^3 a 6 bar, 247°C, é submetido a uma expansão internamente reversível durante a qual $pV^{1,20}$ = *constante* a um estado final em que a temperatura é 37°C. Admitindo o modelo de gás ideal, determine

(a) a pressão no estado final, em bar.

(b) o trabalho e a quantidade de calor transferida, ambos em kJ.

(c) a variação de entropia, em kJ/K.

$$pV^{1,2} = cte$$

$$V_1 = 0{,}1m^3$$

$$p_1 = 6\ bar$$

$$T_1 = 247°C$$

$$T_2 = 37°C$$

$$M_{N2} = 28{,}01\ kg/kmol$$

$$Tab\ A - 1$$

$a)$ $p_2 = ?\ bar$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$p_2 = p_1\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}} = 6\left(\frac{310}{520}\right)^{\frac{1,2}{1,2-1}}$$

$$p_2 = 0{,}2693\ bar$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

b)

$$W = \int p dV$$

$$W = \int \frac{cte}{V^{1,2}} dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{p_1 V_1^{1,2}}{V^{1,2}} dV$$

$$p_1 V_1^{1,2} = p_2 V_2^{1,2} \qquad V_2 = 1{,}328\, m^3$$

$$W = \int \frac{cte}{V^{1,2}} dV = p_1 V_1^{1,2} \int_{V_1}^{V_2} V^{-1,2} dV = \left[\frac{V^{-0,2}}{-0{,}2}\right]_{V_1}^{V_2} = [-5V^{-0,2}]_{0,1}^{1,328}$$

$$W = 600 \cdot 0{,}1^{1,2} [-5V^{-0,2}]_{0,1}^{1,328}$$

$$W = 121{,}153\, kJ$$

Exercícios

- Balanço de energia (desconsiderando ΔEC e ΔEP)

$$\mathrm{m}(u_2 - u_1) = Q - W$$

$$Q = \mathrm{m}(u_2 - u_1) + W$$

$$\mathrm{m} = \frac{p_1 V_1}{R T_1}$$

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{8{,}314(kJ/kmol \cdot K)}{28{,}01(kg/kmol)} = 0{,}297\ (kJ/kg \cdot K)$$

$$R = 297\ (J/kg \cdot K)$$

$$\mathrm{m} = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot 0{,}1}{297 \cdot (247 + 273{,}15)}$$

$$\mathrm{m} = 0{,}38862\ kg$$

- Da Tabela A-23:

$$\bar{u}_1(T_1 = 520K) = 10{,}484\ (kJ/kmol)$$

$$\bar{u}_2(T_2 = 310K) = 6{,}437(kJ/kmol)$$

$$u = \frac{\bar{u}(kJ/kmol)}{M(kg/kmol)}$$

Exercícios

$$Q = \mathrm{m}(u_2 - u_1) + W$$

$$Q = \mathrm{m}\left(\frac{\bar{u}_2 - \bar{u}_1}{M}\right) + W$$

$$Q = 0{,}38862[kg]\left(\frac{6{,}43 - 10{,}484}{28{,}01}\right)\left[\frac{kJ/kmol}{kg/kmol}\right] + 121{,}153[kJ]$$

$$Q = 121{,}097\ kJ$$

Exercícios

c)

$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - Rln\frac{p_2}{p_1}$$

$$S(T_2, p_2) - S(T_1, p_1) = m\left[\left(\frac{\bar{s}^0(T_2) - \bar{s}^0(T_1)}{M}\right) - Rln\frac{p_2}{p_1}\right]$$

- Da Tabela A-23:

$\bar{s}^0{}_1(T_1 = 520K) = 207{,}792\ (kJ/kmol)$

$\bar{s}^0{}_2(T_2 = 310K) = 192{,}638(kJ/kmol)$

$$S(T_2, p_2) - S(T_1, p_1) = 0{,}38862\left[\left(\frac{192{,}638 - 207{,}792}{28{,}01}\right) - 0{,}297ln\frac{0{,}2693}{6}\right]$$

$$S(T_2, p_2) - S(T_1, p_1) = 0{,}148\ kJ/kg$$

Exercícios

6.27 Ar em um conjunto cilindro-pistão e modelado como um gás ideal passa por dois processos internamente reversíveis em série do estado 1, onde $T_1 = 290$ K e $p_1 = 1$ bar.

Processo 1-2: compressão até $p_2 = 5$ bar, durante a qual $pV^{1,19} = constante$

Processo 2-3: expansão isentrópica até $p_3 = 1$ bar

(a) Esboce os dois processos em série em coordenadas T–s.

(b) Determine a temperatura no estado 2, em K.

(c) Determine o trabalho líquido, em kJ.

b)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \longrightarrow T_2 = 290\left(\frac{5}{1}\right)^{\frac{1,19-1}{1,19}}$$

$$T_2 = 375\ K$$

c)

Processo 1-2: da aula sobre propriedades, processos politrópicos *n=cte*

$$W_{1-2} = \int p dV = \frac{mR(T_2 - T_1)}{n-1} \longrightarrow \left(\frac{W}{m}\right)_{1-2} = \frac{R(T_2 - T_1)}{n-1}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

$$\left(\frac{W}{m}\right)_{1-2} \frac{R(T_2 - T_1)}{n-1} = \frac{8{,}314/28{,}97 \cdot (375 - 290)}{1{,}19 - 1} = -128{,}39\ kJ/kg$$

$$\left(\frac{W}{m}\right)_{1-2} = -128{,}39\ kJ/kg$$

Processo 2-3: - Processo isentrópico $s_3 = s_2$

- $p_3 = 5\ bar$
- Balanço de energia

Do balanço de energia

$$m(u_3 - u_2) = -W_{2-3}$$

$$\left(\frac{W}{m}\right)_{2-3} = (\underline{u_2} - \underline{u_3})$$

Exercícios

Do modelo de gás ideal

$$\cancel{s_3 - s_2} = s°(T_3) - s°(T_2) - R\ ln\frac{p_3}{p_2}$$

$$s°(T_3) = s°(T_2) + R\ ln\frac{p_3}{p_2}$$

$$\begin{cases} Tabela\ A - 22 \\ s°(T_2) = 1{,}92657\ kJ/kg \cdot K \end{cases}$$

