

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA**

# **TERMODINÂMICA CLÁSSICA**

Prof. Fabrício Maciel Gomes

## CONCEITOS E DEFINIÇÕES INICIAIS

DO GREGO:

Theme (calor) dynamis (força)

NA ENGENHARIA

Interesse em estudar sistemas e suas relações com a vizinhança

(balanço material e balanço de energia)

# CONCEITOS E DEFINIÇÕES INICIAIS

## EXEMPLOS DE ÁREAS DE APLICAÇÃO

Motores

Turbinas

Bombas e Compressores

Usinas Térmicas (nucleares, combustíveis fósseis, biomassa, etc.)

Sistemas de propulsão para aviões e foguetes

Sistemas de combustão

Sistemas criogênicos, separação de gases e liquefação

Aquecimento, ventilação e ar condicionado

Refrigeração (por compressão de vapor, absorção ou adsorção)

Bombas de calor

Sistemas energéticos alternativos

Células de combustível

Dispositivos termoelétricos e termoiônicos

Conversores magnetohidrodinâmicos (MHD)

Sistemas de aproveitamento da energia Solar para aquecimento, refrigeração e produção de energia elétrica

Sistemas Geotérmicos

Aproveitamento da energia dos oceanos (térmica, das ondas, e das marés)

Aproveitamento da energia dos ventos (energia eólica)

# CONCEITOS E DEFINIÇÕES INICIAIS

## SISTEMAS TERMODINÂMICOS

Em termodinâmica, o termo SISTEMA identifica o objeto da análise.

Pode ser a quantidade de matéria contida num tanque de paredes rígidas ou uma tubulação através da qual a matéria flui.

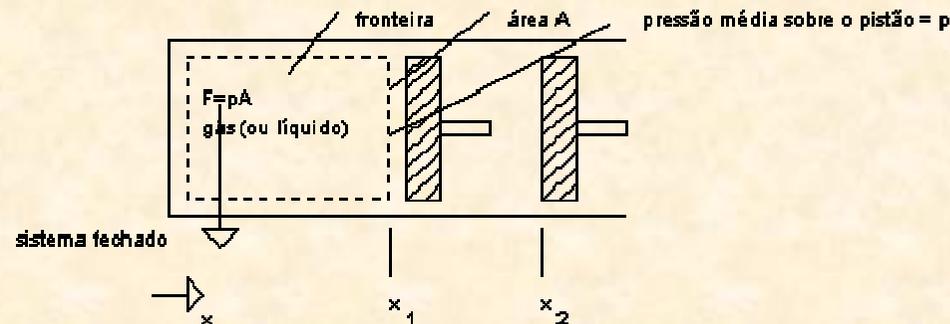
A composição da matéria dentro do sistema pode mudar (reações químicas ou nucleares).

Vizinhança - Tudo o que é externo ao sistema.

Fronteira - Superfície real ou imaginária que separa o sistema de sua vizinhança.

Pode estar em movimento ou repouso.

Deve ser definida cuidadosamente ANTES de se proceder a qualquer análise termodinâmica.

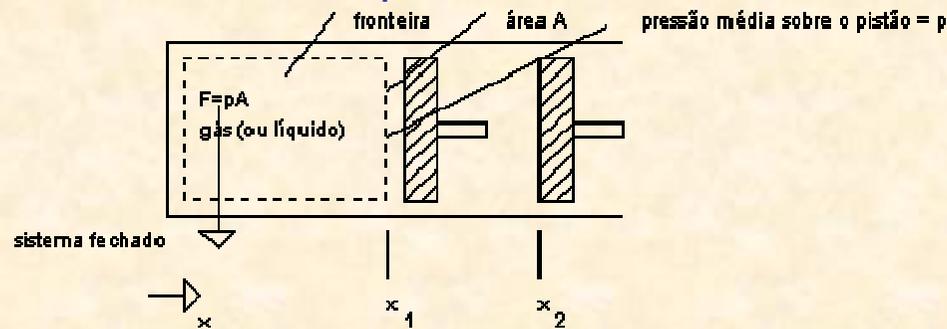


# CONCEITOS E DEFINIÇÕES INICIAIS

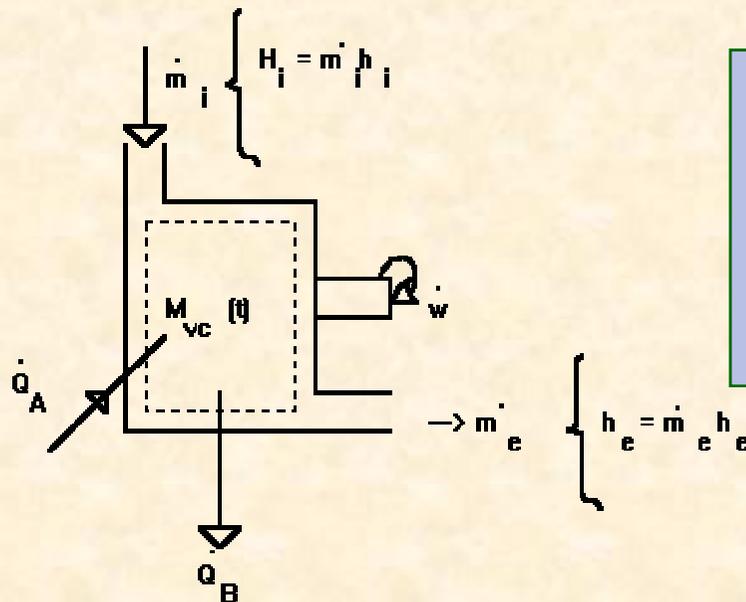
## TIPOS DE SISTEMAS

Sistema fechado e Volume de controle.

Sistema Fechado - quantidade fixa de matéria. Massa não entra, nem sai.



Volume de Controle - região do espaço através da qual ocorre fluxo de massa.



Obs.

Alguns autores utilizam denominações diferentes:

**SISTEMA FECHADO = SISTEMA = MASSA DE CONTROLE**

**VOLUME DE CONTROLE = SISTEMA ABERTO**

**FRONTEIRA = SUPERFÍCIE DE CONTROLE**

# CONCEITOS E DEFINIÇÕES INICIAIS

## PONTOS DE VISTA MACROSCÓPICO E MICROSCÓPICO

### MACROSCÓPICO

- trata do comportamento global, inteiro do sistema.
- nenhum modelo de estrutura molecular, atômica ou subatômica é utilizado diretamente.
- este tratamento é o aplicado na termodinâmica CLÁSSICA.
- o sistema é tratado como um continuum.

### MICROSCÓPICO

- tratamento que leva em conta a estrutura da matéria.
- é chamada de termodinâmica ESTATÍSTICA.
- o objetivo é caracterizar por meios estatísticos o comportamento médio das partículas e relacioná-lo com o comportamento macroscópico do sistema.

Para a grande maioria das aplicações em engenharia, a TERMODINÂMICA CLÁSSICA não somente propicia uma abordagem mais direta para análise e projeto mas também requer menor esforço matemático.



# CONCEITOS E DEFINIÇÕES INICIAIS

## PROPRIEDADE, ESTADO, PROCESSO E EQUILÍBRIO

### PROPRIEDADES EXTENSIVAS E INTENSIVAS

Extensivas - variam diretamente com a massa (massa, volume total, entalpia, etc...)

