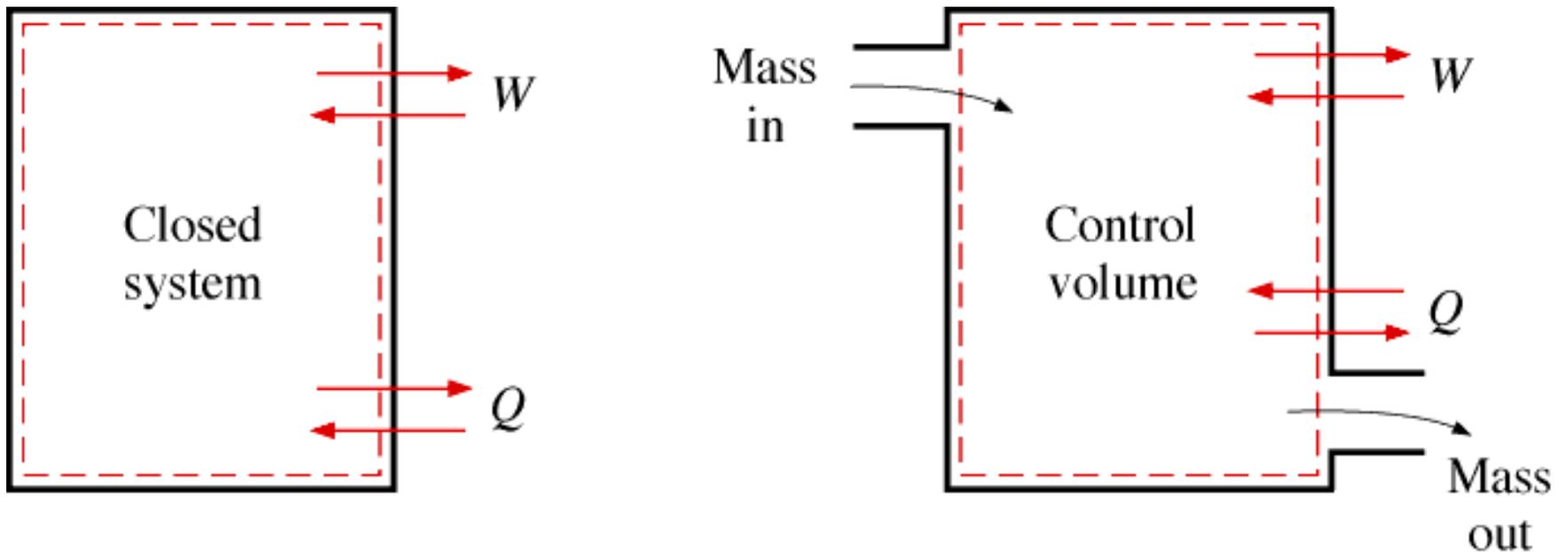


# Sistemas abertos

## Equações de conservação

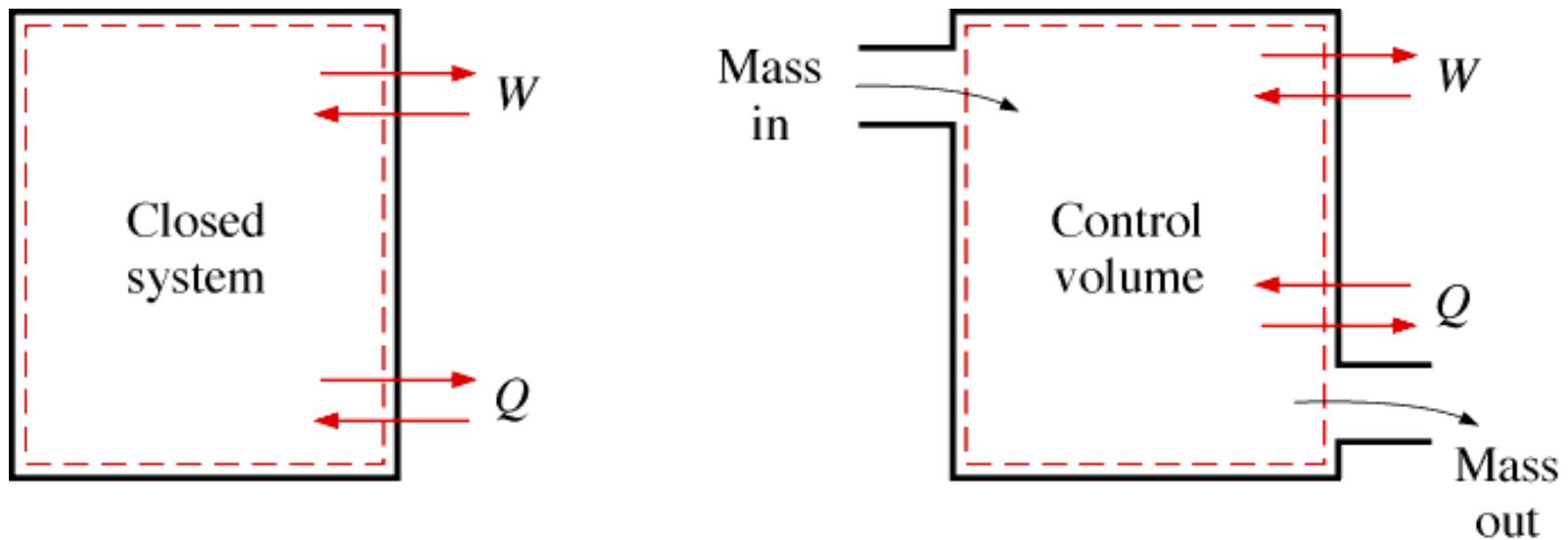


# Diferenças entre sistemas abertos e fechados



# Fluxos de massa, calor e trabalho afetam o conteúdo energético

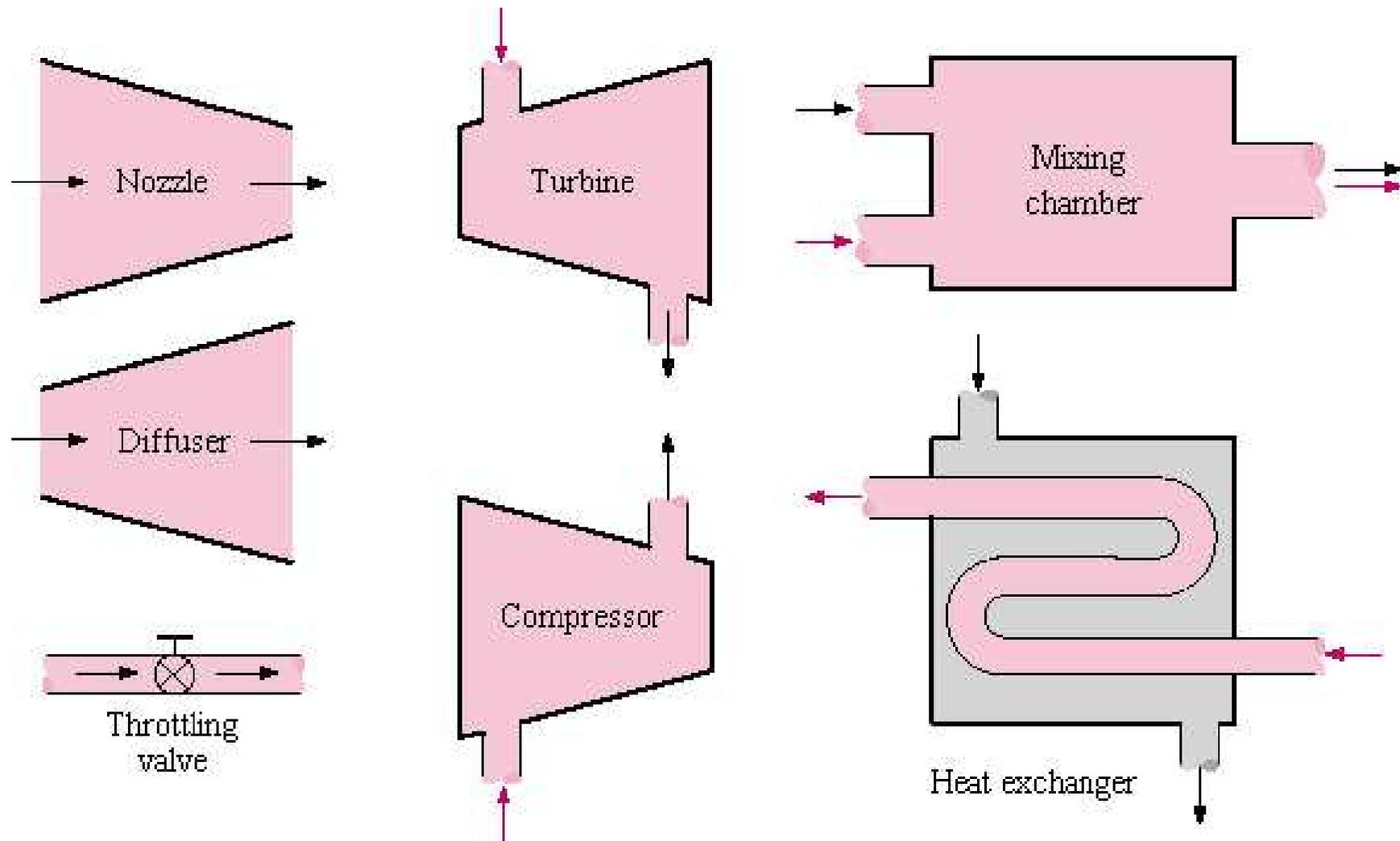
O conteúdo energético de um volume de controle pode ser alterado através de fluxos de **massa** assim como por interações de **trabalho e de calor**