$$s°(T_3) = s°(T_2) + R\ ln\frac{p_3}{p_2} = 1{,}92657 + \frac{8{,}314}{28{,}97}\ln\frac{1}{5} = 1{,}46468\ kJ/kg \cdot K$$

$$\begin{cases} Tabela\ A - 22 \\ s°(T_3) = 1{,}46468\ kJ/kg \cdot K \end{cases} \Rightarrow \begin{matrix} Tabela\ A - 22 \\ u_3 = 168{,}864\ kJ/kg \\ T_3 = 236{,}822\ K \end{matrix}$$

$$T_2 = 375\ \text{K} \Rightarrow u_2 = 268{,}075\ kJ/kg$$

Exercícios

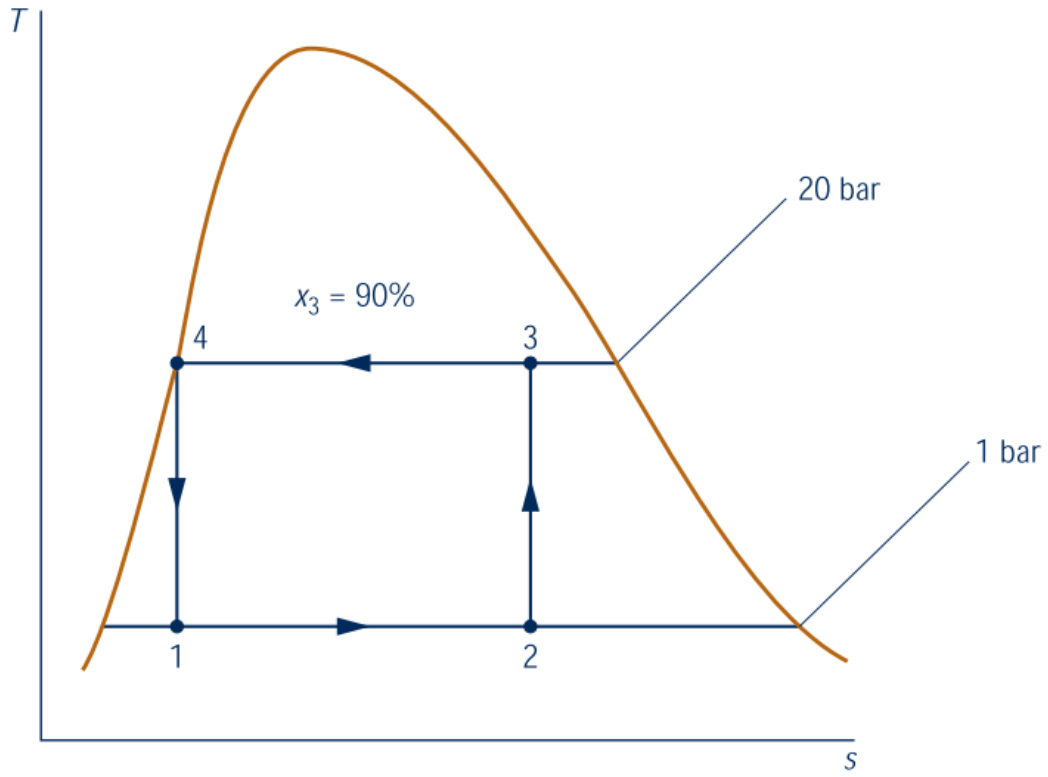
$$\left(\frac{W}{m}\right)_{2-3} = (u_2 - u_3) = (268{,}075 - 168{,}864)$$

$$\left(\frac{W}{m}\right)_{2-3} = 99{,}211\ kJ/kg$$

$$\left(\frac{W}{m}\right)_{1-2} + \left(\frac{W}{m}\right)_{2-3} = -29{,}179\ kJ/kg$$

Exercícios

6.31 A Fig. P6.31 fornece o diagrama T–s de um ciclo de bomba de calor de Carnot para o qual a substância é a amônia. Determine o trabalho líquido de entrada necessário, em kJ, para 50 ciclos de operação em 0,1 kg de substância.



* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercício 6.33

6.33 Água em um conjunto cilindro-pistão é submetida a um ciclo de potência de Carnot. No início da expansão isotérmica a temperatura é de 250°C e o título é de 80%. A expansão isotérmica continua até que a pressão seja de 2 MPa. A expansão adiabática, então, ocorre a uma temperatura final de 175°C.

(a) Esboce o ciclo em coordenadas T–s.

(b) Determine a quantidade de calor transferida e o trabalho, em kJ/kg, para cada processo.

(c) Avalie a eficiência térmica.

Resumo do ciclo de potência e Carnot

Processo 1-2: recebe a energia Q_H expande isotermicamente

Processo 2-3: expande adiabáticamente até a temperatura T_C

Processo 3-4: rejeita a energia Q_C comprime isotermicamente

Processo 4-1: comprime adiabáticamente até a temperatura T_H

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercício 6.33

Balanço de Energia, desconsiderando variação de energia cinética e potencial

Processo 1-2: recebe a energia Q_H expande isotermicamente

$$(u_2 - u_1) = \frac{Q_{1-2}}{m} - \frac{W_{1-2}}{m}$$

$T_1 = T_H = 250°C$

$x_1 = 0{,}8$

$T_2 = T_H = 250°C$

$p_2 = 2\ MPa$

Processo 2-3: expande adiabáticamente até a temperatura T_C

$$(u_3 - u_2) = -\frac{W_{2-3}}{m}$$

$T_2 = T_H = 250°C$

$p_2 = 2\ MPa$

$T_3 = T_C = 175°C$

Processo 3-4: rejeita a energia Q_C comprime isotermicamente

$$(u_4 - u_3) = \frac{Q_{3-4}}{m} - \frac{W_{3-4}}{m}$$

$T_3 = T_C = 175°C$

$T_4 = T_C = 175°C$

Processo 4-1: comprime adiabáticamente até a temperatura T_H

$$(u_1 - u_4) = -\frac{W_{4-1}}{m}$$

$T_4 = T_C = 175°C$

$T_1 = T_H = 250°C$

$x_1 = 0{,}8$

Análise de processo internamente reversível

$$\frac{Q_{1-2}}{m} = T_H(s_2 - s_1)$$

$$\frac{\cancelto{0}{Q_{2-3}}}{m} = T(s_3 - s_2)$$

$$s_3 = s_2$$

$$\frac{Q_{3-4}}{m} = T_C(s_4 - s_3)$$

$$\frac{\cancelto{0}{Q_{4-1}}}{m} = T(s_1 - s_4)$$

$$s_1 = s_4$$

Exercício 6.33

b)

