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

8º e 9º Semanas

- Conservação e análise de energia para um volume de controle em regime permanente / Análise energética de volumes de controle em regime transiente

Calendário

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

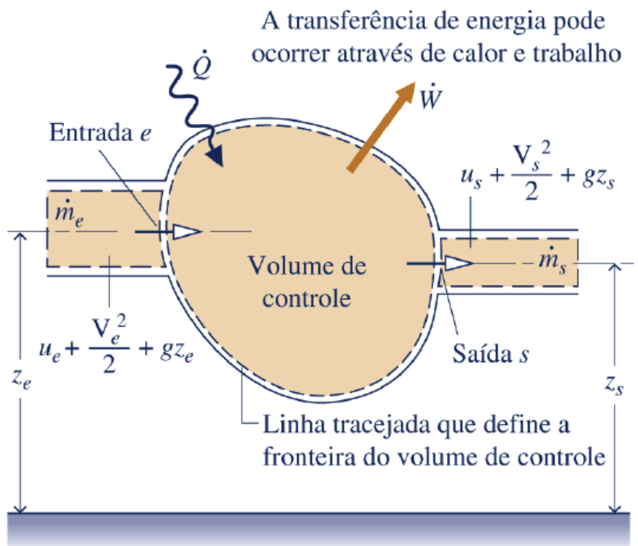
d	s	t	q	q	s	s
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12

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

Conservação de Energia para um Volume de controle



$$\left[\begin{array}{c}\textbf{Taxa temporal de}\\ \textbf{variação de energia}\\ \textbf{contida no interior do}\\ \textbf{volume de controle no}\\ \textbf{instante t}\end{array}\right] = \left[\begin{array}{c}\textbf{\textit{Taxa}}\text{ líquida na qual a}\\ \text{energia está sendo}\\ \text{transferida para }\textbf{\textit{dentro}}\\ \text{por transferência de}\\ \text{calor no instante t}\end{array}\right] - \left[\begin{array}{c}\textbf{\textit{Taxa}}\text{ líquida na qual}\\ \text{a energia está sendo}\\ \text{transferida para }\textbf{\textit{fora}}\\ \text{por realização de}\\ \text{trabalho no instante}\\ \text{t}\end{array}\right] + \left[\begin{array}{c}\textbf{\textit{Taxa}}\text{ líquida de}\\ \text{energia transferida}\\ \textbf{\textit{para}}\text{ o volume de}\\ \text{controle juntamente}\\ \text{com fluxo de massa}\end{array}\right]$$

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

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

Conservação de Energia para um Volume de controle

A expressão para o trabalho

$$\dot{W} = \dot{W}_{VC} + \dot{m}_s(p_s v_s) - \dot{m}_e(p_e v_e)$$

onde

- $\dot{W}_{vc}$ inclui todos os outros efeitos devidos ao trabalho, como aqueles associados a eixos que giram, a deslocamentos de fronteira e a efeitos elétricos.
- $\dot{m}_e(p_e v_e)$ Trabalho associado à pressão na entrada.
- $\dot{m}_s(p_s v_s)$ Trabalho associado à pressão na saída.

Conservação de Energia para um Volume de controle

Combinando as duas equações anteriores

$$\frac{dE_V}{dt} = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum_e \dot{m}_e \left(\underline{u_e + p_e v_e} + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(\underline{u_s + p_s v_s} + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right)$$

Por conveniência substituímos, $\boldsymbol{h = u + pv}$

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

Conservação de Energia para um Volume de controle

Na prática, podem existir vários locais na fronteira através dos quais a massa entra ou sai. Isso pode ser levado em conta colocando-se somatórios como no balanço de massa:

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

Esse é um **balanço contábil** para a energia no volume de controle.

Formulação Integral do Balanço da Taxa de Energia para um Volume de Controle

Como no caso do balanço de massa, o balanço de energia pode ser expresso em termos de propriedades locais para se obter formulações que são aplicáveis de um modo mais abrangente. A energia total associada ao volume de controle em um instante t, pode ser escrita na forma integral.

$$E_{VC}(t) = \int_V \rho e \, dV = \int_V \rho \left(u + \frac{V^2}{2} + gz \right) dV$$

Formulação Integral do Balanço da Taxa de Energia para um Volume de Controle

Em princípio, a variação de energia em um volume de controle ao longo de um período de tempo pode ser obtida pela integração da equação da energia em relação ao tempo.

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho e\, dV = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum_e \left[\int_A \left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right)\rho V_n dA\right]_e$$

$$-\sum_s \left[\int_A \left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right)\rho V_n dA\right]_s$$

Cons. de Energia para um V.C. - Regime Permanente

- **Regime permanente**: todas as propriedades são constantes ao longo do tempo.
- Para um volume de controle em regime permanente, ***dE*$_{vc}$*/dt* = 0**.

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

Cons. de Ener. para um V.C. – 1 entrada e 1 saída

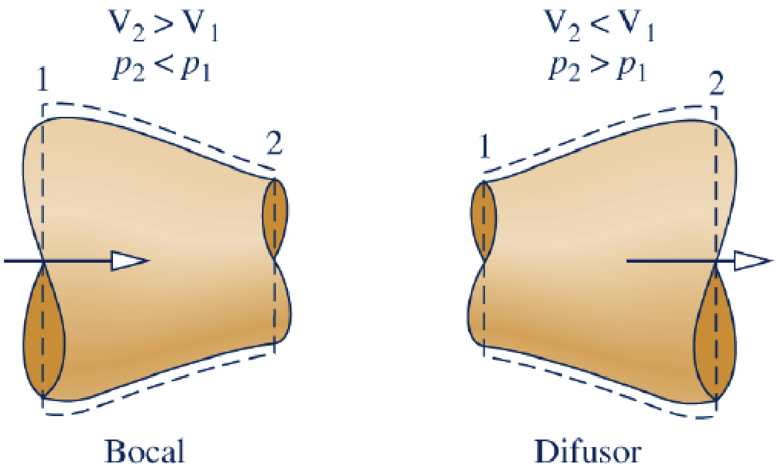
- ►Muitas aplicações importantes envolvem volumes de controle em regime permanente com uma entrada e uma saída.
- ►O balanço de massa se reduz a $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$

$$0 = \dot{Q}_{\text{vc}} - \dot{W}_{\text{vc}} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2) + \frac{(\text{V}_1^2 - \text{V}_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2)\right]$$

Ou dividindo-se pela vazão mássica

$$0 = \frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{\text{vc}}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \frac{(\text{V}_1^2 - \text{V}_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2)$$

Bocais e Difusores



►**Bocal**: é um duto com área reta variável na qual a velocidade de um gás ou líquido aumenta na direção do escoamento.

►**Difusor**: é um duto de área reta variável na qual a velocidade de um gás ou líquido diminui na direção do escoamento.

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

Bocais e Difusores

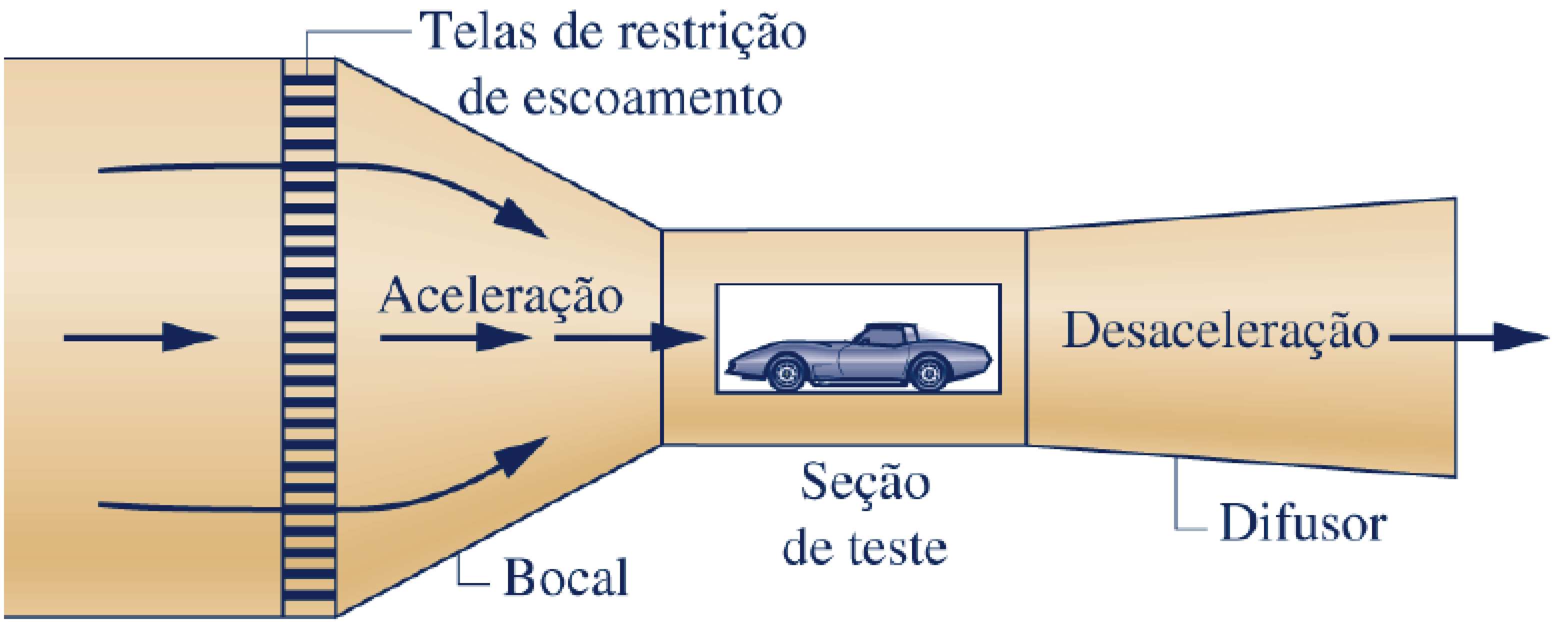


Fig. 4.8 Dispositivo de teste em túnel de vento.