Intensivas - independentes da massa (temperatura, pressão, volume específico, etc)

Fase e substância pura

Fase - quantidade de matéria que é homogênea tanto em composição química quanto em estrutura física

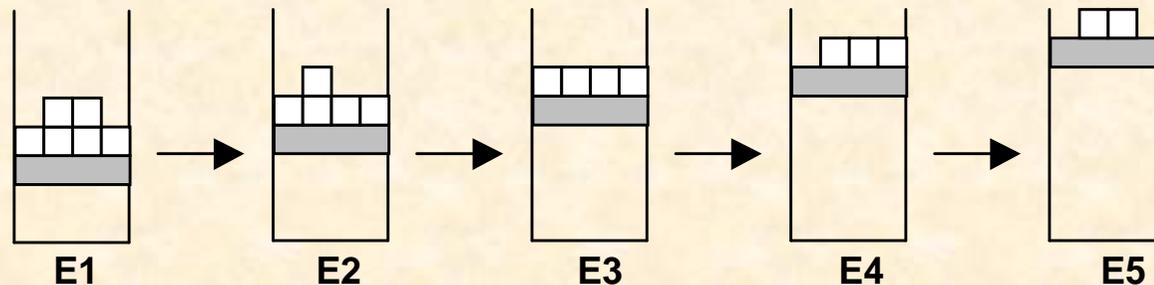
Substância pura - invariável em composição química

# CONCEITOS E DEFINIÇÕES INICIAIS

## PROPRIEDADE, ESTADO, PROCESSO E EQUILÍBRIO

### EQUILÍBRIO

Conceito fundamental em termodinâmica clássica



Equilíbrio termodinâmico: equilíbrios mecânico, térmico, de fase e químico ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_4$  e  $E_5$ )

No equilíbrio ocorre a uniformidade das propriedades termodinâmicas

Processo quase-estático: processo idealizado (sucessão de estados de equilíbrio - desvio infinitesimal da condição de equilíbrio anterior)

Processos reais: sucessão de estados de não equilíbrio (não uniformidade das propriedades)

## CONCEITOS E DEFINIÇÕES INICIAIS

### VOLUME ESPECÍFICO, PRESSÃO E TEMPERATURA

**Massa específica**  $\rho = \frac{dm}{dV}$  (kg/m<sup>3</sup>)

**Volume específico**  $v = 1/\rho$  (m<sup>3</sup>/kg)

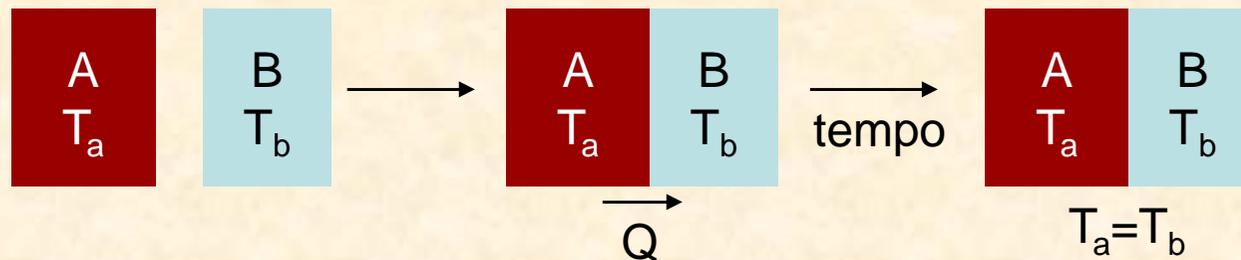
**Pressão**  $p = \frac{dF}{dA}$  (Pa)

**Temperatura - percepção sensorial (mais quente, mais frio, etc...) T (°C, K, F, R, etc...)**

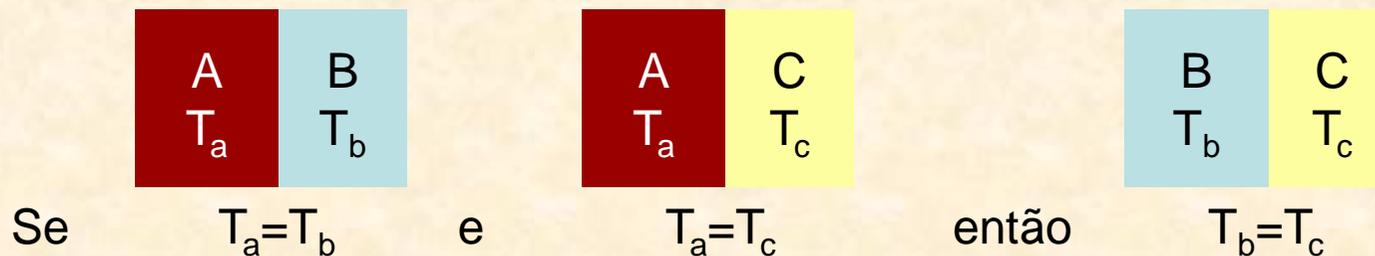
## CONCEITOS E DEFINIÇÕES INICIAIS

### EQUILÍBRIO TÉRMICO

2 blocos de cobre a e b com temperaturas  $T_a$  e  $T_b$  e  $T_a > T_b$ , se colocados juntos, após um certo tempo estarão a uma mesma temperatura, ou em equilíbrio térmico.



Lei zero da termodinâmica: quando dois corpos estão em equilíbrio com um terceiro corpo eles estarão também em equilíbrio entre si (não se aplica a equilíbrio químico e de fases)



Algumas definições:

Parede diatérmica: permite interação térmica

Parede adiabática = isolante ideal (não permite interação térmica)

Processo adiabático: processo de um sistema envolvido por uma parede adiabática.

Processo isotérmico:  $T = \text{constante}$

# PROPRIEDADES DE UMA SUBSTÂNCIA PURA

Substância pura: composição química fixa

Fase: quantidade de matéria que é homogênea

Propriedade de uma substância pura: definida em termos de suas propriedades independentes ( $P=f(T,v)$ ).

Diagrama PvT.

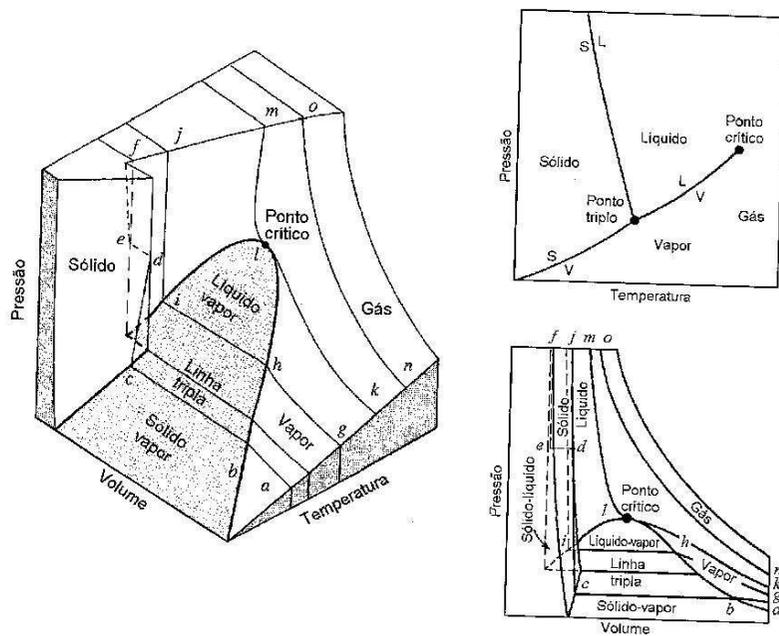


Figura 3.11 – Superfície pressão - volume - temperatura para uma substância que expande na solidificação

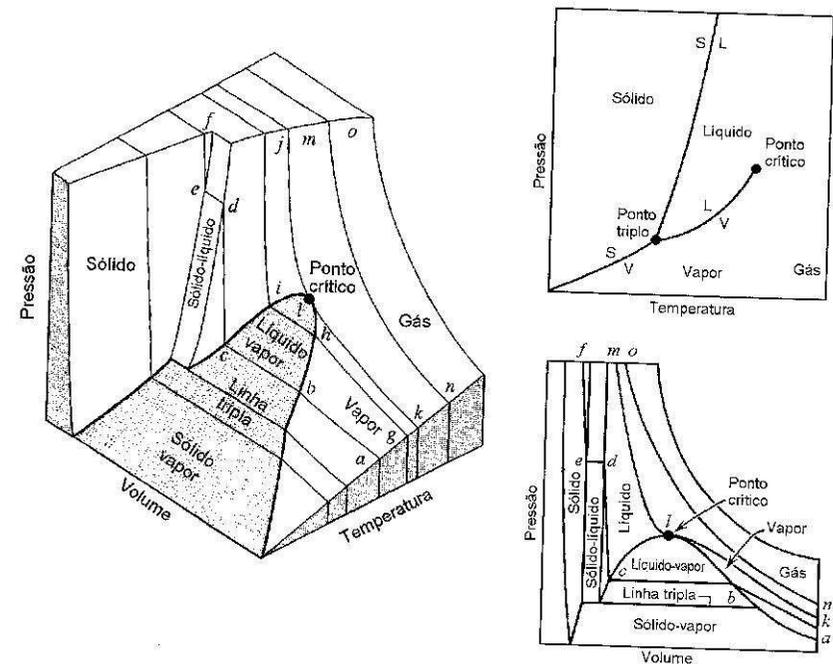


Figura 3.12 – Superfície pressão - volume - temperatura para uma substância que contrai na solidificação