Processo 1-2: recebe a energia Q_H expande isotermicamente

$$\frac{Q_{1-2}}{m} = T_H(s_2 - s_1)$$

$$\frac{Q_{1-2}}{m} = 523{,}15(6{,}5421 - 5{,}417)$$

$$\frac{Q_{1-2}}{m} = 588{,}6\ kJ/kg$$

$$(u_2 - u_1) = \frac{Q_{1-2}}{m} - \frac{W_{1-2}}{m}$$

$$\frac{W_{1-2}}{m} = \frac{Q_{1-2}}{m} - (u_2 - u_1)$$

$$\frac{W_{1-2}}{m} = 588{,}6 - (2678{,}8 - 2298)$$

$$\frac{W_{1-2}}{m} = 207{,}8\ kJ/kg$$

Tabela A-2

$$T_1 = 250°C \qquad x_1 = 0{,}8$$

$$u_1 = u_f + x_1(u_g - u_f)$$

$$u_1 = 1080{,}4 + 0{,}8(2602{,}4 - 1080{,}4)$$

$$u_1 = 2298\ kJ/kg$$

$$s_1 = s_f + x_1(s_g - s_f)$$

$$s_1 = 2{,}7927 + 0{,}8(6{,}0730 - 2{,}7927)$$

$$s_1 = 5{,}41694\ kJ/kg \cdot K$$

Tabela A-4 (interpolando)

$$T_2 = 250°C \qquad p_2 = 2\ MPa$$

$$u_2 = 2678{,}8\ kJ/kg$$

$$s_2 = 6{,}5421\ kJ/kg$$

Exercício 6.33

b)

Processo 2-3: expande adiabáticamente até a temperatura T_C

$$\frac{Q_{2-3}}{m} = 0\ kJ/kg$$

Tabela A-4 (interpolando)

$$T_2 = 250°C \qquad p_2 = 2\ MPa \quad \begin{cases} u_2 = 2678{,}8\ kJ/kg \\ s_2 = 6{,}5421\ kJ/kg \cdot K \end{cases}$$

$$\frac{W_{2-3}}{m} = -(u_3 - u_2)$$

$$\frac{W_{2-3}}{m} = -(2546{,}062 - 2678{,}8)$$

$$\frac{W_{2-3}}{m} = 132{,}738\ kJ/kg$$

Tabela A-2 (interpolando)

$$T_3 = 175°C \qquad s_3 = s_2 \quad \begin{cases} s_3 = 6{,}5421\ kJ/kg \cdot K \\ s_g = 6{,}626\ kJ/kg \cdot K \\ s_f = 2{,}09075\ kJ/kg \cdot K \\ u_g = 2580{,}1\ kJ/kg \\ u_f = 740{,}21\ kJ/kg \\ x_3 = \dfrac{s_3 - s_f}{s_g - s_f} = 0{,}9815 \\ u_3 = u_f + x_3(u_g - u_f) \\ u_3 = 740{,}21 + 0{,}9815(2580{,}1 - 740{,}21) \\ u_3 = 2546{,}062\ kJ/kg \end{cases}$$

Exercício 6.33

b)

Processo 3-4: rejeita a energia Q_C comprime isotermicamente

$$\frac{Q_{3-4}}{m} = T_C(s_4 - s_3)$$

$$\frac{Q_{3-4}}{m} = 448{,}15(5{,}41694 - 6{,}5421)$$

$$\frac{Q_{3-4}}{m} = -504{,}24\ kJ/kg$$

$$(u_4 - u_3) = \frac{Q_{3-4}}{m} - \frac{W_{3-4}}{m}$$

$$\frac{W_{3-4}}{m} = \frac{Q_{3-4}}{m} - (u_4 - u_3)$$

$$\frac{W_{3-4}}{m} = -504{,}24 - (2089{,}585 - 2546{,}062)$$

$$\frac{W_{3-4}}{m} = -47{,}763\ kJ/kg$$

Tabela A-2

$$T_3 = 175°C \qquad x_3 = 0{,}8 \quad \left\{ \begin{array}{l} u_3 = 2546{,}062\ kJ/kg \\ s_3 = 6{,}5421\ kJ/kg \cdot K \end{array} \right.$$

Tabela A-2 (interpolando)

$$T_4 = 175°C \qquad s_4 = s_1 \quad \left\{ \begin{array}{l} s_4 = 5{,}41694\ kJ/kg \cdot K \\ s_g = 6{,}626\ kJ/kg \cdot K \\ s_f = 2{,}09075\ kJ/kg \cdot K \\ u_g = 2580{,}1\ kJ/kg \\ u_f = 740{,}21\ kJ/kg \\ x_4 = \dfrac{s_4 - s_f}{s_g - s_f} = 0{,}7334 \\ u_4 = u_f + x_4(u_g - u_f) \\ u_4 = 740{,}21 + 0{,}7334(2580{,}1 - 740{,}21) \\ u_4 = 2089{,}585\ kJ/kg \end{array} \right.$$

Exercício 6.33

b)

Processo 4-1: comprime adiabáticamente até a temperatura T_H

$$\frac{Q_{4-1}}{m} = 0\ kJ/kg$$

Tabela A-2

$$T_4 = 175°C \quad x_4 = 0{,}7334 \quad \begin{cases} u_4 = 2089{,}585\ kJ/kg \\ s_4 = 5{,}41694\ kJ/kg \cdot K \end{cases}$$

$$\frac{W_{4-1}}{m} = -(u_1 - u_4)$$

Tabela A-2

$$T_1 = 250°C \quad x_1 = 0{,}8 \quad \begin{cases} u_1 = 2298\ kJ/kg \\ s_1 = 5{,}41694\ kJ/kg \cdot K \end{cases}$$

$$\frac{W_{4-1}}{m} = -(2298 - 2089{,}585)$$

$$\frac{W_{4-1}}{m} = -208{,}415\ kJ/kg$$

Exercício 6.33

c)

A eficiência térmica pode ser dada por:

$$\eta = \frac{W_{líquido}/m}{Q_{in}/m} = \frac{207{,}8 + 132{,}738 - 47{,}763 - 208{,}415}{588{,}6}$$

$$\eta = 14{,}33\%$$

Alternativamente, como os ciclos de Carnot são reversíveis:

