Termodinâmica I

1° Semestre/2020

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

10° e 11° 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

fevereiro

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
1	2	3	4	5	6	7

24 - Carnaval

março

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	31	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11

Suspensão das aulas presenciais

23 - Orientações sobre EaD

abril

d	s	t	q	q	s	s
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	1	2
3	4	5	6	7	8	9

06 e 09 - Semana Santa

16 - Não houve aula

20 - Tiradentes

maio

d	s	t	q	q	s	s
26	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

junho

d	s	t	q	q	s	s
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	11

11 - Corpus Chisti

julho

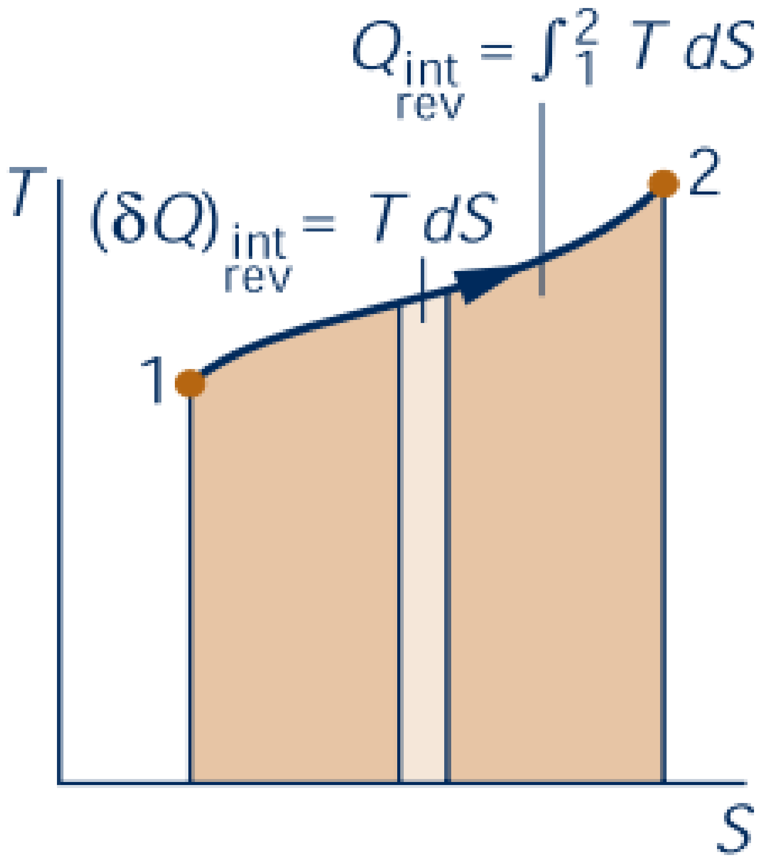
d	s	t	q	q	s	s
28	29	30	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8

Período para realização de recuperação

Plano de ensino pretendido

30/04 04/05	Processos Reversíveis e Irreversíveis / Corolários: 2° Lei para Ciclos Termodinâmicos / Escalas de temperatura Kelvin e internacional / Desempenho máx. para ciclos entre 2 reservat.
07/05 11/05	Ciclo de Carnot e Desigualdade de Clausius / Definições de variação de entropia / Variação de entropia para uma substância incomp. / Variação de entropia de um gás ideal
14/05 18/05	Variação de entropia em proc. Int. reversíveis / Balanço de entropia para sistemas fechados e para Volumes de controle / Processos isentrópicos
21/05 25/05	Eficiência isentrópica de turbinas, bocais, compressores e bombas / Calor e trab. em processos de esc. int. revers. em reg. Permanente
28/05 01/06	Prova 1 / Exergia / Balanço de exergia termomecânica para sistemas fechados
04/06 08/06	Exergia de escoamento / Balanço de exergia termomecânica para volumes de controle, Eficiência Exergética
15/06 18/06	Ciclos de potência
22/06 25/06	Ciclos de refrigeração
29/06 02/07	Prova 2 / Prova Substitutiva

Variação de Entropia em processos Int. Reversíveis

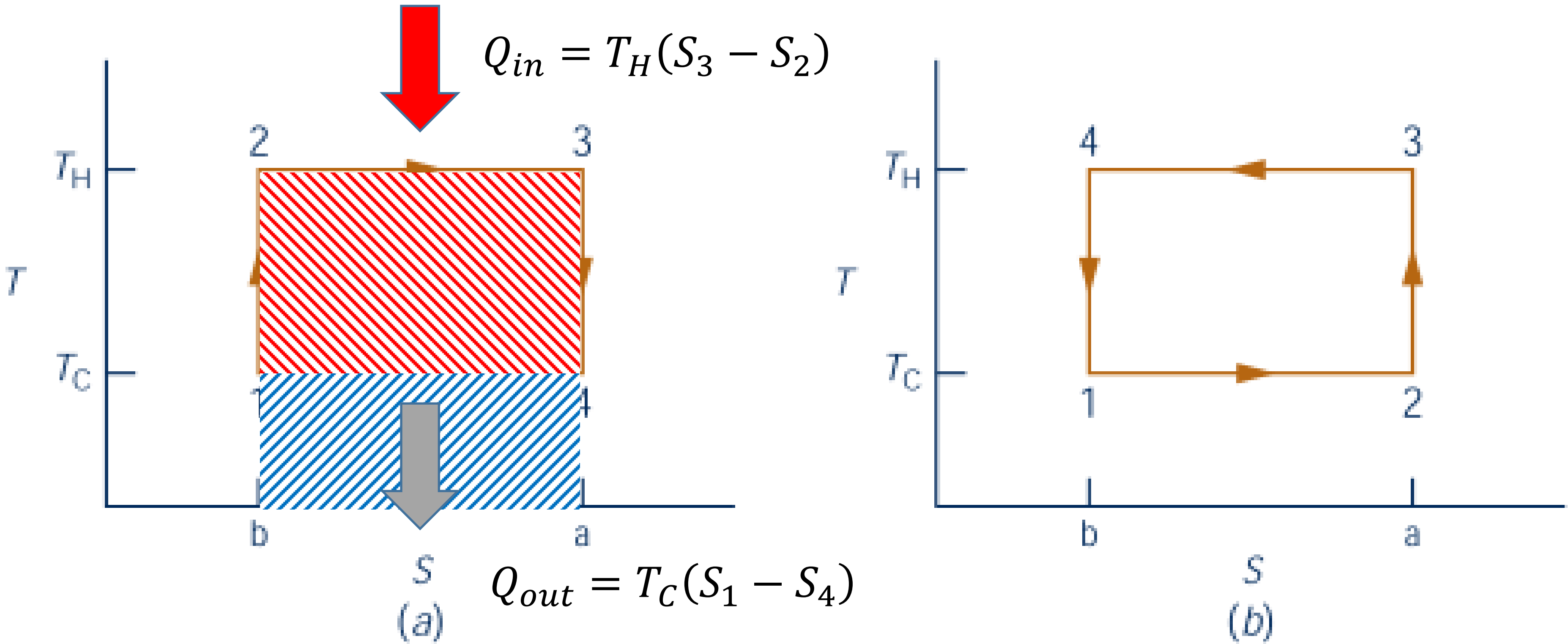


$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{\substack{int\\rev}}$$

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

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

Variação de Entropia em processos Int. Reversíveis

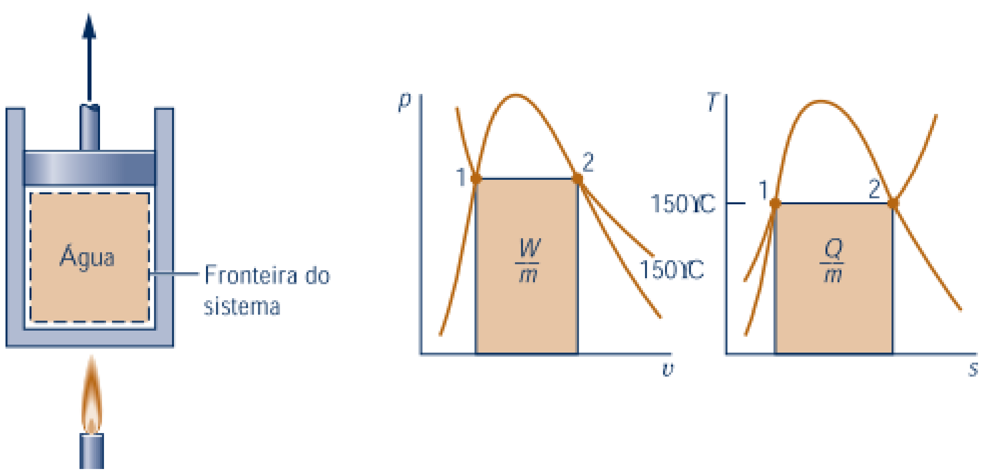


$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_C(S_1 - S_4)}{T_H(S_3 - S_2)} = \frac{área\ 1-2-3-4-1}{área\ 2-3-a-b-2}$$

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

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.

