

Primeira Lei da Termodinâmica

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
2PFG/DE/FEM/UNICAMP

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 1

PLT – pré conceito

- Vêm da época do ginásio, quando se começa a estudar ciências;
– *“Na natureza nada se cria, tudo se transforma”*;
- Nessa afirmação esta embutido um conceito termodinâmica importante, que é a lei de conservação;
- Sob o ponto de vista termodinâmico, esta afirmação quer dizer:
– *Energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada;*

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 2



25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 3

Um sistema percorrendo um ciclo

- A primeira lei estabelece que a energia se conserva;
- Quais as formas de energia que conhecemos?
 - *Calor e trabalho;*
- Desta forma, é plausível dizer que calor se transforma em trabalho e vice-versa;
 - *Veremos adiante que há outras formas de energia;*
- Matematicamente, podemos escrever que:

$$\oint \delta Q \propto \oint \delta W$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

4

Transformando em igualdade

- Estabelecendo uma constante de proporcionalidade (J), pode-se escrever que:

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

- A constante J é chamado de equivalente mecânico do calor e foi determinado por Joule em 1843.

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

5

Determinação do equivalente mecânico do calor

- Para determinar o valor de J, Joule fez um experimento extremamente simples, como o mostrado na [figura](#);
- Medindo o calor recebido pela a água e o trabalho realizado sobre o sistema, Joule determinou o valor de J como sendo 4,18 J/cal;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

6

Implicações

- O calor e o trabalho eram expressos em unidades próprias, contudo ambos são formas de energia;
 - Antigamente, o equivalente mecânico do calor se fazia necessário para compatibilizar as unidades;
 - Atualmente essas grandezas são expressas nas mesmas unidades, desta forma o equivalente mecânico do calor tem com grandeza a unidade ($J = 1 J/J$ ou cal/cal);
- Aqui equivalente mecânico do calor não será escrito, mas deve-se ter em mente que deverá se respeitar as unidades em todos os termos.

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

7

Primeira lei para mudança de estado de um sistema

- Olhando atentamente a definição matemática da primeira lei, observa-se que a integral é um integral cíclica;
 - Só é válida para um sistema que percorre um ciclo;
 - Nem sempre se está interessado nessa situação;
- Muitas vezes se está interessado em um sistema que passa somente por uma mudança de estado;
- A [figura](#) a seguir ilustra essa situação.

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

8

Ciclos termodinâmicos

- Considerando um ciclo como sendo o processo **A-B**:

$$\int_{1A}^{2A} \delta Q + \int_{2B}^{1B} \delta Q = \int_{1A}^{2A} \delta W + \int_{2B}^{1B} \delta W$$

- Considerando um ciclo como sendo o processo **A-C**:

$$\int_{1A}^{2A} \delta Q + \int_{2C}^{1C} \delta Q = \int_{1A}^{2A} \delta W + \int_{2C}^{1C} \delta W$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

9

Manipulando os ciclos

- Subtraindo as duas equações e reagrupando os termos, obtém-se que:

$$\int_{2B}^{1B} (\delta Q - \delta W) = \int_{2C}^{1C} (\delta Q - \delta W)$$

- Uma vez que os processos B e C são arbitrários, pode-se concluir que $(\delta Q - \delta W)$ é a mesma para qualquer processo e portanto é uma propriedade termodinâmica;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

10

Energia, uma propriedade termodinâmica

- Definindo energia como sendo a diferença entre calor e trabalho, pode-se escrever que:

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

- E é uma propriedade termodinâmica;
 - *Independente de como o sistema atingiu o estado;*
 - *Pode ser tabelada em função do estado termodinâmico;*

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

11

Integrando a energia

- Como energia é uma propriedade termodinâmica, sua integral não depende do caminho;

– *Depende só do estado inicial e final da substância;*

- Quando integrada a relação entre trabalho, calor e energia, obtém-se que:

$${}_1Q_2 = E_2 - E_1 + {}_1W_2$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

12

Observações sobre a energia

- A propriedade E representa toda a energia contida em um sistema num dado estado;
 - *Essa energia pode estar presente em uma multiplicidade de formas tais como:*
 - Cinética, potencial, química, etc.
 - *Geralmente de todas as energias presentes em um sistema, separam-se a energia cinética e potencial e agrupam-se todas as outras na forma de energia interna;*
- Desta forma, pode-se escrever que:
 $E = \text{Energia Interna (U)} + \text{Energia Cinética (E.C)} + \text{Energia Potencial (E.P)}.$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

13

Energia cinética

- A energia cinética está associada ao sistema de coordenadas adotado e é determinada a partir da massa e da velocidade como:

$$E.C = \frac{1}{2} mV^2$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

14

Energia potencial

- A energia potencial depende do referencial adotado e é determinada a partir da massa e da elevação como:

$$E.P = mgZ$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

15

Energia Interna

- A energia interna está associada ao estado termodinâmico do sistema;
- Seus valores são tabelados em função do estado termodinâmico;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