# PROPRIEDADES DE UMA SUBSTÂNCIA PURA

## Diagrama Tv.

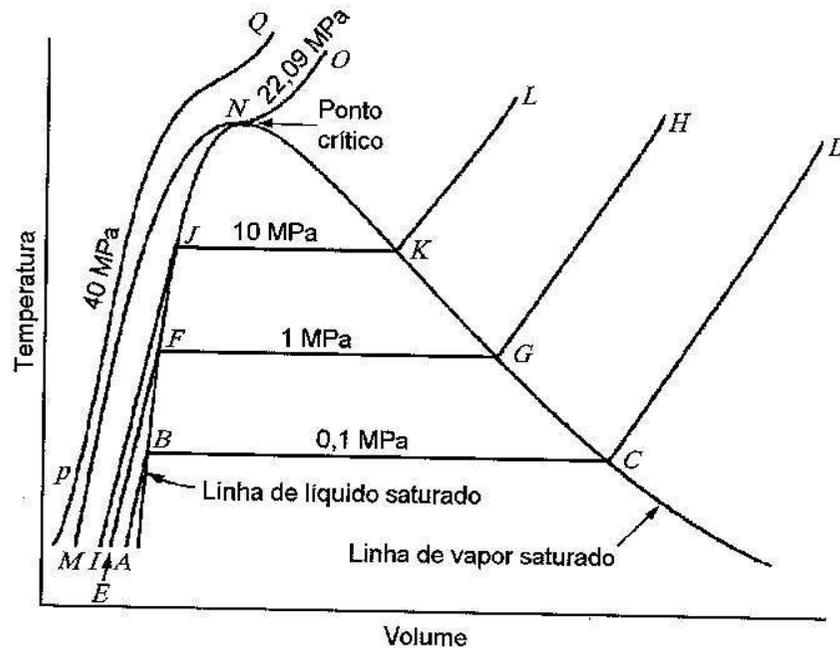


Figura 3.3 — Diagrama temperatura - volume para a água mostrando as fases líquida e vapor

Tabela 3.1 - Alguns dados no ponto crítico

	Temperatura crítica, °C	Pressão crítica, MPa	Volume crítico, m <sup>3</sup> /kg
Água	374,14	22,09	0,003155
Dióxido de carbono	31,05	7,39	0,002143
Oxigênio	-118,35	5,08	0,002438
Hidrogênio	-239,85	1,30	0,032192

# PROPRIEDADES DE UMA SUBSTÂNCIA PURA

## Diagrama PT.

36 FUNDAMENTOS DA TERMODINÂMICA

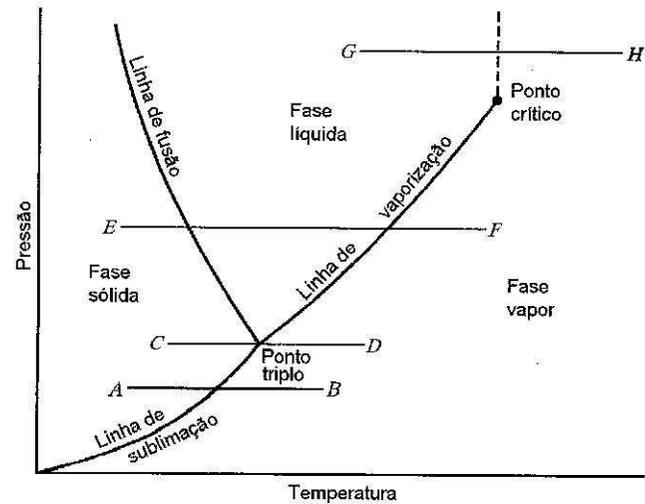


Figura 3.4 — Diagrama pressão - temperatura para uma substância de comportamento semelhante ao da água

Tabela 3.2 - Dados de alguns pontos triplos (sólido - líquido - vapor)

	Temperatura, °C	Pressão, kPa
Hidrogênio (normal)	-259	7,194
Oxigênio	-219	0,15
Nitrogênio	-210	12,53
Mercúrio	-39	0,000 000 13
Água	0,01	0,611 3
Zinco	419	5,066
Prata	961	0,01
Cobre	1083	0,000 079

# PROPRIEDADES DE UMA SUBSTÂNCIA PURA

## Diagrama PT.

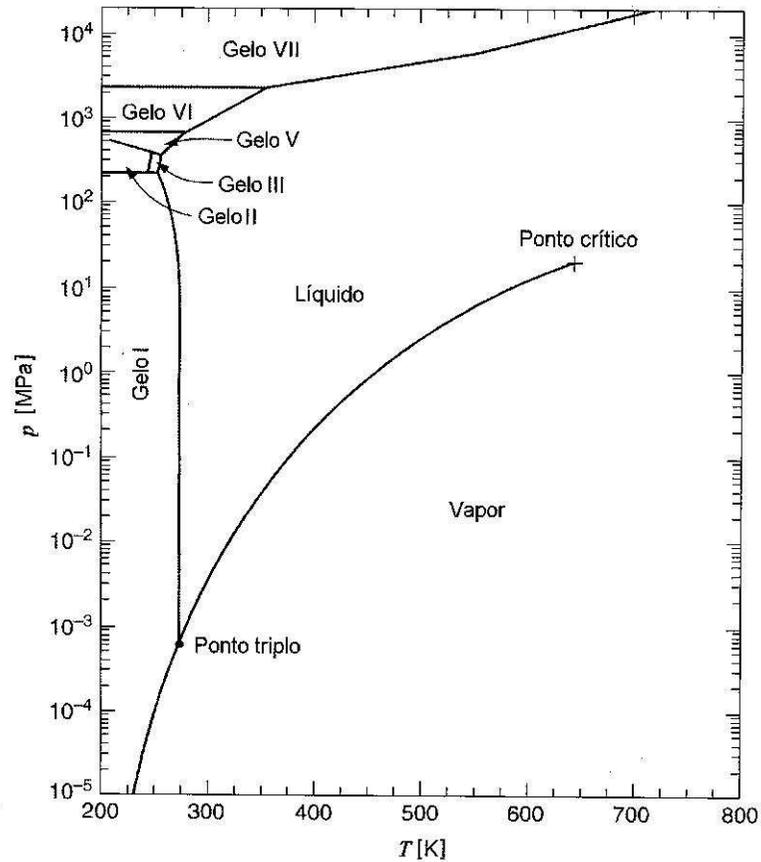


Figura 3.6 — Diagrama de fases da água

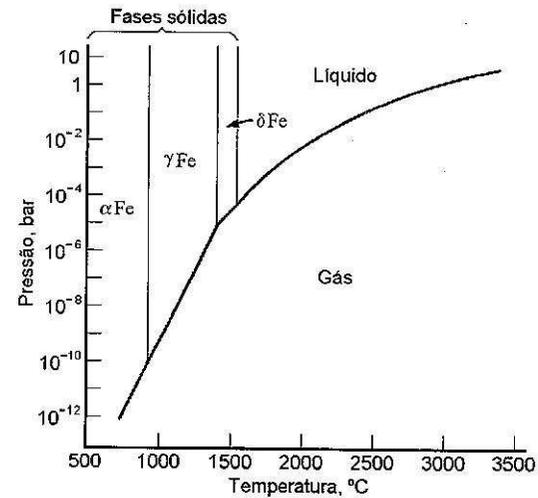


Figura 3.5 — Diagrama pressão-temperatura estimado para o ferro (de "Phase Diagrams in Metallurgy", F. N. Rhines, 1956, McGraw Hill Book Co.; reprodução autorizada)

# PROPRIEDADES DE UMA SUBSTÂNCIA PURA

Tabelas das propriedades termodinâmicas:

## Arquivo de tabelas

O volume específico para uma mistura bifásica de vapor e líquido pode ser determinado usando as Tabelas de Saturação e a definição de título.

$$\text{título} = x = \frac{m_{vap}}{m_{liq} + m_{vap}}$$

Como na região de saturação, todo o líquido está na situação de líquido saturado e todo vapor está na situação de vapor saturado:

$$V_{liq} = m_{liq} v_l \quad \text{e} \quad V_{vap} = m_{vap} v_v \quad \rightarrow \quad v = \frac{V}{m} = \frac{V_{liq}}{m} + \frac{V_{vap}}{m} \quad \rightarrow \quad v = \frac{m_{liq}}{m} v_l + \frac{m_{vap}}{m} v_v$$

Introduzindo a definição de título:

$$v = (1-x)v_l + (x)v_v = v_l + x(v_v - v_l) = v_l + xv_{lv}$$

# CALOR E TRABALHO

## TRABALHO

O trabalho  $W$  (Nm ou J): uma das quantidades básicas de energia transferidas durante um processo termodinâmico;

Definição da mecânica elementar: força  $F$  que atua através de um deslocamento  $x$ ;

Em termodinâmica: o problema diz respeito a interação entre o sistema e suas vizinhanças

Definição termodinâmica: "Trabalho é realizado por um sistema sobre sua vizinhança quando o único efeito sobre ela puder ser reduzido ao levantamento de um peso“.