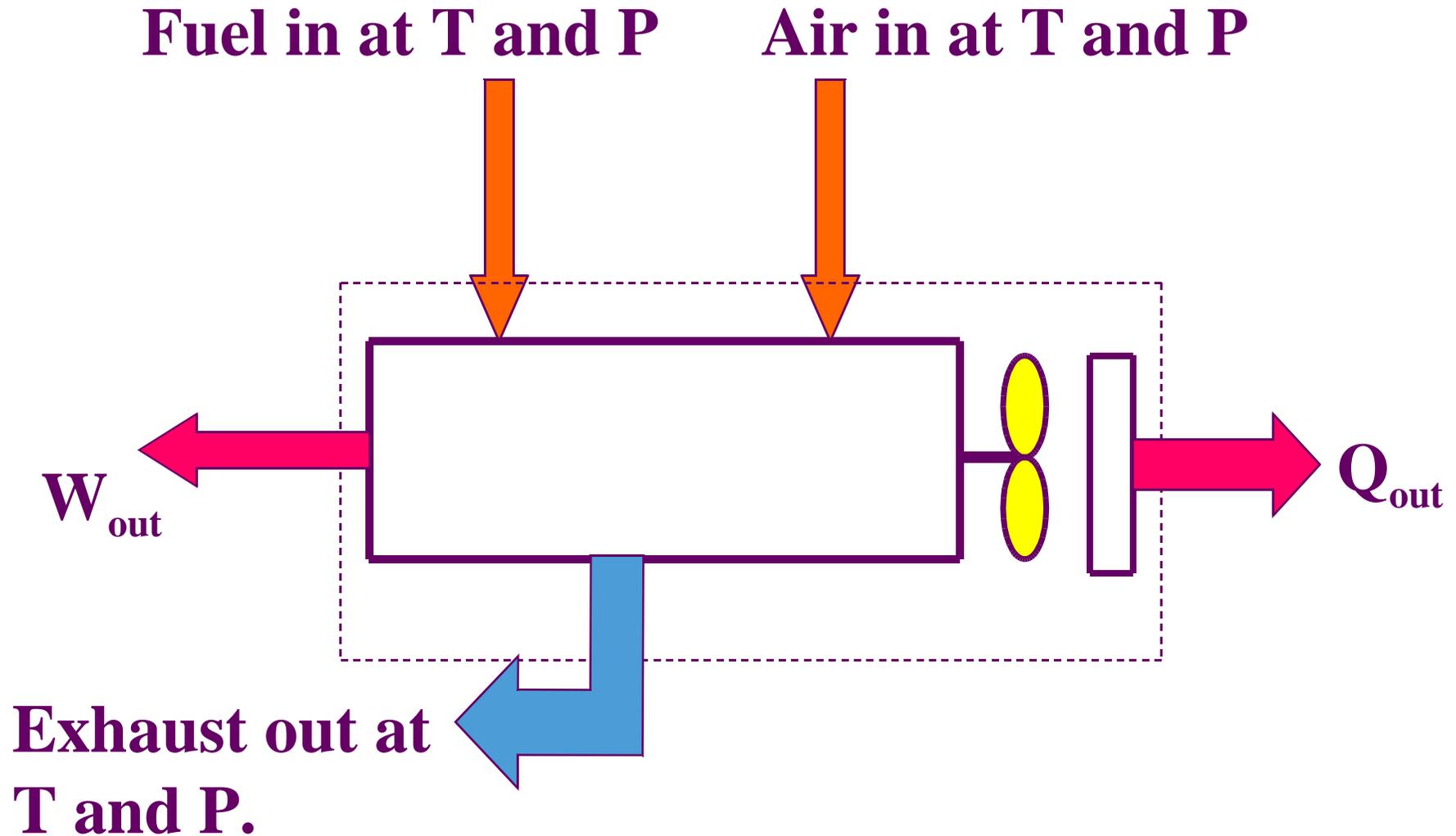
# Volume de controle

- **Sistema fechado – massa de controle**
- **Sistema aberto – volume de controle, envolve fluxos de massa de/para o sistema**
- **Bomba, turbina, radiadores, aquecedores, etc.**
- **Em geral, qualquer região do espaço pode ser escolhida como volume de controle.**
- **Uma escolha adequada do volume de controle simplifica o problema.**

# Sistemas abertos, volume de controle



# Exemplo: motor de automóvel



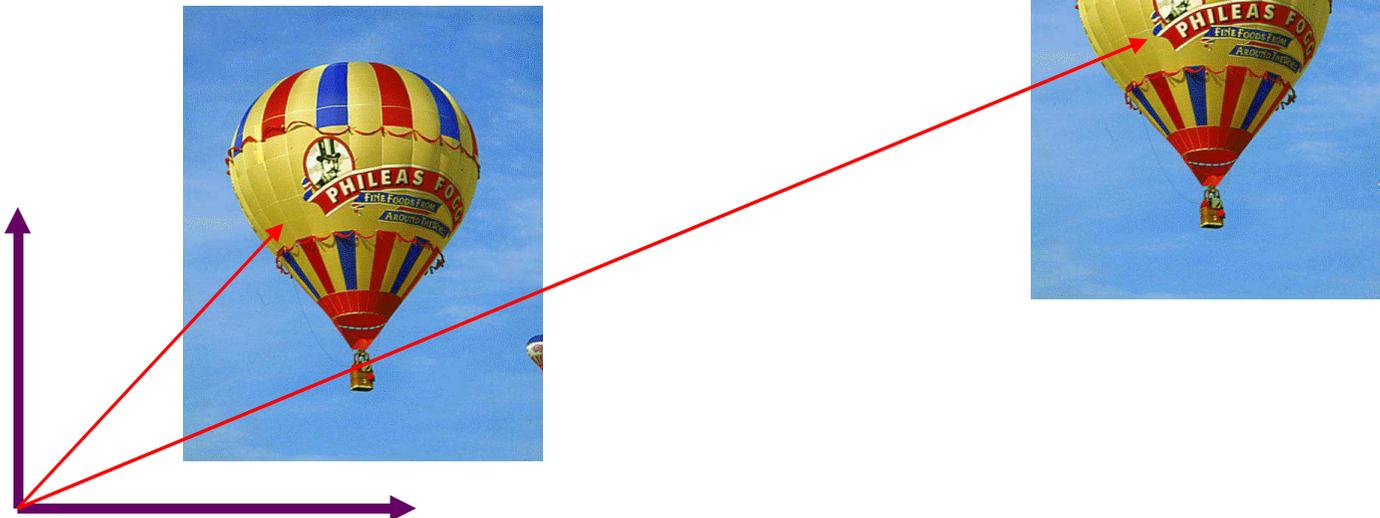
# Leis físicas e conceitos para SISTEMAS (S.F.)