16

“Calculo” da primeira lei

- A primeira lei pode ser escrita em função dos diversos tipos de energias como:

$$\delta Q = dU + d(E.C) + d(E.P) + \delta W$$

- Uma vez integrada, a primeira lei pode ser escrita como:

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) + mg(Z_2 - Z_1) + {}_1W_2$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

17

Considerações finais

- A primeira lei estabelece que a variação líquida de energia do sistema é igual à energia líquida que cruza a fronteira na forma de calor ou trabalho;
- Uma dado importante é que a primeira lei fornece apenas as variações de energia, não sendo possível estabelecer valores absolutos dessa quantidades.

25/2009

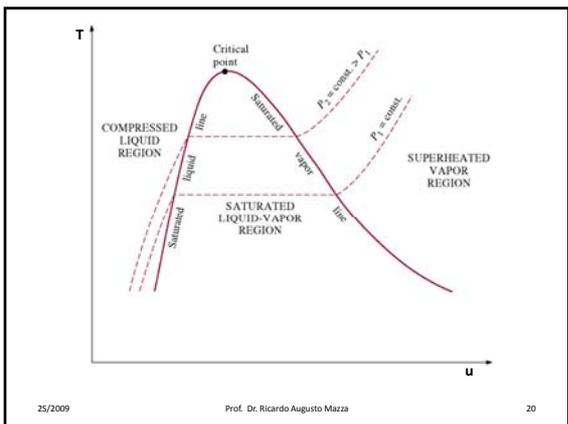
Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

18

Energia interna, uma propriedade termodinâmica

- A energia interna é uma propriedade termodinâmica independente e pode ser utilizada para determinar o estado de uma substância;
 - Especificando a pressão e a energia interna do vapor superaquecido, a temperatura também estará determinada;
- Tabelas termodinâmicas apresentam os valores para a energia interna em função da temperatura e pressão para as diversas regiões (líquido comprimido, saturação e vapor superaquecido), de forma semelhante ao do volume específico;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 19



Determinação da Energia Interna

- Como energia interna é propriedade termodinâmica, pode ser tabelada em função do estado;
- Há tabelas distintas para as três regiões de interesse na termodinâmica:
 - Saturação;
 - Vapor Superaquecido;
 - Líquido comprimido;
- Para gás perfeito, relações algébricas devem ser empregadas;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 21

Região de Saturação

- As propriedades termodinâmicas são determinadas a partir das do líquido e do vapor saturado;
 - As propriedades para esses pontos são obtidas nas tabelas;
 - São representados pelo subscrito *l* e *v*, respectivamente;
 - O subscrito *lv* representa a diferença entre a propriedade para a saturação na fase líquida e de vapor;
- Além dessas propriedades é necessário conhecer o título da mistura (*x*);
- Com essas informações, pode-se calcular as propriedades como:

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

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 22

Tabela A.2 (Continuação)

Temp. °C	Press. bar	Volume Específico m³/kg		Energia Interna kJ/kg	
		Líquido Sat. $v_l \times 10^3$	Vapor Sat. v_g	Líquido Sat. u_l	Vapor Sat. u_g
50	0,1235	1,0121	12,032	209,32	2443,5
55	0,1576	1,0146	9,568	230,21	2450,1
60	0,1994	1,0172	7,671	251,11	2456,6
65	0,2503	1,0199	6,197	272,02	2463,1
70	0,3119	1,0228	5,042	292,95	2469,6
75	0,3858	1,0259	4,131	313,90	2475,9
80	0,4739	1,0291	3,407	334,86	2482,2
85	0,5783	1,0325	2,828	355,84	2488,4
90	0,7014	1,0360	2,361	376,85	2494,5
95	0,8455	1,0397	1,982	397,88	2500,6

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 23

Vapor Superaquecido

- A temperatura em que o sistema se encontra e maior que a temperatura de saturação na pressão do sistema;
- Além disso, todo a massa do sistema se encontra na forma de vapor;
- Também não tem sentido se falar em título;
- As propriedades da região são tabeladas em função da pressão e da temperatura;
- A temperatura tabelada começa na temperatura de saturação;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 24

Calor específico a volume constante

- É propriedade das substâncias e é tabelado:
– É determinado experimentalmente a partir de sua definição;

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

- É importante para calcular variações de determinadas propriedades termodinâmicas:
– Variação da energia interna para gases perfeitos;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

28

Experiência de Joule

- **Joule em 1843** mostrou que a energia interna do sistema depende unicamente da temperatura;
- Esse fato possibilitou se determinar a energia interna de um gás perfeito com uma relação algébrica;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