Trabalho realizado pelo sistema: positivo;

Trabalho realizado sobre o sistema: negativo;

Obs. A definição termodinâmica não afirma que um peso é elevado ou que uma força efetivamente em uma dada distância (é utilizado para distinção entre o calor e o trabalho)

# CALOR E TRABALHO

## TRABALHO - EXEMPLOS

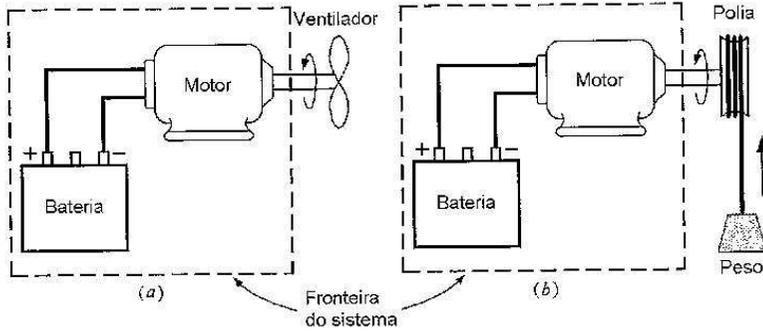


Figura 4.1 — Exemplo de trabalho realizado na fronteira de um sistema

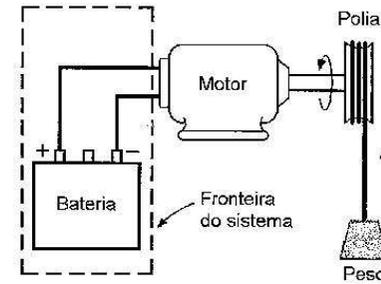


Figura 4.2 — Exemplo de trabalho atravessando a fronteira de um sistema devido ao fluxo de uma corrente elétrica através da mesma

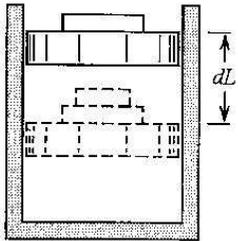


Figura 4.3 — Exemplo de trabalho efetuado pelo movimento da fronteira de um sistema num processo quase-estático



Figura 4.11 — Exemplo de um processo que apresenta variação de volume e trabalho nulo

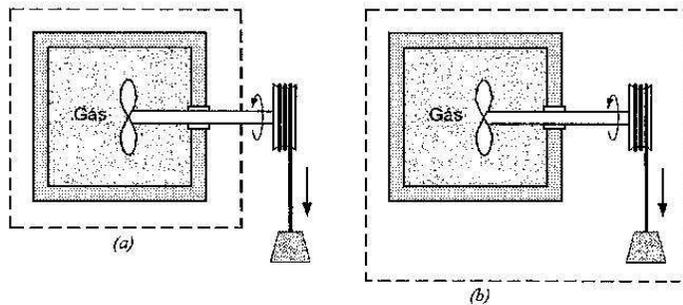


Figura 4.12 — Exemplo que mostra como a definição da fronteira do sistema (linha tracejada) determina se um processo realiza trabalho

# CALOR E TRABALHO

## TRABALHO - DEFINIÇÕES

Um sistema não possui trabalho e depende da causa de transferência: depende da trajetória (função de linha) ;

Incremento de trabalho:  $\delta W$ , Em vez de  $dW$  (dD Diferencial exata: Válida no caso de funções de ponto que são independentes da trajetória).

Propriedades termodinâmicas (P, V,T, v): funções de ponto, logo, o trabalho não é uma propriedade termodinâmica

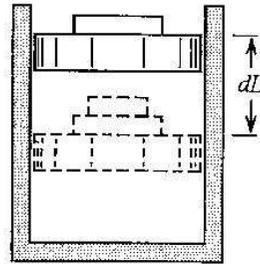
**Exemplo de função de ponto:**  $\int_1^2 dV = V_2 - V_1$

**No caso do trabalho:**  $\int_1^2 \delta W \neq W_2 - W_1 \rightarrow \int_1^2 \delta W = {}_1W_2$

# CALOR E TRABALHO

## TRABALHO – EQUACIONAMENTO

Grande classe dos problemas termodinâmicos: expansão e a compressão de um gás:



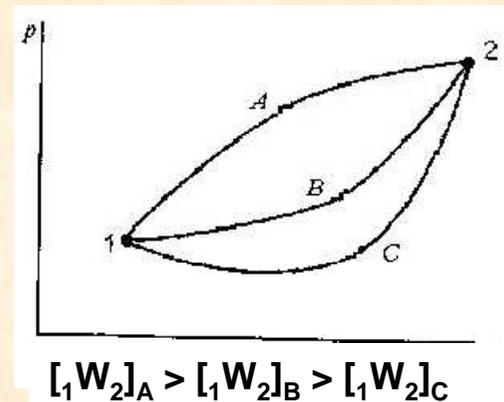
**Figura 4.3** – Exemplo de trabalho efetuado pelo movimento da fronteira de um sistema num processo quase - estático

Se resistência externa do sistema for infinitesimalmente menor que a pressão interna:

$$\delta W = pAdx = pdV \quad \text{integrando:} \quad \int_1^2 \delta W = \int_1^2 pdV \quad \rightarrow \quad {}_1W_2 = \int_1^2 pdV$$

**Trabalho é representado pela área sob a curva PV**

**Prova de que o trabalho é função de linha:**



## TRABALHO - EQUACIONAMENTO

Uma relação funcional entre pressão e volume é o caso de um processo chamado de **politrópico**

$$pV^n = \text{constante} = p_1V_1^n = p_2V_2^n$$

$$p = \text{constante}/V^n \quad \text{onde } \text{constante} = p_1V_1^n = p_2V_2^n$$

${}_1W_2 = \int_1^2 pdV$  **pode ser determinada, considere constante=C:**

$${}_1W_2 = \int_1^2 \frac{C}{V^n} dV = C \int_1^2 \frac{1}{V^n} dV = C \left( \frac{V^{-n+1}}{-n+1} \right) \Big|_1^2 = C \left( \frac{V_2^{1-n} - V_1^{1-n}}{1-n} \right) = \frac{CV_2^{1-n} - CV_1^{1-n}}{1-n} \text{ como } \text{constante} = C = p_1V_1^n = p_2V_2^n :$$

$${}_1W_2 = \frac{p_2V_2^nV_2^{1-n} - p_1V_1^nV_1^{1-n}}{1-n} = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1-n}$$

**válida apenas se  $n \neq 1$ .**

**para  $n=1$ :  $pV=\text{constante}=p_1V_1=p_2V_2$**

**$p=\text{constante}/V$  e considere constante=C=  $p_1V_1 = p_2V_2$**

$${}_1W_2 = \int_1^2 pdV = \int_1^2 \frac{C}{V} dV = C \ln V \Big|_1^2 = C \ln \left( \frac{V_1}{V_2} \right)$$

$${}_1W_2 = p_1V_1 \ln \left( \frac{V_1}{V_2} \right) = p_2V_2 \ln \left( \frac{V_1}{V_2} \right)$$

- **Trabalho por unidade de massa:  $w = W/m$ .**

- **Potência**  $\dot{W} = \frac{\delta W}{dt}$  **(J/s).**

## CALOR

"O calor é a energia que se transfere através dos contornos de um sistema que interage com o ambiente em virtude de uma diferença de temperatura".