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{448{,}15}{523{,}15}$$

$$\eta = 14{,}33\%$$

Balanço de Entropia para Sistemas Fechados

$$\left[\begin{array}{c}\textit{variação}\text{ da quantidade}\\ \text{de entropia contida no}\\ \text{sistema durante um certo}\\ \text{intervalo de tempo}\end{array}\right] = \left[\begin{array}{c}\text{quantidade líquida de entropia}\\ \textit{transferida para dentro}\text{ através}\\ \text{da fronteira do sistema durante}\\ \text{o intervalo de tempo}\end{array}\right] + \left[\begin{array}{c}\text{quantidade de entropia}\\ \textit{produzida no interior}\text{ do}\\ \text{sistema durante o}\\ \text{intervalo de tempo}\end{array}\right]$$

$$\underbrace{S_2 - S_1}_{\text{Variação de entropia}} = \underbrace{\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b}_{\text{Transferência de entropia}} + \underbrace{\sigma}_{\text{Geração de entropia}}$$

$$\sigma: \begin{cases} > 0 & \text{presença de irreversibilidades no sistema} \\ = 0 & \text{ausência de irreversibilidades no sistema} \end{cases} \qquad S_2 - S_1: \begin{cases} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{cases}$$

Reescrevendo em termos de taxa

$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{\sigma}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

6.39 Cinco quilogramas de água contidos em um conjunto cilindro-pistão são expandidos a partir de um estado inicial, em que $T_1 = 400°C$ e $p_1 = 700$ kPa, até um estado final, em que $T_2 = 200°C$ e $p_2 = 300$ kPa. Não ocorrem efeitos significativos com relação às energias cinética e potencial. A tabela a seguir fornece dados adicionais em dois estados. Afirma-se que a água passa por um processo adiabático entre esses estados enquanto produz trabalho. Avalie essa afirmativa.

Estado	T(°C)	p(kPa)	v(m³/kg)	u(kJ/kg)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg · K)
1	400	700	0,4397	2960,9	3268,7	7,6350
2	200	300	0,7160	2650,7	2865,5	7,3115

6.42 Ar contido em um tanque rígido isolado equipado com um agitador, inicialmente a 4 bar, 40ºC e um volume de 0,2 m³, é agitado até que sua temperatura alcance 353ºC. Admitindo o modelo de gás ideal, com $k = 1,4$ para o ar, determine (a) a pressão final, em bar, (b) o trabalho, em kJ, e (c) a quantidade de entropia gerada, em kJ/K. Despreze as energias cinética e potencial.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

6.39 Cinco quilogramas de água contidos em um conjunto cilindro-pistão são expandidos a partir de um estado inicial, em que $T_1 = 400°C$ e $p_1 = 700$ kPa, até um estado final, em que $T_2 = 200°C$ e $p_2 = 300$ kPa. Não ocorrem efeitos significativos com relação às energias cinética e potencial. A tabela a seguir fornece dados adicionais em dois estados. Afirma-se que a água passa por um processo adiabático entre esses estados enquanto produz trabalho. Avalie essa afirmativa.

Estado	T(°C)	p(kPa)	v(m³/kg)	u(kJ/kg)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg · K)
1	400	700	0,4397	2960,9	3268,7	7,6350
2	200	300	0,7160	2650,7	2865,5	7,3115

$$S_2 - S_1 = \cancel{\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b} + \sigma$$

$$\sigma = m(s_2 - s_1)$$

$$\sigma = 5(7{,}3115 - 7{,}6350) \Rightarrow \boxed{\sigma = -1{,}6175\ kJ/kg}$$

$como\ \sigma < 0$ o processo não pode ocorrer

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

6.42 Ar contido em um tanque rígido isolado equipado com um agitador, inicialmente a 4 bar, 40ºC e um volume de 0,2 m³, é agitado até que sua temperatura alcance 353ºC. Admitindo o modelo de gás ideal, com k = 1,4 para o ar, determine (a) a pressão final, em bar, (b) o trabalho, em kJ, e (c) a quantidade de entropia gerada, em kJ/K. Despreze as energias cinética e potencial.

a)

$$p_2 = p_1\left[\frac{T_2}{T_1}\right] = 4\left[\frac{626{,}15}{313{,}15}\right] \longrightarrow p_2 = 8\ bar$$

b)

- Balanço de energia:

$$\Delta U + \Delta EC + \Delta EP = Q - W$$

$$m(u_2 - u_1) = -W$$

$$W = m \cdot cv \cdot (T_2 - T_1)$$

Modelo de gás ideal

$$m = \frac{p_1 V}{R T_1} \qquad cv = \frac{R}{(k-1)}$$

$$W = \frac{p_1 V}{R T_1} \cdot \frac{R}{(k-1)} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{4.10^5.0{,}2}{313} \cdot \frac{(626-313)}{(1{,}4-1)}$$

$$W = -200\ kJ$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

6.42 Ar contido em um tanque rígido isolado equipado com um agitador, inicialmente a 4 bar, 40ºC e um volume de 0,2 m³, é agitado até que sua temperatura alcance 353ºC. Admitindo o modelo de gás ideal, com k = 1,4 para o ar, determine (a) a pressão final, em bar, (b) o trabalho, em kJ, e (c) a quantidade de entropia gerada, em kJ/K. Despreze as energias cinética e potencial.

c) - Balanço de entropia

$$S_2 - S_1 = \cancel{\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b} + \sigma$$

$$\sigma = m(s_2 - s_1)$$

$$\sigma = m(s_2 - s_1)$$

$$\sigma = \frac{p_1 V}{R T_1}\left(\frac{R}{(k-1)} . ln \frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$\sigma = \frac{4.10^5.0{,}2}{313} . \left(\frac{1}{(1{,}4-1)} . ln \frac{626{,}15}{313{,}15}\right)$$

$$\sigma = 0{,}443\ kJ/K$$

Modelo de gás ideal à volume constante

$$(s_2 - s_1) = cv . ln \frac{T_2}{T_1} + R . \cancel{ln \frac{V_2}{V_1}}$$

$$m = \frac{p_1 V}{R T_1} \qquad cv = \frac{R}{(k-1)}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

6.53 Um inventor afirma que o dispositivo ilustrado na Fig. P6.53 gera eletricidade, enquanto recebe calor a uma taxa de 250 Btu/s (263,8 kW) na temperatura de 500°R (4,6°C), uma segunda transferência de calor ocorre a uma taxa de 350 Btu/s (369,3 kW) a 700°R (115,7°C), e uma terceira a uma taxa de 500 Btu/s (527,5 kW) a 1000°R (282,4°C). Avalie essa afirmativa para uma operação em regime permanente.