29

Energia interna para gases perfeitos

- Para gases perfeitos, pode-se escrever que:
 $P \cdot v = R \cdot T$
- Da experiência de Joule e da definição de calor específico a volume constante, pode-se determinar a variação da energia interna como:

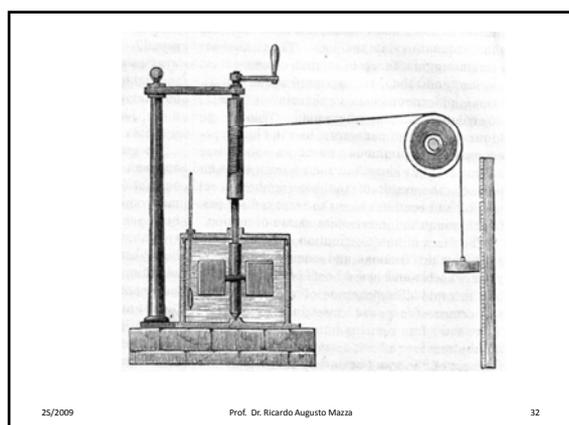
$$C_{v0} = \frac{du}{dT} \quad \text{ou} \quad du = C_{v0} \cdot dT$$

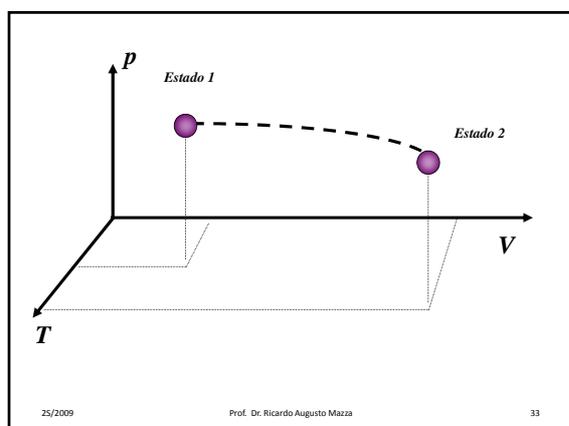
25/2009

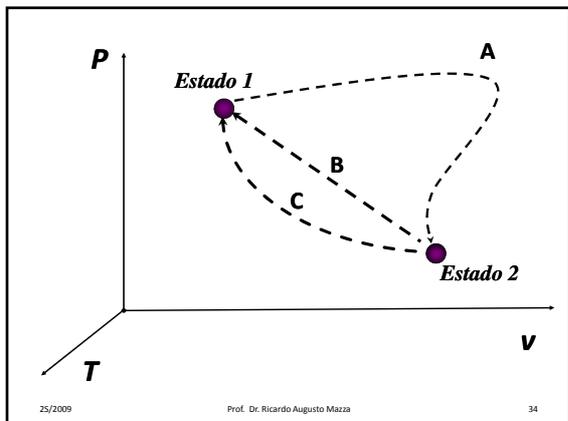
Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

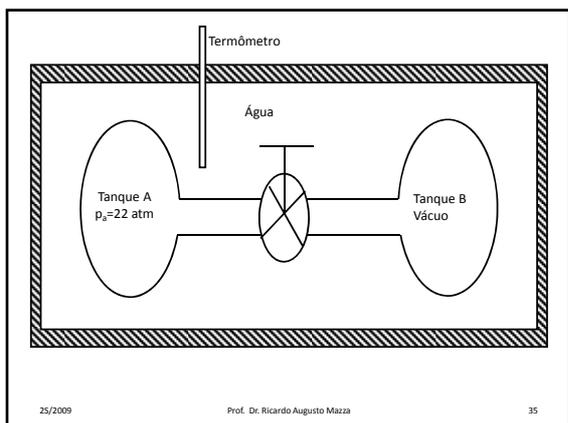
30











Entalpia

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
2PFG/DE/FEM/UNICAMP

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 36

Casos particulares da aplicação da primeira lei

- Em alguns processos termodinâmicos específicos, pode-se combinar propriedades termodinâmicas para se obter outras propriedades termodinâmicas;
- Um exemplo é o processo de expansão quase-estático a pressão constante, como mostra a [figura](#).

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

37

Aplicando a primeira lei ao sistema

- Assumindo que não há variação de energia cinética ou potencial e que o único trabalho realizado durante o processo seja o associado ao movimento da fronteira, a primeira lei da termodinâmica se reduz a:

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

38

Calculando o trabalho

- Como a pressão permanece constante durante o processo, o trabalho pode ser calculado como:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P \cdot dV = P(V_2 - V_1)$$

- Substituindo na equação da primeira lei, obtêm-se que:

$${}_1Q_2 = (U_2 + P_2V_2) - (U_1 + P_1V_1)$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