Exemplo de aplicação de bocais e difusores

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

Bocais e Difusores

$$0 = \cancel{\dot{Q}_{vc}} - \cancel{\dot{W}_{vc}} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 \cancel{-} z_2)\right]$$

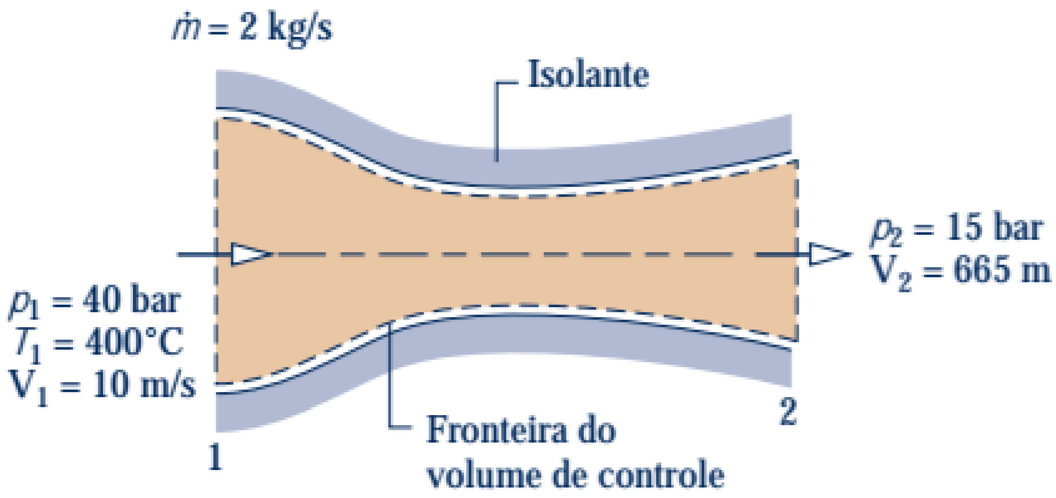
- $\dot{W}_{vc} = 0.$
- Se a variação da energia potencial entre a entrada e a saída é desprezível, $g(z_1 - z_2)$ cai fora.
- Se a transferência de calor com o ambiente é insignificante, $\dot{Q}_{vc}$, também pode ser desprezado

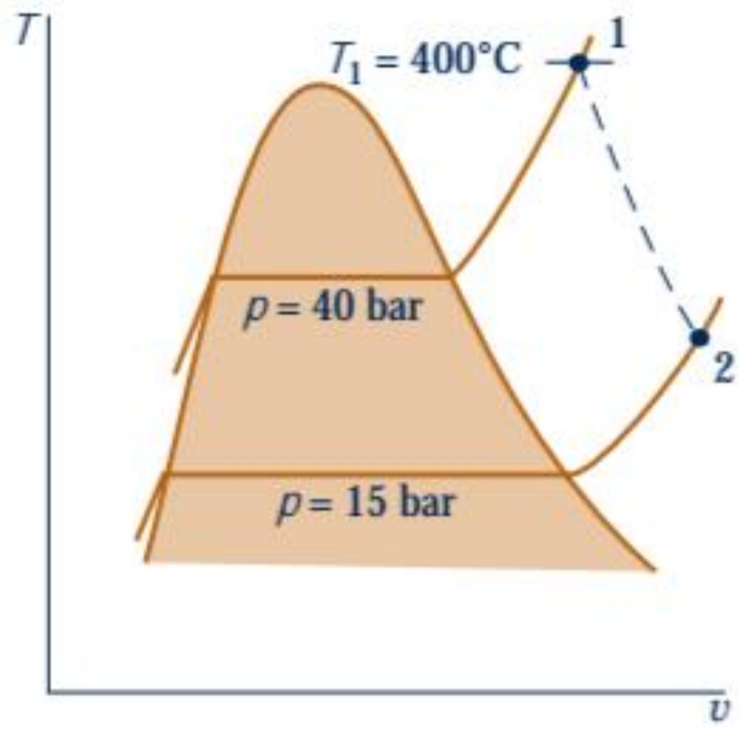
$$0 = (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right)$$

Bocais e Difusores (Exercício 1)

Calculando a Área de Saída de um Bocal de Vapor

Vapor d'água entra em um bocal convergente-divergente que opera em regime permanente com p_1 = 40 bar, T_1 = 400°C e a uma velocidade de 10 m/s. O vapor escoa através do bocal sem transferência de calor e sem nenhuma variação significativa da energia potencial. Na saída, p_2 = 15 bar e a velocidade é de 665 m/s. A vazão mássica é de 2 kg/s. Determine a área de saída do bocal em m².





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

Hipóteses:

i) Regime permanente
ii) Uma entrada e uma saída
iii) Sem interações na foma de calor ou trabalho
iv) Variação de energia potencial desprezível

Conservação de Energia para um Volume de controle

Na prática, podem existir vários locais na fronteira através dos quais a massa entra ou sai. Isso pode ser levado em conta colocando-se somatórios como no balanço de massa:

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

Esse é um **balanço contábil** para a energia no volume de controle.

Cons. de Energia para um V.C. - Regime Permanente

- **Regime permanente**: todas as propriedades são constantes ao longo do tempo.
- Para um volume de controle em regime permanente, $dE_{vc}/dt = 0$.

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

Bocais e Difusores

$$0 = \cancel{\dot{Q}_{vc}} - \cancel{\dot{W}_{vc}} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g\cancel{(z_1 - z_2)}\right]$$

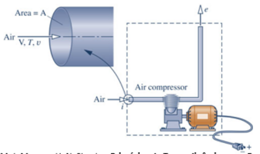
- $\dot{W}_{vc} = 0.$
- Se a variação da energia potencial entre a entrada e a saída é desprezível, $g(z_1 - z_2)$ cai fora.
- Se a transferência de calor com o ambiente é insignificante, $\dot{Q}_{vc}$, também pode ser desprezado

$$0 = (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right)$$

Balanço de massa para escoamento Unidimensional

Escoamento é normal à fronteira nas posições onde a massa entra ou sai do volume de controle

Todas as propriedades intensivas são ***uniformes com a posição*** ao longo de cada área de entrada ou saída através da área (**A**) no qual a massa escoa

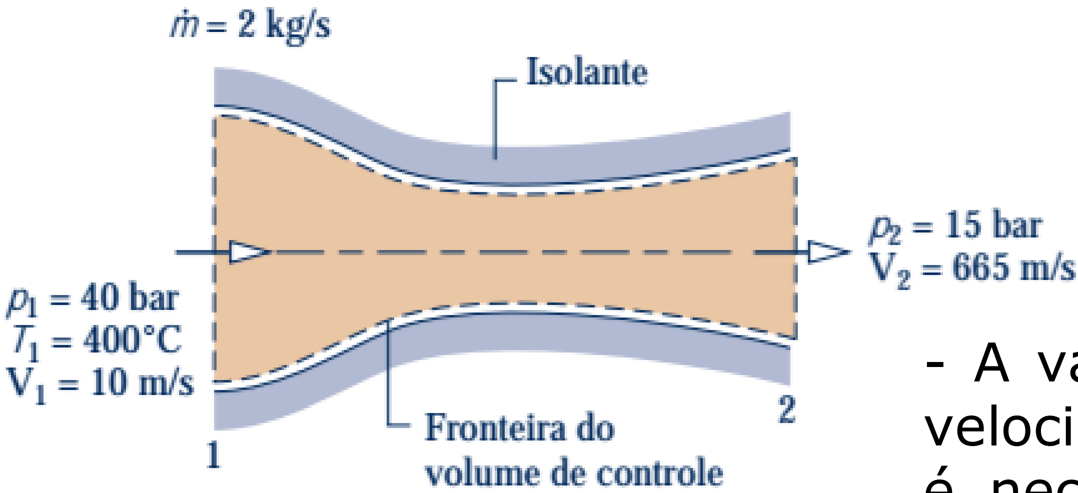


$$\dot{m} = \frac{AV}{v}$$

one
V é velocidade
v é volume específico

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

Bocais e Difusores (Exercício 1)



$$A_2 = \frac{\dot{m} v_2}{V_2}$$

- A vazão mássica é conhecida e a velocidade na saída são conhecidas, é necessário determinar o *volume específico na saída*