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b + \sigma$$

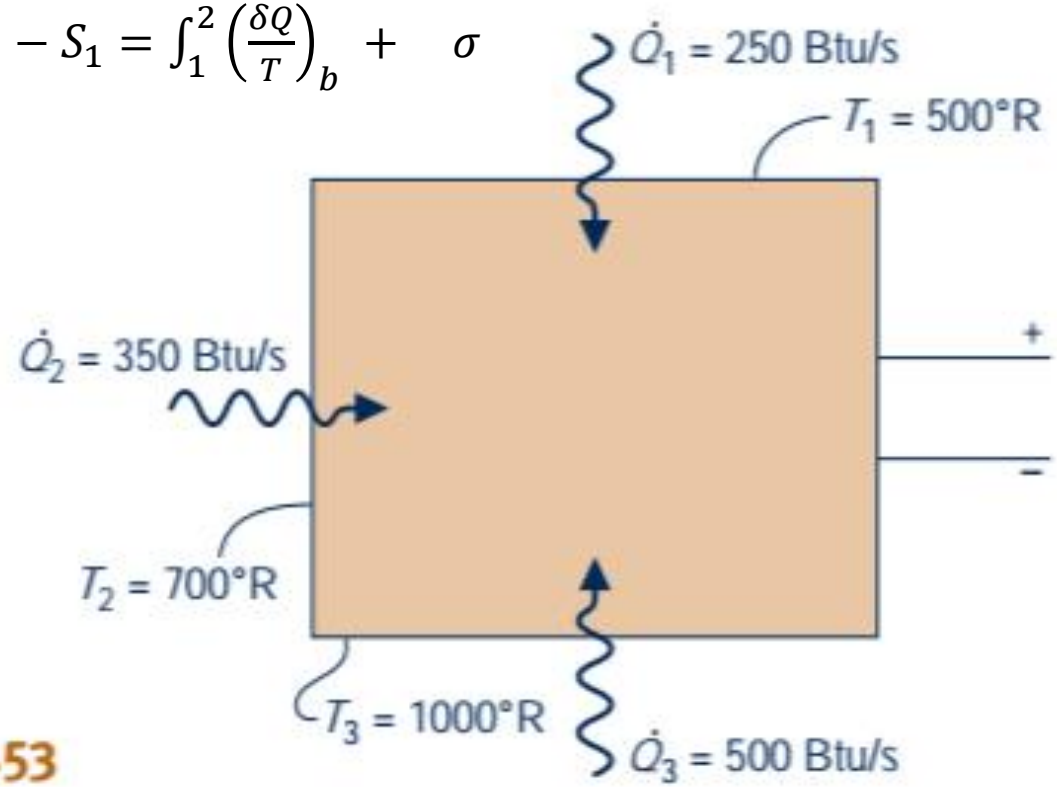


Fig. P6.53

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

Hipótese

- Regime permanente

$$\cancel{\frac{dS}{dt}} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{\sigma}$$

$$\dot{\sigma} = -\left(\frac{\dot{Q}_1}{T_1} + \frac{\dot{Q}_2}{T_2} + \frac{\dot{Q}_3}{T_3}\right)$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

6.62 Em um processo de tratamento térmico, uma peça de 1 kg de metal, inicialmente a 1075 K, é temperada em um tanque contendo 100 kg de água, inicialmente a 295 K. O calor trocado entre os conteúdos do tanque e sua vizinhança é desprezível. Considerando que o calor específico da peça de metal e o da água são constantes e valem 0,5 kJ/kg · K e 4,2 kJ/kg · K, respectivamente, determine (a) a temperatura final de equilíbrio após a têmpera, em K, e (b) a quantidade de entropia gerada no interior do tanque, em kJ/k.

Para uma substância imcompressível, $c_p = c_v$; o calor específico pode ser representado somente por c.

$$s_2 - s_1 = c\, ln \frac{T_2}{T_1}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Balanços de Entropia para Volume de Controle

Balanço da taxa de entropia

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{VC}$$

Forma Integral do Balanço da taxa de entropia

$$\frac{d}{dt}\int_V psdV = \int_A \left(\frac{\dot{Q}}{T}\right)_b dA + \sum_e \left(\int_A s\rho V_n dA\right)_e - \sum_s \left(\int_A s\rho V_n dA\right)_s + \dot{\sigma}_{VC}$$

Regime permanente

$$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{VC}$$

Regime permanente uma entrada e uma saída

$$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{m}(s_1 - s_2) + \dot{\sigma}_{VC}$$

Balanços para Volumes de Controle (Reg. Permanente)

Balanço de Massa

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s$$

Balanço de Energia

$$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + g z_s \right)$$

Balanço de Entropia

$$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{VC}$$

Exercícios

Vapor d' água é admitido em uma turbina a uma pressão de 30 bar, a uma temperatura de 400°C e a uma velocidade de 160 m/s. Vapor saturado a 100°C é descarregado a uma velocidade de 100 m/s. Em regime permanente, a turbina produz uma quantidade de trabalho igual a 540 kJ por kg de vapor escoando através da turbina. Ocorre transferência de calor entre a turbina e sua vizinhança a uma temperatura média da superfície externa igual a 350 K. Determine a taxa de geração de entropia no interior da turbina por kg de vapor escoando, em kJ/kg . K. Despreze a variação da energia potencial entre a admissão e a descarga."

