



# Termodinâmica e Estrutura da Matéria

## Aula 6 – 1ª Lei da Termodinâmica em sistemas abertos

**Carlos A. Santos Silva**

Professor Associado Convidado

Cátedra WS – Energia

Departamento de Física

[carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt](mailto:carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt)



# Sumário

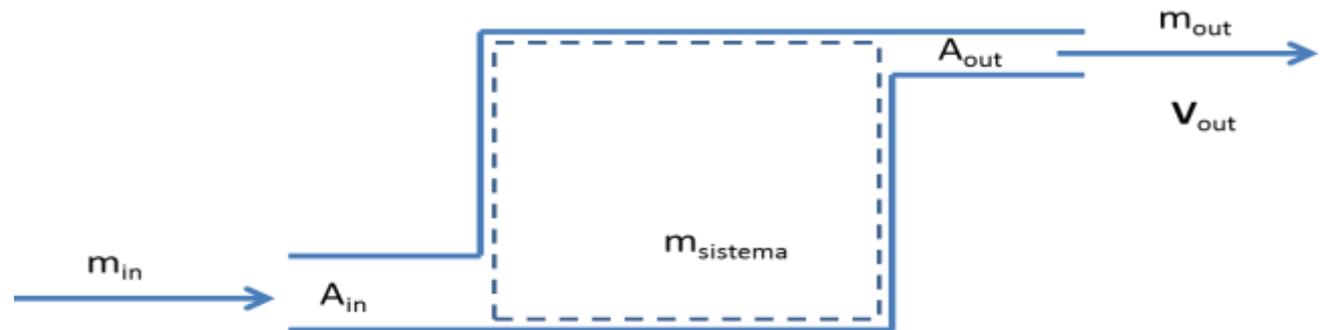
- Balanço de massa em sistemas abertos
- Balanço de energia em sistemas abertos
- Sistemas abertos em regime estacionário
- Aplicações em regime estacionário
- Sistemas abertos em regime transiente

# **BALANÇO DE MASSA EM SISTEMAS ABERTOS**

# Princípio de conservação de massa

- O princípio de conservação de massa é um dos princípios fundamentais da natureza: “nada se cria, nada se perde, tudo se transforma” [Lavoisier]
- Para sistemas fechados, o princípio está implícito na definição:
  - Não há trocas de massa entre o sistema e o exterior  $\Delta m_{sistema} = 0$
- Para sistemas abertos (volume de controlo)

$$\Delta m_{sistema} = \sum m_{in} - \sum m_{out}$$



# Definição

- **Caudal mássico ( $\dot{m}$ ) [kg/s]**

- Quantidade de massa que atravessa uma determinada área por unidade de tempo

$$\dot{m} = \int_A \rho \mathbf{V} dA$$

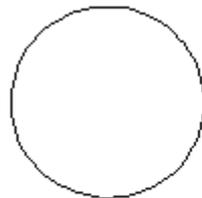
- **Caudal volúmico ( $\dot{V}$ ) [ $m^3/s$ ]**

- Volume de fluido que atravessa uma determinada área por unidade de tempo

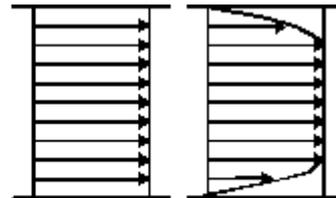
$$\dot{V} = \int_A \mathbf{V} dA$$

# Escoamentos unidimensionais

- Na maior parte dos sistemas, podemos assumir que
  - O escoamento do fluido tem a direção normal à fronteira de entrada e saída do volume de controlo
  - Todas as propriedades intensivas, incluindo densidade, temperatura e **velocidade**, são em média uniformes com a posição em cada entrada e saída do volume de controlo