- São necessárias duas propriedades para determinar o estado em 2, a pressão em 2 é conhecida e a segunda propriedade pode ser obtida através da entalpia específica, determinada através do balanço de energia no volume de controle

$$0 = (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right)$$

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

Bocais e Difusores (Exercício 1)

- Rearranjando

$$h_2 = h_1 + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right)$$

Da Tabela A-4, $h_1 = 3213{,}6$ kJ/kg.

$$h_2 = 3213{,}6 \text{ kJ/kg} + \left[\frac{(10)^2 - (665)^2}{2}\right]\left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}\right)\left|\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}\right|\left|\frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}}\right|$$

$$= 3213{,}6 - 221{,}1 = 2992{,}5 \text{ kJ/kg}$$

Tabela A-4 para $p_2 = 15$ bar e com $h_2 = 2992{,}5$ kJ/kg. $v_2 = 0{,}1627\ m^3/kg$

$$A_2 = \frac{\dot{m} v_2}{V_2} = \frac{2 \times 0{,}1627}{665} = 4{,}89 \times 10^{-4} m^2$$

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

Bocais e Difusores (Exercício 1)

- Rearranjando

$$h_2 = h_1 + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right)$$

Da Tabela A-4, $h_1 = 3213{,}6$ kJ/kg.

$$h_2 = 3213{,}6 \text{ kJ/kg} + \left[\frac{(10)^2 - (665)^2}{2}\right]\left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}\right)\left|\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}\right|\left|\frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}}\right|$$

$$= 3213{,}6 - 221{,}1 = 2992{,}5 \text{ kJ/kg}$$

Tabela A-4 para $p_2 = 15$ bar e com $h_2 = 2992{,}5$ kJ/kg. $v_2 = 0{,}1627\ m^3/kg$

$$A_2 = \frac{\dot{m}v_2}{V_2} = \frac{2 \times 0{,}1627}{665} = 4{,}89 \times 10^{-4} m^2$$

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

Turbinas

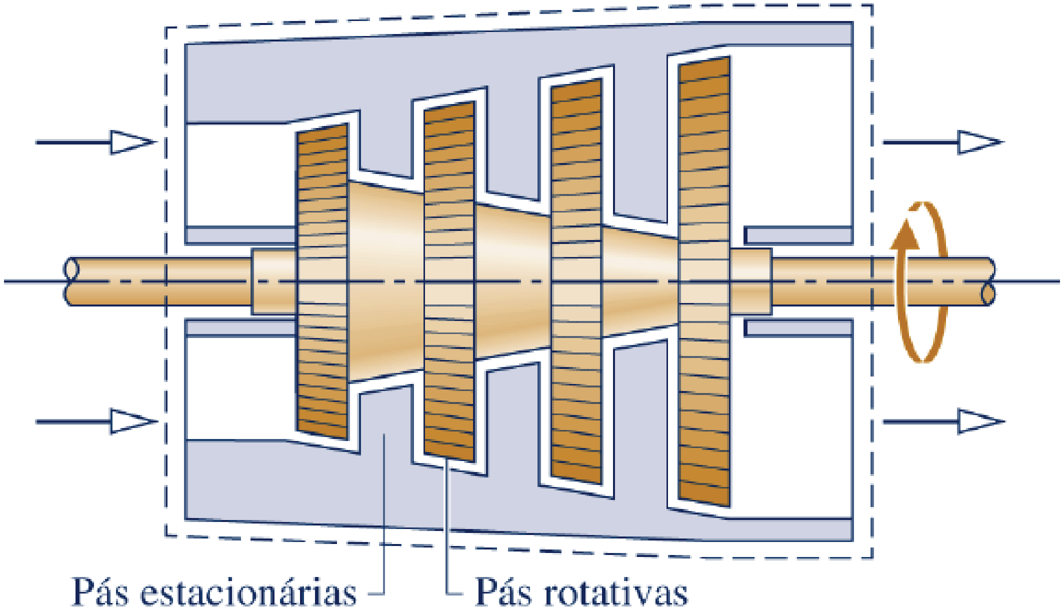
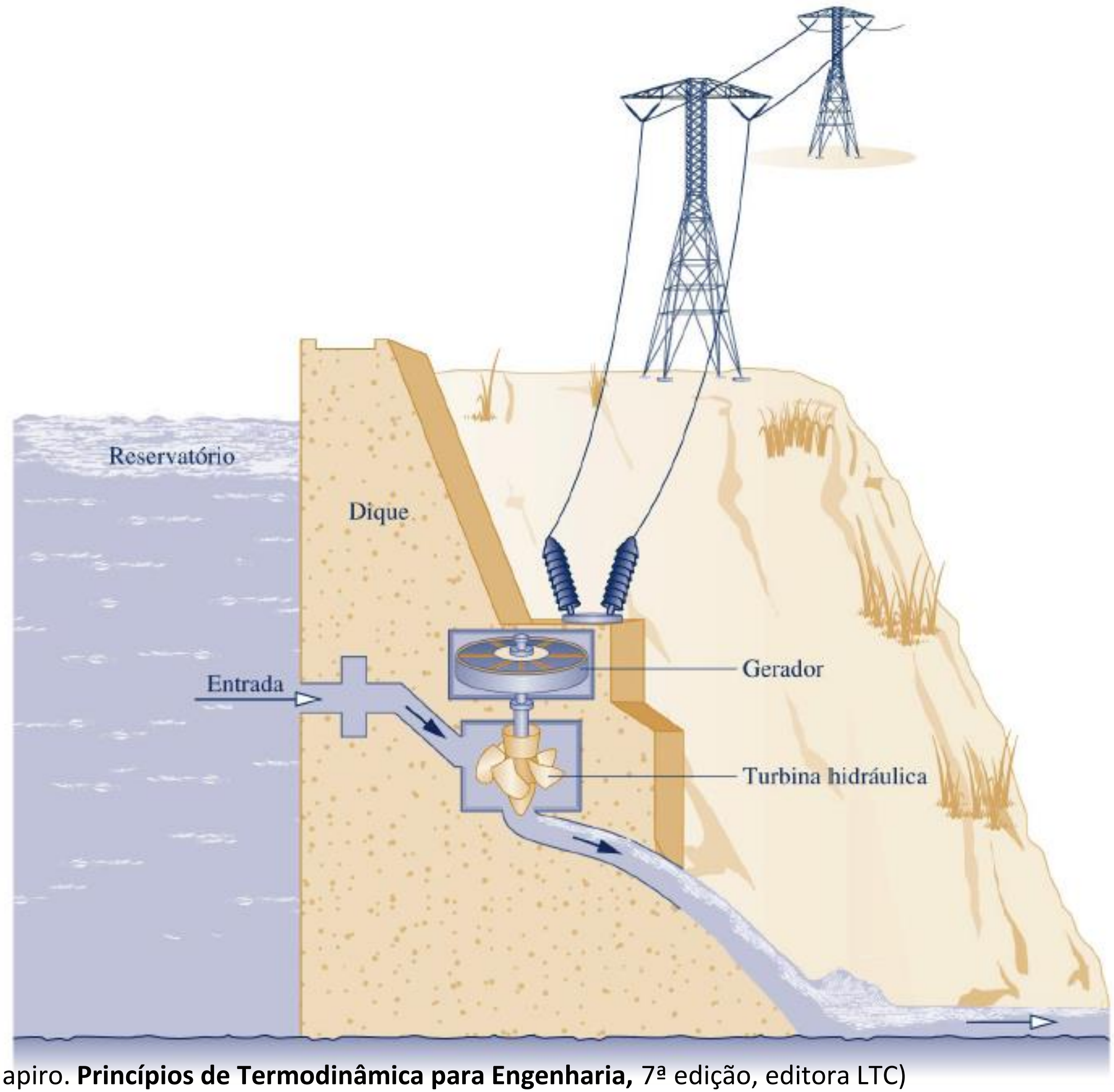


Fig. 4.9 Esquema de uma turbina a vapor ou a gás de fluxo axial.

► **Turbina**: é um dispositivo que desenvolve potência em função da passagem de um gás ou líquido escoando através de uma série de pás colocadas em um eixo que se encontra livre para girar.

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

Turbinas



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

Turbinas

$$0 = \cancel{\dot{Q}_{vc}} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2) + \cancel{\frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2}} + \cancel{g(z_1 - z_2)} \right]$$

► Se a variação da energia cinética da matéria que flui é insignificante, $\frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2}$ cai fora.

► Se a variação da energia potencial da matéria que flui é desprezível, $g(z_1 - z_2)$ cai fora.