39

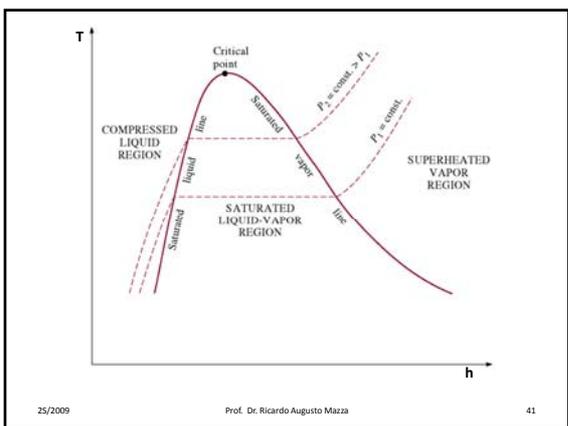
Entalpia, uma propriedade termodinâmica

- A transferência de calor é dada em termos da variação da quantidade $U + PV$ entre os estados inicial e final;
- Todos os elementos dessa expressão são propriedades termodinâmicas ;
 - Sua combinação deve ter as mesmas características;
- É conveniente definir uma nova propriedade extensiva chamada entalpia como:

$$H = U + PV$$
- Por unidade de massa,

$$h = u + P.v$$

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 40



Determinação da Entalpia

- Como entalpia é propriedade termodinâmica, pode ser tabelada em função do estado;
- Há tabelas distintas para as três regiões de interesse na termodinâmica :
 - **Saturação;**
 - **Vapor Superaquecido;**
 - **Líquido comprimido;**
- Para **gás perfeito**, relações algébricas devem ser empregadas;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 42

Região de Saturação

- As propriedades termodinâmicas são determinadas a partir das do líquido e do vapor saturado;
 - As propriedades para esses pontos são obtidas nas tabelas;
 - São representados pelo subscrito l e v, respectivamente;
 - O subscrito lv representa a diferença entre a propriedade para a saturação na fase líquida e de vapor;
- Além dessas propriedades é necessário conhecer o título da mistura (x);
- Com essas informações, pode-se calcular as propriedades como:

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

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 43

Tabela de propriedades termodinâmicas do vapor d'água – vapor saturado.

Temp. [°C]	Pressão [kPa]	Volume Específico [m³/kg]		Energia Interna [kJ/kg]				Entalpia [kJ/kg]		
		LS	VS	LS	EVAP.	VS	LS	EVAP.	VS	
		v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.3	
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 44

Vapor Superaquecido

- A temperatura em que o sistema se encontra e maior que a temperatura de saturação na pressão do sistema;
- Além disso, todo a massa do sistema se encontra na forma de vapor;
- Também não tem sentido se falar em título;
- As propriedades da região são tabeladas em função da pressão e da temperatura;
- A temperatura tabelada começa na temperatura de saturação;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 45

Calor específico a pressão constante

- É propriedade das substâncias e é tabelado:
– É determinado experimentalmente a partir de sua definição;

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

- É importante para calcular variações de determinadas propriedades termodinâmicas:
– Variação da entalpia para gases perfeitos

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

49

Entalpia e a lei para gases perfeitos

- Da definição de entalpia e da lei para gases perfeitos, pode-se escrever que:

$$h = u + Pv = u + RT$$

- Como R é uma constante e u só é função da temperatura (Joule), pode-se afirmar que h é função apenas da temperatura;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

50

Entalpia para gases perfeitos

- Como a entalpia é só depende da temperatura para um gás perfeito, pode-se determinar sua variação como:

$$C_{po} = \frac{dh}{dT} \quad \text{ou} \quad dh = C_{po} \cdot dT$$

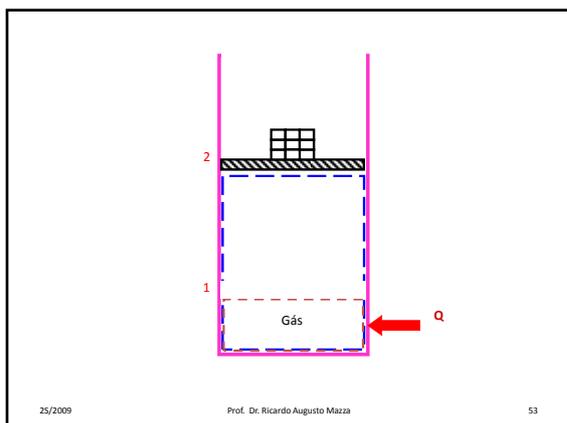
- Uma relação importante entre os calores específicos e desenvolvida a partir da entalpia é que $C_{po} - C_{vo} = R$