Calor, do mesmo modo que o trabalho, não faz parte do sistema

Calor: função de linha e não é uma propriedade termodinâmica (propriedade termodinâmica - função de ponto).

$${}_1Q_2 = \int_1^2 \delta Q \neq Q_1 - Q_2$$

Calor transmitido para um sistema: positivo

Calor transmitido para fora do sistema: negativo

- Calor por unidade de massa do sistema:  $q = Q/m$  (J/kg).
- Calor transferido para um sistema na unidade de tempo:  $\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt}$  (W)

# PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

## PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Primeira lei da termodinâmica: relação entre calor e trabalho

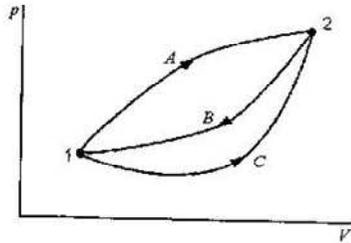
$$J \oint \delta Q = \oint \delta W$$

**No SI J=1**

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

# PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA - SISTEMA

## PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA PARA A MUDANÇA DE ESTADO DE UM SISTEMA



**Figura 5.2** — Demonstração da existência da propriedade termodinâmica  $E$

Aplicando a primeira lei da termodinâmica indo do estado 1 para o estado 2 pelo processo A e voltando para 1 pelo processo B:

$$\int_1^2 \delta Q_A + \int_2^1 \delta Q_B = \int_1^2 \delta W_A + \int_2^1 \delta W_B \quad (i)$$

Com o sistema mudando do estado 1 ao estado 2 pelo processo C e voltando ao estado 1 pelo processo B:

$$\int_1^2 \delta Q_C + \int_2^1 \delta Q_B = \int_1^2 \delta W_C + \int_2^1 \delta W_B \quad (II)$$

Fazendo (I) - (II):

$$\int_1^2 \delta Q_A - \int_1^2 \delta Q_C = \int_1^2 \delta W_A - \int_1^2 \delta W_C$$

**E reordenando:**

$$\int_1^2 (\delta Q - \delta W)_A = \int_1^2 (\delta Q - \delta W)_C$$

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

$$\mathbf{E=U+EC+EP}$$

## PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA - SISTEMA

$$dE=dU+dEC+dEP$$

A primeira lei da termodinâmica para uma mudança de estado de um sistema pode ser escrita como:

$$\delta Q = dU + dEC + dEP + \delta W$$

**Integrando:**

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + EC_2 - EC_1 + EP_2 - EP_1 + {}_1W_2$$

**Sendo:**  $EC_2 - EC_1 = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2}$  e  $EP_2 - EP_1 = mg(Z_2 - Z_1)$

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} + mg(Z_2 - Z_1) + {}_1W_2$$

**Ou, por unidade de massa:**

$${}_1q_2 = u_2 - u_1 + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2} + g(Z_2 - Z_1) + {}_1w_2$$

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

**Portanto:**

$$u = (1-x)u_l + xu_v$$

$$u = u_l + vu_{lv}$$

**Por exemplo:** a energia interna específica do vapor à pressão de 0,6 MPa e título de 95% é calculada do seguinte modo:

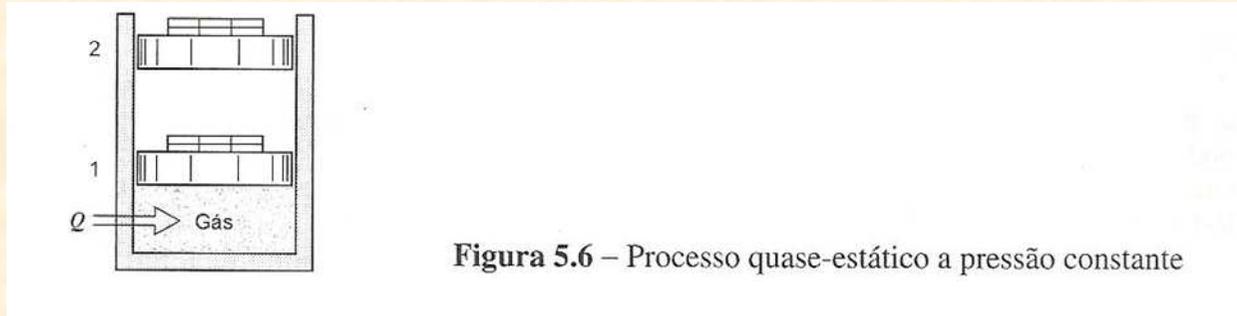
$$u = u_l + u_{lv} = 669,9 + 0,95(1897,5) = 2472,5 \text{ k J/kg}$$

Ver exemplos do livro:

# PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

## A PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

Considere o seguinte processo



**EC=0; EP=0**

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

$${}_1W_2 = \int_1^2 p dV$$

**A pressão é constante**

$${}_1W_2 = p(V_2 - V_1)$$

**portanto**

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + p_2V_2 - p_1V_1 = (U_2 + p_2V_2) - (U_1 + p_1V_1)$$

**Entalpia (H):**

$$H = U + pV$$

**OU POR UNIDADE DE MASSA:**

$$h = u + pv$$

$$h = (1-x)h_1 + xh_v$$

## PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

### CALORES ESPECÍFICOS A VOLUME CONSTANTE E A PRESSÃO CONSTANTE

$\begin{matrix} C_v \\ C_p \end{matrix}$  | Propriedades derivadas da energia interna e da entalpia

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

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

$$K = \frac{C_p}{C_v}$$

Aproximações para determinar as propriedades dos líquidos usando as tabelas de líquido saturado.

$$v(t, p) \simeq v(t)$$

$$u(t, p) \simeq u(t)$$

$$h(t, p) \simeq h(t)$$

## PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

### Modelo de Substância Incompressível.

Para substância incompressível a energia interna específica depende somente da temperatura e o calor específico é também somente função da temperatura.

$$c_v(T) = \frac{du}{dT}(\text{incompressível})$$

A entalpia varia com a pressão e com a temperatura.

$$h(T, P) = u(T) + Pv$$

$$\left. \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = \frac{du}{dT}$$

$$\left. \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = Cp(\text{definição})$$

Assim, para uma substância incompressível

$$Cp = Cv = C \quad (\text{incompressível})$$

## PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Para intervalos de temperatura não muito grandes, a variação de  $c$  pode ser pequena e nesses casos o calor específico pode ser tomado como constante, sem perda apreciável de precisão.

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT$$

$$h_2 - h_1 = u_2 - u_1 + v(p_2 - p_1)$$

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT + v(p_2 - p_1)$$

Para  $c = \text{constante}$ ,

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

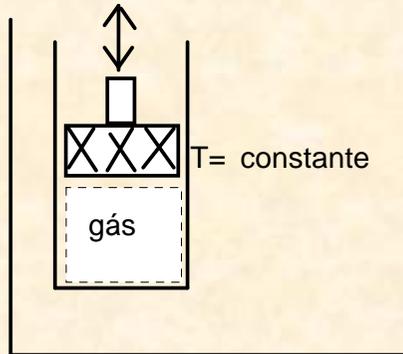
$$h_2 - h_1 = c(T_2 - T_1) + v(p_2 - p_1).$$

**Relações PvT para gases.**

Úteis para avaliar sistemas na fase gasosa.

# PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

## Constante Universal dos Gases



O Pistão pode se mover para a obtenção de vários estados de equilíbrio à mesma temperatura.

Para cada estado de equilíbrio são medidos: a Pressão e o volume específico. Com os resultados é construído o seguinte

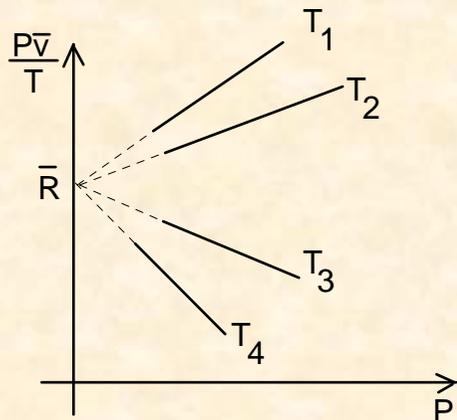


gráfico:  $\bar{v}$  = *Volume Específico Molar*

Quando  $P \rightarrow 0$ , para todas as temperaturas, o limite tende a  $\bar{R}$ , independentemente do gás utilizado.

$$\lim_{P \rightarrow 0} \frac{P \bar{v}}{T} = \bar{R}$$

$\bar{R}$  = Constante Universal dos Gases

$$\bar{R} \begin{cases} 8,314 \text{ kJ/kmol.K} \\ 1,986 \text{ BTU/lbmol.}^\circ\text{R} \\ 1545 \text{ pé/ lbf/lbmol.}^\circ\text{R} \end{cases}$$

## PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

### Fator de Compressibilidade (Z)

$$Z = \frac{P\bar{v}}{RT} \quad (\text{adimensional}); \quad \bar{v} = Mv \quad (M = \text{Massa Molar}); \quad R = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$Z = \frac{Pv}{RT} \quad \lim_{P \rightarrow 0} Z = 1$$

Z = Fator de compressibilidade

$$Z = 1 + \hat{B}(T)p + \hat{C}(T)p^2 + \hat{D}(T)p^3 + \dots$$

$$Z = 1 + \frac{B(T)}{\bar{v}} + \frac{C(T)}{\bar{v}^2} + \frac{D(T)}{\bar{v}^3} + \dots$$

Essas equações são conhecidas como expansões viriais e os coeficientes  $\hat{B}$ ,  $\hat{C}$ ,  $\hat{D}$  e B, C, D são os coeficientes viriais, e pretendem representar as forças entre as moléculas.

$$\hat{B}p \quad \frac{B}{\bar{v}} = \textit{iteração entre duas moléculas}$$

$$\hat{C}p^2 \quad \frac{C}{\bar{v}^2} \approx \textit{iteração entre três moléculas}$$

$$\hat{D}p^3 \quad \frac{D}{\bar{v}^3} \rightarrow \textit{iterações entre quatro moléculas}$$

e assim por diante.

# PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

## Gráfico de Compressibilidade Generalizada

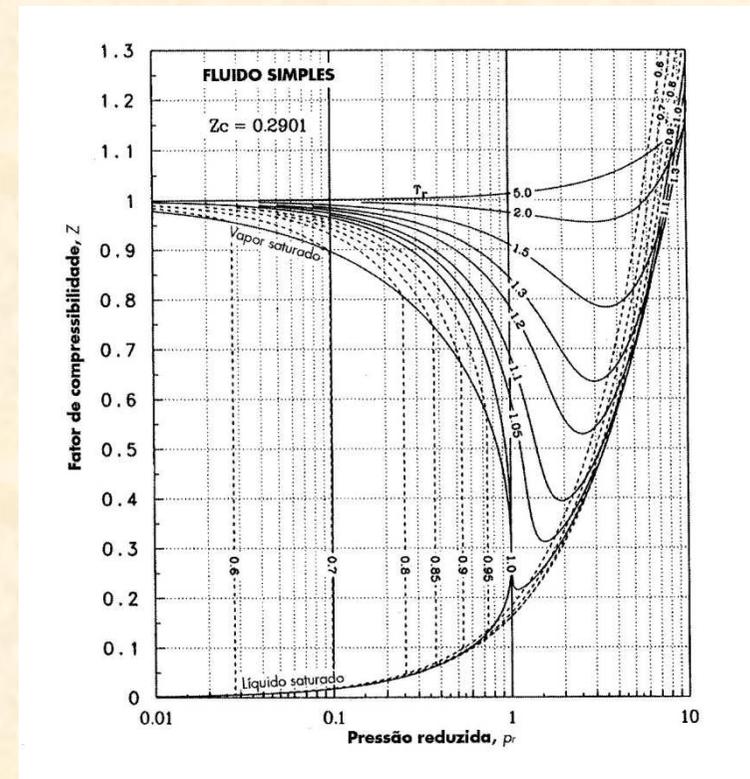
Os gráficos do fator de compressibilidade são similares para os vários gases.

Efetuando-se modificações adequadas nos eixos coordenados é possível estabelecer relações quantitativas similares para os vários gases.

Isso é referido ao "princípio dos estados correspondentes".

Dessa maneira, o fator de compressibilidade é colocado num gráfico versus uma Pressão Reduzida e uma temperatura reduzida, definidos como:

$$Pr = \frac{P}{P_c} \quad Tr = \frac{T}{T_c}$$



# PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

## Modelo de Gás Ideal

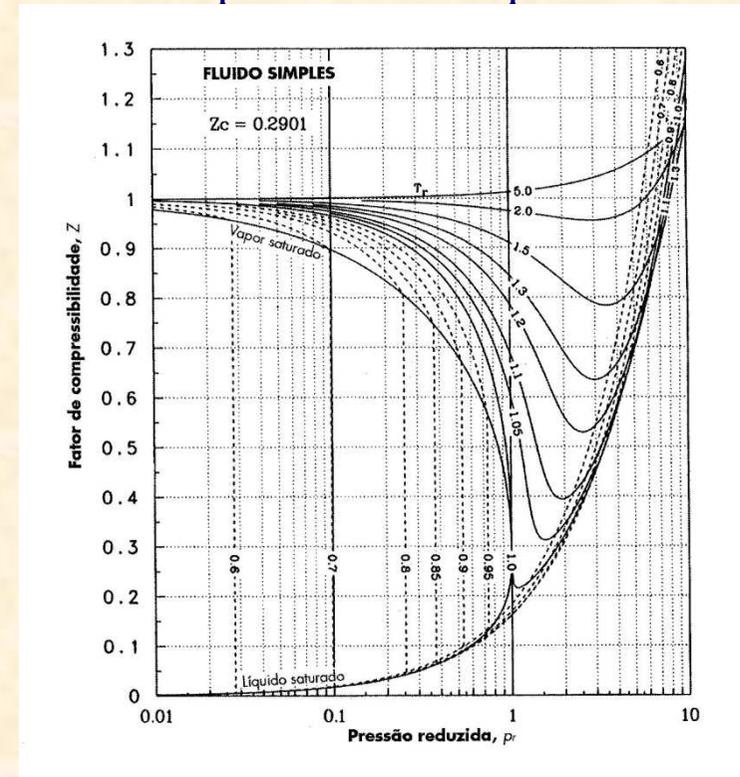
Considerando os dados de compressibilidade generalizada pode ser visto que:

$$Z \approx 1 \left\{ \begin{array}{l} P_R \leq 0,05 \\ \text{ou} \\ T_R \geq 15 \end{array} \right.$$

$$Z \approx 1 \left\{ \begin{array}{l} 2 \leq T_R \leq 3 \\ \text{Larga Faixa } P_R \end{array} \right.$$

$$O_2 \quad T_c = 154 \text{ K} \quad P_c = 50,5 \text{ bars}$$

$$N_2 \quad T_c = 126 \text{ K} \quad P_c = 33,9 \text{ bars}$$



$$Z = \frac{P_v}{RT} = 1 \rightarrow \text{Gás Ideal} \quad P_v = RT$$

$$v = \frac{V}{m} \quad PV = mRT \quad v = \frac{\bar{v}}{M}$$

$$\bar{v} = \frac{V}{n} \quad P\bar{v} = \bar{R}T \quad R = \frac{\bar{R}}{M} \quad PV = n\bar{R}T$$

# PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

## Para o Gás Ideal

$u = u(T) \rightarrow$  função só da temperatura se  $Z = 1$

$h = h(T) = u(T) + RT$

Lembrar sempre que o modelo de gás ideal é muito bom quando  $Z \approx 1$  e que não fornece resultados aceitáveis para todos os estados, e deve ser utilizado como uma aproximação para os casos reais.

## Energia Interna, Entalpia e Calor Específico para Gás Ideal

$$Z \approx 1 \rightarrow \text{gás ideal} \quad Z = \frac{Pv}{RT}$$

Energia interna e calor específico a volume constante

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \rightarrow du = c_v(T) dT$$

Entre dois estados 1) e 2)

$$\int_1^2 du = \int_1^2 c_v(T) dt \Rightarrow u_2(T_2) - u_1(T_1) = \int_1^2 c_v(T) dT$$

## PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Entalpia e  $C_p$

$$C_p(T) = \frac{dh}{dT} \rightarrow dh = C_p(T)dT$$

Entre dois estados 1) e 2)

$$\int_1^2 dh = \int_1^2 C_p(T)dt \Rightarrow h_2(T_2) - h_1(T_1) = \int_1^2 C_p(T) dT$$

$$h(T) = u(T) + RT \Rightarrow \frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + R$$

$$C_p(T) = C_v(T) + R$$

$$C_p(T) > C_v(T)$$

Assim, a razão entre os calores específicos  $C_p$  e  $C_v$  é função somente da Temperatura

$$k = \frac{C_p}{C_v} > 1$$

Combinando as equações

$$C_p(T) = C_v(T) + R$$

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

$$k = \frac{C_p(T)}{C_v(T)}$$

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

## PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Os valores de  $C_p$  e  $C_v$  variam com a temperatura e são disponíveis para a maioria dos gases de interesse.