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

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

$$p_1 = 6\ bar$$

$$T_1 = 247°C$$

$$T_2 = 37°C$$

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

$$Tab\ A-1$$

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)

$$W = \int p dV$$

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

$$p_1 V_1^{1,2} = p_2 V_2^{1,2}$$

$$V_2 = 1{,}328\, m^3$$

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

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

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

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)

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

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

- Da Tabela A-23:

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

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

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

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

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*

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

* (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

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

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

Exercícios

Do modelo de gás ideal

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

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

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

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

$$Tabela\ A - 22$$

$$\left\{\begin{array}{l} Tabela\ A - 22 \\ s°(T_3) = 1{,}46468\ kJ/kg \cdot K \end{array}\right. \longrightarrow \begin{array}{l} u_3 = 168{,}864\ kJ/kg \\ T_3 = 236{,}822\ K \end{array}$$

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

Exercícios

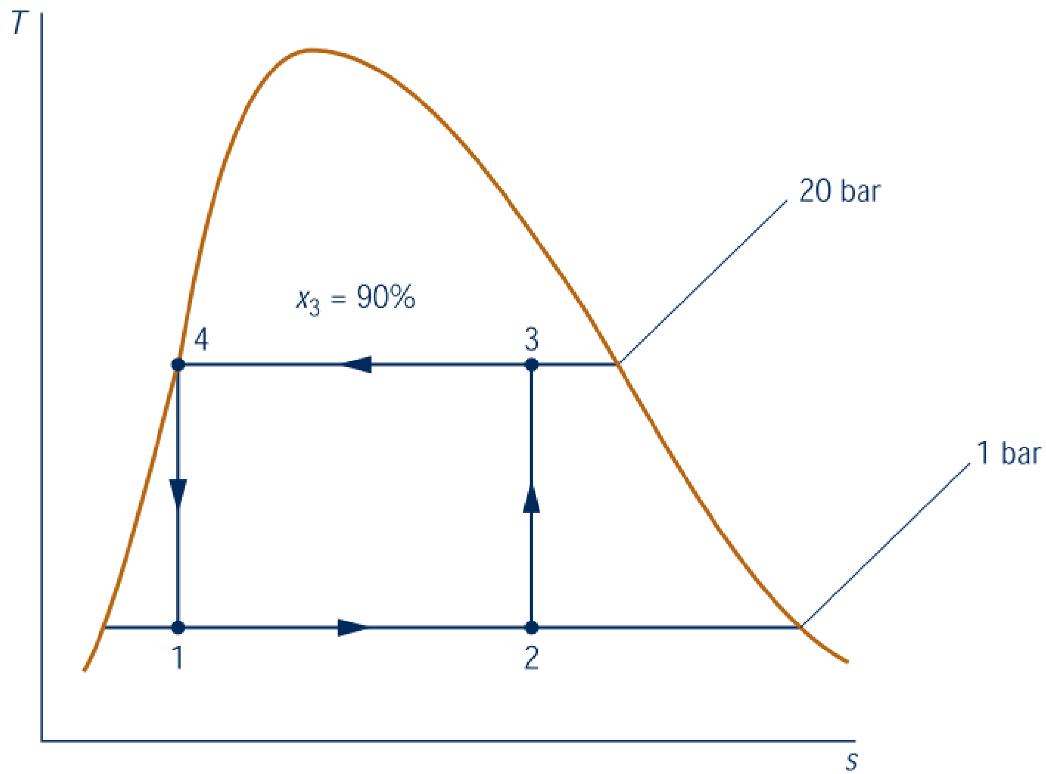
$$\left(\frac{W}{m}\right)_{2-3} = (u_2 - u_3) = (268{,}075 - 168{,}864)$$

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

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

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

$$\left.\begin{matrix} T_1 = 250°C \\ x_1 = 0{,}8 \end{matrix}\right\} \begin{cases} u_1 = u_f + x_1(u_g - u_f) \\ u_1 = 1080{,}4 + 0{,}8(2602{,}4 - 1080{,}4) \\ u_1 = 2298\ kJ/kg \\ s_1 = s_f + x_1(s_g - s_f) \\ s_1 = 2{,}7927 + 0{,}8(6{,}0730 - 2{,}7927) \\ s_1 = 5{,}41694\ kJ/kg \cdot K \end{cases}$$

Tabela A-4 (interpolando)

$$\left.\begin{matrix} T_2 = 250°C \\ p_2 = 2\ MPa \end{matrix}\right\} \begin{cases} u_2 = 2678{,}8\ kJ/kg \\ s_2 = 6{,}5421\ kJ/kg \end{cases}$$

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)

$$\left.\begin{array}{l} T_2 = 250°C \\ p_2 = 2\ MPa \end{array}\right\} \begin{array}{l} u_2 = 2678{,}8\ kJ/kg \\ s_2 = 6{,}5421\ kJ/kg \cdot K \end{array}$$

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

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

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

Tabela A-2 (interpolando)

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

Exercício 6.33

b)

Processo 3-4: rejeita a energia Q_C comprime isotermicamente

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

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

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

Tabela A-2

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

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

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

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

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

Tabela A-2 (interpolando)

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

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

$$\left.\begin{array}{l} T_4 = 175°C \\ x_4 = 0{,}7334 \end{array}\right\} \begin{array}{l} u_4 = 2089{,}585\ kJ/kg \\ s_4 = 5{,}41694\ kJ/kg\cdot K \end{array}$$

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

Tabela A-2

$$\left.\begin{array}{l} T_1 = 250°C \\ x_1 = 0{,}8 \end{array}\right\} \begin{array}{l} u_1 = 2298\ kJ/kg \\ s_1 = 5{,}41694\ kJ/kg\cdot K \end{array}$$

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

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

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

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

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

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

$$S_2 - S_1: \begin{cases} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{cases}$$

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

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

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

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

$$\sigma = 5(7{,}3115 - 7{,}6350)$$

$$\boxed{\sigma = -1{,}6175\ kJ/kg}$$

* (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, 40°C e um volume de 0,2 m³, é agitado até que sua temperatura alcance 353°C. 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)

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

b)

- Balanço de energia:

$$\Delta U + \cancel{\Delta EC} + \cancel{\Delta EP} = \cancel{Q} - W$$

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

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

Modelo de gás ideal

$$m = \frac{p_1 V}{RT_1} \qquad cv = \frac{R}{(k-1)}$$

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

$$\boxed{W = -200\ kJ}$$

* (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, 40°C e um volume de 0,2 m³, é agitado até que sua temperatura alcance 353°C. 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

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

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

Modelo de gás ideal à volume constante

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

$$m = \frac{p_1 V}{RT_1} \qquad cv = \frac{R}{(k-1)}$$

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

$$\sigma = \frac{p_1 V}{RT_1}\left(\frac{R}{(k-1)}.\,ln\frac{T_2}{T_1}\right)$$

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

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

* (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.

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

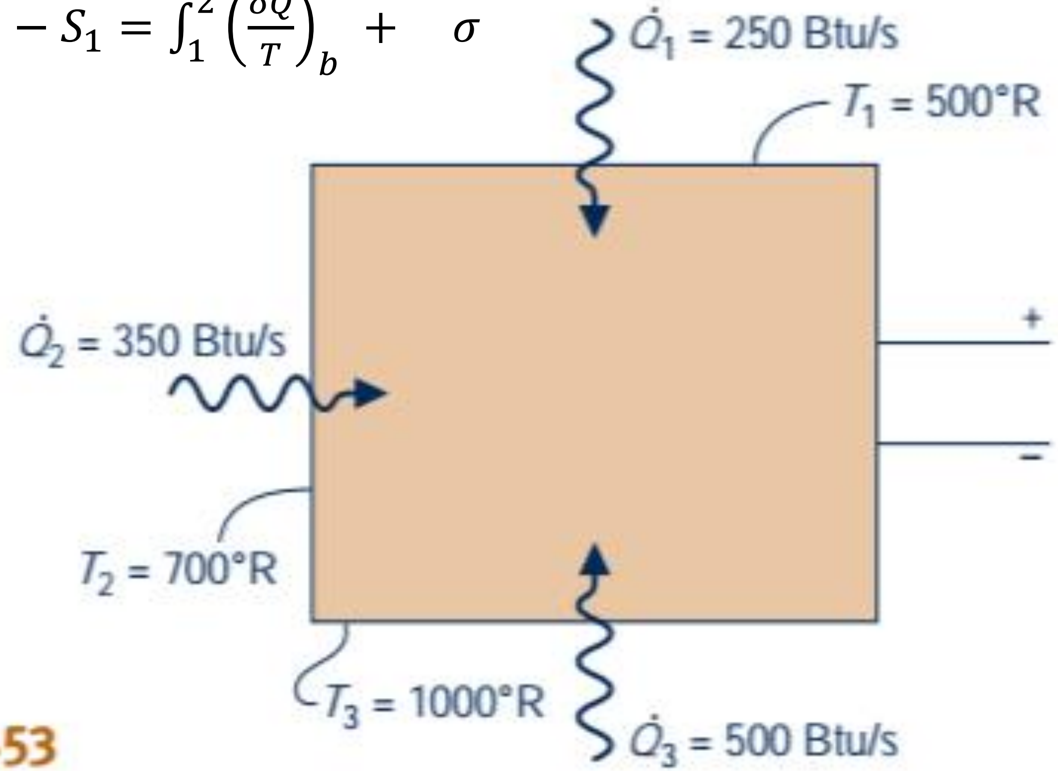


Fig. P6.53

* (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

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

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."

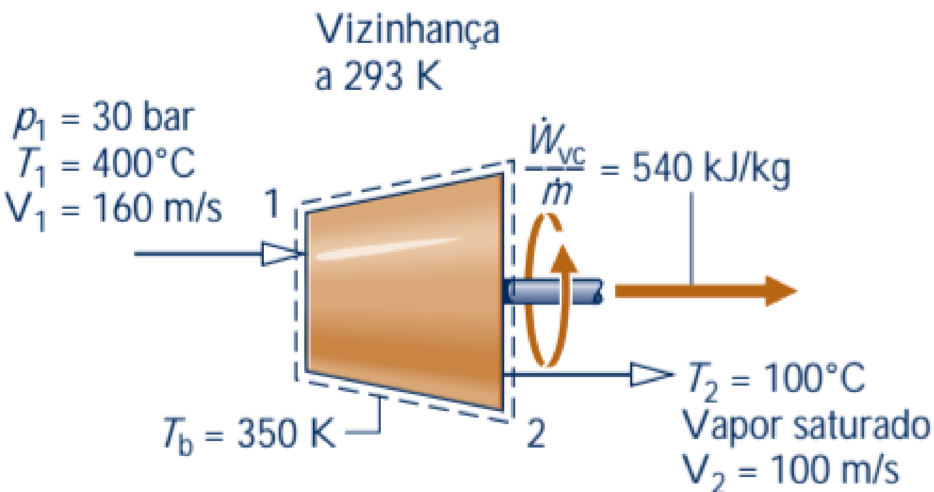
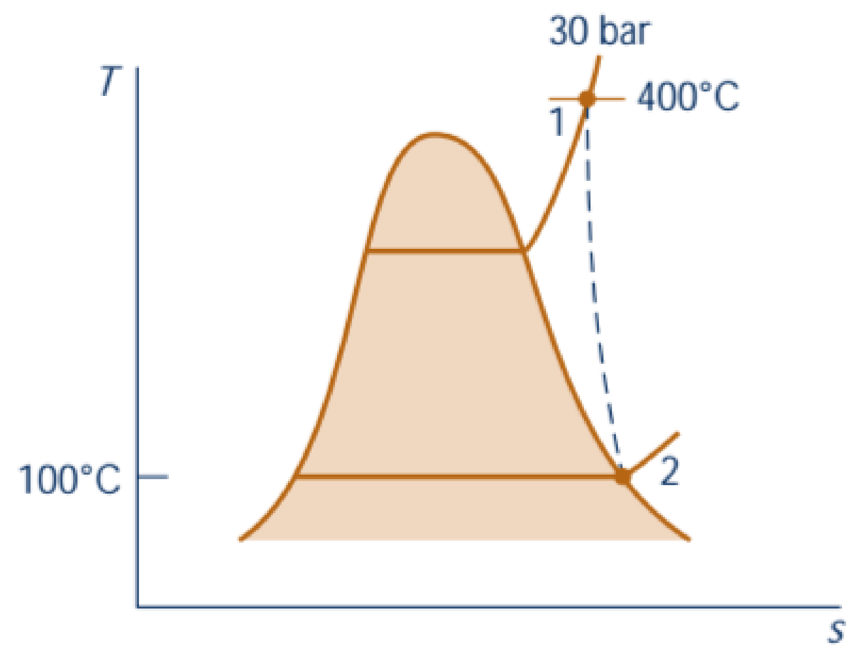