- **Todas as leis físicas vistas até agora foram desenvolvidas para sistemas fechados: um conjunto de partículas com uma identidade.**
- **Em um S.F., massa não pode cruzar as fronteiras, mas calor e trabalho podem.**

# Equação de conservação da massa

- A massa de um S.F. é constante. Seguindo-se o S.F., em um sistema de referência Lagrangeano, não se observa variação de massa.

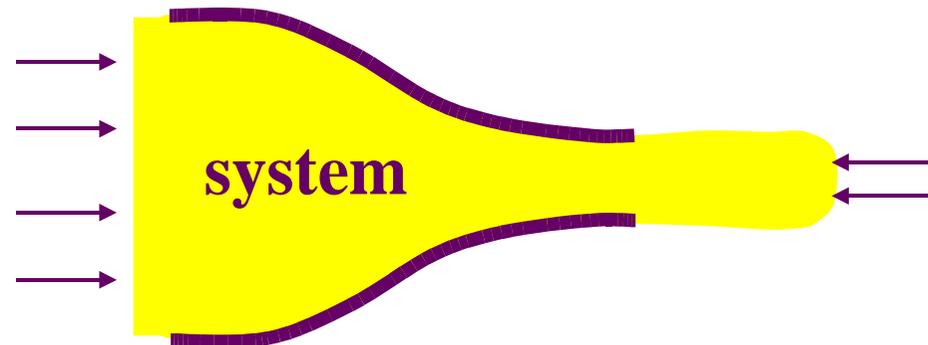
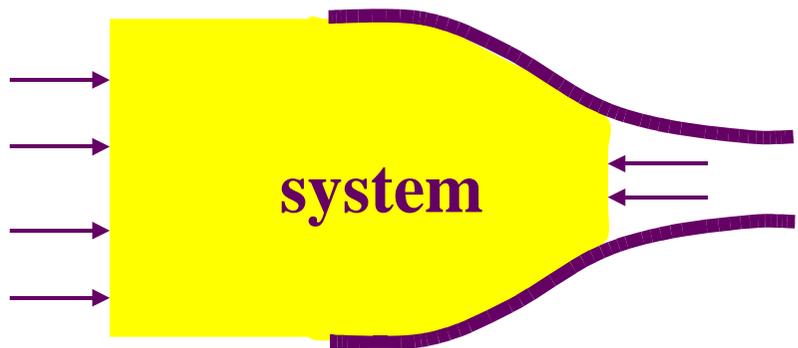
$$\left. \frac{dm}{dt} \right|_{system} = 0$$



# Conservação da quantidade de movimento

- Seguindo-se o S.F., em um sistema de referência Lagrangeano, a variação de QDM é igual a resultante das forças agindo sobre o sistema:

$$\frac{d(m\vec{V})}{dt}\Big|_{system} = \sum \vec{F}_{\text{external forces}}$$



# Conservação da quantidade de movimento angular

- Seguindo-se o S.F., em um sistema de referência Lagrangeano, a variação de QDMA é igual a resultante dos torques agindo sobre o sistema:

$$\frac{d(m\vec{r} \times \vec{V})}{dt} \Big|_{system} = \sum \vec{r} \times \vec{F}_{\text{external torques}}$$

# Conservação da energia: 1ª lei

- Seguindo-se o S.F., em um sistema de referência Lagrangeano, a variação de energia é igual aos fluxos líquidos de calor e trabalho cruzando as fronteiras

$$\frac{d(me)}{dt} \Big|_{system} = \iint_{boundary} (\dot{Q}'' - \dot{W}'') dA$$

- $e = u + gz + v^2/2$  energia específica (J/kg)
- $\dot{Q}''$  e  $\dot{W}'' =$  fluxos de energia por unidade área, ( $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ )

# Variação de entropia: 2ª lei

- Seguindo-se o S.F., em um sistema de referência Lagrangeano, a variação de entropia é igual ao fluxo de calor dividido pela temperatura da fronteira mais a entropia produzida:

$$\frac{d(ms)}{dt} \Big|_{system} = \oint_{boundary} \frac{\delta \dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

# Forma geral equações de conservação/transporte

$$\left. \frac{dB}{dt} \right|_{system} = \left. \frac{d(m\beta)}{dt} \right|_{system} = \text{Termos fonte}$$

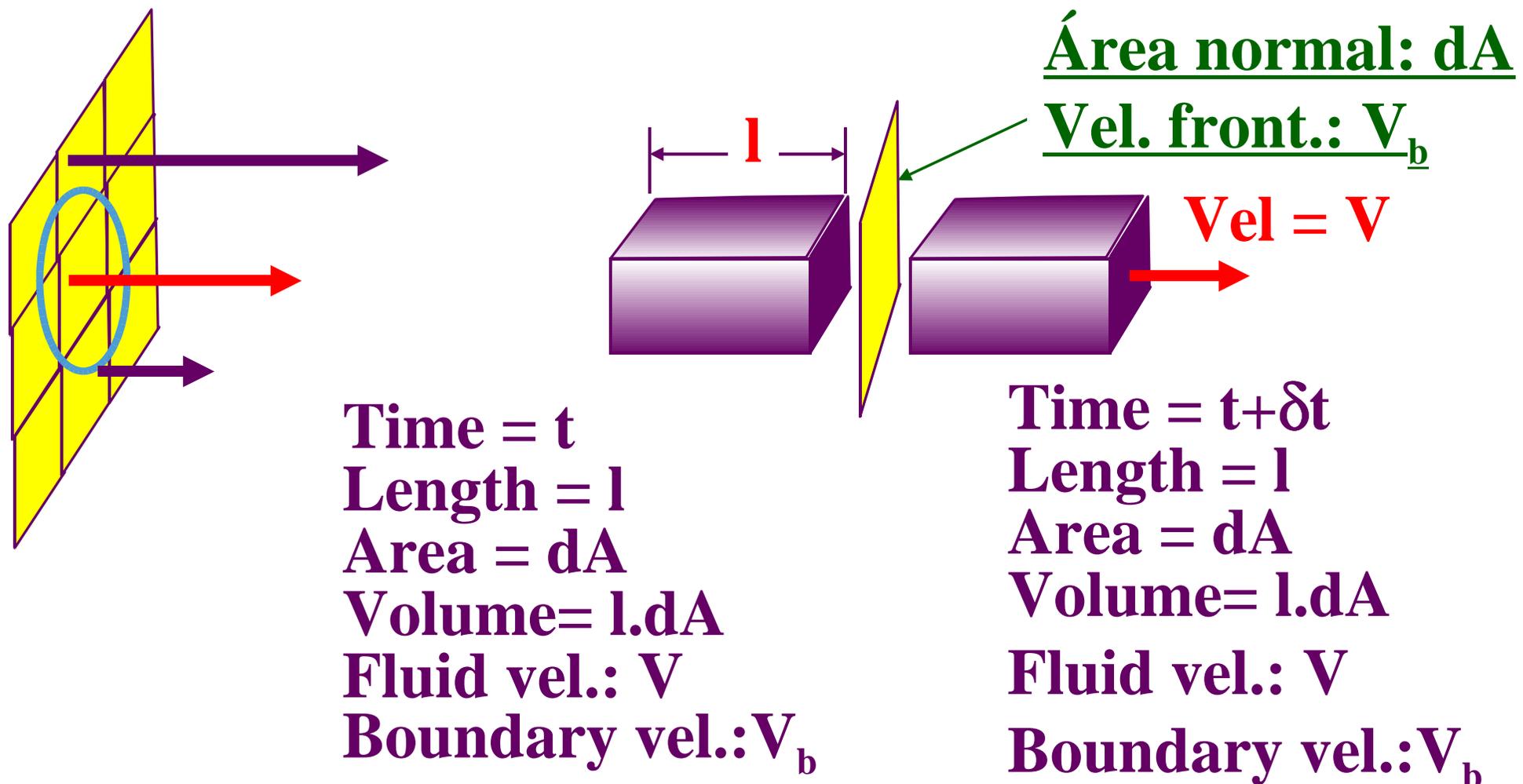
	<b>B</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b>Fonte</b>
<b>Massa</b>	<b>m</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>QDM</b>	<b>mV</b>	<b>V</b>	<b><math>\sum F_{ext}</math></b>
<b>QDMA</b>	<b>mr<sub>x</sub>V</b>	<b>r<sub>x</sub>V</b>	<b><math>\sum r_x F_{ext}</math></b>
<b>1ª Lei</b>	<b>E</b>	<b>e</b>	<b><math>\oint (Q'' - W'') dA</math></b>
<b>2ª Lei</b>	<b>S</b>	<b>s</b>	<b><math>\oint \delta Q/T + S_{gen}</math></b>

# Sistemas x volumes de controle

- Para fronteiras se deformando continuamente (gases e líquidos) é difícil fazer uma análise baseada em um S.F.
- É muito mais simples analisar uma região fixa do espaço (volume de controle)
- Como transpor as propriedades de um sistema para um volume de controle?