Pipe



Ideal flow

Real flow

# Definições para escoamento unidimensional

- **Caudal mássico ( $\dot{m}$ ) [kg/s]**

- Quantidade de massa que atravessa uma determinada área por unidade de tempo

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

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

- **Caudal volúmico ( $\dot{V}$ ) [ $m^3/s$ ]**

- Volume de fluido que atravessa uma determinada área por unidade de tempo

$$\dot{V} = VA$$

1ª Lei da Termodinâmica em sistemas abertos

# **BALANÇOS DE ENERGIA EM SISTEMAS ABERTOS**

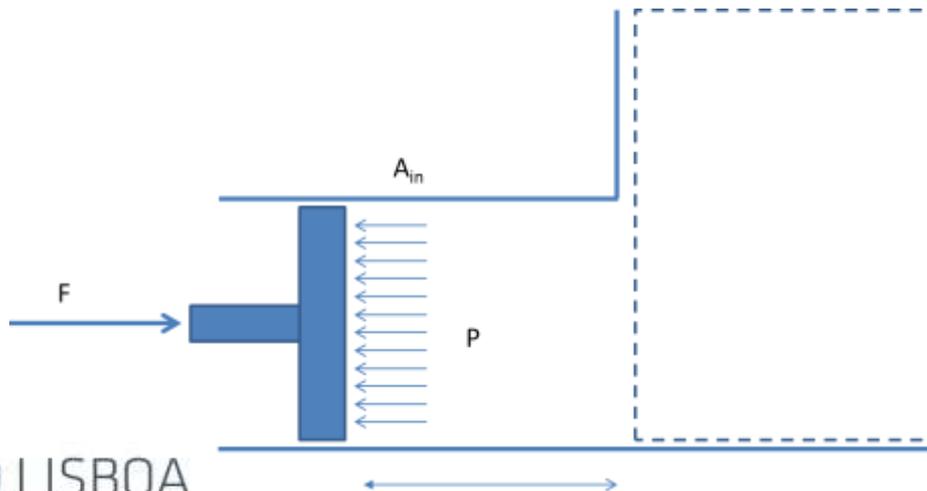
# 1º Lei da Termodinâmica

- Para sistemas fechados:  $\Delta E = Q - W$
- Em sistemas abertos, a entrada e saída de massa podem alterar o balanço de energia
  - Num termoacumulador de água, a saída de um determinado caudal de água quente e a sua reposição por água fria alteram o conteúdo de energia do sistema
  - Nestes casos

$$\Delta E = Q - W + \sum E_{in} - \sum E_{out}$$

# A energia de escoamento

- A energia necessária para introduzir/extrair um fluído de um sistema
  - É diferente das trocas de calor ou de trabalho (incluindo o associado a fronteiras móveis)



$$F = PA$$

$$W_{flow} = FL = PAL = PV \text{ (J)}$$

$$w_{flow} = Pv \text{ (J/kg)}$$

# Energia total de um fluído em escoamento

- Um fluído em escoamento também tem
  - Energia interna (energia cinética das moléculas)
  - Energia cinética do escoamento associado à sua velocidade  $\mathbf{V}$
  - Energia potencial do escoamento

$$e = u + ke + pe = u + \frac{V^2}{2} + gz \text{ (J/kg)}$$

- A energia total de um fluído em escoamento é

$$w_{flow} + e = Pv + u + \frac{V^2}{2} + gz \text{ (J/kg)}$$

$$w_{flow} + e = h + \frac{V^2}{2} + gz \text{ (J/kg)}$$

# 1ª Lei da Termodinâmica para sistemas abertos

- Para sistemas abertos, o balanço de energia é dado pela expressão

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} \left( h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) - \sum \dot{m}_{in} \left( h_{in} + \frac{V_{in}^2}{2} + gz_{in} \right)$$

# **SISTEMAS ABERTOS EM REGIME ESTACIONÁRIO**

# Definição

- Um escoamento em regime estacionário é um escoamento em que
  - As propriedades podem ser diferentes em regiões diferentes do volume de controlo (massa, energia)

- Neste caso, o trabalho da fronteira móvel é zero, logo

$$\Delta m_{sistema} = \sum m_{in} - \sum m_{out} = 0 \quad \Delta E_{sistema} = 0$$

- As propriedades no mesmo ponto são iguais ao longo do tempo
    - *Escoamento cujas propriedades não variam com o tempo*
  - *As interações de trabalho e calor também não variam com o tempo*
- Em escoamentos em regime estacionário, vamos sempre analisar em termos de caudais

# Simplificações

- Conservação de massa

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad \dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} \Leftrightarrow \rho_{out} V_{out} A_{out} = \rho_{in} V_{in} A_{in}$$