Fig. E6.6



* (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:

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

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

Balanço de energia com uma entrada e uma saída:

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

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

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

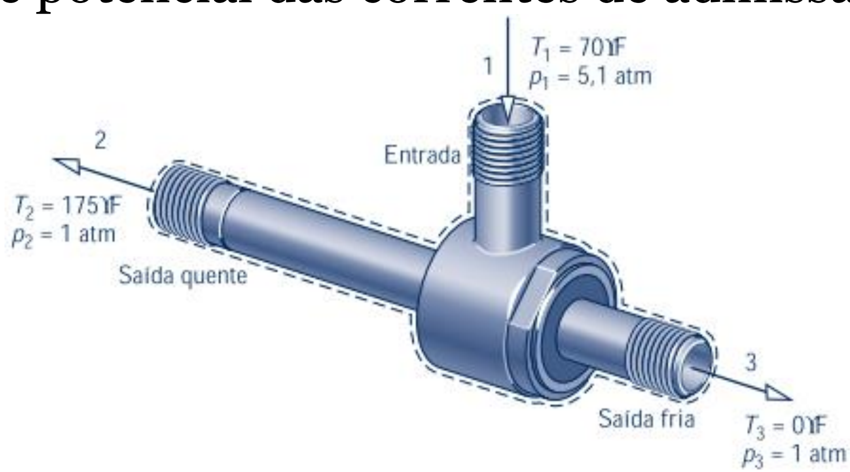
$$\frac{\dot{\sigma}_{VC}}{\dot{m}} = -\frac{-22{,}6\ [kJ/kg]}{350\ [K]} + (7{,}3549 - 6{,}9212)\ [kJ/kg \cdot K] \Longrightarrow \boxed{\frac{\dot{\sigma}_{VC}}{\dot{m}} = 0{,}498\ [kJ/kg \cdot K]}$$

* (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

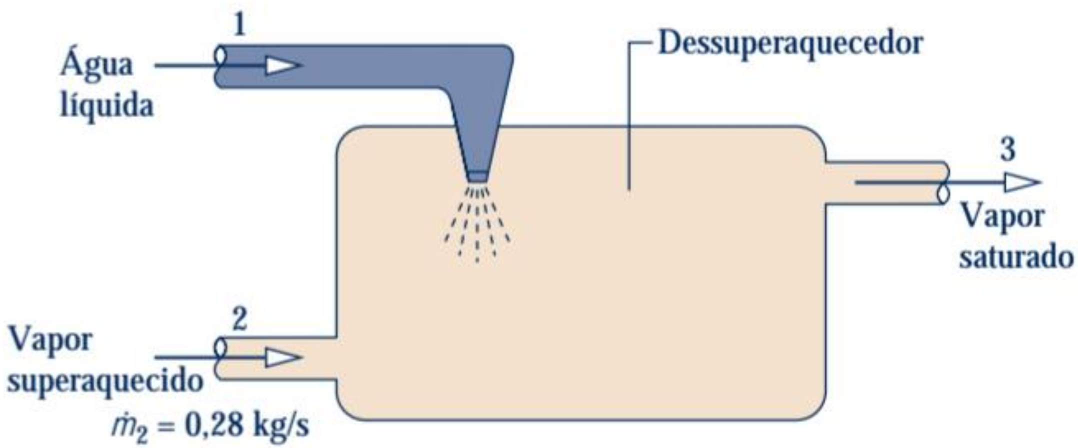


Fig. P6.86

* (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

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

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

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

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

* (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

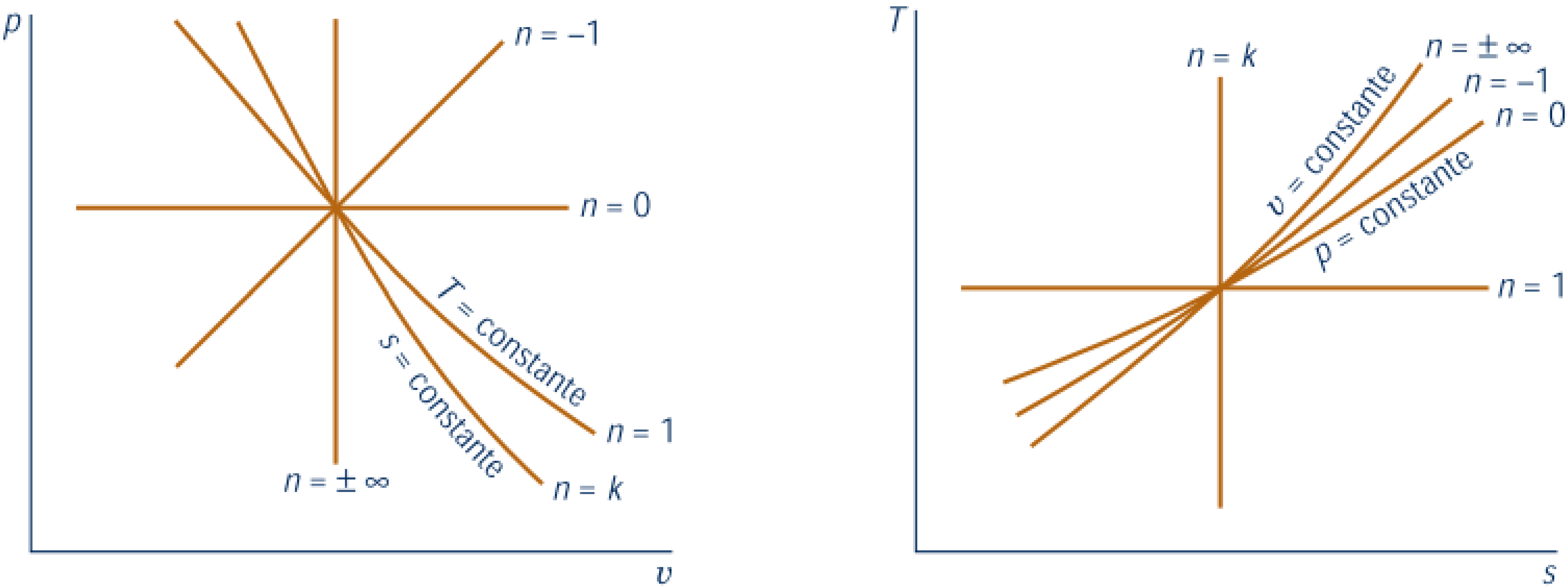
$$\dot{\sigma}_{VC} = \dot{m}_3 s_3 - (\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_2 s_2)$$

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

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

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

Processos Isentrópicos do ar



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

Processos Isentrópicos do ar

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

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

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{exp[s^0(T_2)/R]}{exp[s^0(T_1)/R]}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}} \quad (s_1 = s_2, somente\ para\ o\ ar)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}} \quad (s_1 = s_2, somente\ para\ o\ ar)$$

Da aula sobre processos politrópicos do ar, temos:

Quando: $n = k = c_p/c_v$

processo isentrópico

$$c_p(T) = \frac{kR}{k-1} \qquad c_v(T) = \frac{R}{k-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} \quad (s_1 = s_2, k\ constante)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} \quad (s_1 = s_2, k\ constante)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k} \quad (s_1 = s_2, k\ constante)$$

Processos Isentrópicos do ar (exercício resolvido)

Ar é submetido a um processo isentrópico de $p_1 = 1$ atm, $T_1 = 540°R\,(26{,}8°C)$ até um estado final em que a temperatura é $T_2 = 1160°R\,(371{,}3°C)$. Utilizando o modelo de gás ideal, determine a pressão final p_2, em atm. Utilize
(a) dados de p_r da Tabela A-22E,
(b) O Interactive Thermodynamics: IT ou um programa similar
(c) Uma razão de calores específicos k constante avaliada a uma temperatura média, $850°R\,(199{,}1°C)$, a partir da Tabela A-20E.

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

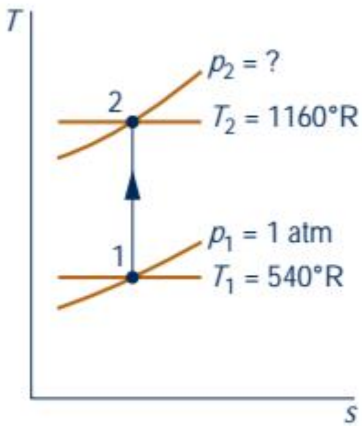
Processos Isentrópicos do ar (exercício resolvido)

SOLUÇÃO

Dado: ar é submetido a um processo isentrópico a partir de um estado em que a pressão e a temperatura são conhecidas até um estado em que a temperatura é especificada.

Pede-se: determine a pressão final utilizando (a) dados de p_r, (b) o *IT* ou um programa similar e (c) um valor constante para a razão de calores específicos constante k.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. Uma quantidade de ar considerada como sistema é submetida a um processo isentrópico.
2. O ar pode ser modelado como um gás ideal.
3. No item (c) a razão de calores específicos é constante.