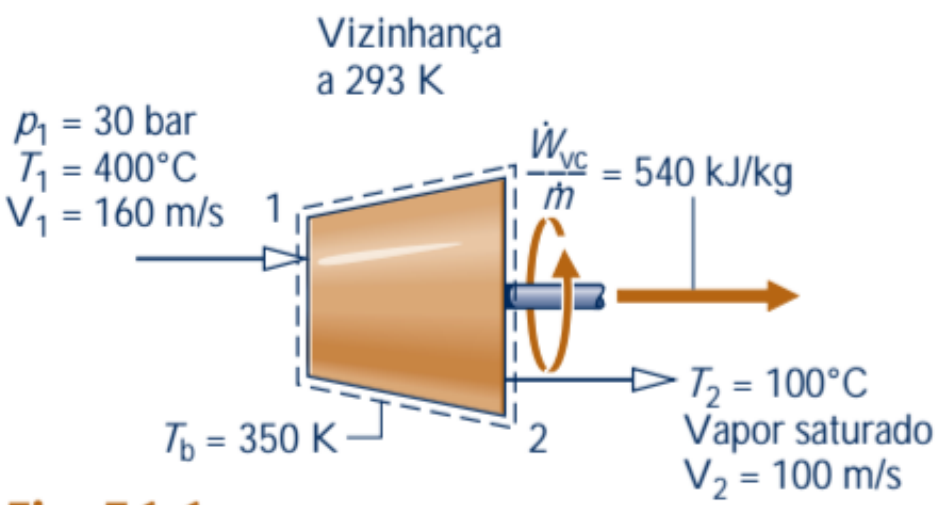
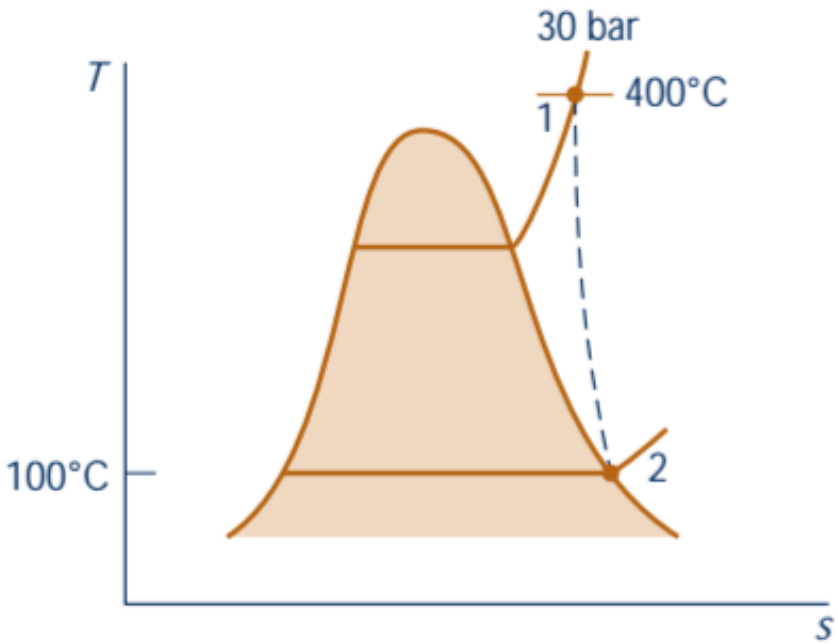


Fig. E6.6



* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

Balanço de entropia em regime permanente com uma entrada e uma saída:

$$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{m}(s_1 - s_2) + \dot{\sigma}_{VC} \qquad \frac{\dot{\sigma}_{VC}}{\dot{m}} = -\frac{\dot{Q}_{VC}/\dot{m}}{T_b} + (s_2 - s_1)$$

Balanço de energia com uma entrada e uma saída:

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

$$\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}} = 540[kJ/kg] + (2676{,}1 - 3230{,}9)[kJ/kg] + \left(\frac{100^2 - 160^2}{2} \right) . \frac{1}{10^3} [kJ/kg]$$

$$\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}} = -22{,}6\ [kJ/kg]$$

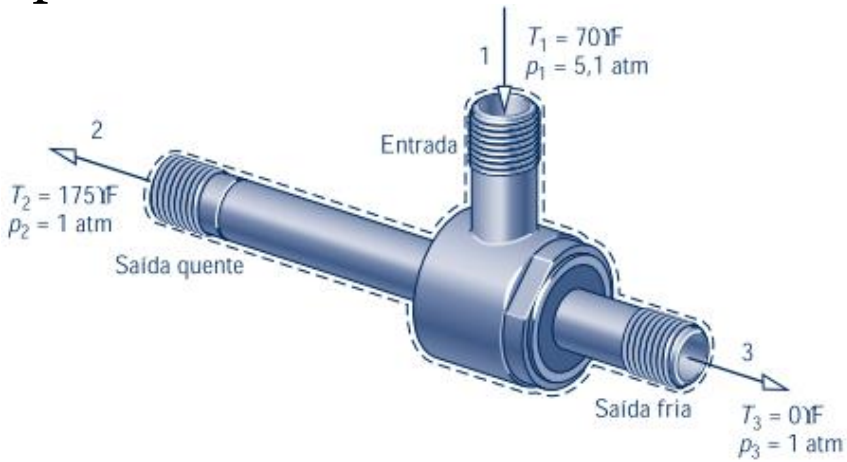
$$\frac{\dot{\sigma}_{VC}}{\dot{m}} = -\frac{-22{,}6\ [kJ/kg]}{350\ [K]} + (7{,}3549 - 6{,}9212)\ [kJ/kg \cdot K] \Rightarrow \frac{\dot{\sigma}_{VC}}{\dot{m}} = 0{,}498\ [kJ/kg \cdot K]$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

Avaliando uma Especificação de Desempenho

Um inventor afirma ter desenvolvido um dispositivo que, mesmo não necessitando de transferência de energia sob a forma de trabalho, $\dot{W}_{VC}$, ou calor, permite a produção de ar quente e frio a partir de um escoamento único de ar a uma temperatura intermediaria. O inventor fornece dados de testes em regime permanente que indicam que quando ar é admitido a uma temperatura de 70°F (21,1°C) e à pressão de 5,1 atm, as correntes de ar obtidas são descarregadas a 0 e 175°F (217,8 e 79,4°C), respectivamente, ambas a uma pressão de 1 atm. Sessenta por cento da massa admitida no dispositivo são descarregados a uma temperatura inferior. Avalie a afirmação do inventor utilizando o modelo de gás ideal para o ar e desprezando as variações das energias cinética e potencial das correntes de admissão e descarga."



* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

6.86 Conforme o *dessuperaquecedor* ilustrado na Fig. P6.86, água líquida é injetada em um fluxo de vapor superaquecido. Como resultado, tem-se um fluxo de vapor saturado na saída. Os dados para a operação em regime permanente estão apresentados na tabela a seguir. Considere que as perdas de calor e todos os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. (a) Localize os estados 1, 2 e 3 em um esboço do diagrama *T–s*. (b) Determine a taxa de geração de entropia no interior do dessuperaquecedor, em kW/K.

