

PMT3532 -

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

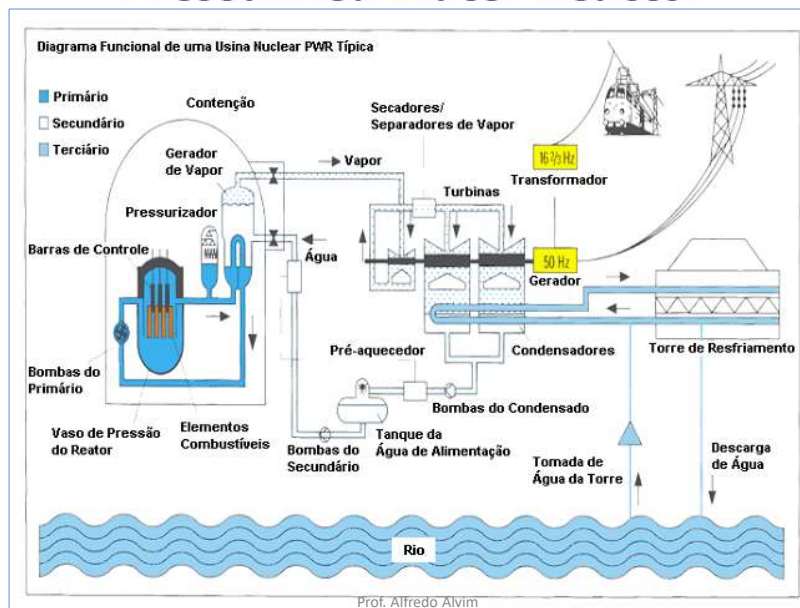
Termohidráulica de Sistemas de Geração de Potência I- Aula 02



Prof. Dr. Alfredo Alvim
CEN- Centro Engenharia Nuclear
IPEN/CNEN- MCTIC

1

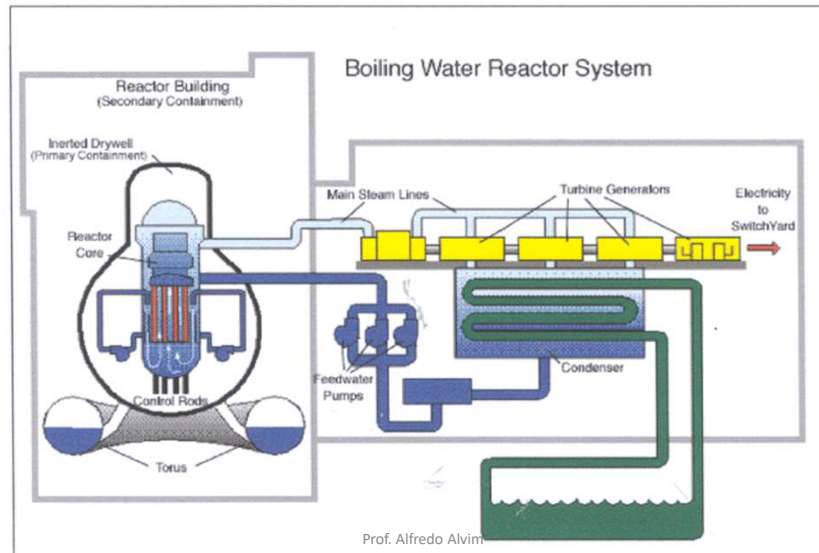
PWR Pressurized Water Reactor



2

2

REATORES REFRIGERADO A H₂O FERVENTE (BWR)



3

Princípios Básicos de Termodinâmica *1ª Lei da Termodinâmica*

Referência: Livro Termodinâmica Yunus Çengel 7ª Edição

Introdução



Max Planck
1858-1947

Segundo Max Planck, a *1ª Lei da Termodinâmica* nada mais é do que o princípio da conservação da energia aplicado a fenômenos que envolvem transferência de calor.