# Considerações preliminares

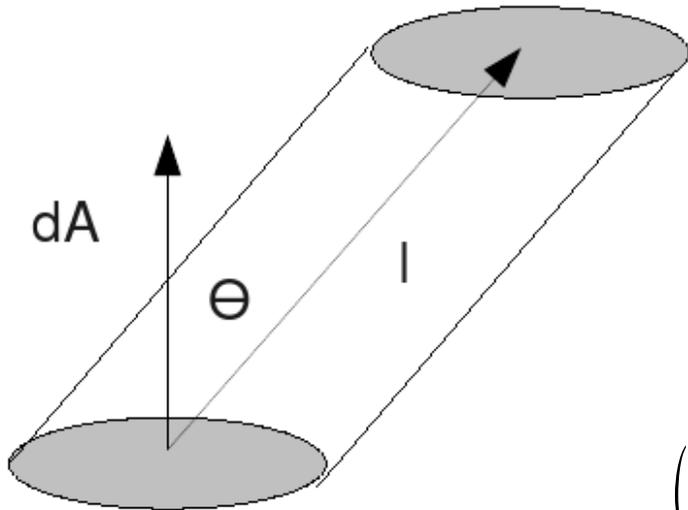
- Antes de fazer uma análise em volume de controle, é necessário definir o fluxo de massa em termos da velocidade.



# Fluxo de massa: $\text{kg}\cdot\text{sec}^{-1}$

- Para cada elemento de área há um fluxo de massa cruzando-o

$$d \dot{m} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left( \frac{m^{t+\delta t} - m^t}{\delta t} \right) = \frac{(\rho d \mathcal{V})^{t+\delta t} - (\rho d \mathcal{V})^t}{\delta t}$$



$$d \mathcal{V} = l dA \cos(\theta) = \vec{l} \cdot d\vec{A}$$

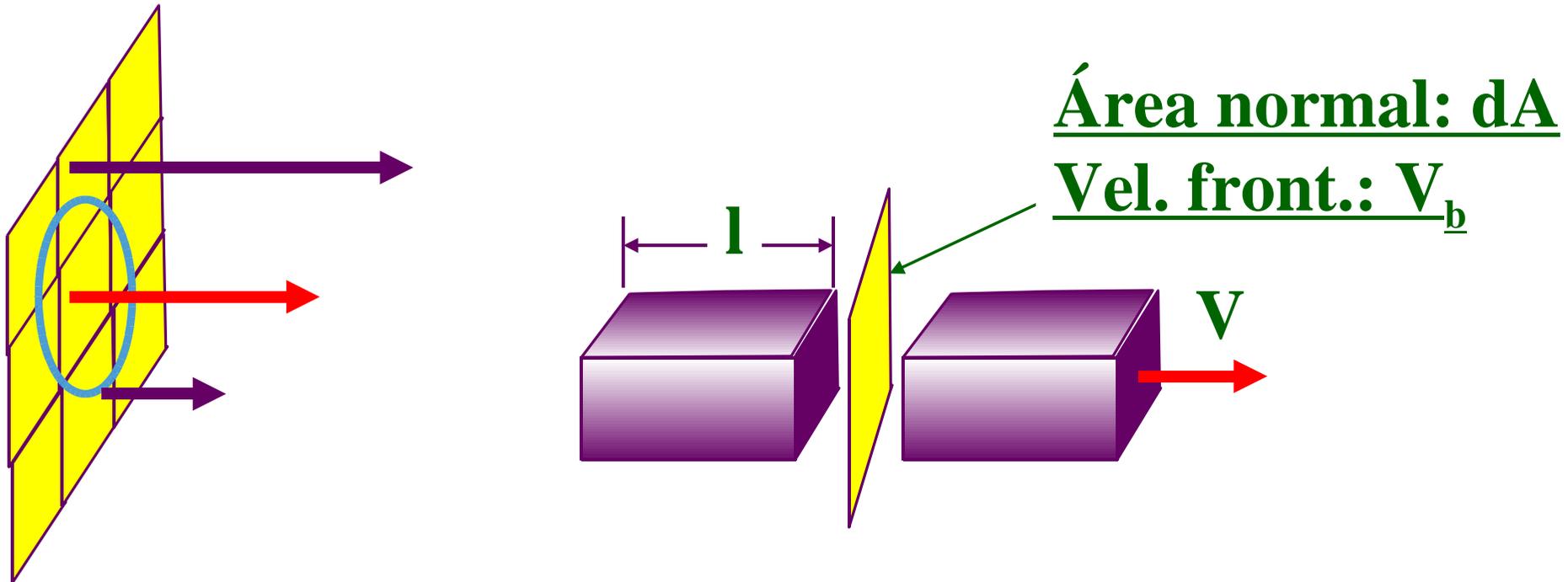
$$d \dot{m} = \frac{(\rho \vec{l} \cdot d\vec{A})^{t+\delta t} - (\rho \vec{l} \cdot d\vec{A})^t}{\delta t} \equiv \rho (\vec{V}_r \cdot d\vec{A})$$

- $\mathbf{V}_r$  é a velocidade relativa entre o fluido e a fronteira:  
 $\mathbf{V}_r = \mathbf{V} - \mathbf{V}_b$

# Fluxo de massa: $\text{kg}\cdot\text{sec}^{-1}$

- Considerando a área aberta ao fluxo, o fluxo de massa é:

$$\dot{m} = \int d\dot{m} = \iint \rho (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA$$



# Variável genérica $\beta$

$$B = \int \beta \rho dV$$

**B = variável extensiva**

**$\beta$  = variável intensiva**

$$B = m \rightarrow \beta = 1$$

$$B = mV \rightarrow \beta = V$$

$$B = E \rightarrow \beta = e$$

$$B = S \rightarrow \beta = s$$

# Fluxo de uma variável genérica $\beta$

$$\dot{B} = \iint \beta \rho (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA$$

**Fluxo de B: kg.sec<sup>-1</sup>**

$$\dot{M} = \iint \rho (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA$$

**Fluxo de massa: kg.sec<sup>-1</sup>**

$$\dot{U} = \iint u \rho (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA$$

**Fluxo energia interna: J.sec<sup>-1</sup>**

$$\dot{X} = \iint \rho \vec{V} (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA$$