► Se a transferência de calor com o ambiente é insignificante, $\dot{Q}_{CV}$ cai fora

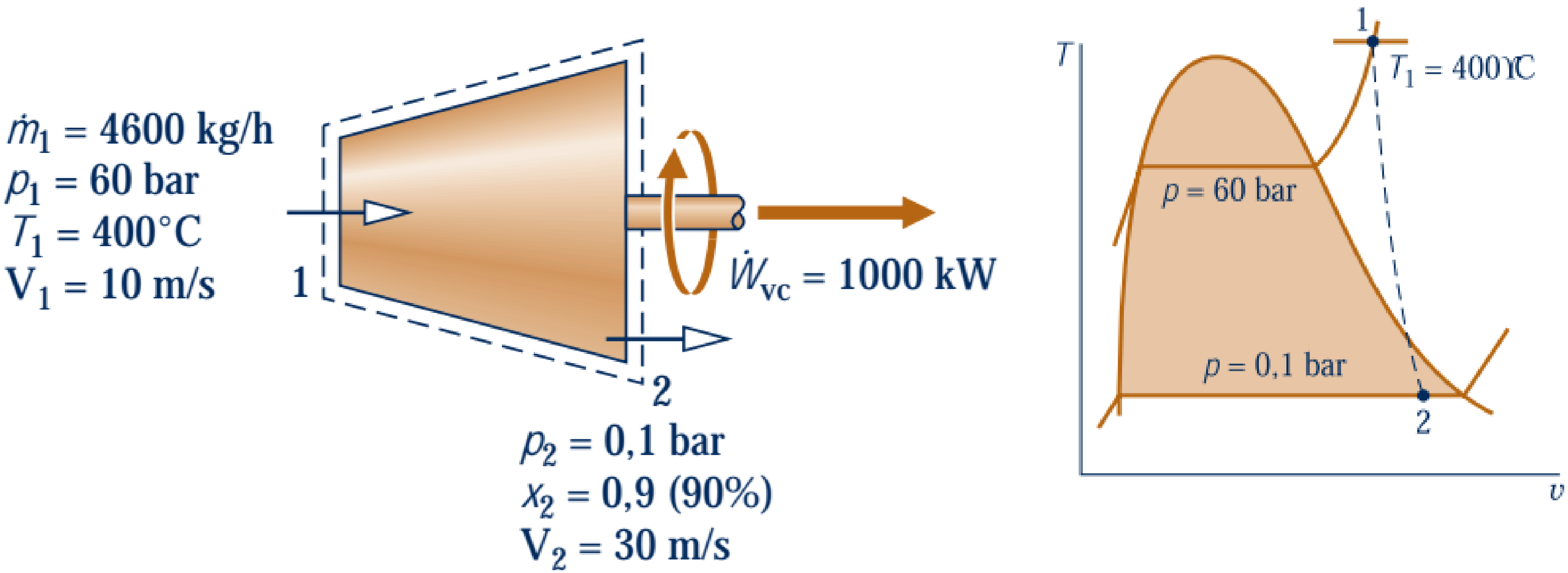
$$\dot{W}_{vc} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

Turbinas

Calculando a Transferência de Calor em uma Turbina a Vapor

O vapor d'água entra em uma turbina operando em regime permanente com uma vazão mássica de 4600 kg/h. A turbina desenvolve uma potência de 1000 kW. Na entrada, a pressão é 60 bar, a temperatura é 400°C e a velocidade é 10 m/s. Na saída, a pressão é 0,1 bar, o título é 0,9 (90%) e a velocidade é 30 m/s. Calcule a taxa de transferência de calor entre a turbina e a vizinhança em kW.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



$$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \dot{m}\left((h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2}\right)$$

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

Turbinas

TABLE A-4 *(Continued)*

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
	p = 40 bar = 4.0 MPa (T_{sat} = 250.4°C)				p = 60 bar = 6.0 MPa (T_{sat} = 275.64°C)			
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892
280	0.05546	2680.0	2901.8	6.2568	0.03317	2605.2	2804.2	5.9252
320	0.06199	2767.4	3015.4	6.4553	0.03876	2720.0	2952.6	6.1846
360	0.06788	2845.7	3117.2	6.6215	0.04331	2811.2	3071.1	6.3782
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690	0.04739	2892.9	$\boxed{3177.2}$	6.5408

h_1

TABLE A-3 Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Pressure Table

		Specific Volume m³/kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		
Press. bar	Temp. °C	Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	Press. bar
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	$\boxed{191.83}$	2392.8	$\boxed{2584.7}$	0.6493	8.1502	0.10

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

$$h_2 = h_f + x(h_g - h_f)$$

Turbinas

$$\dot{Q}_{VC} = \dot{W}_{VC} + \dot{m}\left((h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2}\right)$$

$$\dot{Q}_{VC} = 1100(kW) + 4600\left(\frac{kg}{h}\right).\frac{1}{3600}\left(\frac{h}{s}\right).\left((3177,2 - 2345,4) + \frac{(30^2 - 10^2)}{2}\right).\left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{Q}_{VC} = -62,3(kW)$$

Turbinas

Vapor entra em uma turbina operando em regime permanente com uma vazão mássica de 10 kg/min, uma entalpia específica de 3100 kJ/kg e uma velocidade de 30 m/s. Na saída, a entalpia específica é 2300 kJ/kg e a velocidade é de 45 m/s. A entrada está situada 3 m mais elevada do que a saída. A transferência de calor da turbina para sua vizinhança ocorre a uma taxa de 1,1 kJ por kg de vapor em escoamento. Admita g=9,81 m/s^2. Determine a potência desenvolvida pela turbina em kW.?

Turbinas

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

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

$$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \dot{m} \left((h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(Z_1 - Z_2) \right)$$

Turbinas

$$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \dot{m}\left((h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(Z_1 - Z_2)\right)$$

$\dot{Q}_{VC} = -1{,}1 \times \dot{m}\ kW$

$h_1 = 3100\ kJ/kg$

$h_2 = 2300\ kJ/kg$

$V_1 = 30\ m/\mathrm{s}$

$V_2 = 45\ m/\mathrm{s}$

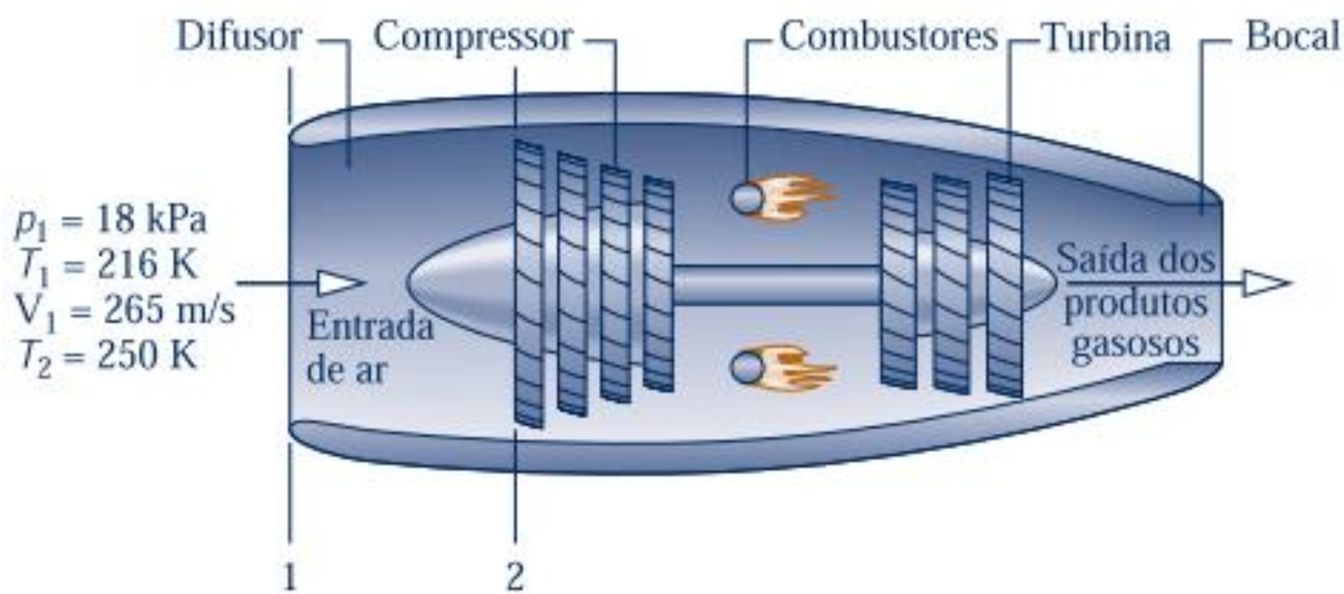
$Z_1 - Z_2 = -3\ m$

$\dot{m} = \frac{10}{60} kg/\mathrm{s}$

$$\dot{W}_{VC} = \dot{Q}_{VC} + \dot{m}\left((h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(Z_1 - Z_2)\right)$$

Turbinas

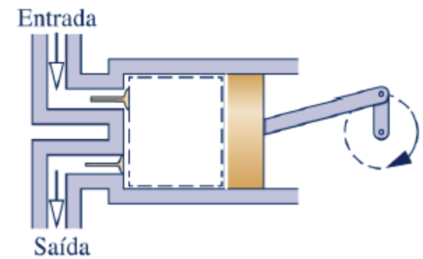
Conforme ilustrado na figura, ar entra no difusor de um motor a jato, operando em regime permanente, a 18k Pa, 216 K e uma velocidade de 265 m/s, todos os dados correspondendo a um voo de alta altitude. O ar escoa adiabaticamente através do difusor e atinge a temperatura de 250 K na saída do difusor. Utilizando o modelo de gás ideal para o ar, determine a velocidade do ar na saída do difusor, em m/s



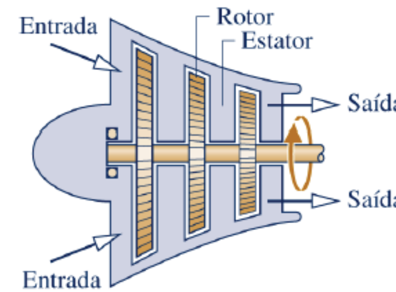
* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Compressores e Bombas

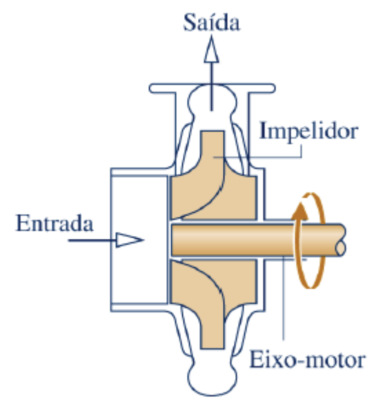
- ►**Compressores e Bombas**:
- ►são dispositivos nos quais o trabalho é realizado sobre a substância em escoamento ao longo dos mesmos, de modo a mudar o estado substância, normalmente aumentar a pressão e/ou a elevação.