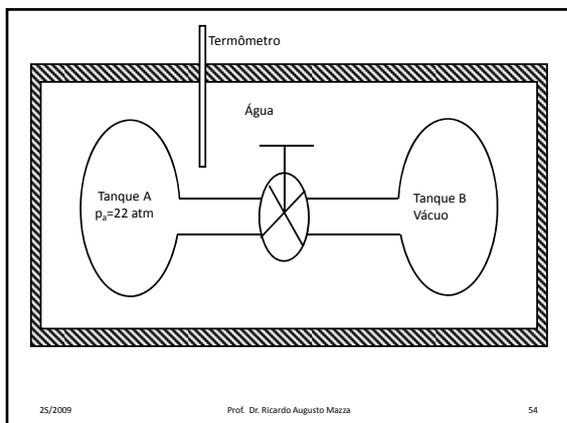
25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

51







Primeira Lei da Termodinâmica
Volume de Controle

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
2PFG/DE/FEM/UNICAMP

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 55

Introdução

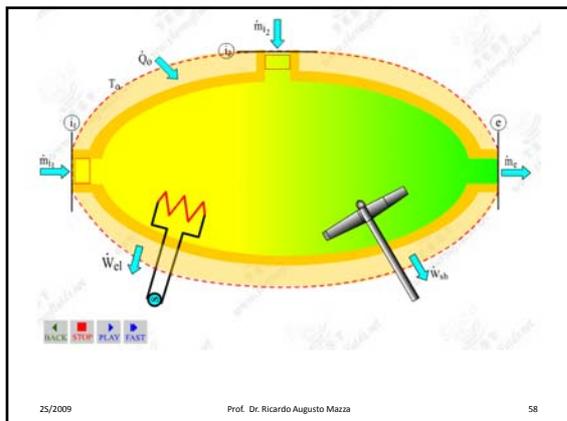
- Até esse instante foi estuda as variações das propriedades do sistema:
 - *Pressão, temperatura, volume específico, entalpia, etc;*
- Deste instante em diante estaremos interessados em determinar variações das propriedades quando há transporte de massa pelas fronteiras:
 - *Isso é importante para se determinar potências.*

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 56

Volume de Controle (VC)

- É um volume arbitrário do espaço através do qual há massa entrando e saindo;
- Seu contorno geométrico é denominado de superfície de controle:
 - *Esta superfície pode ser real ou imaginária;*
 - *Pode estar em repouso (estacionária) ou em movimento (móvel);*
- Pode atravessar a superfície de controle:
 - *Massa, trabalho, calor e quantidade de movimento.*

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 57



Recapitulando

- Para sistema, as equações de conservação podem ser escritas como:
 - **Massa:**

$$M = cte \quad \left. \frac{dM}{dt} \right|_{\text{sistema}} = 0$$
 - **Energia:**

$$dE = \delta Q - \delta W \quad \left. \dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt} \right|_{\text{sistema}}$$

Transformando sistema em VC

- Considerando um sistema que acompanha uma determinada massa de fluido e um VC fixo em relação a um referencial **inercial**;
- Assumindo no instante $t=t_0$ que **o sistema e o VC são coincidentes**;
- No instante $t=t_0+\Delta t$, o sistema se deslocou e ocupa as regiões **2 e 3**;
- As regiões foram escolhidas de tal forma que:
 - A massa da região 1 entra no VC e a da região 3 deixa o VC, conforme mostra a figura;

Avaliando d/dt no sistema

- Considerando genericamente que N é uma propriedade extensiva qualquer, pode-se escrever que:

$$\left. \frac{dN}{dt} \right)_{\text{sistema}} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_s)_{t_0+\Delta t} - N_s)_{t_0}}{\Delta t}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

61

Avaliando N em t_0 e $t_0+\Delta t$

- Em t_0 , o sistema e o VC ocupam a mesma região (1 e 2) e em $t_0+\Delta t$, o sistema ocupa as regiões 2 e 3;
- Desta forma:

$$N_s)_{t_0+\Delta t} = (N_2 + N_3)_{t_0+\Delta t} = (N_{VC} - N_1 + N_3)_{t_0+\Delta t}$$

$$N_s)_{t_0} = (N_{VC})_{t_0}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

62

Calculando a derivada

$$\left. \frac{dN}{dt} \right)_s \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_s)_{t_0+\Delta t} - N_s)_{t_0}}{\Delta t}$$

$$\left. \frac{dN}{dt} \right)_s \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(N_{VC} - N_1 + N_3)_{t_0+\Delta t} - (N_{VC})_{t_0}}{\Delta t}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

63

Separando os termos

$$\left. \frac{dN}{dt} \right)_s \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(N_{VC} - N_1 + N_3)_{t_0 + \Delta t} - (N_{VC})_{t_0}}{\Delta t}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(N_{VC})_{t_0 + \Delta t} - (N_{VC})_{t_0}}{\Delta t} \quad \text{I}$$

$$+ \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(N_3)_{t_0 + \Delta t}}{\Delta t} \quad \text{II}$$

$$- \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(N_1)_{t_0 + \Delta t}}{\Delta t} \quad \text{III}$$

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 64

Primeiro termo

- Representa a variação da propriedade dentro do volume de controle;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 65