**Fluxo de QDM: Nm/s**

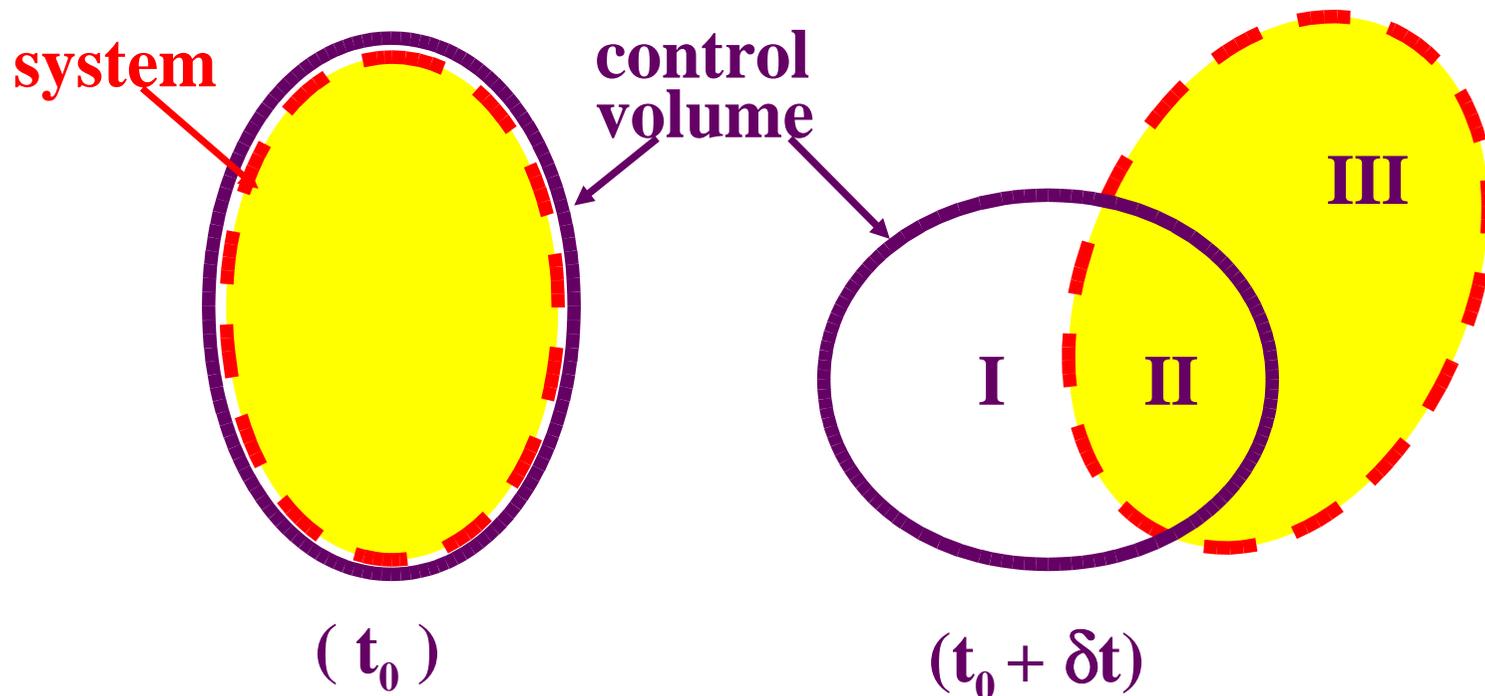
# **Teorema do Transporte de Reynolds**

## **RTT**

- **O volume de controle é uma região do espaço delimitada pela superfície de controle que é deformável ou não e que pode ser cruzada por calor, trabalho e massa.**
- **O RTT traduz as relações do sistema em termos das propriedades em uma região específica: o volume de controle**

# Teorema do Transporte de Reynolds

- Considere um instante  $t_0$  no qual a superfície de controle e a fronteira do sistema coincidem

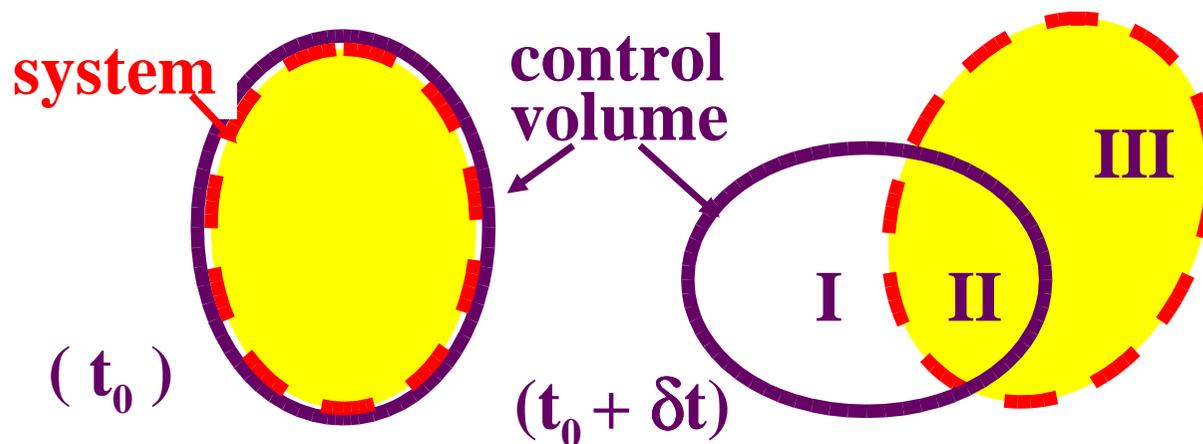


- No instante  $t_0 + \delta t$  o sistema deixa parcialmente o V.C.. III fora do V.C.; II ainda encontra-se no V.C. e I encontra-se com um novo “sistema”.

# Teorema do Transporte de Reynolds

A derivada do sistema em termos das propriedades no V.C.:

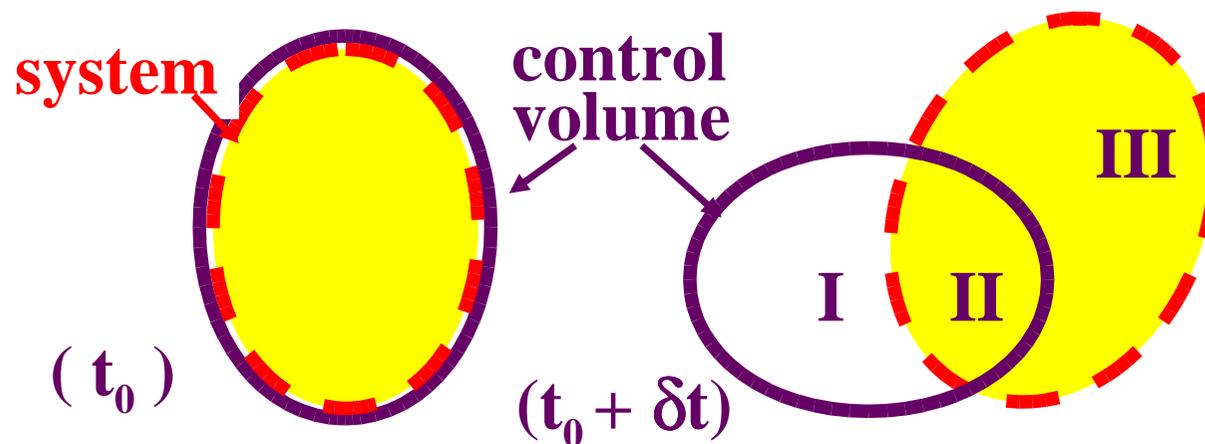
$$\begin{aligned}\frac{dB}{dt}\Big|_{\text{sys}} &\equiv \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left( \frac{B_{III}^{t+\delta t} + B_{II}^{t+\delta t} - B^t}{\delta t} \right) \\ &\equiv \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left( \frac{B_I^{t+\delta t} + B_{II}^{t+\delta t} - B^t}{\delta t} + \frac{B_{III}^{t+\delta t}}{\delta t} - \frac{B_I^{t+\delta t}}{\delta t} \right)\end{aligned}$$



# Teorema do Transporte de Reynolds

O primeiro termo é a derivada de B no V.C.:

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left( \frac{B_I^{t+\delta t} + B_{II}^{t+\delta t} - B^t}{\delta t} \right) \equiv \frac{d}{dt} \iiint_{vol} \beta \rho d \forall$$