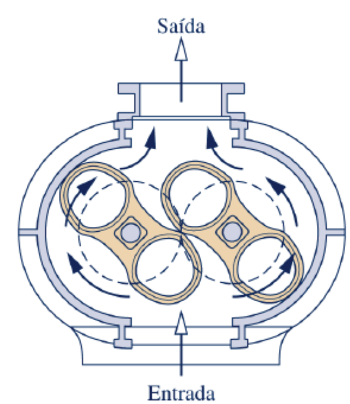
(*a*) Alternativo



(*b*) Fluxo axial



(*c*) Centrífugo



(*d*) De lóbulo

- ►*Compressor* : substância é um gás
- ►*Bomba*: substância é um liquido

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

Compressores e Bombas

$$0 = \cancel{\dot{Q}_{vc}} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2) + \cancel{\frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2}} + \cancel{g(z_1 - z_2)} \right]$$

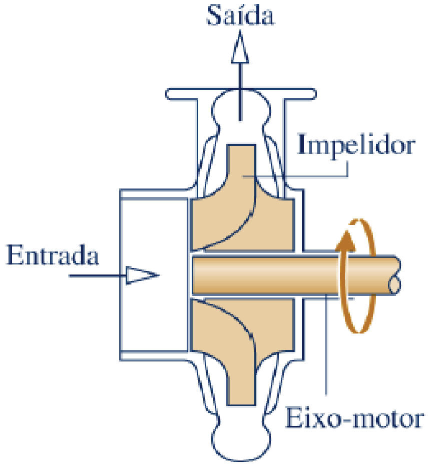
- Se a variação de energia cinética do fluido é insignificante, $½(V_1^2 – V_2^2)$ sai fora.
- Se a mudança de energia potencial do fluido é insignificante, $g(z_1 – z_2)$ sai fora.
- Se a transferência de calor com a vizinhança é insignificante, $\dot{Q}_{vc}$ sai fora.

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

Compressores e Bombas

Ar a 1,05 bar e 300 K entra em um compressor centrífugo operando em regime permanente, com uma vazão volumétrica de 12 m³/min, e sai a 12 bar e 400 K. A transferência de calor entre o compressor e sua vizinhança ocorre a uma taxa de 2 kW. Admitindo o modelo de gás ideal para o ar e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a potência de entrada em kW

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2)\right]$$



(c) Centrífugo

$$\dot{W}_{vc} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad ?$$

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

Compressores e Bombas

Ar a 1,05 bar e 300 K entra em um compressor centrífugo operando em regime permanente, com uma vazão volumétrica de 12 m^3/min, e sai a 12 bar e 400 K. A transferência de calor entre o compressor e sua vizinhança ocorre a uma taxa de 2 kW. Admitindo o modelo de gás ideal para o ar e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a potência de entrada em kW

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2)\right]$$

$$\dot{W}_{vc} = \dot{Q}_{vc} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2)\right]$$

$$\dot{m} = \frac{AV}{v} = \left(\frac{(AV)p}{RT}\right)_1 = \frac{(12)/60.\,(1{,}05 \times 10^5)}{= \frac{8314}{28{,}97}.\,300} = 0{,}2439\,\frac{kg}{x}$$

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

Compressores e Bombas

TABLE A-22 Ideal Gas Properties of Air

T(K), h and u(kJ/kg), $s°$ (kJ/kg · K)											
				when $\Delta s = 0$[1]						when $\Delta s = 0$	
T	h	u	$s°$	p_r	v_r	T	h	u	$s°$	p_r	v_r
290	290.16	206.91	1.66802	1.2311	676.1	550	554.74	396.86	2.31809	11.86	133.1
295	295.17	210.49	1.68515	1.3068	647.9	560	565.17	404.42	2.33685	12.66	127.0
300	300.19	214.07	1.70203	1.3860	621.2	570	575.59	411.97	2.35531	13.50	121.2
400	400.98	286.16	1.99194	3.806	301.6	700	713.27	512.33	2.57277	28.80	69.76
410	411.12	293.43	2.01699	4.153	283.3	710	724.04	520.23	2.58810	30.38	67.07
420	421.26	300.69	2.04142	4.522	266.6	720	734.82	528.14	2.60319	32.02	64.53

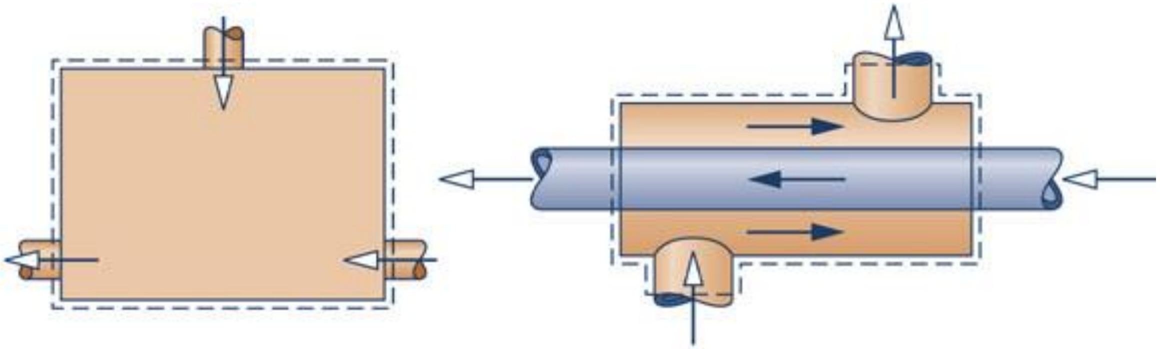
$$\dot{W}_{vc} = \dot{Q}_{vc} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2)\right] = -2kW +$$

$$+(0{,}2439)(kg/s).\left[300{,}19 - 400{,}98\right](kJ/kg).\left(\frac{1kW}{1kJs}\right)$$

$$\dot{W}_{vc} = -26{,}6kW$$

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

Trocadores de Calor



(a) (b)

► **Contato direto**: Uma câmara de mistura na qual fluxos quentes e frias são misturadas diretamente.

► **Trocador de calor duplo tubo contracorrente**: Uma corrente de gás ou líquido é separado de outra corrente de gás ou líquido por uma parede através da qual a energia é conduzida. A transferência de calor ocorre a partir do fluxo quente para o fluxo frio com as correntes fluindo em direções opostas.

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

Trocadores de Calor

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

- $\dot{W}_{\mathrm{vc}}=0.$
- Se a variação de energia cinética do fluido é insignificante $\dot{m}_e(V_e^2/2)$ e $\dot{m}_s(V_s^2/2)$ sai fora.
- Se a variação de energia potencial do fluido é insignificante, $\dot{m}_e g z_e$ e $\dot{m}_s g z_s$ sai fora.
- Se a transferência de calor com a vizinhança é insignificante, $\dot{Q}_{\mathrm{vc}}$ sai fora.

$$0=\sum_e \dot{m}_e h_e-\sum_s \dot{m}_s h_s$$

Trocadores de Calor

4.75 Um sistema de ar condicionado é ilustrado na Fig. P4.75, no qual o ar escoa sobre tubos através dos quais flui Refrigerante 134a. O ar entra com uma vazão volumétrica de 50 m^3/min a 32°C, 1 bar e sai a 22°C, 0,95 bar. O refrigerante entra nos tubos a 5 bar com um título de 20% e sai a 5 bar, 20°C. Ignorando a transferência de calor na superfície externa do ar condicionado e desprezando os efeitos das energia cinética e potencial, determine, considerando regime permanente,

(a) a vazão mássica do refrigerante, em kg/min.

(b) a taxa de transferência de calor, em kJ/min, entre o ar e o refrigerante.