Segundo e/ou terceiro termo

- Esses termos são similares na forma e na interpretação física;
- Representam a propriedade entra ou sai do volume de controle;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 66

Forma Final

$$\frac{\partial N_{\text{sistema}}}{\partial t} = \frac{\partial N_{\text{VC}}}{\partial t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(N_3)_{t_0+\Delta t}}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(N_1)_{t_0+\Delta t}}{\Delta t}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

67

Reescrevendo a propriedade extensiva

- Trabalhar com a propriedade N não é adequado;
- É melhor ponderar pela massa;
 - *As propriedades termodinâmicas extensivas são tabelas dessa forma;*
- Desta forma, podemos escrever que:

$$N = \int_{\text{Sistema}} \eta \cdot dm \quad \text{ou} \quad N = \int_{\text{Volume}} \eta \cdot \frac{dV}{v} \quad \text{ou} \quad \int_{\text{Volume}} \eta \cdot \rho \cdot dV$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

68

Reescrevendo

$$\frac{\partial N_{\text{sistema}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{Volume}} \eta \cdot \rho \cdot dV +$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left(\int_{\text{Volume}} \eta \cdot \rho \cdot dV_3 \right)_{t_0+\Delta t}}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left(\int_{\text{Volume}} \eta \cdot \rho \cdot dV_1 \right)_{t_0+\Delta t}}{\Delta t}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

69

O termo referente ao volume (dV)

- Para a determinação do limite é necessário se avaliar o volume do sistema em $t_0 + \Delta t$;
- Escrevendo o volume como o produto de um diferencial de área (dA) por um comprimento apropriado (Δl);
 - O comprimento é obtido pelo produto da altura representativa do volume pelo cosseno de um ângulo apropriado;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

70

Reescrevendo o segundo e o terceiro termo

- Com o exposto anteriormente, os termos podem ser escritos como:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left(\int_3 \eta \rho \Delta l \cos(\alpha) dA - \int_1 \eta \rho \Delta l \cos(\alpha) dA \right)_{t_0 + \Delta t}}{\Delta t}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

71

Álgebra linear !

- Verificando que:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{\Delta t} = |\vec{V}|$$

- Definindo o vetor $d\vec{A}$ como sendo o produto de um vetor unitário \vec{n} pelo diferencial de área (dA), pode-se escrever que:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left(\int_3 \eta \rho \Delta l \cos(\alpha) dA \right)_{t_0 + \Delta t}}{\Delta t} = \int_3 \eta \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

72

Uma observação

- Analisando-se toda a superfície de controle, pode-se escrever que:

$$SC = SC_1 + SC_2 + SC_p$$

onde o subscrito p refere-se a superfície restante para englobar todo o sistema;

- Quando não há fluxo atravessando a fronteira, a vetor velocidade é paralelo à área, desta forma:

$$\vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

73

Versão final

- Desta forma, se aplicarmos ao terceiro termo uma metodologia semelhante ao do segundo e lembrando-se do [primeiro](#), pode-se finalmente escrever que:

$$\left. \frac{dN}{dt} \right)_{\text{sistema}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \eta \rho dV + \int_{SC} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

74

Interpretação física

$$\left. \frac{dN}{dt} \right)_{\text{sistema}} = \bullet \text{ Taxa de variação total de qualquer propriedade extensiva de um sistema}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \eta \rho dV = \bullet \text{ Taxa de variação no tempo de qualquer propriedade extensiva no VC}$$

$$\int_{SC} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = \bullet \text{ Taxa líquida da propriedade extensiva saindo pela superfície de controle}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

75

Conservação de Massa
Volume de controle

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
2PFG/DE/FEM/UNICAMP

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 76

Recapitulando

- Para sistema, as equações de conservação podem ser escritas como

– *Massa*

$$m = cte \quad \left. \frac{dm}{dt} \right)_{\text{sistema}} = 0$$

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 77

Conservação de massa

- Para um sistema, a variação de massa no tempo tem que ser necessariamente nula;
- Ponderando a massa por ela mesma, obtém-se que:

$$\eta=1$$

- Portanto, a equação de conservação de massa para VC pode ser escrita como:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 78

Interpretação física

$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV =$ • Acumulo de massa no interior do volume de controle

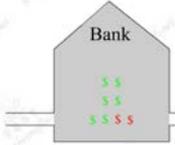
$\int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA =$ • Taxa líquida de massa que atravessa o volume de controle

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 79

Analogia

• É um princípio familiar;
 – *“Tudo que entra menos o que sai, fica retido”;*

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 80



Bank

Time rate of change of money contained within the bank at time t analogous to Time rate of change of mass within control volume at time t

money = mass

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i \dot{m}_i - \sum_e \dot{m}_e$$