Estado	p(MPa)	T(°C)	$v \times 10^3$ (m³/kg)	u(kJ/kg)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg · K)
1	2,7	40	1,0066	167,2	169,9	0,5714
2	2,7	300	91,01	2757,0	3002,8	6,6001
3	2,5	vap. sat.	79,98	2603,1	2803,1	6,2575

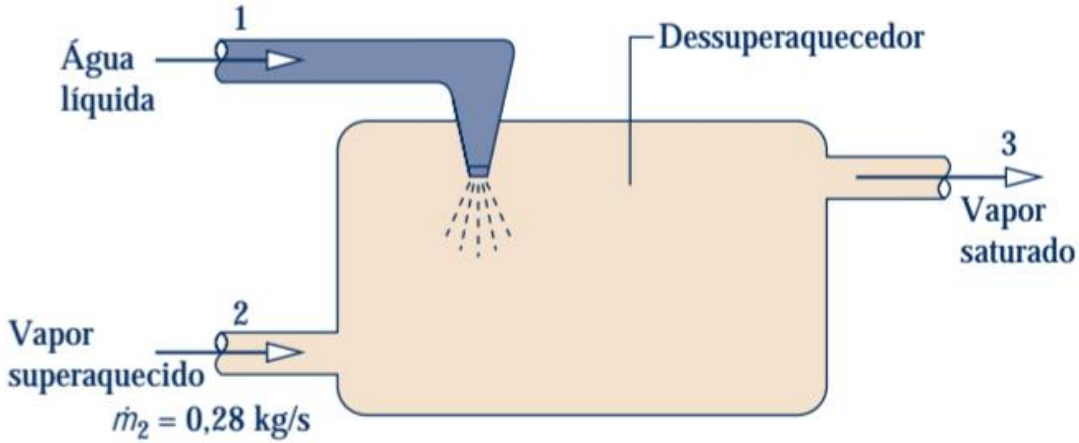


Fig. P6.86

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

a)

Da tabela A-3: $T_3 = 224°C$

b)

$\dot{\sigma}_{VC} = ?$

Hipóteses:

- Regime permanente;
- Sem variações de energia cinética e potencial;
- Sem interações de calor ou trabalho no V.C.;

Balanço de Entropia

$$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{VC}$$

$$\dot{\sigma}_{VC} = \dot{m}_3 s_3 - (\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_2 s_2)$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

Balanço de Massa

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad \Longrightarrow \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

Balanço de Energia

$$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + g z_s \right)$$

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

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

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_2 (h_3 - h_2)}{(h_1 - h_3)} = \frac{0{,}28(2803{,}1 - 3002{,}8)}{(169{,}9 - 2803{,}1)} = 0{,}021235\ kg/s$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios

Balanço de Massa

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 0{,}28 + 0{,}021235$$

$$\dot{m}_3 = 0{,}301235$$

Balanço de Entropia

$$\dot{\sigma}_{VC} = \dot{m}_3 s_3 - (\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_2 s_2)$$

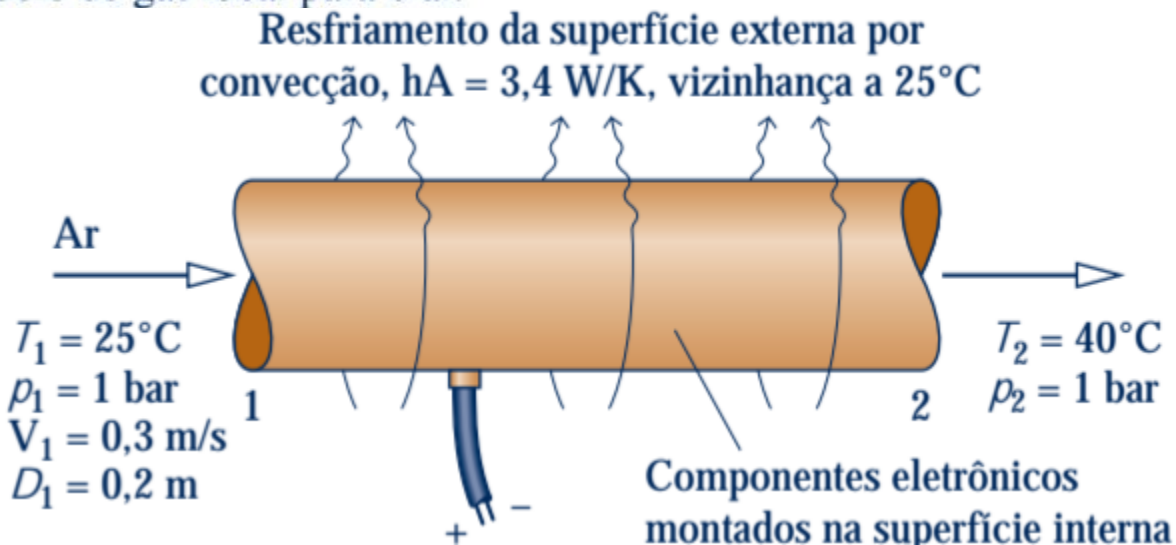
$$\dot{\sigma}_{VC} = 0{,}301235 \cdot 6{,}2575 - (0{,}021235 \cdot 0{,}5714 + 0{,}28 \cdot 6{,}6001)$$

$$\dot{\sigma}_{VC} = 0{,}0248\ kW/K$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Balanço de Entropia em Volumes de Controle