Para os gases mono-atômicos Ar, He, Ne, a razão  $\frac{\bar{C}_p}{R}$  é praticamente constante

$$\frac{\bar{C}_p}{R} = 2,5 \quad (\text{Ar, Ne, He}).$$

Para os demais gases, os valores de  $\bar{C}_p$  podem ser obtidos de tabelas ou expressões

$$\frac{\bar{C}_p}{R} = \alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3 + \epsilon T^4$$

onde  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$  são listados na Tab. A-6 para vários gases na faixa de temperaturas entre 300 e 1000 K.

[Ver tabela A-6](#)

## PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

### Tabelas de Gás Ideal

Para os gases mais comuns, avaliações de valores de energia interna específica e de entalpia são facilitados pelo uso de tabelas de gases ideais.

A determinação da entalpia é obtida pela equação

$$h(T) = \int_{T_{ref}}^T C_p(T) dT + h(T_{ref}) \quad \text{onde} \quad T_{ref} = \text{temperatura arbitrária} \quad h(T_{ref}) =$$

entalpia

As tabelas A-16 a A-22 são baseadas em  $T_{ref} = 0K$  e  $h(0) = 0$

Para essas temperaturas e entalpia de referências

$$h(T) = \int_0^T C_p(T) dT$$

A energia interna foi tabulada a partir dos valores de entalpia usando:

$$u = h - RT$$

Esses valores podem também ser obtidos através de programas de computador.

### Hipótese de calores específicos constantes

$$u(T_2) - u(T_1) = C_v (T_2 - T_1)$$

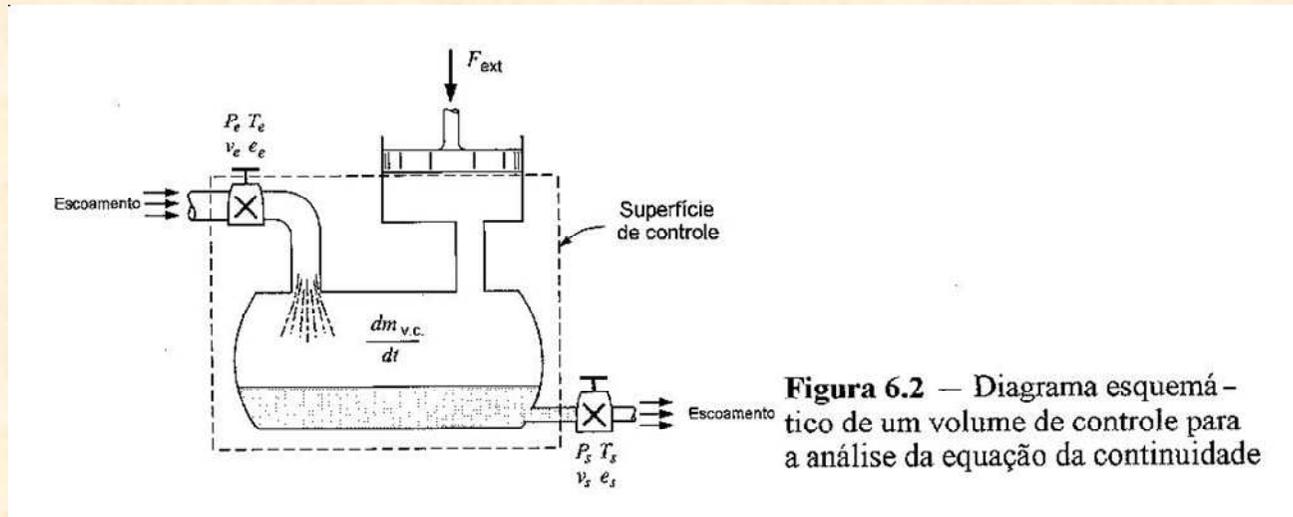
$$h(T_2) - h(T_1) = C_p (T_2 - T_1)$$

Os valores de  $C_v$  e  $C_p$  constantes são os valores médios obtidos de

$$C_v = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_v(T) dT}{T_2 - T_1} \quad C_p = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT}{T_2 - T_1}$$

# PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – VOLUME DE CONTROLE

## Conservação de massa para Volume de Controle (V.C.)



ACUMULA = ENTRA – SAI + FORMA – CONSUMIDO

Formação e consumo → problemas envolvendo reações químicas

Na disciplina Termodinâmica não serão considerados sistemas reacionais:

ACUMULA = ENTRA – SAI

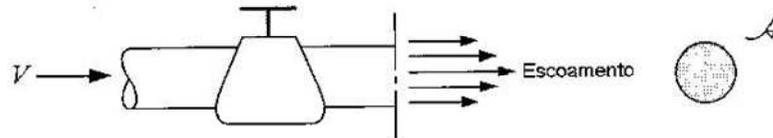
$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s$$

$\dot{m}$  → fluxo mássico [kg/s]

# PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – VOLUME DE CONTROLE

## Formas do balanço do fluxo de massa.

Em muitos casos pode ser conveniente expressar o balanço de massa em função das propriedades locais.



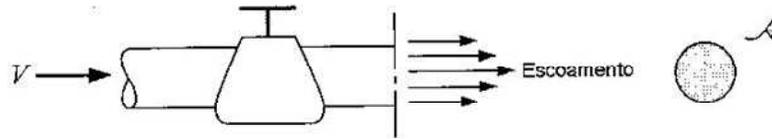
**Figura 6.3** Escoamento através de regiões da superfície de controle que apresentam áreas da seção transversal iguais a  $A$ . A parte esquerda da figura mostra a velocidade média do escoamento e a parte direita mostra o perfil de velocidade na seção transversal do escoamento.

$$[\text{Fluxo instantâneo de massa através de toda a área } A] = \int_A \rho V_n dA$$
$$\dot{m} = \int_A \rho V_n dA$$

Assim o balanço da massa pode ser escrito:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \sum_i \left( \int_A \rho V_n dA \right)_i - \sum_e \left( \int_A \rho V_n dA \right)_e$$

## PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – VOLUME DE CONTROLE



**Figura 6.3** Escoamento através de regiões da superfície de controle que apresentam áreas da seção transversal iguais a  $A$ . A parte esquerda da figura mostra a velocidade média do escoamento e a parte direita mostra o perfil de velocidade na seção transversal do escoamento.

O estudo detalhado do princípio da conservação da massa é usualmente feito em Mecânica dos Flúidos e adota-se em termodinâmica formas mais simplificadas.

### Fluxo unidimensional

$$\dot{m} = \rho VA \dot{v} = \frac{VA}{v} VA = \dot{m} v$$

$$\frac{d}{dt} m_{vc} = \sum_i \frac{A_i V_i}{v_i} - \sum_e \frac{A_e V_e}{v_e}$$

*Para processos em Regime Permanente*

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_e \dot{m}_e$$

# PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – VOLUME DE CONTROLE

## Forma do balanço do fluxo de energia para um VC

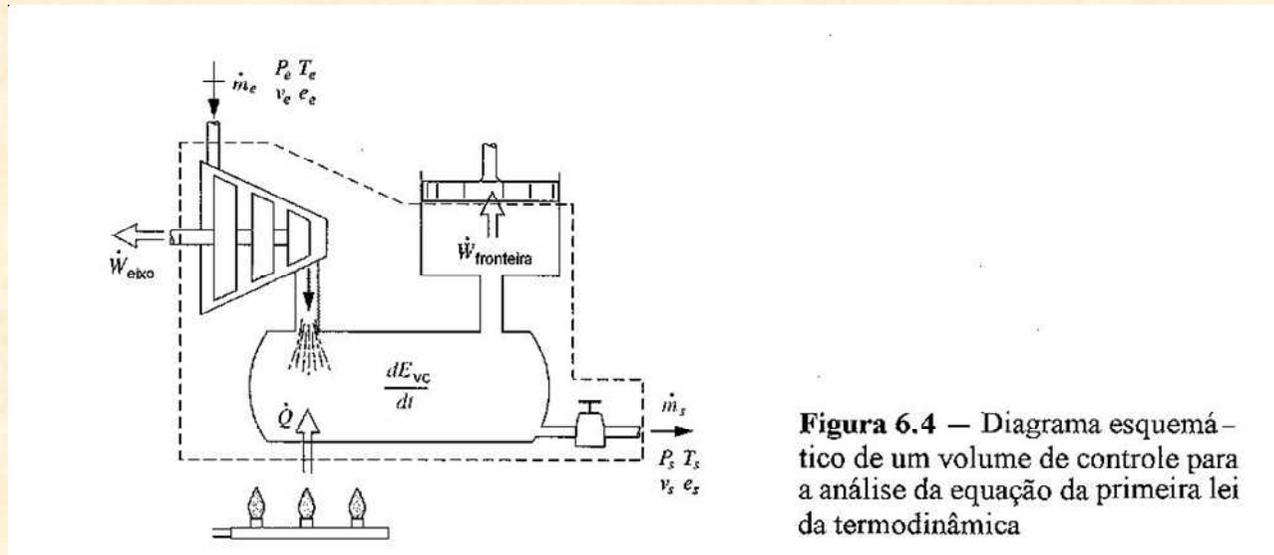


Figura 6.4 – Diagrama esquemático de um volume de controle para a análise da equação da primeira lei da termodinâmica

$$\frac{dE_{\text{vc}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{vc}} - \dot{W}_{\text{vc}} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right)$$

$h = u + pv$ , onde o produto  $pv$  corresponde ao trabalho de fluxo.