⏪ STOP ⏩ PLAY ⏴ FAST ⏵

⊕ Mass
⊖ Energy
⊙ Entropy

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 81

Conservação de massa

- Do ponto de vista mais formal é:
 - O fluxo de massa que entra no VC atravessando a superfície de controle é igual ao fluxo de massa que sai mais a taxa de acumulo de massa no VC;
- Na linguagem matemática:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \Rightarrow \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = \frac{dm}{dt} \Bigg|_{VC}$$

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 82

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 83

Fluxo de massa

- O fluxo de massa está correlacionado com a velocidade com que a massa trafega da seguinte forma:

$$\dot{m} = \frac{\bar{V}A}{v}$$

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 84

Vazão e velocidade

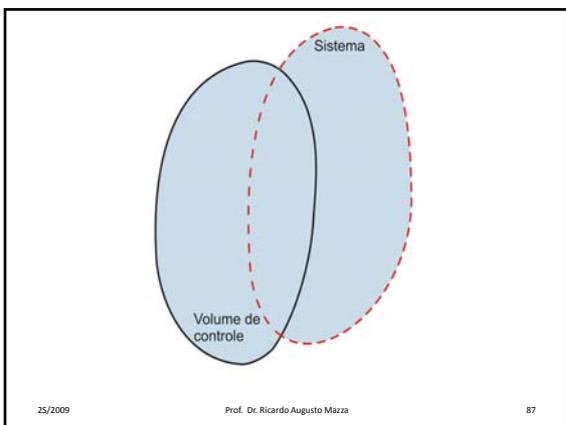
- \bar{v} é a velocidade média na seção cuja a área é A , sendo essa normal à velocidade. A velocidade média é definida como sendo:

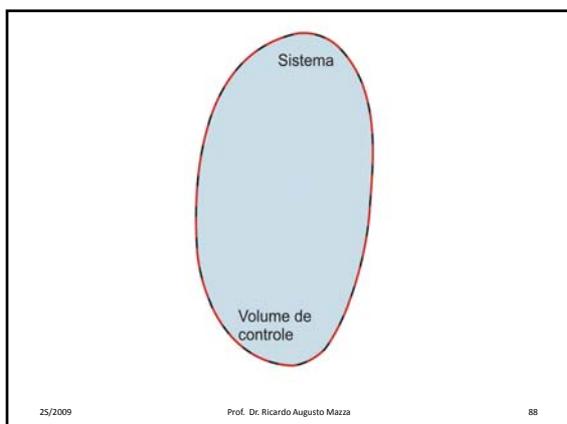
$$\bar{v} = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \int_A \vec{v} \cdot d\vec{A}$$

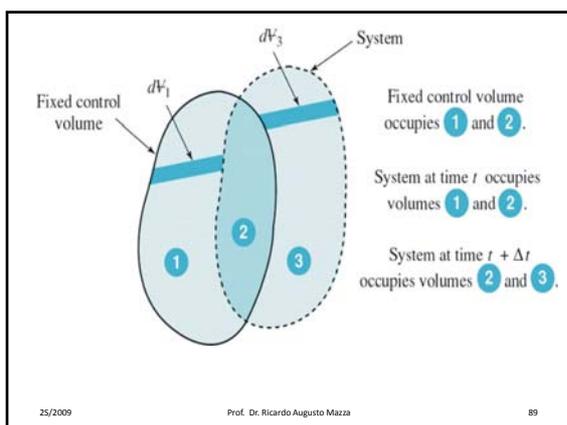
25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 85

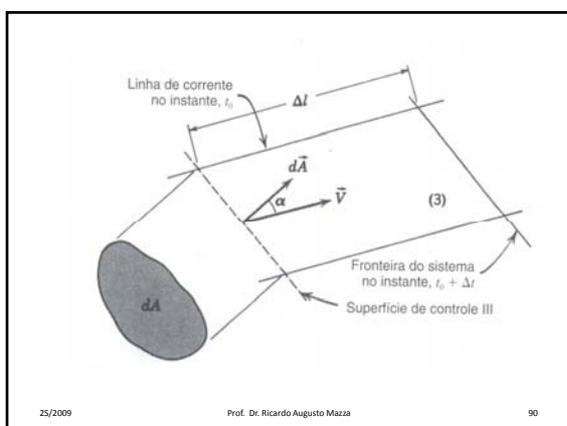
FIM !

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 86









Primeiro termo

$$\frac{\partial N_{VC}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \eta \rho dV$$

25/2009
Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza
91

Conservação de Energia Volume de Controle

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
2PFG/DE/FEM/UNICAMP

25/2009
Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza
92

Volume de Controle (VC)

- É um volume arbitrário do espaço através do qual há massa entrando e saindo;
- Seu contorno geométrico é denominado de superfície de controle:
 - Esta superfície pode ser real ou imaginária;
 - Pode estar em repouso (estacionária) ou em movimento (móvel);
- Pode atravessar a superfície de controle:
 - Massa, trabalho, calor e quantidade de movimento.