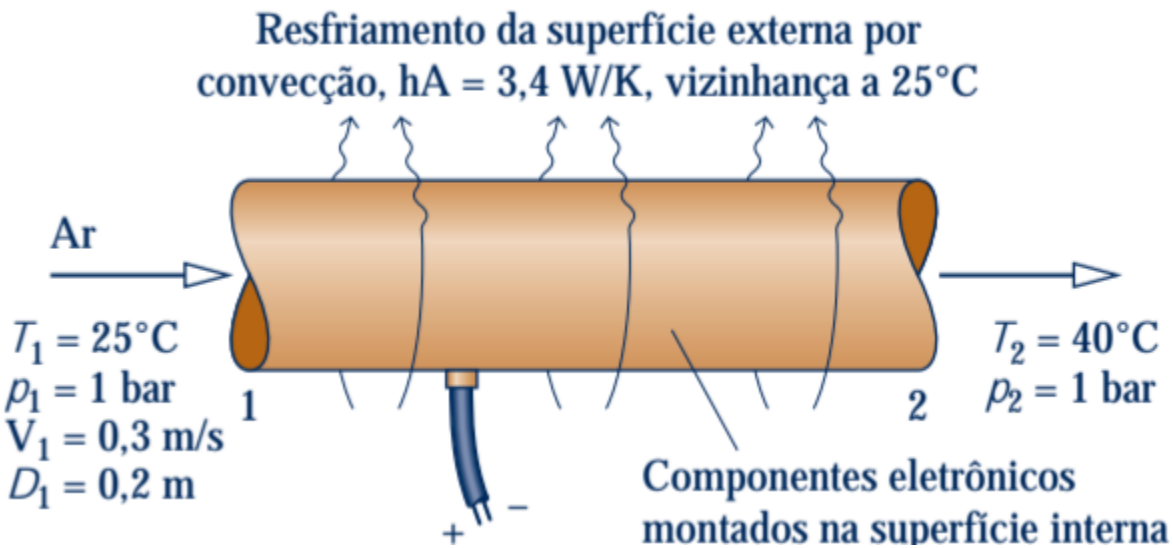
6.96 Componentes eletrônicos são montados na superfície interna de um duto cilíndrico horizontal cujo diâmetro interno é 0,2 m, conforme ilustrado na Fig. P6.96. De modo a prevenir um superaquecimento dos componentes, o cilindro é resfriado por um fluxo de ar escoando em seu interior e por convecção na sua superfície exterior. O ar entra no duto a 25°C, 1 bar e a uma velocidade de 0,3 m/s, e sai a 40°C com variações desprezíveis de energia cinética e pressão. Em virtude da troca de calor com a vizinhança, que está a 25°C, ocorre resfriamento convectivo na superfície externa do cilindro, de acordo com hA = 3,4 W/K, em que h é o coeficiente de película e A é a área superficial. Os componentes eletrônicos necessitam de 0,20 kW de potência elétrica. Para um volume de controle englobando o cilindro, determine em regime permanente (a) a vazão mássica do ar, em kg/s, (b) a temperatura da superfície externa do duto, em °C, e (c) a taxa de geração de entropia, em W/K. Admita o modelo de gás ideal para o ar.



Balanço de Entropia em Volumes de Controle

Hipóteses:
- Desconsiderando variações de energia cinética e potencial;
- Modelo de gás ideal;
- Regime permanente.

Dados:



$$\dot{W} = 0{,}20\ kW$$

Balanço de Entropia em Volumes de Controle

a) $\dot{m} = ?\,[kg/s]$

b) $T_s = ?\,[°C]$

c) $\dot{\sigma} = ?\,[W/K]$

$$\dot{m} = A \cdot vel/v$$

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{8314 \cdot 298{,}15}{28{,}95 \cdot 10^5} = 0{,}856241485\ m^3/kg$$

$$\dot{m} = A \cdot \frac{vel}{v} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot vel}{4 \cdot v} = \frac{\pi \cdot 0{,}2^2 \cdot 0{,}3}{4 \cdot 0{,}856241485}$$

$$\dot{m} = 0{,}011 kg/s$$

Balanço de Entropia em Volumes de Controle

b) $T_s = ?\,[°C]$

$$\dot{Q}_{VC} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$T_s = \frac{\dot{Q}_{VC}}{h \cdot A} + T_\infty$$

Do balanço de energia

$$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \dot{m}(h_1 - h_2)$$

$$\dot{Q}_{VC} = \dot{W}_{VC} + \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{VC} = -0{,}20 + 0{,}011(313{,}3 - 298{,}2)$$

$$\dot{Q}_{VC} = -0{,}034\ kW$$

$$T_s = \frac{34}{3{,}4} + 25$$

$$T_s = 35\ °C$$

c) $\dot{\sigma} = ?\,[W/K]$

$$\dot{\sigma}_{VC} = -\frac{\dot{Q}_{VC}}{T_\infty} + \dot{m}(s_2 - s_1)$$

$$\dot{\sigma}_{VC} = -\frac{\dot{Q}_{VC}}{T_\infty} + \dot{m}\left(s^0(T_2) - s^0(T_1) - R ln\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\dot{\sigma}_{VC} = -\frac{-34}{308{,}15} + 0{,}011(1{,}7446 - 1{,}6953)$$

$$\dot{\sigma}_{VC} = 0{,}653\ W/K$$

Lista de exercícios:

5.3	(c) Impossível, (d) Indeterminado, (e) Possível
5.6	(b) F, (d) V
5.16	71,6° F
5.17	(a) Irreversivelmente, (c) Impossív
5.20	(b) 1610, 610
5.24	1000
5.28	2700
5.32	3
5.36	750
5.41	Diminuiria T_C
5.45	(b) 55
5.50	(a) Afirmação inválida
5.53	5
5.59	(a) 150
5.62	(c) 29,3
5.65	(a) 0,8
5.69	(a) 8,23
5.73	(a) 500
5.77	(c) 20,88%
5.81	(b) 38,4%
5.85	(c) 20%
5.88	(a) Impossível
5.93	(b) F, (e) F
5.95	(b) V, (e) V

6.1	(c) 4,4468
6.4	(a) –1,43749
6.8	(e) 0,188
6.11	–0,0197
6.16	0,5
6.20	1-2: 0, –254,25
6.23	65,6, 873,3
6.27	(b) 375
6.32	(c) 75%
6.36	(c) negativa, (d) positiva
6.40	(b) 500
6.44	(b) 2,5265
6.48	Não, do sistema
6.53	Afirmação inválida
6.58	(b) $10{,}2 \times 10^{-5}$
6.62	(a) 295,9
6.67	(a) 697,4
6.69	(a) 0,3709
6.74	(b) $T_H \geq T'_H$, $T'_C \geq T_C$
6.78	0,591
6.80	(b) inferior, (c) superior
6.85	(b) 0,117
6.89	0,079
6.92	(b) 0,072
6.95	0,328

6.96	(b) 35
6.99	2,12
6.103	Afirmação incorreta
6.105	(b) 0,0129
6.110	(a) –131,4
6.114	(a) –50,4, 0,403
6.118	(c) 1,87

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)