Prof. Alfredo Alvim

4

4

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Para um sistema num ciclo termodinâmico (propriedades finais coincidem com as iniciais) tem-se que:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

Integral cíclica

$$0 = \oint \delta Q - \oint \delta W$$

variação de uma
propriedade

$$\Delta E = \oint \delta Q - \oint \delta W$$

energia

Prof. Alfredo Alvim

5

5

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Para um sistema que passa por uma mudança **infinitesimal** de estado, podemos realizar um balanço de energia:

Variação da
energia do sistema
no processo

Energia que
entra no sistema
durante o
processo

Energia que sai
do sistema
durante o
processo

Assim: $dE = \delta Q - \delta W$

Prof. Alfredo Alvim

6

6

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Para entender os sinais que aparecem na expressão diferencial da 1ª Lei, precisamos lembrar da convenção de sinais adotada.

$$dE = \delta Q - \delta W$$

★ $\delta Q > 0$ quando o calor é “transferido” da vizinhança para o sistema;

★ $\delta Q < 0$ quando o calor é “transferido” do sistema para a vizinhança;

★ $\delta W > 0$ trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança;

★ $\delta W < 0$ trabalho realizado sobre o sistema pela vizinhança.

Prof. Alfredo Alvim

7

7

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Podemos integrar a expressão entre o estado 1 e 2 e obter a expressão da 1ª Lei para um sistema:

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 dE$$

$$Q_{1-2} = \int_1^2 \delta Q \quad \rightarrow \quad E_2 - E_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

$$W_{1-2} = \int_1^2 \delta W$$

Prof. Alfredo Alvim

8

8

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Podemos também realizar um balanço em um determinado instante de tempo, e assim temos:

Taxa de variação
da energia do
sistema

=

Taxa com que
energia que
entra no sistema

-

Taxa com que
energia sai do
sistema

Assim:
$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Prof. Alfredo Alvim

9

9

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Na expressão:
$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Taxa de transferência de calor para o sistema

Taxa de realização de trabalho pelo sistema

Temos uma equação diferencial ordinária (EDO), cuja solução exige o conhecimento da energia no instante inicial.

As seguintes
relações são válidas:

$$Q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt$$

$$W_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{W} dt$$

Prof. Alfredo Alvim

10

10

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Resumo

1ª Lei para um processo (1-2): $\Delta E = Q_{1-2} - W_{1-2}$

1ª Lei para um instante: $\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$

Prof. Alfredo Alvim

11

11

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Simplificações

♦ Ciclo: $E_1 = E_2 \quad \therefore \Delta E = 0 \quad \therefore Q = W$

Podemos escrever de outra forma:

$\oint \delta Q = \oint \delta W$
 integral cíclica

♦ Regime permanente (propriedades não variam com o tempo):

$\cancel{0} \frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$

Prof. Alfredo Alvim

12

12

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Escrevemos expressões para a conservação da energia sem nos preocuparmos sob quais formas encontramos a energia.

Anteriormente vimos:

A energia total (E) de um sistema composto por uma substância compressível simples em um dado estado é:

$$E = U + E_c + E_p$$

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p \quad \text{ou} \quad dE = dU + dE_c + dE_p$$

As igualdades são válidas pois Energia é uma função de ponto!

Prof. Alfredo Alvim

13

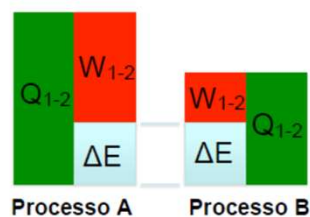
13

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Voltando à questão de função de ponto e caminho:

$$\underbrace{E_2 - E_1}_{\text{Variação da energia (propriedades)}} = \underbrace{Q_{1-2} - W_{1-2}}_{\text{Interação de energia (não-propriedades)}}$$

Observe a figura:



Fica claro que apesar de seguirmos por processos em que trabalho e calor são diferentes, a variação de energia do sistema é a mesma!

Prof. Alfredo Alvim

14

14

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Lembrando de Mecânica:

Energia cinética $\Delta E_c = \frac{1}{2} m (V_2^2 - V_1^2)$

Energia potencial $\Delta E_p = mg(z_2 - z_1)$

Completamos a apresentação da conservação da energia para um sistema. Veremos como avaliar a propriedade energia interna!