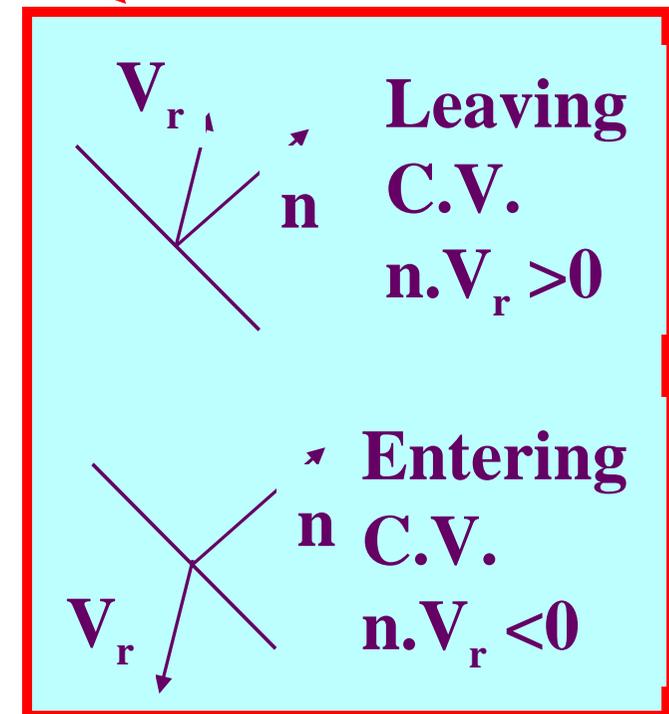
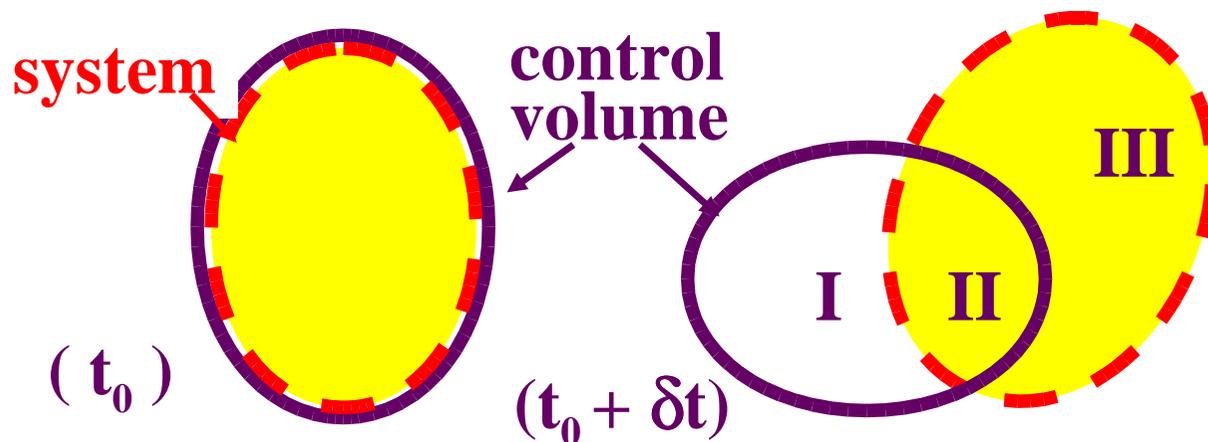


# Teorema do Transporte de Reynolds

O 2º e o 3º termos representam o fluxo de **B** saindo e entrando no V.C.:

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left( \frac{B_{III}^{t+\delta t}}{\delta t} - \frac{B_I^{t+\delta t}}{\delta t} \right) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\iint_{III} \beta \rho (\vec{n} \cdot \vec{l}) dA}{\delta t} + \frac{\iint_I \beta \rho (\vec{n} \cdot \vec{l}) dA}{\delta t} \right)$$

$$= \oiint_{C.S.} \beta \rho (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA$$



# Teorema do Transporte de Reynolds

- **Variações do sistema escritas em termos do V.C.,**

$$\frac{dB}{dt} \Big|_{sys} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V.} \beta \rho dV + \oiint_{C.S.} \beta \rho (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA$$

- **A variação de B no sistema é igual a sua variação no V.C. mais o fluxo líquido de B através da superfície de controle.**
- **A derivação Lagrangeana do sistema é calculada para uma região do espaço (fixa ou não) através do RTT.**

# Equações de transporte em termos do V.C.

- O RTT é aplicado às equações de transporte para exprimi-las em termos das propriedades do V.C.

$$\frac{dB}{dt} \Big|_{sys} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V.} \beta \rho dV + \oiint_{C.S.} \beta \rho (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA$$

# Escoamentos permanentes e transientes

- **Processos termodinâmicos envolvendo V.C. Podem ser divididos em: *processos a escoamentos permanentes* e *processos a escoamentos transientes*.**
- **Durante um processo permanente, o fluido escoia através do V.C. de forma estável, sem variações temporais em uma posição fixa. Os conteúdos mássico e energético do V.C. permanecem constantes durante um processo permanente.**

# Hipótese de escoamento permanente

As propriedades extensivas e intensivas do V.C. não variam com o tempo, entretanto podem variar espacialmente.

$m_{CV}$ ,  $E_{CV}$ , e  $V_{CV}$  são constantes.

# Hipótese de escoamento permanente

- Observe que as derivadas temporais do sistema e do V.C. são diferentes:

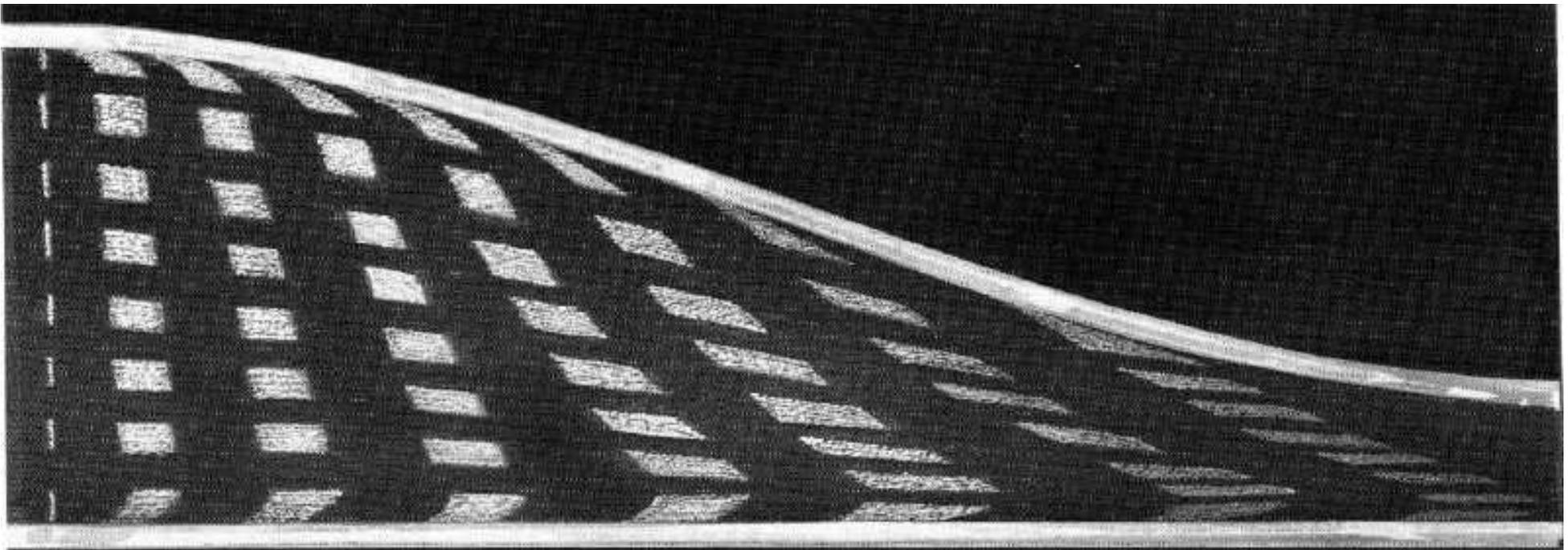
$$\frac{dB}{dt} \Big|_{SYS} \neq \frac{\partial B}{\partial t} \Big|_{CV} \equiv \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{vc} \rho \beta dV$$

- Isto permite que as propriedades variem no espaço, mas não com o tempo:

$$\frac{\partial(m)}{\partial t} \Big|_{CV} = \frac{\partial(m\vec{V})}{\partial t} \Big|_{CV} = \frac{\partial(me)}{\partial t} \Big|_{CV} = 0$$

- Entretanto, matéria pode entrar e sair do V.C.
- Os termos de fluxo de 'm' não são nulos.