Fig. E6.9

(a) As pressões e temperaturas nos dois estados de um gás ideal, tendo as mesmas entropias específicas, estão relacionadas na Eq. 6.41

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}}$$

Resolvendo

$$p_2 = p_1 \frac{p_{r2}}{p_{r1}}$$

Com valores de p_r da Tabela A-22E

$$p = (1\ \text{atm}) \frac{21{,}18}{1{,}3860} = 15{,}28\ \text{atm}$$

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

Processos Isentrópicos do ar (Exercício resolvido)

(b) A solução utilizando o *IT* é descrita a seguir:

```
T1 = 540 // °R
p1 = 1 // atm
T2 = 1160 // °R
s_TP("Air", T1,p1) = s_TP("Air",T2,p2)

// Result: p2 = 15.28 atm
```

1 (marcador da linha s_TP)

(c) Quando a razão de calores específicos k é considerada constante, as temperaturas e pressões em dois estados de um gás ideal tendo a mesma entropia específica estão relacionadas na Eq. 6.43. Então

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

A partir da Tabela A-20E, na temperatura média, 390°F (850°R), $k = 1{,}39$. Substituindo valores na expressão anterior

2 $$p_2 = (1\ \text{atm})\left(\frac{1160}{540}\right)^{1{,}39/0{,}39} = 15{,}26\ \text{atm}$$

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

Processos Isentrópicos do ar (Exercício sugerido)

6.123 Ar em um conjunto cilindro-pistão é comprimido isentropicamente de um estado 1, em que $T_1 = 35°C$, até um estado 2, no qual o volume específico é um décimo do volume específico no estado 1. Usando o modelo de gás ideal com $k = 1,4$, determine (a) T_2, em °C e (b) o trabalho, em kJ/kg.

6.130 Um tanque rígido e isolado, com 20 m^3 de volume, é preenchido inicialmente por ar a 10 bar, 500 K. Um vazamento se desenvolve e o ar escapa lentamente, até que a pressão do ar que permanece no tanque é de 5 bar. Empregando o modelo de gás ideal com $k = 1,4$ para o ar, determine a quantidade de massa que permanece no interior do tanque, em kg, e sua temperatura, em K.

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

Processos Isentrópicos do ar (Exercício sugerido)

6.123 Ar em um conjunto cilindro-pistão é comprimido isentropicamente de um estado 1, em que $T_1 = 35°C$, até um estado 2, no qual o volume específico é um décimo do volume específico no estado 1. Usando o modelo de gás ideal com $k = 1{,}4$, determine (a) T_2, em °C e (b) o trabalho, em kJ/kg.

a) $T_2 = ?$

Hipóteses:

- Processo isentrópico;
- Modelo de gás ideal.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} \quad \Rightarrow \quad T_2 = (35 + 273{,}15)\left(\frac{v_1}{0{,}1 \cdot v_1}\right)^{1{,}4-1}$$

$$T_2 = 774{,}04\ K \approx 500{,}88\ °C$$

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

Processos Isentrópicos do ar (Exercício sugerido)

b) $W = ?$

Hipóteses:
- Sem variações de energia cinética e potencial;
- Sem interação de calor entre vizinhança e sistema.

Aplicando um balanço de energia no sistema fechado

$$\Delta U + \cancel{\Delta EC} + \cancel{\Delta EP} = \cancel{Q} - W$$

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

Tabela A-22:
Determinar u em função
da temperatura?
Podemos usar essa alternativa?

$$\frac{du}{dT} = c_v$$

$$c_v(T) = \frac{R}{k-1}$$

$$\frac{W}{m} = -c_v(T_2 - T_1)$$

$$\frac{W}{m} = -\frac{R}{k-1}(T_2 - T_1)$$

$$\frac{W}{m} = -\frac{8{,}314/28{,}97}{1{,}4-1}(774{,}04 - 308{,}15)$$

$$\frac{W}{m} = -334{,}3\ kJ/kg$$

Processos Isentrópicos do ar (Exercício sugerido)

6.130 Um tanque rígido e isolado, com 20 m^3 de volume, é preenchido inicialmente por ar a 10 bar, 500 K. Um vazamento se desenvolve e o ar escapa lentamente, até que a pressão do ar que permanece no tanque é de 5 bar. Empregando o modelo de gás ideal com $k = 1{,}4$ para o ar, determine a quantidade de massa que permanece no interior do tanque, em kg, e sua temperatura, em K.

$\boldsymbol{m_2 = ?}$

$\boldsymbol{T_2 = ?}$

Hipóteses:

- Processo isentrópico;
- Modelo de gás ideal.

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

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} \Rightarrow T_2 = 500\left(\frac{5}{10}\right)^{(1{,}4-1)/1{,}4} \Rightarrow T_2 = 410{,}17\ K$$

$$m_2 = \frac{P_2 V_2}{R T_2} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 20}{8{,}314/28{,}97 \cdot 410{,}17} \Rightarrow m_2 = 84{,}95\ kg$$

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

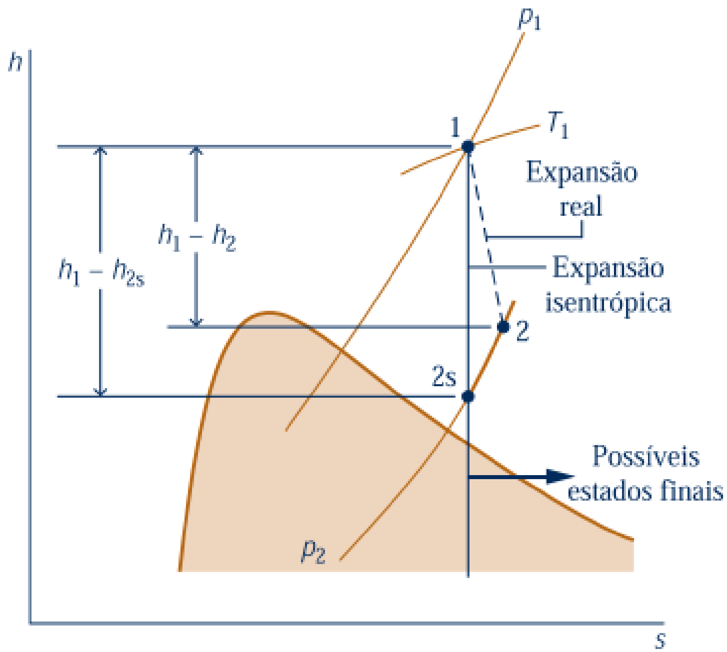
Eficiência isentrópica de turbinas

Análise de eficiência de turbina, nas condições de:

i) Regime permanente;

ii) Uma entrada e uma saída;

iii) Sem variações significativas de energia cinética e potencial.



Balanço de energia

$$\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

2° Lei

$$\frac{\dot{\sigma}_{VC}}{\dot{m}} = s_2 - s_1 \geq 0$$

Máximo trabalho desenvolvido

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_s = h_1 - h_{2s}$$

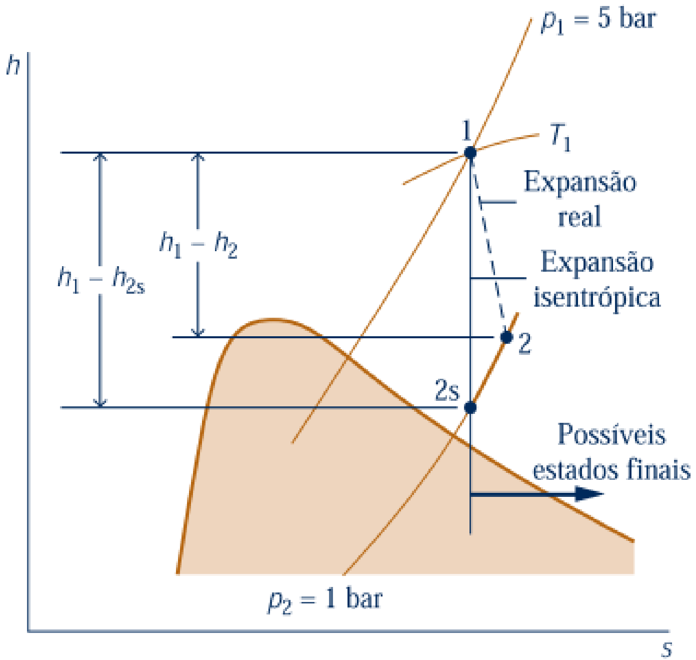
Eficiência Isentrópica da turbina: *Avaliada para o mesmo estado inicial e mesma pressão de descarga*

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{VC}/\dot{m}}{\left(\dot{W}_{VC}/\dot{m}\right)_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

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

Eficiência isentrópica de turbinas (exercício resolvido)

Uma turbina a vapor opera em regime permanente com condições de entrada de p_1 = 5 bar e T_1 = 320°C. Vapor deixa a turbina a uma pressão de 1 bar. Não ocorre transferência de calor significativa entre a turbina e a vizinhança, e as variações das energias cinética e potencial entre a admissão e a descarga podem ser desprezadas. Se a eficiência isentrópica da turbina é de 75%, determine o trabalho produzido por unidade de massa de vapor escoando na turbina, em kJ/kg.



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

Eficiência isentrópica de turbinas (exercício resolvido)

Análise: o trabalho produzido pode ser determinado utilizando-se a eficiência isentrópica da turbina, Eq. 6.46, que após ser rearranjada fornece

$$\frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} = \eta_t \left(\frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}}\right)_s = \eta_t (h_1 - h_{2s})$$

A partir da Tabela A-4, $h_1 = 3105{,}6$ kJ/kg e $s_1 = 7{,}5308$ kJ/kg · K. O estado de saída para a expansão isentrópica está determinado

1 por $p_2 = 1$ bar e $s_{2s} = s_1$. Interpolando com a entropia específica na Tabela A-4 a 1 bar temos $h_{2s} = 2743{,}0$ kJ/kg. Substituindo valores, temos

2 $$\frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} = 0{,}75(3105{,}6 - 2743{,}0) = 271{,}95 \text{ kJ/kg}$$

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

Eficiência isentrópica de turbinas (exercício resolvido)

6.141 Ar a 1175 K e 8 bar é admitido em uma turbina operando em regime permanente e sofre um processo de expansão adiabático até 1 bar. A eficiência isentrópica da turbina é de 92%. Empregando o modelo de gás ideal com $k = 1{,}4$, determine (a) o trabalho desenvolvido pela turbina, em kJ por kg de ar em escoamento, e (b) a temperatura na saída, em K. Despreze os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados.