Prof. Alfredo Alvim

15

15

1ª Lei da Termodinâmica – Sistemas

Determinação de propriedades

U - energia interna (energia)

u – energia interna específica (energia / massa)

Para uma mistura líquido vapor:

$$U = U_{liq} + U_{vap} \quad \text{ou} \quad \frac{mu = m_{liq}u_l + m_{vap}u_v}{m}$$

Dividindo por m e introduzindo o título:

$$u = (1 - x)u_l + xu_v \quad \text{ou} \quad u = u_l + xu_{lv}$$

sendo u_l a energia específica do líquido saturado, u_v a energia do vapor saturado e u_{lv} a diferença entre a primeira e a segunda.

Prof. Alfredo Alvim

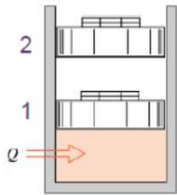
16

16

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

A propriedade entalpia

Considere o gás no conjunto cilindro-pistão como sistema. Vamos aquecer o sistema lentamente:



• 1ª lei: $E_2 - E_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$

Simplificando: $E_2 - E_1 \simeq U_2 - U_1$ Por que?

$$W_{1-2} = \int p dV = P_1(V_2 - V_1)$$

Combinando as expressões: $U_2 - U_1 = Q_{1-2} - P_1(V_2 - V_1)$

Define-se entalpia como: $H = U + PV$ Assim: $Q_{1-2} = H_2 - H_1$

Prof. Alfredo Alvim

17

17

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Determinação de propriedades

H - entalpia (energia)

h - entalpia específica (energia / massa)

Para uma mistura líquido vapor:

$$H = H_{liq} + H_{vap} \quad \text{ou} \quad mh = m_{liq}h_l + m_{vap}h_v$$

Introduzindo o título:

$$h = (1 - x)h_l + xh_v \quad \text{ou} \quad h = h_l + xh_{lv}$$

sendo h_l a entalpia específica do líquido saturado, h_v a entalpia do vapor saturado e h_{lv} a entalpia de vaporização.

Prof. Alfredo Alvim

18

18

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Determinação de propriedades

Aproximações para o líquido comprimido usando as propriedades do líquido saturado

$$v_{liq\ comp}(T, P) \approx v_l(T)$$

$$u_{liq\ comp}(T, P) \approx u_l(T)$$

$$h_{liq\ comp}(T, P) \approx u_l(T) + P \cdot v_l(T)$$

ou

$$h_{liq\ comp}(T, P) \approx h_l(T) + v_l(T) \cdot [P - P_{sat}(T)]$$

Prof. Alfredo Alvim

19

19

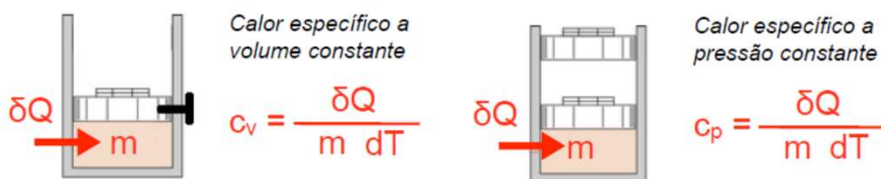
1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Determinação de propriedades

Calores Específicos

Para calcular as variações de entalpia e energia interna precisamos definir duas novas propriedades termodinâmicas, os **calores específicos a pressão constante e a volume constante**.

Considere os dois experimentos com um fluido:



Prof. Alfredo Alvim

20

20

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Calores específicos

Concluimos que:

Calor específico a
volume constante

$$c_v = \frac{\delta Q}{m \, dT}$$

Calor específico a
pressão constante

$$c_p = \frac{\delta Q}{m \, dT}$$

Podemos aplicar a 1ª Lei para os dois casos considerando a substância como sistema:

$$\delta Q = dU + \delta W (=0)$$

$$\delta Q = dU + \delta W (=pdV)$$

Combinando com as expressões dos calores específicos:

$$c_v = \frac{dU}{m \, dT} \rightarrow c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v$$

$$c_p = \frac{dU + pdV}{m \, dT} \rightarrow c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p$$

Prof. Alfredo Alvim

21

21

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Determinação de propriedades

Substância incompressível

O modelo considera que:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = \text{cte} \\ u = u(T) \Rightarrow c_v(T) = \frac{du}{dT} \end{array} \right.$$

Derivando a definição de entalpia:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p = \frac{du}{dT} \Rightarrow c = c_p = c_v \Rightarrow u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT$$

Considerando adicionalmente
calor específico constante:

$$u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1)$$

Quando podemos fazer essa hipótese?