# Exemplo : escoamento em R.P. em um bocal convergente



# Massa, $B=m$ ; $\beta = 1$

- **Balanco de massa no V.C.**
- **A variaçao de massa no V.C. é igual ao fluxo de massa cruzando a S.C.**

$$\frac{dm}{dt} \Big|_{sys} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V.} \rho dV + \oiint_{C.S.} \rho (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA = 0$$

- **Assumindo propriedades uniformes nas fronteiras: densidades e velocidades nas entradas e saídas**

$$\frac{dm}{dt} \Big|_{sys} = \frac{\partial m}{\partial t} \Big|_{C.V.} + \underbrace{\sum (\rho VA)_{out}}_{\dot{m}_{out}} - \underbrace{\sum (\rho VA)_{in}}_{\dot{m}_{in}} = 0$$

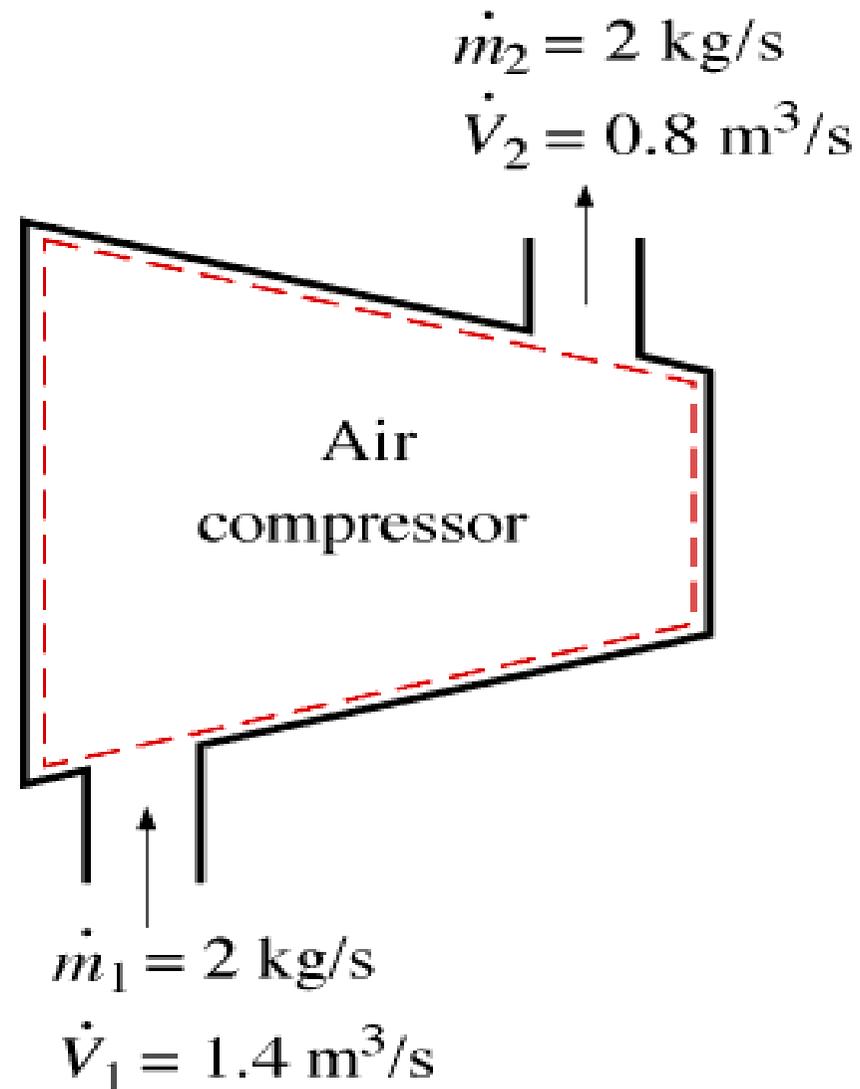
# Conservação de massa

$$\dot{m}_{\text{IN}} - \dot{m}_{\text{OUT}} = \frac{\partial m}{\partial t} \Big|_{\text{CV}}$$

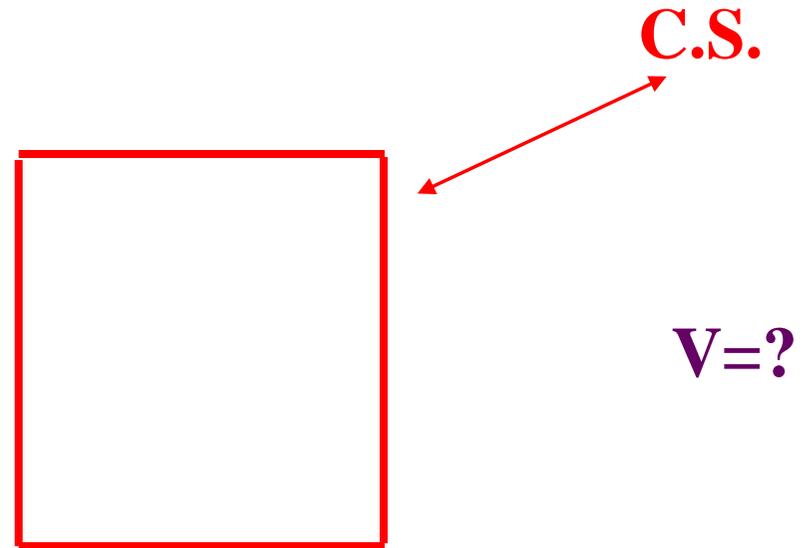
# Durante um processo a regime permanente, fluxos de volumes não são necessariamente conservados

- Regime permanente
- Uma entrada
- Uma saída

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$
$$\dot{V}_1 \neq \dot{V}_2$$



- Problema 5.9** Um tanque recebe água através da válvula 1 com  $V_1 = 10\text{ft/s}$  e através da válvula 3 com  $Q_3 = 0.35\text{ ft}^3/\text{s}$ . Determine a velocidade através da válvula 2 para manter o nível de água constante.



$$(\rho VA)_2 - (\rho VA)_1 - (\rho VA)_3 = 0$$

$$\therefore V_2 = \frac{V_1 d_1^2 + V_3 d_3^2}{d_2^2}$$

# Equação QDM, $B=mV$ ; $\beta = V$ , (eq. Vetorial, 3 comp.)

- Expressa o balanço de forças no V.C. (segunda lei de Newton).
- A variação de QDM no V.C. é igual a resultante das forças atuando sobre o V.C.

$$\frac{dm\vec{V}}{dt}\Big|_{sys} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V.} \rho \vec{V} d\forall + \oiint_{C.S.} \rho (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) \vec{V} dA = \sum \vec{F}_{ext} \begin{bmatrix} \textit{gravity} \\ \textit{pressure} \\ \textit{shear stress} \end{bmatrix}$$

# Equação QDM, $\beta = V$ , (eq. Vetorial, 3 comp. Sistema Inercial)

Inserindo as forças externas,

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V.} \rho \vec{V} dV + \iint_{C.S.} \rho \vec{V} (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA = \iiint_{C.V.} \rho \vec{g} dV + \iint_{C.S.} (-\vec{n} \cdot P) dA + \iint_{C.S.} (\vec{n} \cdot \tau) dA$$

- A gravidade age no volume.
- A força devido à pressão é normal à S.C. e direcionada internamente à S.C.
- A força devido à tensão de cisalhamento age tangencialmente à S.C.

# Equação QDM, $\beta = V$ , (eq. Vetorial, 3 comp. Sistema Inercial)

- Assumindo propriedades uniformes nas fronteiras: densidades e velocidades (entradas saídas)
- Desprezando as forças devido à tensão de cisalhamento

$$\frac{\partial(m\vec{V})}{\partial t}\Big|_{C.V.} + \sum (\dot{m}\vec{V})_{out} - \sum (\dot{m}\vec{V})_{in} = \rho \vec{g} \forall + \oiint_{C.S.} (-\vec{n} \cdot P) dA$$

**A conservação da QDM**  
**- 2ª lei de Newton -**  
**Sistema Inercial**  
**R.P e Duas portas no V.C. (uma**  
**entrada/uma saída)**

$$\dot{m} \left( \vec{V}_{OUT} - \vec{V}_{IN} \right) = \sum \vec{F}_{EXT}$$

# Força de reação: bico difusor (convergente)

Por que são necessários 2 bombeiros?