6.142 Vapor d'água entra em uma turbina operando em regime permanente a 10 MPa, 600°C e uma vazão volumétrica de 0,36 m^3/s, e sai a 0,1 bar e um título de 92%. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine para a turbina (a) a vazão mássica, em kg/s, (b) a potência desenvolvida pela turbina, em MW, (c) a taxa na qual a entropia é gerada, em kW/K, e (d) a eficiência isentrópica da turbina.

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

Eficiência isentrópica de turbinas (exercício resolvido)

6.141 Ar a 1175 K e 8 bar é admitido em uma turbina operando em regime permanente e sofre um processo de expansão adiabático até 1 bar. A eficiência isentrópica da turbina é de 92%. Empregando o modelo de gás ideal com k = 1,4, determine (a) o trabalho desenvolvido pela turbina, em kJ por kg de ar em escoamento, e (b) a temperatura na saída, em K. Despreze os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados.

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

a) $\dot{W}_{VC}/\dot{m} = ?$

b) $T_2 = ?$

Dados:

$\eta_t = 0{,}92$

$T_1 = 1175\ K \qquad p_1 = 8\ bar$

$p_2 = 1\ bar \qquad k = 1{,}4$

a)

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{VC}/\dot{m}}{\left(\dot{W}_{VC}/\dot{m}\right)_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = \frac{c_p(T_1 - T_2)}{c_p(T_1 - T_{2s})}$$

$$c_p(T) = \frac{kR}{k-1}$$

$$\dot{W}_{VC}/\dot{m} = \eta_t \cdot c_p(T) \cdot (h_1 - h_{2s})$$

$$\dot{W}_{VC}/\dot{m} = \eta_t \cdot \frac{kR}{k-1} \cdot (h_1 - h_{2s})$$

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

Eficiência isentrópica de turbinas (exercício resolvido)

$$T_{2s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} = 1175 \left(\frac{1}{8}\right)^{(1,4-1)/1,4} = 648,65\ K$$

$$\dot{W}_{VC}/\dot{m} = \eta_t \cdot \frac{kR}{k-1} \cdot (T_1 - T_{2s})$$

$$\dot{W}_{VC}/\dot{m} = 486,2\ kJ/kg$$

b) $T_2 = ?$

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{VC}/\dot{m}}{\left(\dot{W}_{VC}/\dot{m}\right)_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = \frac{c_p(T_1 - T_2)}{c_p(T_1 - T_{2s})}$$

$$T_2 = T_1 - \eta_t(T_1 - T_{2s}) \qquad T_2 = 690,76\ K$$

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

Eficiência isentrópica de turbinas (exercício resolvido)

6.142 Vapor d'água entra em uma turbina operando em regime permanente a 10 MPa, 600°C e uma vazão volumétrica de 0,36 m³/s, e sai a 0,1 bar e um título de 92%. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine para a turbina (a) a vazão mássica, em kg/s, (b) a potência desenvolvida pela turbina, em MW, (c) a taxa na qual a entropia é gerada, em kW/K, e (d) a eficiência isentrópica da turbina.

Hipóteses:

- Desconsiderando variações de energia cinética e potencial;

a) $\dot{m} =?$

b) $\dot{W}_{VC} =?$

c) $\dot{\sigma} =?$

d) $\eta_t =?$

Dados:

$T_1 = 600\ °C$

$p_1 = 10\ \text{Mpa}$

$\dot{V}_1 = 0{,}36\ m^3/s$

$p_2 = 0{,}1\ bar$

$x = 0{,}92$

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

Eficiência isentrópica de turbinas (exercício resolvido)

a)

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}_1}{v_1}\left[\frac{m^3/s}{m^3/kg}\right]$$

Tabela A4

$$v_1 = 0{,}03837 m^3/kg$$

$$\dot{m} = 9{,}3823\ kg/s$$

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

Tabela A4

$$h_1 = 3625{,}3\ kJ/kg$$

Tabela A3

$$h_2 = 2393{,}206\ kJ/kg$$

$$\dot{W}_{VC} = 11{,}56\ MW$$

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

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

$$\dot{\sigma}_{VC} = \dot{m}(s_1 - s_2)$$

d) $\eta_t = ?$

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

$$h_{2s} = f(p_2, s_1 = s_{2s})$$

Eficiência isentrópica de bocais

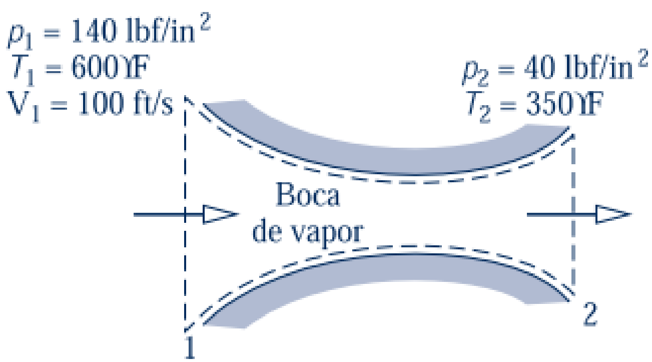
Análise de eficiência de um bocal, nas condições de:

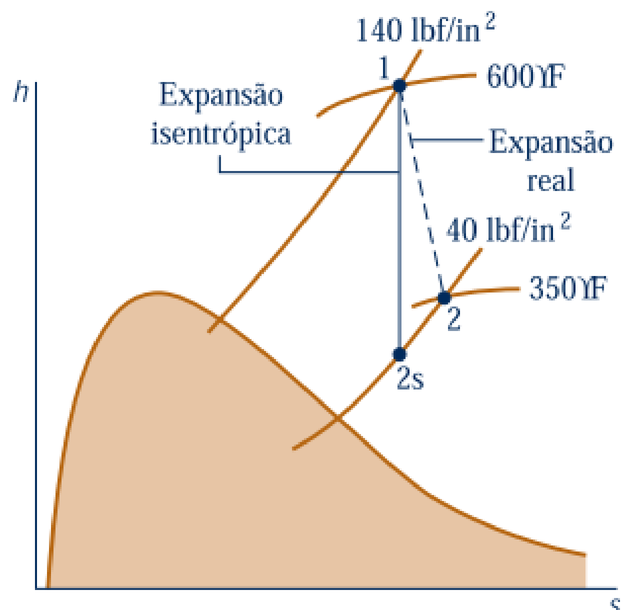
i) Regime permanente;
ii) Uma entrada e uma saída;
iii) Sem interações na forma de calor ou trabalho;
iv) Sem variações significativas de energia interna e potencial.

$$\eta_{bocal} = \frac{V_2^2/2}{(V_2^2/2)_s}$$

Eficiência isentrópica de turbinas (exercício resolvido)

Vapor d'água é admitido em um bocal que opera em regime permanente a p_1=140 lbf/in² (965,3 kPa) e T_1=600°F (315,6°C) com uma velocidade de 100 ft/s. A pressão e a temperatura na descarga são p_2=40 lbf/in² (275,8 kPa) e T_2=350°F (176,7°C). Não ocorre transferência de calor significativa entre o bocal e sua vizinhança, e as variações da energia potencial entre a entrada e a saída podem ser desprezadas. Determine a eficiência do bocal





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

Eficiência isentrópica de turbinas (exercício resolvido)

Análise: a eficiência do bocal dada pela Eq. 6.47 requer a energia cinética específica real na saída do bocal e a energia cinética específica que seria atingida na saída, em uma expansão isentrópica a partir do estado de admissão especificado e a pressão de saída dada. O balanço da taxa de energia para o volume de controle com uma entrada e uma saída em regime permanente, que engloba o bocal, se reduz a Eq. 4.21, que rearranjada fornece

$$\frac{V_2^2}{2} = h_1 - h_2 + \frac{V_1^2}{2}$$

Esta equação se aplica tanto para a expansão real quanto para a expansão isentrópica.

A partir da Tabela A-4E a $T_1 = 600°F$ e $p_1 = 140$ lbf/in^2, $h_1 = 1326{,}4$ Btu/lb, $s_1 = 1{,}7191$ Btu/lb · °R. Também, com $T_2 = 350°F$ e $p_2 = 40$ lbf/in^2, $h_2 = 1211{,}8$ Btu/lb. Então, a energia cinética real na saída em Btu/lb é

$$\frac{V_2^2}{2} = 1326{,}4\,\frac{\text{Btu}}{\text{lb}} - 1211{,}8\,\frac{\text{Btu}}{\text{lb}} + \frac{(100\ \text{ft/s})^2}{(2)\left|\dfrac{32{,}2\ \text{lb}\cdot\text{ft/s}^2}{1\ \text{lbf}}\right|\left|\dfrac{778\ \text{ft}\cdot\text{lbf}}{1\ \text{Btu}}\right|}$$

$$= 114{,}8\,\frac{\text{Btu}}{\text{lb}}$$

Interpolando na Tabela A-4E a 40 lbf/in^2, com $s_{2s} = s_1 = 1{,}7191$ Btu/lb · °R, resulta $h_{2s} = 1202{,}3$ Btu/lb. Consequentemente, a energia cinética específica na saída para uma expansão isentrópica é

$$\left(\frac{V_2^2}{2}\right)_s = 1326{,}4 - 1202{,}3 + \frac{(100)^2}{(2)|32{,}2|\,|778|} = 124{,}3\ \text{Btu/lb}$$

Substituindo valores na Eq. 6.47

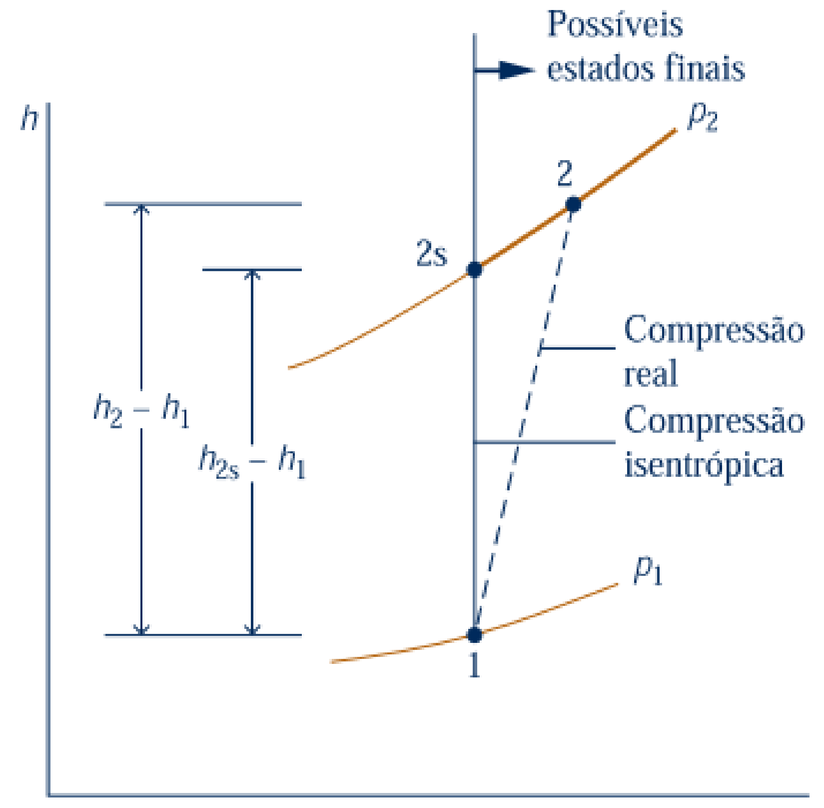
1 $$\eta_{\text{bocal}} = \frac{(V_2^2/2)}{(V_2^2/2)_s} = \frac{114{,}8}{124{,}3} = 0{,}924\ (92{,}4\%)$$

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

Eficiência isentrópica de Compressores e Bombas

Análise de eficiência de Compressores e bombas, nas condições de:

i) Regime permanente;
ii) Uma entrada e uma saída;
iii) Sem variações significativas de energia cinética e potencial.