25/2009
Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza
93

Formula final

$$\left. \frac{dN}{dt} \right)_{\text{sistema}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \eta \rho dV + \int_{SC} \eta \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

94

Interpretação física

$$\left. \frac{dN}{dt} \right)_{\text{sistema}} =$$

- Taxa de variação total de qualquer propriedade extensiva do sistema

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \eta \rho dV =$$

- Taxa de variação no tempo de qualquer propriedade extensiva no VC

$$\int_{SC} \eta \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA =$$

- Taxa líquida da propriedade extensiva saindo pela superfície de controle

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

95

Recapitulando

- Para sistema, as equações de conservação podem ser escritas como

– Energia

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

$$\left. \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} \right)_{\text{sistema}}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

96

Conservação de energia

- Fazendo com que:

$$\eta = e$$

- Portanto, a equação de conservação de energia para VC pode ser escrita como:

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right)_{\text{sistema}} - \left. \frac{dW}{dt} \right)_{\text{sistema}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \cdot \rho dV + \int_{SC} e \cdot \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q}$$

$$\frac{dW}{dt} = \dot{W}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

97

Trabalho sobre as massas

- Para as massas entrarem e saírem do volume de controle é necessário trabalho;
- Esse trabalho sistema pode ser determinado como:

$$\dot{W}_S = \dot{W}_{vc} + \frac{d}{dt} (P_s v_s m_s - P_e v_e m_e)$$

$$\dot{W}_S = \dot{W}_{vc} + (P_s v_s \dot{m}_s - P_e v_e \dot{m}_e)$$

$$\dot{W}_S = \dot{W}_{vc} + \int_{SC} P v \cdot \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

98

Termos associados ao fluxo de massa

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right)_{vc} - \left. \frac{dW}{dt} \right)_{vc} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \cdot \rho dV + \int_{SC} e \cdot \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA + \int_{SC} P v \cdot \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

$$e = u + \frac{V^2}{2} + Zg$$

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right)_{vc} - \left. \frac{dW}{dt} \right)_{vc} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \cdot \rho dV + \int_{SC} \left(\frac{u + P v}{h} + \frac{V^2}{2} + Zg \right) \cdot \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

99

Forma final

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{VC} - \left(\frac{dW}{dt}\right)_{VC} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \cdot \rho dV + \int_{SC} \left(h + \frac{V^2}{2} + Zg \right) \cdot \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 100

Interpretação física

$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{VC}$	• Fluxo de energia na forma de calor que atravessa o VC;
$\left(\frac{dW}{dt}\right)_{VC}$	• Fluxo de trabalho (potência) que atravessa o VC;
$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \cdot \rho dV$	• Variação de energia dentro do VC
$\int_{SC} e \cdot \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA$	• Fluxo líquido de energia associada a massa que atravessa o VC;

$$e = h + \frac{V^2}{2} + Zg$$

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 101

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 102

Regime permanente $\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \cdot \rho dV = 0$

- Para regime permanente a PLT é simplificada para:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g \right) = \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + Z_s g \right) + \dot{W}_v$$
- Por unidade de massa

$$\dot{q}_{vc} + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g = h_s + \frac{V_s^2}{2} + Z_s g + \dot{w}_{vc}$$

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 103

Aplicações

- Essa formulação é útil para se modelar:
 - Turbinas, compressores, caldeiras, condensadores, etc;
- No modelo não é considerado a fase transitória de entrada em operação e de parada dos dispositivos;
 - Só é abordado o período de tempo de operação estável;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 104

Comprovação da primeira lei da termodinâmica

- A base de todas as leis da natureza é a evidência experimental;
 - Isto é verdadeiro também para a primeira lei da termodinâmica também;
- Independente do tipo de experiência que tenha sido realizada, a primeira lei da termodinâmica é comprovada seja direta ou indiretamente;
 - Desta forma, a base dessa lei é a evidência experimental não sendo refutada em nenhuma situação até o presente momento;
- Não há um prova formal da validade da primeira lei.

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 105

Motos perpétuos

- São considerados motos perpétuos os sistemas que violam alguma lei termodinâmica;
- Quando violam a primeira lei da termodinâmica são chamados de MPPE;
 - *Um exemplo deste sistema pode ser um sistema adiabático que fornece trabalho sem que haja mudanças na energia interna, potencial ou cinética;*

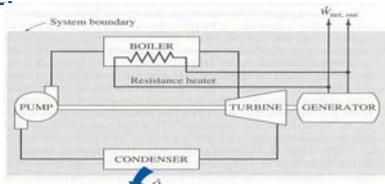
25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

106

Exemplo de um MPPE

- Um sistema que utiliza a energia elétrica, gerada pelo próprio sistema, constitui um MPPE.



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

107

FIM !

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

108