Prof. Alfredo Alvim

22

22

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Determinação de propriedades

Gás perfeito

O modelo considera que:
$$\begin{cases} pv = RT \\ u(T) \end{cases}$$

Considerando a definição da entalpia:

$$h = h(T) = u + RT \Rightarrow dh = du + RdT$$

Combinando a equação anterior com as definições dos calores específicos:

$$c_{v0}(T) = \frac{du}{dT}$$

$$c_{p0}(T) = \frac{dh}{dT}$$

$$\text{Obtém-se: } c_{p0} = c_{v0} + R$$

maior que c_v

indica g.p.

Prof. Alfredo Alvim

23

23

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Determinação de propriedades

Gás perfeito: Aproximações

$$\begin{matrix} c_{p0} \text{ e } c_{v0} \\ \text{constantes:} \end{matrix} \begin{cases} c_{v0}(T) = \frac{du}{dT} \\ c_{p0}(T) = \frac{dh}{dT} \end{cases} \xrightarrow{\text{Integrando}} \begin{matrix} u_2 - u_1 = c_{v0}(T_2 - T_1) \\ h_2 - h_1 = c_{p0}(T_2 - T_1) \end{matrix}$$

Em alguns problemas aparecem u e h isolados, isto é, não aparecem diferenças de u e h . Nessa situação como determinamos as propriedades?

Definimos um estado de referência para u , por exemplo. Nesse estado estabelecemos um valor arbitrário para u e calculamos h correspondente! Vejamos como fazer isso na sequência.

Prof. Alfredo Alvim

24

24

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Determinação de propriedades

Gás perfeito: Aproximações

Vamos definir o estado de referência. Considere a expressão:

$$u = u(T_{ref}) + \int_{T_{ref}}^T c_v dT$$

Por simplicidade vamos estabelecer que para $T = 0 \text{ K}$, $u = 0$:

$$u = u(0) + \int_0^T c_v dT \quad \rightarrow \quad u(T) = c_{v0} T$$

Agora calculamos h :

$$h(T_{ref}) = u(T_{ref}) + Pv \quad \rightarrow \quad h = 0 + RT_{ref} \quad \therefore h(0K) = 0$$

Analogamente: $h(T) = c_{p0} T$

Prof. Alfredo Alvim

25

25

1ª Lei da Termodinâmica - Sistemas

Determinação de propriedades

Gás perfeito: Tabelas de gás ideal

Fizemos a integração usando a hipótese de calores específicos constantes

$$c_{v0}(T) = \frac{du}{dT}$$

$$c_{p0}(T) = \frac{dh}{dT}$$

Nas tabelas de gás ideal a integração é feita a partir de um estado de referência considerando a dependência dos calores com a temperatura!

Prefira usar as Tabelas de Gás Ideal a considerar calores constantes!

TABELA A.7
Propriedades termodinâmicas do ar (gás ideal; pressão de referência para a entropia é 0,1 MPa ou 1 bar)

T [K]	u kJ/kg	h kJ/kg	s° kJ/kg $\times$ K	P_r	v_r
200	142,77	200,17	6,46260	0,2703	493,47
220	157,07	220,22	6,55912	0,3770	389,15
240	171,38	240,27	6,64535	0,5109	313,27

Prof. Alfredo Alvim

26

26

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Introdução

Os princípios básicos que nos são importantes estão escritos para um sistema. Assim, temos as expressões a seguir para a conservação da massa e da energia:

$m = \text{constante}$	$\frac{dm}{dt} = 0$
$E_2 - E_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$	$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$