Balanço de energia

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right) = h_2 - h_1$$

Mínimo trabalho requerido

$$\left(-\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_s = h_{2s} - h_1$$

Eficiência Isentrópica da compressores e bombas:
Avaliada para o mesmo estado inicial e mesma pressão de descarga

$$\eta_t = \frac{\left(-\dot{W}_{VC}/\dot{m}\right)_s}{\left(-\dot{W}_{VC}/\dot{m}\right)} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

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

Eficiência isentrópica de Compressores e Bombas

6.107 Ar é admitido em um compressor operando em regime permanente a 1 bar, 22°C e uma vazão volumétrica de 1 m^3/min, sendo comprimido até 4 bar e 177°C. A potência necessária é 3,5 kW. Utilizando o modelo de gás ideal e ignorando os efeitos das energia cinética e potencial, obtenha os seguintes resultados:

(a) Para um volume de controle envolvendo somente o compressor, determine a taxa de transferência, em kW, e a variação da entropia específica entre a entrada e a saída, em kJ/kg · K. Que informação adicional seria necessária para a avaliação da geração de entropia?

(b) Calcule a taxa de geração de entropia, em kW/K, para um volume de controle estendido envolvendo o compressor e uma parcela de sua vizinhança próxima, de maneira que a transferência de calor ocorra a uma temperatura ambiente de 22°C.

Eficiência isentrópica de Compressores e Bombas

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

Dados:

$T_1 = 22°C \qquad p_1 = 1\ bar$

$T_2 = 177°C \qquad p_2 = 4\ bar$

$\dot{W}_{VC} = 3{,}5\ kW \qquad \dot{V} = 1\ m^3/min$

a) $\dot{Q} =?\ [kW]$

$(s_1 - s_2) =?\ [kJ/kg]$

b) $T_\infty = 22°C$

$\dot{\sigma} =?\ [kW/K]$

a)

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

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v} = \frac{1/60}{RT/p} = \frac{1/60 \cdot 10^5}{\frac{8314}{28{,}97}(22 + 273{,}15)} = 0{,}01968\ kg/s$$

Tabela A-22 para as entalpias

$$\dot{Q}_{VC} = -3{,}5 + 0{,}01968(451{,}8 - 295{,}17)$$

$$\dot{Q}_{VC} = -0{,}4175\ kW$$

Eficiência isentrópica de Compressores e Bombas

a)

Tabela A22 para as entalpias

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

$$\mathrm{s}(\mathrm{T}_2, \mathrm{p}_2) - \mathrm{s}(\mathrm{T}_1, \mathrm{p}_1) = 2{,}11161 - 1{,}68515 - \frac{8{,}314}{28{,}97}\ln 4$$

$$\mathrm{s}(\mathrm{T}_2, \mathrm{p}_2) - \mathrm{s}(\mathrm{T}_1, \mathrm{p}_1) = 0{,}0286\, kJ/kg \cdot K$$

b)

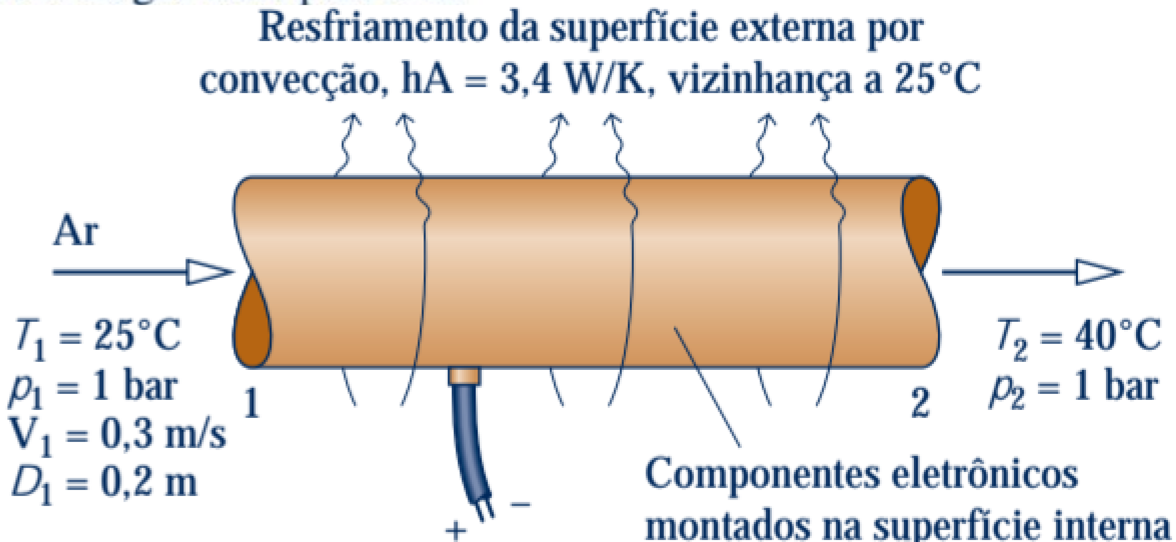
$$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{VC}$$

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

$$\dot{\sigma}_{VC} = 1{,}98 \cdot 10^{-3}\, kW/K$$

Balanço de Entropia em Volumes de Controle

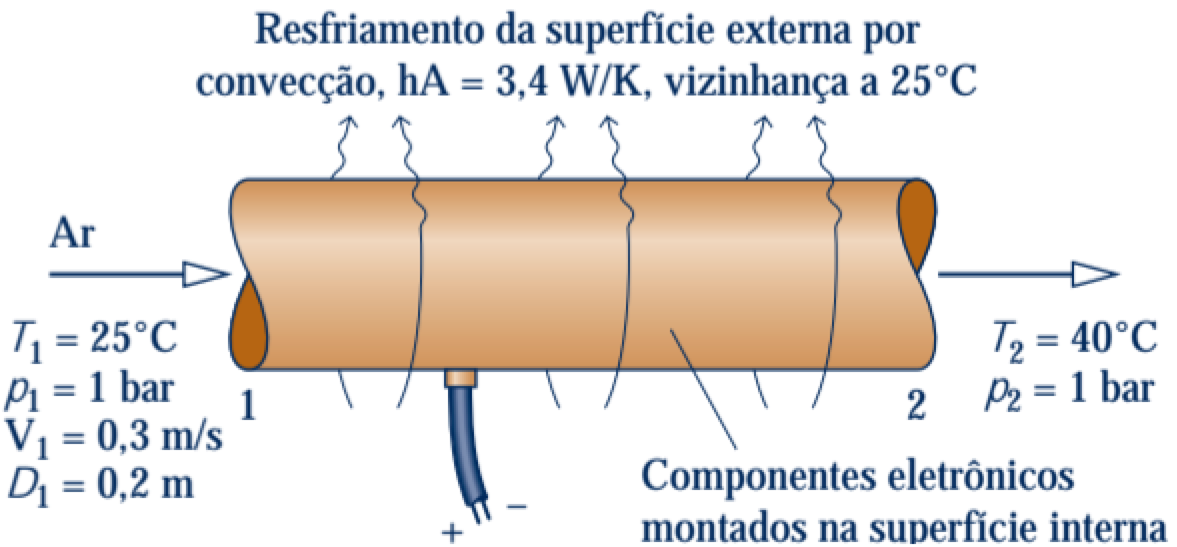
6.96 Componentes eletrônicos são montados na superfície interna de um duto cilíndrico horizontal cujo diâmetro interno é 0,2 m, conforme ilustrado na Fig. P6.96. De modo a prevenir um superaquecimento dos componentes, o cilindro é resfriado por um fluxo de ar escoando em seu interior e por convecção 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) $\dot{\sigma} = ?\ [W/K]$

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

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

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

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

Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente

Calor Transferido, nas condições de:

i) Regime permanente;
ii) Uma entrada e uma saída;
iii) Escoamento isotérmico;
iv) Internamente reversível.

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

h_e

$i)$ $\quad iii)\ \frac{\dot{Q}_{VC}}{T}$ $\quad ii)\ \dot{m}(s_1 - s_2)$ $\quad iv)$

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

Quando a temperatura varia com o escoamento do fluido ao longo do V.C.

$$\left(\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = \int_1^2 T ds$$

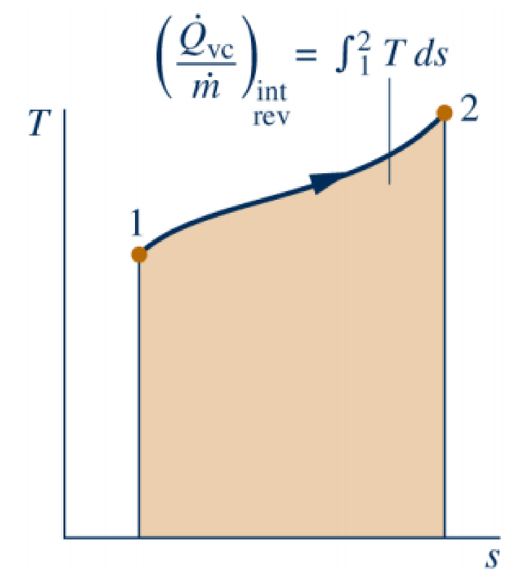


Fig. 6.13 Área correspondente ao calor transferido em um processo de escoamento internamente reversível de um sistema fechado.