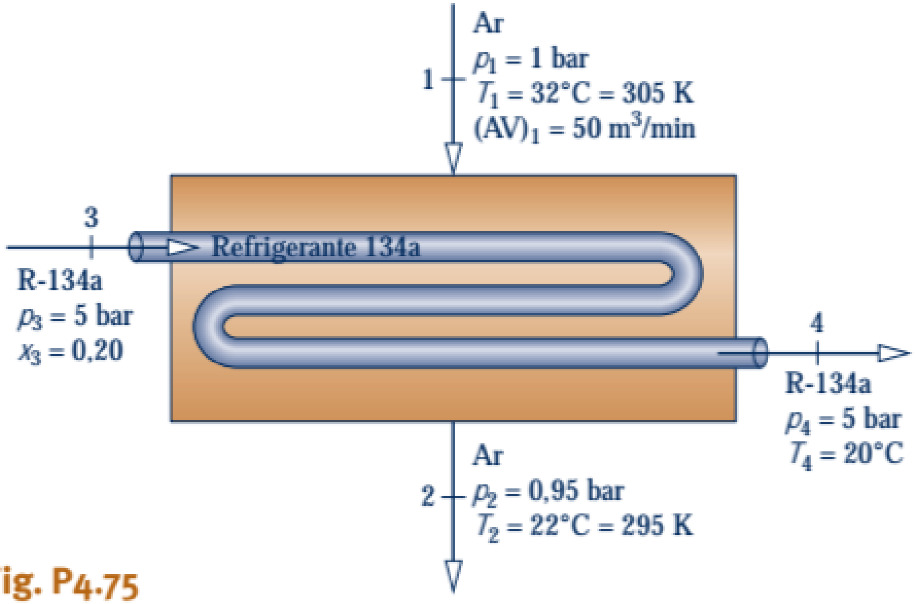


Fig. P4.75

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

Trocadores de Calor

$$\sum_e \dot{m}_e\,(h_e) = +\sum_s \dot{m}_s\,(h_s)$$

$$\dot{m}_{R134a}\left(h_{e\_R134a}\right) + \dot{m}_{ar}\left(h_{e\_ar}\right) = \dot{m}_{R134a}\left(h_{s\_R134a}\right) + \dot{m}_{ar}\left(h_{s\_ar}\right)$$

$$\dot{m}_{ar} = \frac{(AV)}{v} = \frac{(50)\,m^3/min}{v_{ar}(p_1, T_1)}$$

a)

$$\dot{m}_{R134a} = \frac{\dot{m}_{ar}\left(h_{s\_ar} - h_{e\_ar}\right)}{\left(h_{s\_R134a} - h_{e\_R134a}\right)}$$

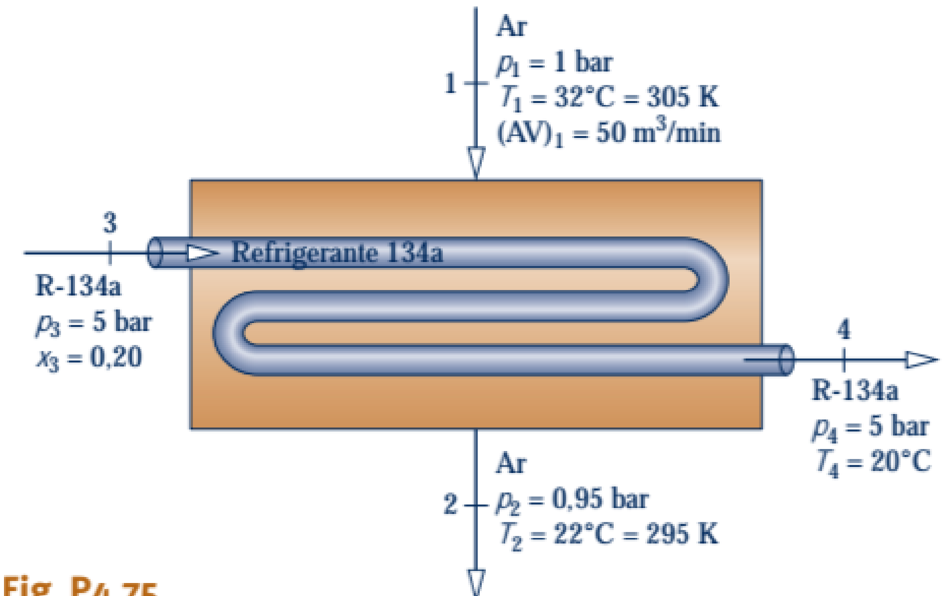


Fig. P4.75

b)

$$\dot{Q} = \dot{m}_{R134a}\left(h_{s\_R134a} - h_{e\_R134a}\right) = \dot{m}_{ar}\left(h_{s\_ar} - h_{e\_ar}\right)$$

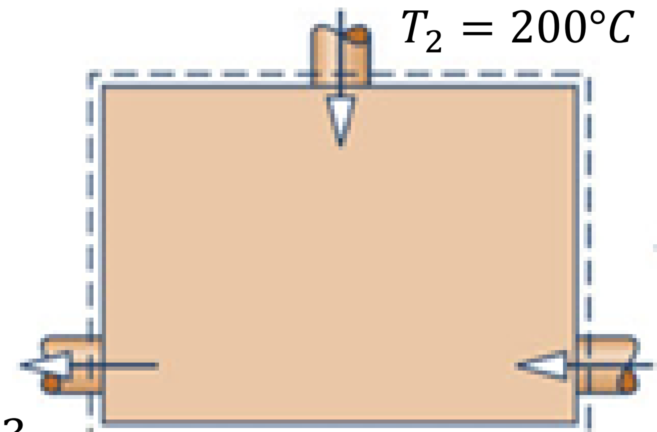
* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Trocadores de Calor

Um aquecedor de água de alimentação opera em regime permanente com água líquida escoando, ao longo da entrada 1, a 10 bar, 50°C e com uma vazão mássica de 60 kg/s. Um fluxo separado de vapor penetra na entrada 2 a 10 bar e 200°C. Líquido saturado a 10 bar sai do aquecedor de agua de alimentação por 3. Ignorando a transferência de calor para a vizinhança e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a vazão mássica, em kg/s, na entrada 2

$p_2 = 10\ bar$

$T_2 = 200°C$ $\quad \dot{m}_2 = ?\ \mathrm{kg/s}$



$p_3 = 10\ bar$

$x_3 = 0$

Líquido saturado em 3

$p_1 = 10\ bar$

$T_1 = 50°C$

$\dot{m}_1 = 60\ \mathrm{kg/s}$

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

Trocadores de Calor

Hipóteses:

i) Regime permanente
ii) Variação de energia cinética e potencial desprezíveis
iii) Sem troca de calor com o ambiente
iv) Sem interações de trabalho

- Balanço de massa e energia com aplicação das hipóteses

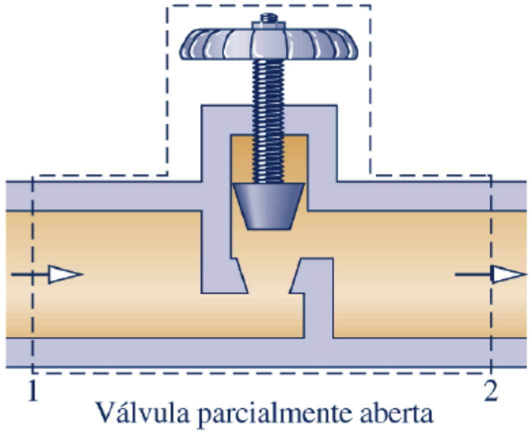
$$0 = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \Rightarrow 0 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3 \Rightarrow \dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

$$0 = \sum_e \dot{m}_e\,(h_e) - \sum_s \dot{m}_s\,(h_s) \Rightarrow \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$$

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

$$\boxed{\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \frac{(h_1 - h_3)}{(h_3 - h_2)}}$$

Dispositivos de Estrangulamento



►**Dispositivos de estrangulamento**: é um dispositivo que consegue uma redução significativa na pressão através da introdução de uma restrição para uma linha através da qual um gás ou líquido flui. Meios para introduzir a restrição incluem uma válvula parcialmente aberto ou um tampão poroso.