A variação da energia do Volume de Controle é dada pelo balanço das taxas de energia que cruzam a fronteira do volume de controle.

Os mecanismos são: Calor e Trabalho, como nos sistemas fechados energia associada aos fluxos de massa que cruzam as fronteiras.

# PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – VOLUME DE CONTROLE

## Análise para Volume de Controle em Regime Permanente

### Balances de Fluxo de Massa e Energia

Para operação em Regime Permanente

MASSA

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

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e$$

ENERGIA

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

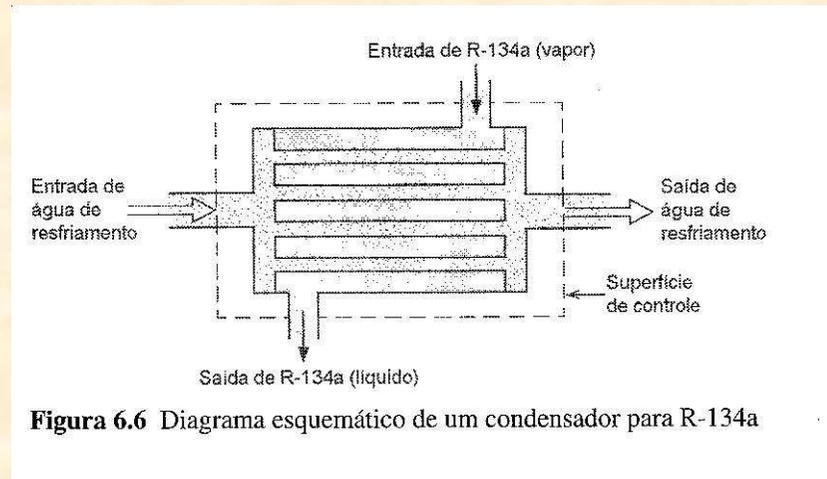
$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{wc} + \sum_i \dot{m}_i \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right)$$

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_i \dot{m}_i \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) = \dot{W}_{wc} + \sum_e \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right)$$

# PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – VOLUME DE CONTROLE

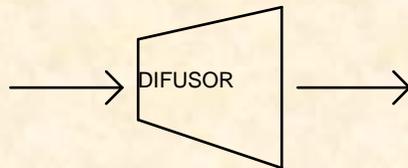
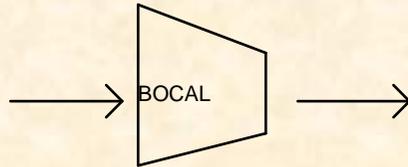
## Trocadores de calor:

Transferência de calor de um fluido para outro.



# PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – VOLUME DE CONTROLE

## Bocais e difusores



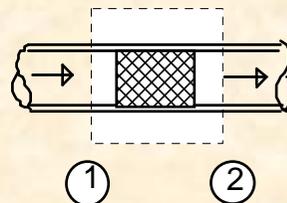
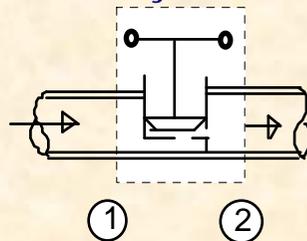
## Turbinas

Turbina é um dispositivo que realiza trabalho como resultado da passagem de um gás ou um líquido através das pás que são fixadas em um eixo.

## Dispositivos de estrangulamento

Uma significativa redução de pressão é conseguida por um estrangulamento na tubulação onde o fluxo passa.

Isso é usualmente feito através da abertura parcial de uma válvula ou pela introdução de um “plug” poroso, como ilustrado nas figuras.



$$h_1 = h_2$$

Coeficiente de Joule-Thomson ( $\mu_J$ ):

$$\mu_J = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$

# PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – VOLUME DE CONTROLE

## Compressor (gases) / Bomba (líquidos):

Equipamentos utilizados para aumentar a pressão no fluido pela adição de trabalho de eixo

## Centrais de potência e de Refrigeração:

Ver exemplos.

## Processo em Regime Uniforme:

Exemplo: Enchimento e esvaziamento de tanques fechados com gás ou líquido.

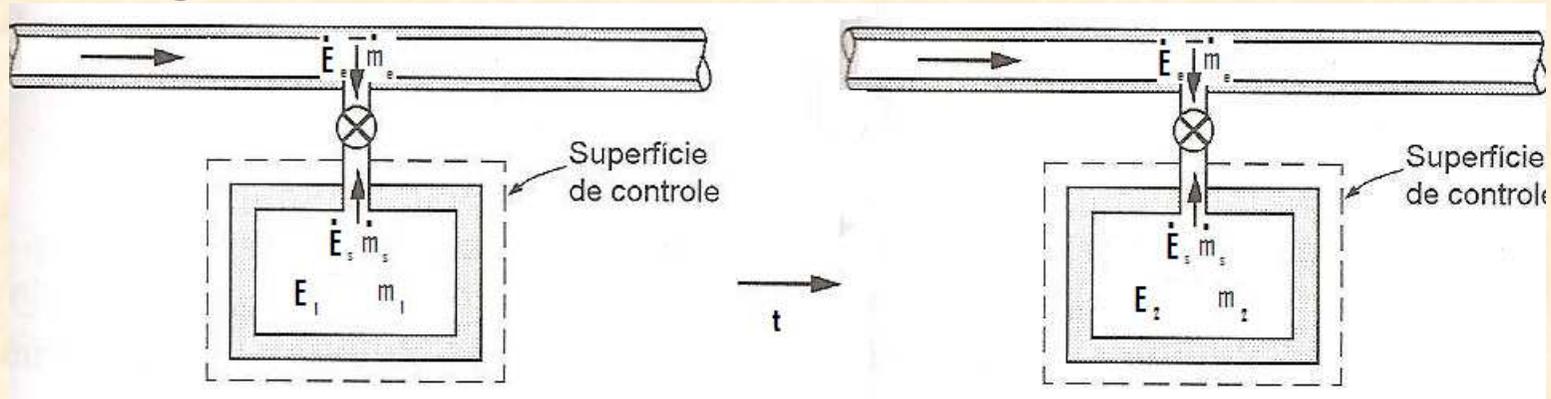
1 – Volume de controle fixo;

2 – Estado termodinâmico pode variar com o tempo, porém em qualquer instante o estado é uniforme em todo o volume de controle;

3 – O estado da massa que atravessa cada uma das áreas de fluxo na superfície de controle é constante com o tempo, embora as vazões possam variar com o tempo.

# PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – VOLUME DE CONTROLE

Processo em Regime Uniforme:



**Balanco de massa:**

[acumula] = [entra] – [sai]

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

$$\int_{m_1}^{m_2} dm_{vc} = \left( \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \right) dt$$

$$(m_2 - m_1)_{vc} = \sum m_e - \sum m_s$$

**Balanco de energia:**

[acumula] = [entra] – [sai]

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum \dot{E}_e + \dot{Q}_{vc} - \sum \dot{E}_s - \dot{W}_{vc}$$

$$\int_{m_1}^{m_2} dE_{vc} = \left( \sum \dot{E}_e + \dot{Q}_{vc} - \sum \dot{E}_s - \dot{W}_{vc} \right) dt$$

$$(E_2 - E_1)_{vc} = \sum E_e + Q_{vc} - \sum E_s - W_{vc}$$

rearranjando :

$$Q_{vc} + \sum m_e \left( h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) = \sum m_s \left( h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) +$$

$$+ \left[ m_2 \left( u_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right) - m_1 \left( u_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right) \right] + W_{vc}$$