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

Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente

Trabalho realizado, nas condições de:

i) Regime permanente;
ii) Uma entrada e uma saída;
iii) Escoamento isotérmico;
iv) Internamente reversível.

$$\cancel{\frac{dE}{dt}} = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \underbrace{\sum_e \dot{m}_e\left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e\right) - \sum_s \dot{m}_s\left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s\right)}_{ii)\ \dot{m}\left[(h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right) + g(z_1 - z_2)\right]}$$

$i)$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = \underbrace{\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}}}_{iii\ e\ iv)} + (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right) + g(z_1 - z_2)$$

$$\int_1^2 Tds = dh - vdp = (h_2 - h_1) - \int_1^2 vdp$$

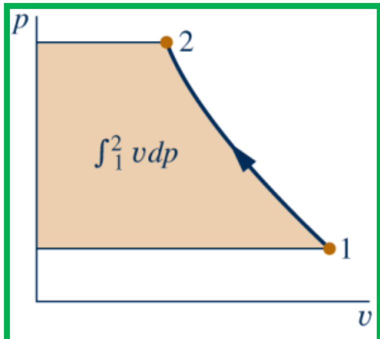


Fig. 6.14 Área correspondente a $\int_1^2 v\,dp$.

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -\int_1^2 vdp + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right) + g(z_1 - z_2)$$

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

Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente

Trabalho em processos **politrópicos**, nas condições de:

i) Regime permanente;
ii) Uma entrada e uma saída;
iii) Escoamento isotérmico;
iv) Internamente reversível;
v) Sem variações significativas de energia interna e potencial.

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -\int_1^2 v dp \qquad pv^n = cte$$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -\int_1^2 v dp = -\int_1^2 \left(\frac{cte}{p}\right)^{1/n} dp = -cte^{1/n}\left(\frac{p^{1-\frac{1}{n}}}{1-\frac{1}{n}}\right) = -\frac{n}{1-n}cte^{1/n}\left[p_2^{\left(1-\frac{1}{n}\right)} - p_1^{\left(1-\frac{1}{n}\right)}\right]$$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -\frac{n}{1-n}\left[p_2^{\frac{1}{n}} v_2 p_2^{\left(1-\frac{1}{n}\right)} - p_1^{\frac{1}{n}} v_1 p_1^{\left(1-\frac{1}{n}\right)}\right]$$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -\frac{n}{1-n}(p_2 v_2 - p_1 v_1) \qquad (politrópico, n \neq 1)$$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -\int_1^2 v dp = -\int_1^2 \left(\frac{cte}{p}\right)^{1/n} dp = -cte \cdot ln(p_2/p_1) \qquad (politrópico, n = 1)$$

Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -\frac{n}{1-n}(p_2v_2 - p_1v_1) \quad \therefore \quad pv = RT \quad (politrópico, gás\ ideal, n \neq 1)$$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -\frac{nR}{1-n}(T_2 - T_1) \quad (politrópico, gás\ ideal, n \neq 1)$$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -\frac{nRT_1}{1-n}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n} - 1\right] \quad (politrópico, gás\ ideal, n \neq 1)$$

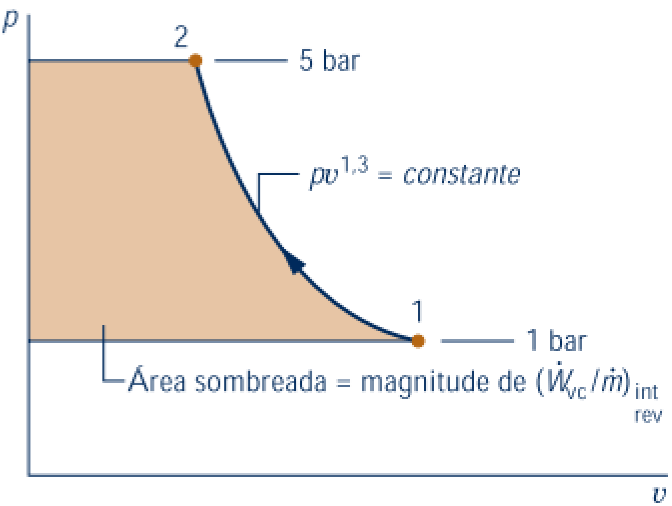
$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -cte \cdot ln(p_2/p_1) \quad \therefore \quad cte = pv^1 = RT \quad (politrópico, gás\ ideal, n = 1)$$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -RT \cdot ln(p_2/p_1) \quad (politrópico, gás\ ideal, n = 1)$$

Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente
Exercício resolvido

Determinando Trabalho e Transferência de Calor para um Processo de Compressão Politrópica do Ar

Um compressor de ar opera em regime permanente com ar admitido a p_1 = 1 bar, T_1 = 20°C e descarregado a p_2 = 5 bar. Determine o trabalho e o calor transferido por unidade de massa que passa através do equipamento, em kJ/kg, se o ar é submetido a um processo politrópico com n = 1,3. Despreze as variações das energias cinética e potencial entre a entrada e a saída. Utilize o modelo de gás ideal para o ar.



Modelo de Engenharia:

1. Um volume de controle envolvendo o compressor se encontra em regime permanente.
2. O ar é submetido a um processo politrópico com n = 1,3.
3. O ar se comporta como um gás ideal.
4. As variações das energias cinética e potencial da entrada à saída podem ser desprezadas.

Fig. E6.15

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

Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente
Exercício resolvido

Análise: o trabalho pode ser obtido utilizando a Eq. 6.55a, que requer para sua utilização a temperatura na saída, T_2. A temperatura T_2 pode ser encontrada utilizando-se a Eq. 3.56

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n} = 293\left(\frac{5}{1}\right)^{(1,3-1)/1,3} = 425 \text{ K}$$

Substituindo-se os valores conhecidos na Eq. 6.55a, encontramos

$$\frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} = -\frac{nR}{n-1}(T_2 - T_1) = -\frac{1,3}{1,3-1}\left(\frac{8,314}{28,97}\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)(425-293) \text{ K}$$
$$= -164,2 \text{ kJ/kg}$$

O calor transferido é avaliado pela simplificação dos balanços de massa e energia, utilizando as hipóteses para obter

$$\frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} + h_2 - h_1$$

Utilizando as temperaturas T_1 e T_2, as entalpias específicas requeridas são obtidas a partir da Tabela A-22 como $h_1 = 293,17$ kJ/kg e $h_2 = 426,35$ kJ/kg. Então

$$\frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}} = -164,15 + (426,35 - 293,17) = -31 \text{ kJ/kg}$$

❶ Os estados correspondentes ao processo politrópico de compressão são mostrados pela curva no diagrama p–v que acompanha esta solução. A magnitude do trabalho por unidade de massa atravessando o compressor é representada pela área sombreada *atrás* da curva.

✓ Habilidades Desenvolvidas

Habilidade para...

- ❑ analisar um processo politrópico de um gás ideal.
- ❑ aplicar o balanço da taxa de energia a um volume de controle.

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

Proc. Int. Reversíveis em Regime Permanente Exercício

6.174 Ar é admitido em um compressor operando em regime permanente a $p_1 = 1$ bar e $T_1 = 17°C$, sendo descarregado a $p_2 = 5$ bar. O ar passa por um processo politrópico, no qual o trabalho de acionamento do compressor é 162,2 kJ por kg de ar em escoamento. Determine (a) a temperatura do ar na saída do compressor, em °C, e (b) a transferência de calor, em kJ por kg de ar em escoamento. (c) Represente o processo em esboços dos diagramas p–v e T–s e associe áreas dos diagramas com o trabalho e a quantidade de calor transferida, respectivamente. Considere o modelo de gás ideal para o ar e despreze os efeitos das energias cinética e potencial.

6.176 Compare o trabalho necessário para comprimir *vapor d'água* em regime permanente isentropicamente até 3 MPa a partir do estado de vapor saturado a 0,1 MPa com o trabalho necessário para bombear *água líquida* isentropicamente até 3 MPa a partir do estado de líquido saturado a 0,1 MPa, ambos em kJ por kg de água escoando através do equipamento. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser ignorados.

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

Proc. Int. Reversíveis em Regime Permanente Exercício

6.174 Ar é admitido em um compressor operando em regime permanente a $p_1 = 1$ bar e $T_1 = 17°C$, sendo descarregado a $p_2 = 5$ bar. O ar passa por um processo politrópico, no qual o trabalho de acionamento do compressor é 162,2 kJ por kg de ar em escoamento. Determine (a) a temperatura do ar na saída do compressor, em °C, e (b) a transferência de calor, em kJ por kg de ar em escoamento. (c) Represente o processo em esboços dos diagramas p–v e T–s e associe áreas dos diagramas com o trabalho e a quantidade de calor transferida, respectivamente. Considere o modelo de gás ideal para o ar e despreze os efeitos das energias cinética e potencial.

Hipóteses:

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

Dados:

$p_1 = 1\ bar \qquad T_1 = 17°C$

$p_2 = 5\ bar \qquad \dfrac{\dot{W}}{\dot{m}} = -162{,}2\ kJ/kg$

a) $T_2 = ?\ °C$

b) $\dfrac{\dot{Q}}{\dot{m}} = ?\ kJ/kg$

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

Proc. Int. Reversíveis em Regime Permanente Exercício

a)

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -\frac{nRT_1}{1-n}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n} - 1\right]$$

$$-162{,}2\ [kJ/kg] = -\frac{n.\frac{8{,}314}{28{,}97}.290{,}15}{1-n}\left[\left(\frac{5}{1}\right)^{(n-1)/n} - 1\right]\ [kJ/kg]$$

$n = 1{,}3$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n} \rightarrow T_2 = 297{,}15.\left(\frac{5}{1}\right)^{(1{,}3-1)/1{,}3} \rightarrow T_2 = 420{,}4\ K$$

b) - Balanço de energia

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = \frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \cancel{\left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right)} + \cancel{g(z_1 - z_2)}$$

Proc. Int. Reversíveis em Regime Permanente Exercício

- Usando a Tabela A22 para determinar a entalpia

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = \frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2)$$

$$-162{,}2\ [kJ/kg] = \frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}} + (290{,}16 - 421{,}67)\ [kJ/kg]$$

$$\boxed{\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}} = -30{,}69\ [kJ/kg]}$$

Proc. Int. Reversíveis em Regime Permanente Exercício

6.176 Compare o trabalho necessário para comprimir *vapor d'água* em regime permanente isentropicamente até 3 MPa a partir do estado de vapor saturado a 0,1 MPa com o trabalho necessário para bombear *água líquida* isentropicamente até 3 MPa a partir do estado de líquido saturado a 0,1 MPa, ambos em kJ por kg de água escoando através do equipamento. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser ignorados.