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

Dispositivos de Estrangulamento

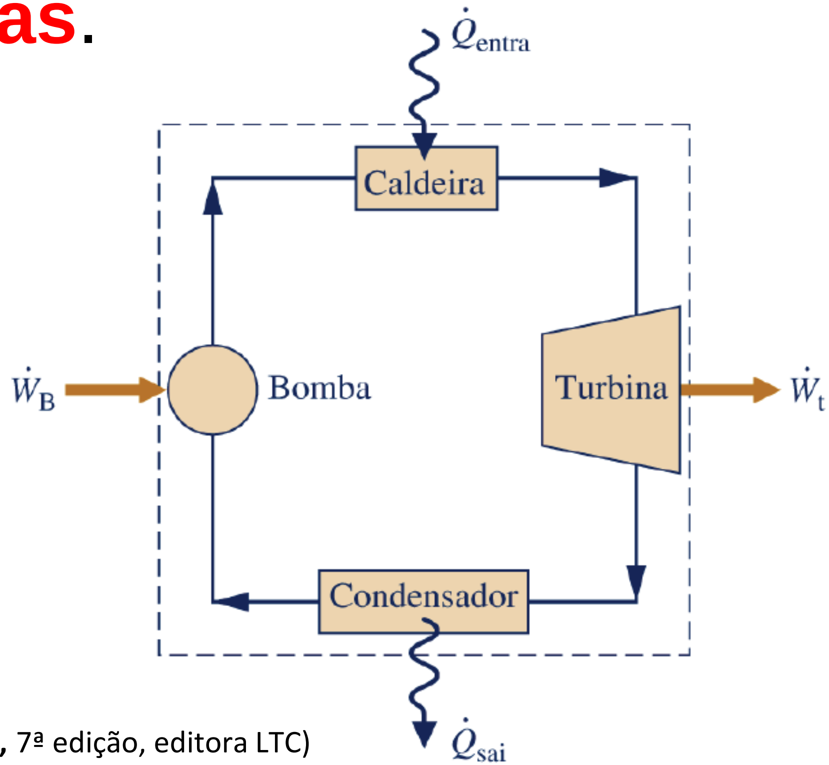
$$0 = \cancel{\dot{Q}_{vc}} - \cancel{\dot{W}_{vc}} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2) + \cancel{\frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2}} + \cancel{g(z_1 - z_2)}\right]$$

- $\dot{W}_{vc} = 0.$
- Se a variação da energia cinética do fluxo a montante e a jusante da restrição é insignificante, $\frac{1}{2}(V_1^{\,2} - V_2^{\,2})$ sai fora.
- Se a mudança de energia potencial do fluido é insignificante, $g(z_1 - z_2)$ sai fora.
- Se a transferência de calor com a vizinhança é insignificante, $\dot{Q}_{vc}$ sai fora. $h_2 = h_1$

Integração de Sistemas

- ►Muitas vezes, os engenheiros devem combinar os componentes de um modo criativo para atingirem um objetivo global que se encontra sujeito a restrições, como custo geral mínimo. Esta importante atividade de engenharia é chamada de **integração de sistemas**.

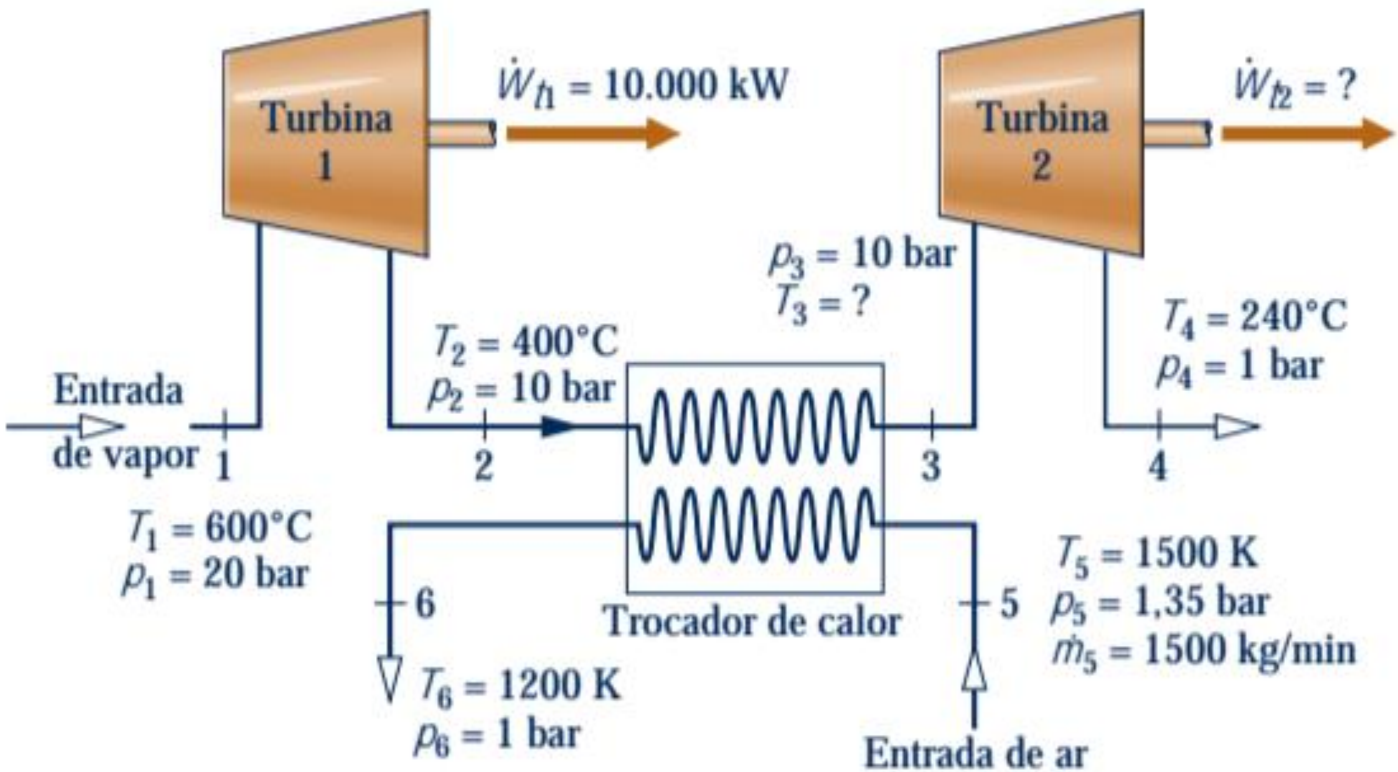
- ►Uma simples instalação de potência a vapor é um exemplo de como diversos componentes podem ser combinados



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

Exercício

Fluxos separados de vapor e ar escoam ao longo do conjunto turbina-trocador de calor mostrado na figura. Os dados da operação em regime permanente são mostrados na figura. A transferência de calor para o ambiente pode ser desprezada, assim como todos os efeitos das energia cinética e potencial. Determine *(a)* T_3, em K, e *(b)* a potência da segunda turbina em kW.



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

Exercício

Hipóteses:

i) Regime permanente

ii) Variação de energia cinética e potencial desprezíveis

iii) Sem troca de calor com o ambiente

- Balanço de energia no trocador de calor

$$0 = \sum_e \dot{m}_e\,(h_e) - \sum_s \dot{m}_s\,(h_s)$$

$$0 = \dot{m}_{ar}(h_5) + \dot{m}_{vap}(h_2) - \dot{m}_{ar}(h_6) - \dot{m}_{vap}(h_3)$$

$$h_3 = \frac{\left[\dot{m}_{ar}(h_5) + \dot{m}_{vap}(h_2) - \dot{m}_{ar}(h_6)\right]}{\dot{m}_{vap}}$$

$\dot{m}_{vap}$?

- Balanço de energia na primeira turbina

$$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \dot{m}_{vap}\left((h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(Z_1 - Z_2)\right)$$

Exercício

$$\dot{W}_{VC} = \dot{m}_{vap}(h_1 - h_2) \quad \begin{cases} h_1 = 3690{,}1\ kJ/kg \\ h_2 = 3263{,}9 kJ/kg \end{cases}$$

$$\dot{m}_{vap} = \frac{\dot{W}_{VC}}{(h_1 - h_2)} = \frac{10000}{(3690{,}1 - 3263{,}9)} = 23{,}46\ \ kg/s$$

- Retomando o Balanço de energia no Trocador de Calor

Da tabela A-20 considerando c_p=cte

$h_5 - h_6 = c_p(T{\sim}1000K)(T_5 - T_6)$=342,6 kJ/kg

Da tabela A-22 $\begin{cases} h_1 = 3690{,}1\ kJ/kg \\ h_2 = 3263{,}9 kJ/kg \end{cases}$

$h_5 - h_6 = 358{,}18\ kJ/kg$

$$h_3 = \frac{\left[\dot{m}_{ar}(h_5) + \dot{m}_{vap}(h_2) - \dot{m}_{ar}(h_6)\right]}{\dot{m}_{vap}} = 3645{,}6\ kJ/kg$$

Interpolando a Tabela A-4 com p_3=10bar

$T_3 = 576$ °C

Exercício

- Balanço de energia na Segunda Turbina

$$\dot{W}_{VC} = \dot{m}_{vap}(h_3 - h_4) \quad \begin{cases} h_3 = 3645{,}6\ kJ/kg \\ h_4 = 2954{,}2\ kJ/kg\ (Tabela\ A-4) \end{cases}$$

$$\dot{W}_{VC} = \frac{\dot{W}_{VC}}{(h_1 - h_2)} = 23{,}46\ \ kg/s(3645{,}6 - 2954{,}2)\ kJ/kg$$

$$\dot{W}_{VC} = 16{,}213\ \mathrm{kW}$$

Analise transiente (balanço de massa)

Transiente: estado muda com o tempo.

Integração do balanço da taxa de massa do tempo **0** até o tempo final t.

$$\int_0^t \left(\frac{dm_{vc}}{dt}\right)dt = \int_0^t \left(\sum_e \dot{m}_e\right)dt - \int_0^t \left(\sum_s \dot{m}_s\right)dt$$

$$m_{VC}(t) - m_{VC}(0) = \sum_e \int_0^t \dot{m}_e \, dt - \sum_s \int_0^t \dot{m}_s \, dt$$

Nós temos

$$m_{vc}(t) - m_{vc}(0) = \sum_e m_e - \sum_s m_s$$

onde

- $m_e = \int_0^t \dot{m}_e \, dt$ é a quantidade de massa entrando no volume de controle através da entrada e, do tempo **0** até t.
- $m_s = \int_0^t \dot{m}_s \, dt$ é a quantidade de massa saindo no volume de controle através da saída s, do tempo **0** até t.