- Conservação de energia

$$\dot{q} - \dot{w} = \dot{m} \left( h_{out} - h_{in} + \frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2} + g(z_{out} - z_{in}) \right) (J/s)$$

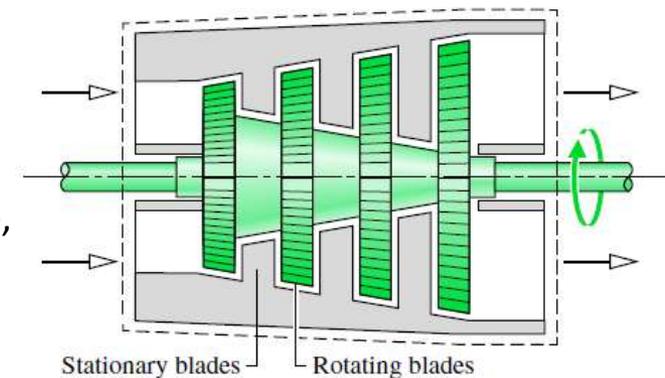
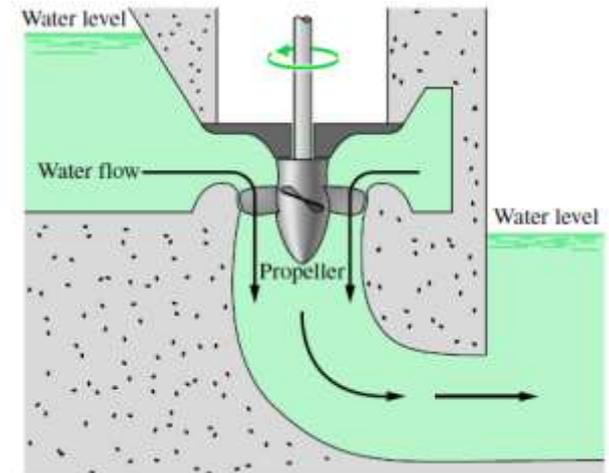
$$q - w = h_{out} - h_{in} + \frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2} + g(z_{out} - z_{in}) (J/kg)$$

$$q - w = h_{out} - h_{in} (J/kg)$$

# APLICAÇÕES EM REGIME ESTACIONÁRIO

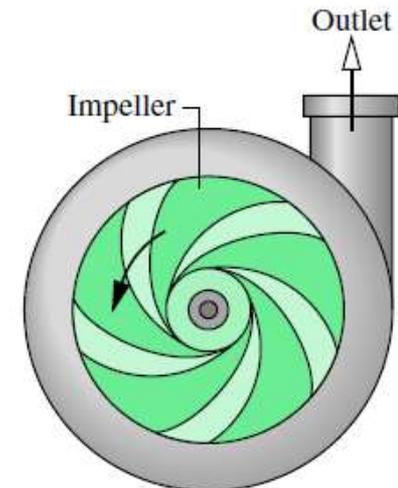
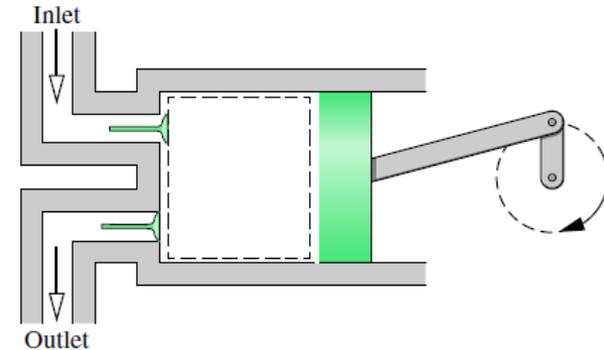
# Turbinas

- É um dispositivo que produz trabalho aquando da passagem do fluido através das pás
  - Utilizado em centrais térmicas, barragens
- Características
  - $\Delta\dot{Q} \cong 0$ : mesmo que não sejam isolados, as trocas de calor com o exterior são desprezáveis
  - $\Delta\dot{W} \neq 0$ : a rotação das pás envolve por definição transferências de trabalho
  - $\Delta p_e \cong 0$ : em geral estes componentes estão colocados à mesma altura de elevação
  - $\Delta k_e \cong 0$ : apesar de haver grandes alterações de velocidade, em geral são desprezáveis face às alterações de entalpia e por isso podem ser negligenciadas