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

Dados:

a)

$p_1 = 0{,}1\ MPa \quad x_1 = 1$

$p_2 = 3\ MPa$

$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} =?\ kJ/kg$

b)

$p_1 = 0{,}1\ MPa \quad x_1 = 0$

$p_2 = 3\ MPa$

$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} =?\ kJ/kg$

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

Proc. Int. Reversíveis em Regime Permanente Exercício

- Compressão isentrópica, e balanço de energia

$s_1 = s_2$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = \cancel{\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}}} + (h_1 - h_2) + \cancel{\left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right)} + \cancel{g(z_1 - z_2)}$$

a)

$p_1 = 0{,}1\ MPa \qquad x_1 = 1$

$p_2 = 3\ MPa$

Tabela A3

$s_1 = s_2 = 7{,}3594\ \mathrm{kJ}/kg.K$

$h_1 = 2675{,}5\ kJ/kg$

Tabela A4

$h_2 = 3556{,}71\ kJ/kg$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -881{,}21\ \mathrm{kJ/kg}$$

a)

$p_1 = 0{,}1\ MPa \qquad x_1 = 0$

$p_2 = 3\ MPa$

Tabela A3

$s_1 = s_2 = 1{,}3026\ \mathrm{kJ}/kg.K$

$h_1 = 417{,}46\ kJ/kg$

Tabela A5

$h_2 = 420{,}49\ kJ/kg$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{\substack{int\\rev}} = -3{,}03\ \mathrm{kJ/kg}$$

Resumo das principais equações

▶ EQUAÇÕES PRINCIPAIS

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b + \sigma$$	(6.24)	balanço de entropia para um sistema fechado.
$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{\sigma}$$	(6.28)	balanço da taxa de entropia para um sistema fechado.
$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{vc}$$	(6.34)	balanço da taxa de entropia para um volume de controle.
$$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{vc}$$	(6.36)	balanço da taxa de entropia para um volume de controle em regime permanente.
$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{vc}/\dot{m}}{(\dot{W}_{vc}/\dot{m})_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$	(6.46)	eficiência isentrópica de uma turbina.
$$\eta_{bocal} = \frac{V_2^2/2}{(V_2^2/2)_s}$$	(6.47)	eficiência isentrópica de um bocal.
$$\eta_c = \frac{(-\dot{W}_{vc}/\dot{m})_s}{(-\dot{W}_{vc}/\dot{m})} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$	(6.48)	eficiência isentrópica de um compressor (e de uma bomba).

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

Resumo das principais equações

Relações para o Modelo de Gás Ideal

$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\frac{dT}{T} + R\ln\frac{v_2}{v_1}$	(6.17)	Variação da entropia específica; forma geral para T e v como propriedades independentes.
$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = c_v \ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{v_2}{v_1}$	(6.21)	Calor específico c_v constante.
$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\frac{dT}{T} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$	(6.18)	Variação da entropia específica; forma geral para T e p como propriedades independentes.
$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = s^\circ(T_2) - s^\circ(T_1) - R\ln\frac{p_2}{p_1}$	(6.20a)	Para o ar s° é obtido da Tabela A-22. (Para outros gases $\bar{s}^\circ$ é obtido da Tabela A-23.)
$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$	(6.22)	Calor específico c_p constante.
$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}}$	(6.41)	$s_1 = s_2$ (somente para o ar), p_r e v_r são obtidos da Tabela A-22.
$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}}$	(6.42)	
$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}$	(6.43)	$s_1 = s_2$, razão de calores específicos k constante.
$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$	(6.44)	
$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k}$	(6.45)	

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

Exercícios:

6.147 Ar é admitido em um compressor de uma turbina a gás em uma instalação de potência operando em regime permanente a 290 k, 100 kPa e sai a 420 K, 330 kPa. As perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Utilizando o modelo de gás ideal para o ar, determine a eficiência isentrópica do compressor.

6.162 Ar é admitido em um difusor isolado operando em regime permanente a 1 bar, –3°C e 260 m/s e descarregado com uma velocidade de 130 m/s. Utilizando o modelo de gás ideal e ignorando a energia potencial, determine

(a) a temperatura do ar na descarga, em °C.

(b) a pressão de descarga máxima possível, em bar.

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

Exercícios:

6.165 A Fig. P6.165 fornece um esboço de uma planta de potência a vapor operando em regime permanente que utiliza água como fluido de trabalho. Dados localizados em posições estratégicas são fornecidos na figura. A vazão mássica da água que circula através dos componentes é de 109 kg/s. As perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine

(a) a potência líquida desenvolvida, em MW.

(b) a eficiência térmica.

(c) a eficiência isentrópica da turbina.

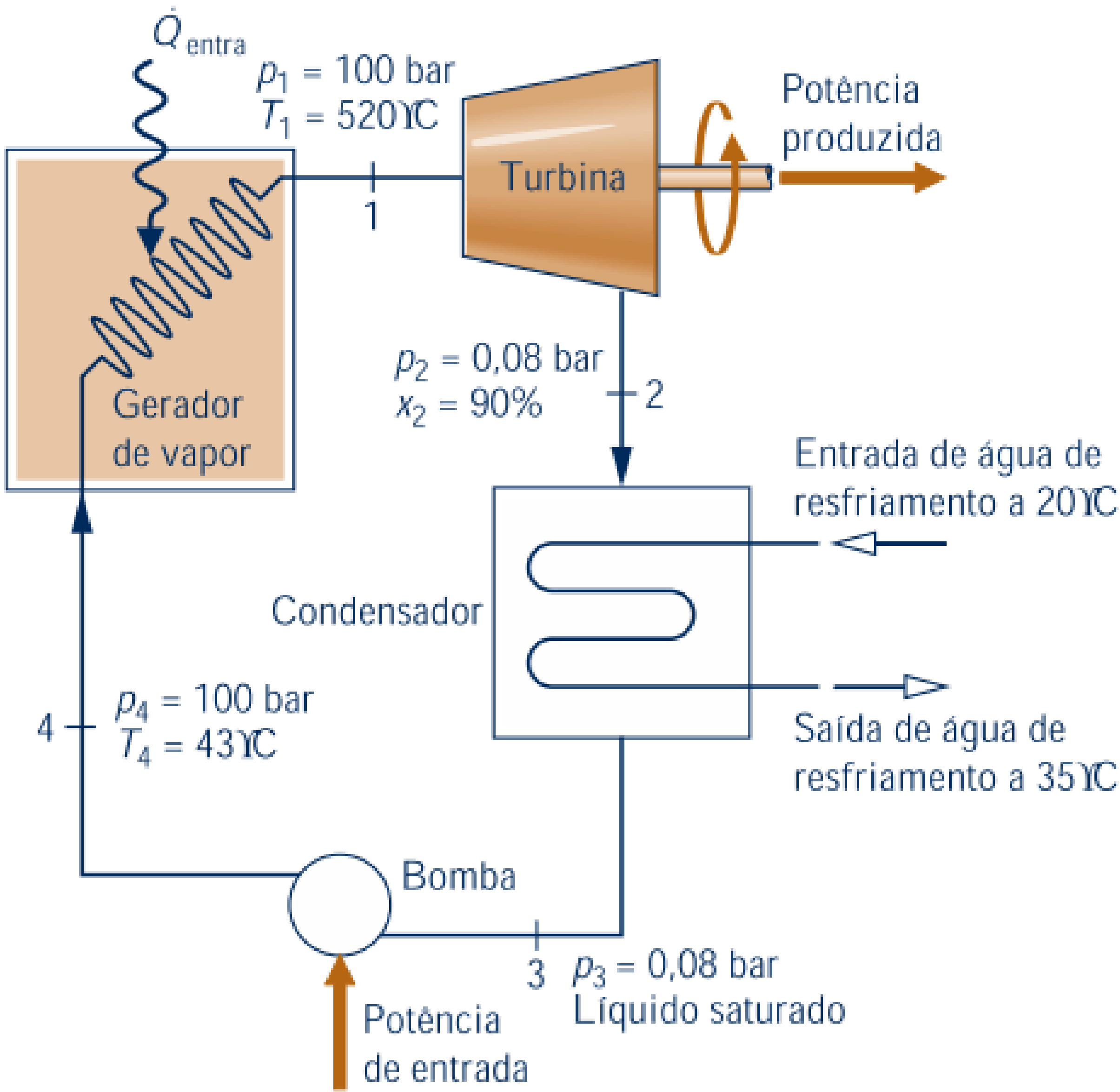
(d) a eficiência isentrópica da bomba.

(e) a vazão mássica da água de resfriamento, em kg/s.

(f) as taxas de geração de entropia, cada uma em kW/K, para a turbina, o condensador e a bomba.

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

Exercícios:



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

Exercícios:

6.179 Uma bomba operando em regime permanente recebe água líquida a 50°C e 1,5 MPa. A pressão da água na saída da bomba é 15 MPa. A magnitude do trabalho requerido pela a bomba é de 18 kJ por kg de água em escoamento. As perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine a eficiência isentrópica da bomba.

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

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
6.122	(b) 1938
6.128	(c) 107
6.134	1,034, 447,8
6.138	mistura bifásica líquido-vapor
6.144	91,6%
6.148	89,8%
6.153	(b) 78,4%
6.158	(a) 2949
6.161	(a) 4,37
6.165	(b) 33,2%
6.170	(b) 2,11
6.173	(a) –69,5, –13,14
6.177	–20
6.181	Não
6.184	1,54
6.187	(b) F, (e) V
6.189	(a) F, (e) F

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