Prof. Alfredo Alvim

27

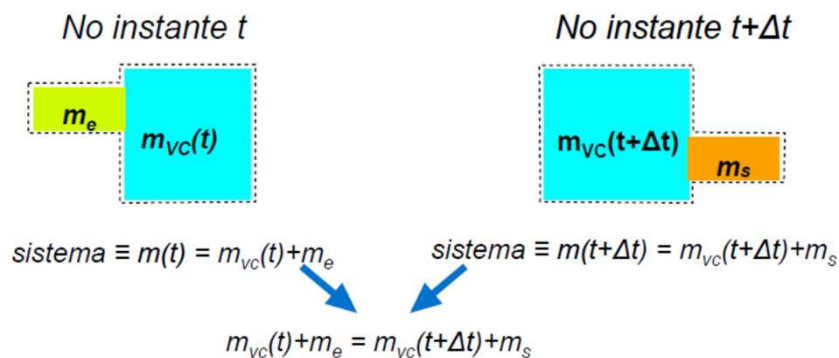
27

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Conservação da massa

Vamos escrever expressões equivalentes para um volume de controle.

Podemos fazer isso considerando um sistema com fronteira móvel:



Prof. Alfredo Alvim

28

28

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Conservação da massa

Agrupando os termos e dividindo por Δt :

$$\frac{m_{vc}(t+\Delta t) - m_{vc}(t)}{\Delta t} = m_e - m_s \quad \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} \quad \frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

vazão mássica (massa/tempo)

Generalizando para várias entradas e saídas:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s$$

Prof. Alfredo Alvim

29

29

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Conservação da massa

Deduzimos:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s$$

De fato fizemos a seguinte conta:

Taxa de variação da massa contida no VC no instante t	=	Taxa com que massa entra no VC	-	Taxa com que massa sai do VC
---	---	--------------------------------	---	------------------------------

Prof. Alfredo Alvim

30

30

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Conservação da energia

De forma análoga podemos deduzir a expressão da conservação da energia para um volume de controle:

No instante t No instante $t+\Delta t$

$$E = E_{vc}(t) + m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \quad E = E_{vc}(t + \Delta t) + m_s \left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$$

$$E_{vc}(t) + m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) + Q_{vc} - W = E_{vc}(t + \Delta t) + m_s \left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$$

Prof. Alfredo Alvim

31

31

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Conservação da energia

Agrupando os termos:

$$E_{vc}(t + \Delta t) - E_{vc}(t) = m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - m_s \left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + Q_{vc} - W$$

Dividindo por Δt e aplicando o limite ($\Delta t \rightarrow 0$):

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{m}_s \left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

A potência pode ser dividida em dois componentes:

$$\dot{W} = \dot{W}_{vc} + \dot{W}_{fluxo}$$

O que é essa tal de potência de fluxo?

Prof. Alfredo Alvim

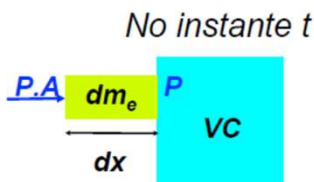
32

32

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Trabalho de fluxo

Para entender o porque da divisão e a introdução do trabalho de fluxo, considere as figuras a seguir:



O trabalho realizado pela vizinhança para que dm_e entre no sistema é: $P.A.dx$

Por sua vez a potência é dada: $P.A.V$

V é a velocidade média com dm_e entre no sistema.

Analogamente poderíamos repetir a análise para uma saída. Dessa forma, chegamos na expressão da potência de fluxo:

$$\dot{W} = p_s A_s V_s - p_e A_e V_e = \dot{m}_s p_s v_s - \dot{m}_e p_e v_e$$

Por que o sinal negativo associado à entrada?