# Compressores, bombas

- É um dispositivo que consome trabalho para a passagem do fluido através das pás
  - Compressores: gases / Bombas: líquidos
- Características
  - $\Delta\dot{Q} \cong 0$ : mesmo que não sejam isolados, as trocas de calor com o exterior são desprezáveis. Nos compressores pode haver arrefecimento forçado (*intercooler*)
  - $\Delta\dot{W} \neq 0$ : a rotação das pás envolve por definição transferências de trabalho
  - $\Delta p_e \cong 0$ : em geral estes componentes estão colocados à mesma altura de elevação
  - $\Delta k_e \cong 0$ : não tem grandes alterações de velocidade e por isso podem ser negligenciadas



# Permutadores

- É um dispositivo que promove a troca de calor entre dois fluídos sem que haja contacto direto

- Ares condicionados / centrais térmicas

- Características

- $\Delta\dot{Q} \neq 0$ : os fluídos estão a temperaturas diferentes, logo vai haver transferência de calor. Contudo o exterior deve ser bem isolado.

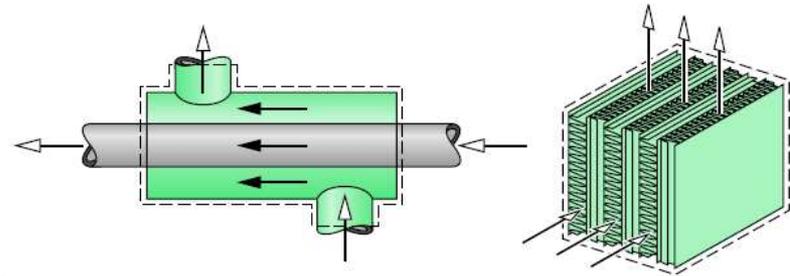
- Se todo o permutador for escolhido como volume de controlo  $\Delta\dot{Q} = 0$

- $\Delta\dot{W} = 0$ : não existem transferências de trabalho
  - $\Delta p_e \cong 0$ : em geral estes componentes estão colocados à mesma altura de elevação
  - $\Delta k_e \cong 0$ : não tem alterações de velocidade e por isso podem ser negligenciadas

$$\sum \dot{m}_{out} h_{out} = \sum \dot{m}_{in} h_{in}$$

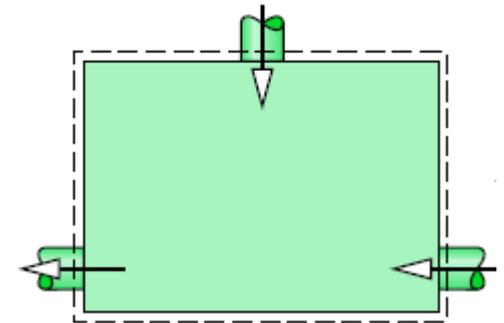
$$\dot{m}_{H out} h_{H out} + \dot{m}_{C out} h_{C out} = \dot{m}_{H in} h_{H in} + \dot{m}_{C in} h_{C in}$$

$$\dot{m}_H (h_{H out} - h_{H in}) = \dot{m}_C (h_{C out} - h_{C in})$$



# Câmaras de mistura

- É um dispositivo que promove a troca de calor entre dois fluídos a partir da sua mistura
  - Termoacumuladores, torneiras
- Características
  - $\Delta\dot{Q} = 0$ : os fluídos estão a temperaturas diferentes, logo vai haver transferência de calor dentro do sistema, não com o exterior
  - $\Delta\dot{W} = 0$ : não existem transferências de trabalho
  - $\Delta p_e \cong 0$ : em geral estes componentes estão colocados à mesma altura de elevação
  - $\Delta ke \cong 0$ : não tem alterações de velocidade e por isso podem ser negligenciadas