Analise transiente (balanço de energia)

► **Integração** do balanço da taxa de energia (**Eq. 4.15**), ignorando os efeitos de energia cinética e potencial, desde o tempo **0** até o tempo final ***t***.

$$\int_0^t \left(\frac{dU_{\mathrm{vc}}}{dt}\right)dt = \int_0^t \dot{Q}_{\mathrm{vc}}dt - \int_0^t \dot{W}_{\mathrm{vc}}dt + \int_0^t \left(\sum_e \dot{m}_e h_e\right)dt - \int_0^t \left(\sum_s \dot{m}_s h_s\right)dt$$

Quando as entalpias específicas nas entradas e saídas são constantes com o tempo, a Eq. se torna

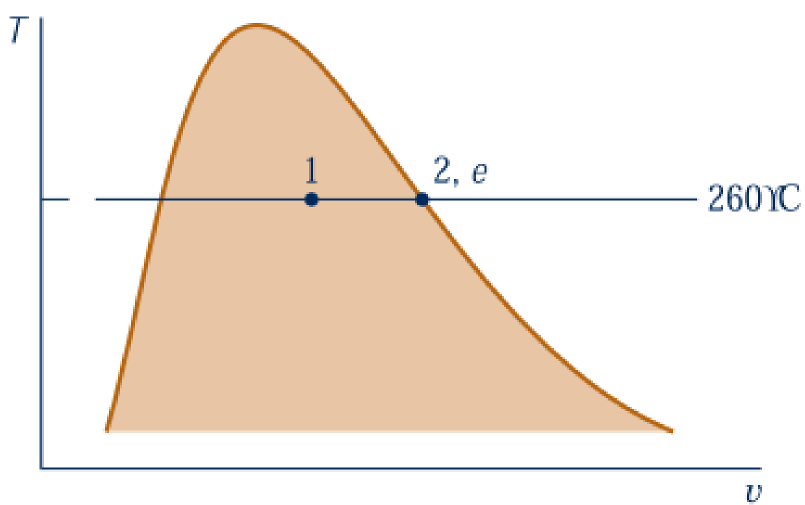
$$U_{\mathrm{vc}}(t) - U_{\mathrm{vc}}(0) = Q_{\mathrm{vc}} - W_{\mathrm{vc}} + \sum_e m_e h_e - \sum_s m_s h_s$$

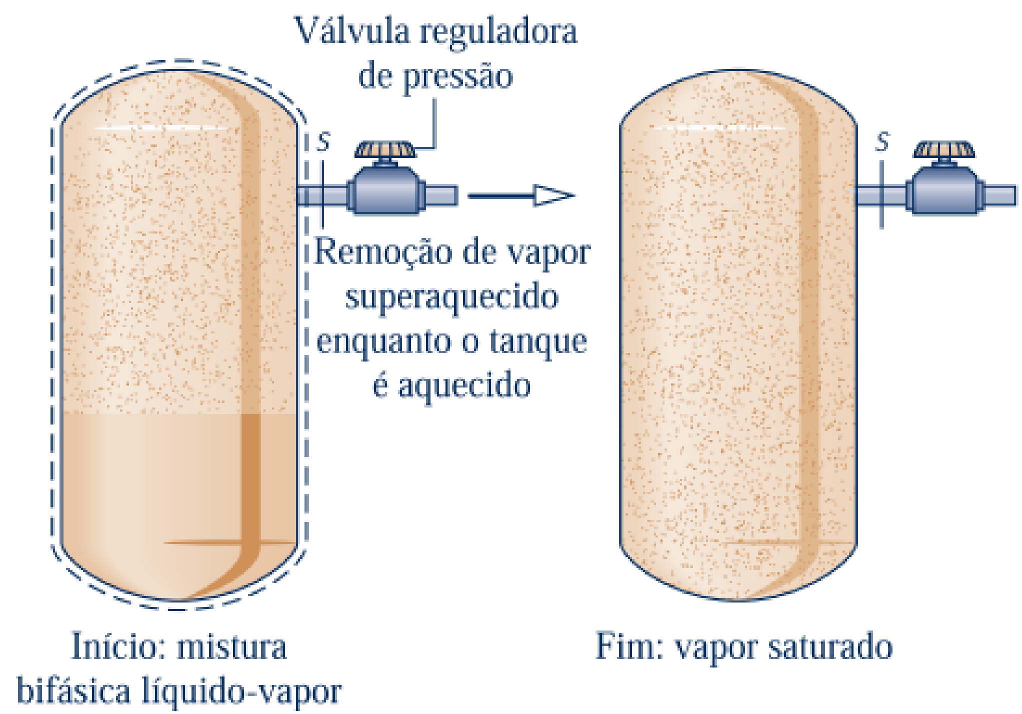
Analise transiente (exercício)

EXEMPLO 4.11 ▸

Avaliando a Transferência de Calor de um Tanque Parcialmente Vazio

Um tanque, com $0{,}85\ m^3$ de volume, inicialmente contém água em uma mistura bifásica líquido-vapor a 260°C e com um título de 0,7. O vapor d'água saturado a 260°C é lentamente retirado através de uma válvula reguladora de pressão no topo do tanque à medida que a energia é transferida por meio de calor para manter a pressão constante no tanque. Esse processo continua até que o tanque esteja cheio de vapor saturado a 260°C. Determine a quantidade de calor transferida em kJ. Despreze todos os efeitos das energias cinética e potencial.





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

Exercício

4.117 Um tanque rígido de cobre contendo inicialmente 1 m^3 de ar a 295 K, 5 bar, encontra-se conectado, por meio de uma válvula, a uma grande linha de alimentação que transporta ar a 295 K, 15 bar. A válvula é aberta apenas o tempo necessário para encher o tanque com ar até uma pressão de 15 bar. No estado final, o ar no tanque se encontra a 310 K. O tanque de cobre, cuja massa é de 20 kg, está a mesma temperatura do ar no tanque, nos estados inicial e final. O calor específico do cobre é c = 0,385 kJ/kg · K. Admitindo o comportamento de gás ideal para o ar, determine (a) as massas inicial e final do ar no tanque, ambas em kg, e (b) a transferência de calor do tanque e seus conteúdos para a vizinhança, em kJ, ignorando os efeitos das energias cinética e potencial.

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

Exercício

Hipóteses:

i) Regime transiente
ii) Variação de energia cinética e potencial desprezíveis
iii) Não há interações na forma de trabalho
iv) As temperaturas do ar dentro do tanque e do tanque são as mesmas no estado inicial e final, tanque rígido
v) O volume de controle compreende o tanque e o ar
vi) Ar como gás ideal

- Balanço de massa no conjunto

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = [\dot{m}_e]_{ar} \quad \Rightarrow \quad \frac{dm_{vc}}{dt} = [m_2 - m_1]_{ar}$$

- Balanço de energia no conjunto

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = Q_{VC} + [\dot{m}_e h_e]_{ar} \quad \Rightarrow \quad \Delta U_{Tanque} + \Delta U_{ar} = Q_{VC} + [(m_2 - m_1)h_e]_{ar}$$

Exercício

$$Q_{VC} = \Delta U_{Tanque} + \Delta U_{ar} + [(m_2 - m_1)h_e]_{ar}$$

$$Q_{VC} = [mc(T_2 - T_1)]_{Tanque} + [m_2u_2 - m_1u_1]_{ar} + [(m_2 - m_1)h_e]_{ar}$$

Do enunciado do exercício:

$p_1 = 5bar = 5 \cdot 10^5 Pa$

$p_2 = 15bar = 15 \cdot 10^5 Pa$

$p_e = 15bar = 15 \cdot 10^5 Pa$

$T_1 = 295K$

$T_2 = 310K$

$T_e = 295K$

$V = 1m^3$

$m_{tanque} = 20kg$

$c_{tanque} = 0{,}385\ kJ/kg \cdot K$

Da tabela A-22:

$u_1 = 210{,}49\ kJ/kg$

$u_2 = 221{,}25\ kJ/kg$

$h_e = 295{,}17\ kJ/kg$

Exercício

$$m_1 = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 1}{\frac{8314}{28,97} \cdot 295} = 5,91kg$$

$$m_2 = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{15 \cdot 10^5 \cdot 1}{\frac{8314}{28,97} \cdot 310} = 16,86kg$$

$$Q_{VC} = [mc(T_2 - T_1)]_{Tanque} + [m_2 u_2 - m_1 u_1]_{ar} + [(m_2 - m_1)h_e]_{ar}$$

$$Q_{VC} = \{[20 \cdot 0,385(310 - 295)] + (16,86 \cdot 221,25 - 5,91 \cdot 210,49) + (16,86 - 5,91) \cdot 295,17\}(kJ)$$

$$Q_{VC} = -630,3\ kJ$$