Prof. Alfredo Alvim

33

33

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Expressão para volume de controle

Substituindo o resultado anterior na expressão da 1ª Lei:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{m}_e \left(u_e + p_e v_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e \right) - \dot{m}_s \left(u_s + p_s v_s + \frac{V_s^2}{2} + g z_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

Lembrando da definição de entalpia e generalizando para várias entradas e saídas:

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

Prof. Alfredo Alvim

34

34

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Resumo

Princípios de conservação para volume de controle:

Conservação da massa

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s$$

Conservação da energia

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

Prof. Alfredo Alvim

35

35

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Caso particular

Regime permanente:

- ★ O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;
- ★ O estado da massa em cada ponto do VC não varia com o tempo;
- ★ O fluxo e o estado da massa em cada área discreta de escoamento na superfície de controle não variam com o tempo;
- ★ As taxas nas quais o calor e o trabalho cruzam a superfície de controle permanecem constantes.
- ★ O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;

As velocidades do fluido nas entradas e saídas são velocidades relativas ao VC, portanto, nesse caso, absolutas

- ★ O estado da massa em cada ponto do VC não varia com o tempo;

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = 0 \qquad \frac{dE_{vc}}{dt} = 0$$

36

36

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Regime permanente

Resumos das equações com uma entrada e uma saída:

$$\cancel{\frac{dm_{vc}}{dt}} = \cancel{\sum_e \dot{m}_e} - \cancel{\sum_s \dot{m}_s} \quad \Rightarrow \quad \dot{m} = \dot{m}_e = \dot{m}_s$$

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

Combinando com
a conservação da
massa

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

Dividindo pela
vazão mássica

$$h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + q_{vc} - w_{vc} = h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s$$

Prof. Alfredo Alvim

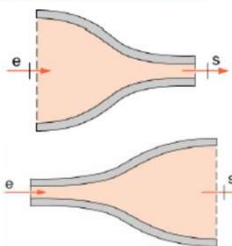
37

37

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Exemplos de aplicação

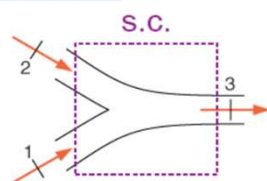
Bocal / Difusor



$$\cancel{h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + q_{vc} - w_{vc}} = \cancel{h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s}$$

$$h_e + \frac{V_e^2}{2} = h_s + \frac{V_s^2}{2}$$

Misturador



$$\sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_s \dot{m}_s h_s + \cancel{\dot{Q}_{vc}} - \cancel{\dot{W}_{vc}} = 0$$

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

Prof. Alfredo Alvim

38

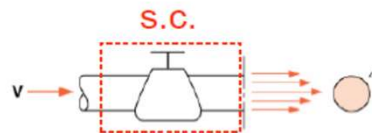
38

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Exemplos de aplicação

Restrições

Exemplos: válvulas e tubos capilares



1ª Lei:
$$h_e + \cancel{\frac{V_e^2}{2}} + \cancel{gz_e} + \cancel{q_{vc}} - \cancel{w_{vc}} = h_s + \cancel{\frac{V_s^2}{2}} + \cancel{gz_s}$$

$$h_e = h_s \rightarrow \text{isentálica}$$

Prof. Alfredo Alvim

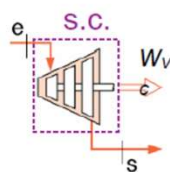
39

39

1ª Lei da Termodinâmica-Volume Controle

Exemplos de aplicação

Turbina

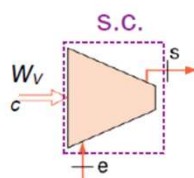


$$h_e + \cancel{\frac{V_e^2}{2}} + \cancel{gz_e} + \cancel{q_{vc}} - \cancel{w_{vc}} = h_s + \cancel{\frac{V_s^2}{2}} + \cancel{gz_s}$$

$$w_{vc} = h_e - h_s$$

Note que resulta $w_{vc} > 0$ e que a vazão mássica define a potência

Compressor / Bomba



$$h_e + \cancel{\frac{V_e^2}{2}} + \cancel{gz_e} + \cancel{q_{vc}} - \cancel{w_{vc}} = h_s + \cancel{\frac{V_s^2}{2}} + \cancel{gz_s}$$

$$w_{vc} = h_e - h_s$$

Note que resulta $w_{vc} < 0$ e que a vazão mássica define a potência

Prof. Alfredo Alvim

40

40