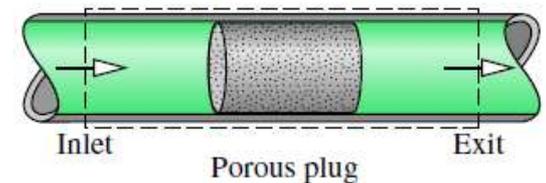
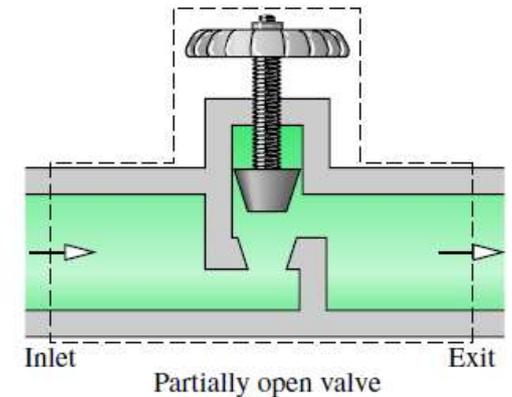
$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$$

$$\dot{m}_H in + \dot{m}_C in = \dot{m}_{out}$$

$$\dot{m}_H h_H in + \dot{m}_C h_C in = \dot{m}_{out} h_{out}$$

# Válvulas

- É um dispositivo que restringem o caudal e que induzem grandes perdas de pressão no fluído
  - Válvulas, tubos capilares
- Características
  - $\Delta\dot{Q} \cong 0$ : em geral são pequenos dispositivos e podem ser considerados adiabáticos
  - $\Delta\dot{W} = 0$ : a queda de pressão não é por aplicação de força em peças moveis
  - $\Delta p_e \cong 0$ : em geral estes componentes estão colocados à mesma altura de elevação
  - $\Delta k_e \cong 0$ : apesar da velocidade de saída ser muito superior à de entrada, pode em geral ser negligenciada
  - Se não for gás ideal ( $h=h(T)$ ), a alteração da pressão pode ser acompanhada também por uma alteração da temperatura: coeficiente Joule-Thomson

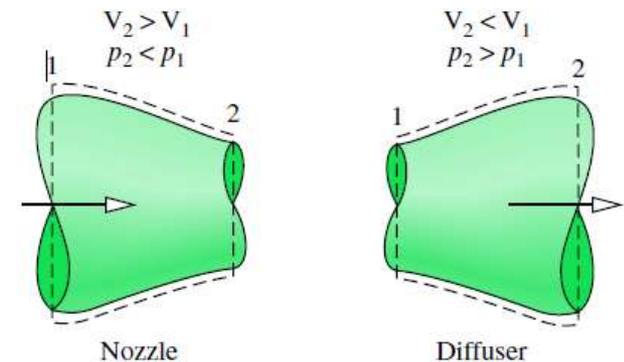


$$h_{in} = h_{out}$$

$$u_{in} + Pv_{in} = u_{out} + Pv_{out}$$

# Tubeiras

- É um dispositivo que altera a velocidade de um fluido à custa de variações na sua pressão
  - Utilizado em motores a jacto, foguetes, mangueiras
- Características
  - $\Delta\dot{Q} \cong 0$ : mesmo que não sejam isolados, as trocas de calor com o exterior são desprezáveis
  - $\Delta\dot{W} = 0$ : não têm componentes elétricos nem mecânicos
  - $\Delta p_e \cong 0$ : em geral estes componentes estão colocados à mesma altura de elevação
  - $\Delta k_e \neq 0$ : estes dispositivos envolvem grandes variações de velocidade



# Conduatas

- Os fluídos são em geral transportados através de conduatas
- Características
  - $\Delta\dot{Q} \neq 0$ : se as conduatas forem compridas, podem haver trocas significativas de calor como exterior
  - $\Delta\dot{W} \neq 0$ : pode haver secções com elementos de aquecimento, bombas, etc...
  - $\Delta p_e \neq 0$ : em geral as conduatas alteraçaõ a sua altura de elevação ao longo do percurso
  - $\Delta ke \cong 0$ : não tem grandes alterações de velocidade e por isso podem ser negligenciadas

# **SISTEMAS ABERTOS EM REGIME TRANSIENTE**

# Definição

- Um escoamento em regime transiente é um escoamento em que
  - As propriedades do sistema alteram-se com o tempo
- Conservação de massa

$$\Delta m_{sistema} = \sum m_{in} - \sum m_{out}$$

- Conservação de energia

$$\begin{aligned} \Delta E_{sistema} \\ = Q - W + \sum m_{in} \left( h_{in} + \frac{V_{in}^2}{2} + gz_{in} \right) - \sum m_{out} \left( h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) \end{aligned}$$