Por que ao acelerar a água aparece uma força de reação?



*Bico com ajuste do diâmetro*



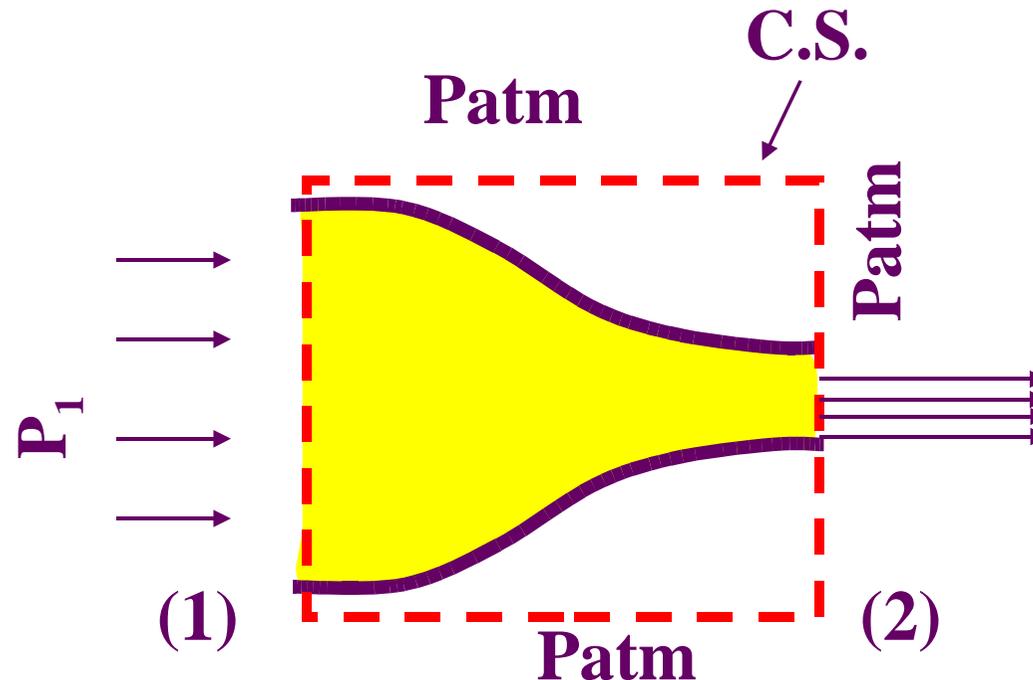
**100 Psi & 50 – 350 GPM**

# Força de reação: bico difusor (convergente)

S.C. engloba o bico (sólido) + o fluido.

Sempre que a S.C. cruzar um sólido podemos ter forças mecânicas devido à reação.

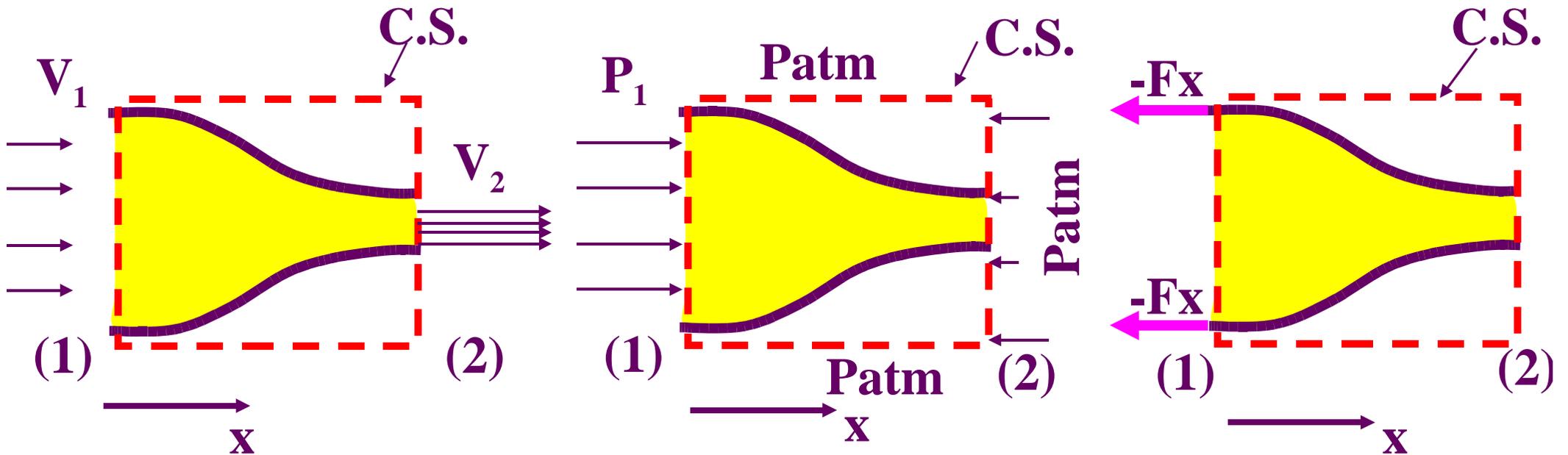
Entrada e saída do bico possuem diâmetros  $d_1$  e  $d_2$



Em R.P.,  $d/dt = 0$  e da conservação da massa,  
 $\rho V_1 d_1^2 = \rho V_2 d_2^2 \rightarrow V_2 = V_1 (d_1/d_2)^2$  e  $\dot{m} = \rho V_1 \pi d_1^2 / 4$

# Força de reação no bico (eq. vetorial: componente x)

$$\left(\dot{m} \vec{V}\right)_{out} - \left(\dot{m} \vec{V}\right)_{in} = \iiint_{C.V.} \rho \vec{g} dV + \iint_{C.S.} (-\vec{n} \cdot P) dA + \vec{F}$$



$$\dot{m} (V_2 - V_1) = (P_1 - P_{atm}) \cdot \frac{\pi d_1^2}{4} + F_x$$

$$F_{Bico} = -F_x$$

# Equação da energia, $B=E$ ; $\beta=e$ , (escalar)

- Expressa o balanço de energia para um V.C.
- A variação da energia no V.C. é dada pelos fluxos de calor e de trabalho cruzando a S.C.

$$\frac{dme}{dt}\Big|_{sys} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V.} \rho e dV + \iint_{C.S.} \rho e (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) dA = \dot{Q} - \dot{W}$$

# Equação da energia, $B=E$ $\beta= e$ , (escalar)

- **Aproximação: propriedades uniformes:**

$$\frac{\partial E}{\partial t} \Big|_{CV} + \sum (\dot{m} e)_{out} - \sum (\dot{m} e)_{in} = \dot{Q} - \dot{W}$$

- **As convenções de sinal para calor e trabalho permanecem as mesmas:**

**Calor IN e Trabalho OUT no V.C. são ( + )**

**Calor OUT e Trabalho IN no V.C. são ( - )**

# Termos de transferência de calor

Deseja-se combiná-los em um único termo:  
**transferência de calor líquida**

$$\dot{Q}_{\text{net}} = \dot{Q}_{\text{in}} - \dot{Q}_{\text{out}}$$

Por simplicidade, despreza-se o índice “net”

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{net}}$$

# Termos de trabalho

Fazemos o mesmo:

$$\dot{W} = -\dot{W}_{\text{in}} + \dot{W}_{\text{out}}$$

OBS: trabalho envolve **movimentos da fronteira**, trabalhos de eixo, elétrico, etc.

# Equação de conservação da energia

- Para R.P. e duas portas (uma entrada e uma saída) no V.C.:

$$\dot{m}(e_{out} - e_{in}) = \dot{Q} - \dot{W}$$

# Equação da energia, $\beta = e$ , (escalar)

É necessário estabelecer:

- 1- Os termos de energia específica, 'e'
- 2- Dividir o trabalho em termos devido ao escoamento mais os outros modos de trabalho

# A energia específica

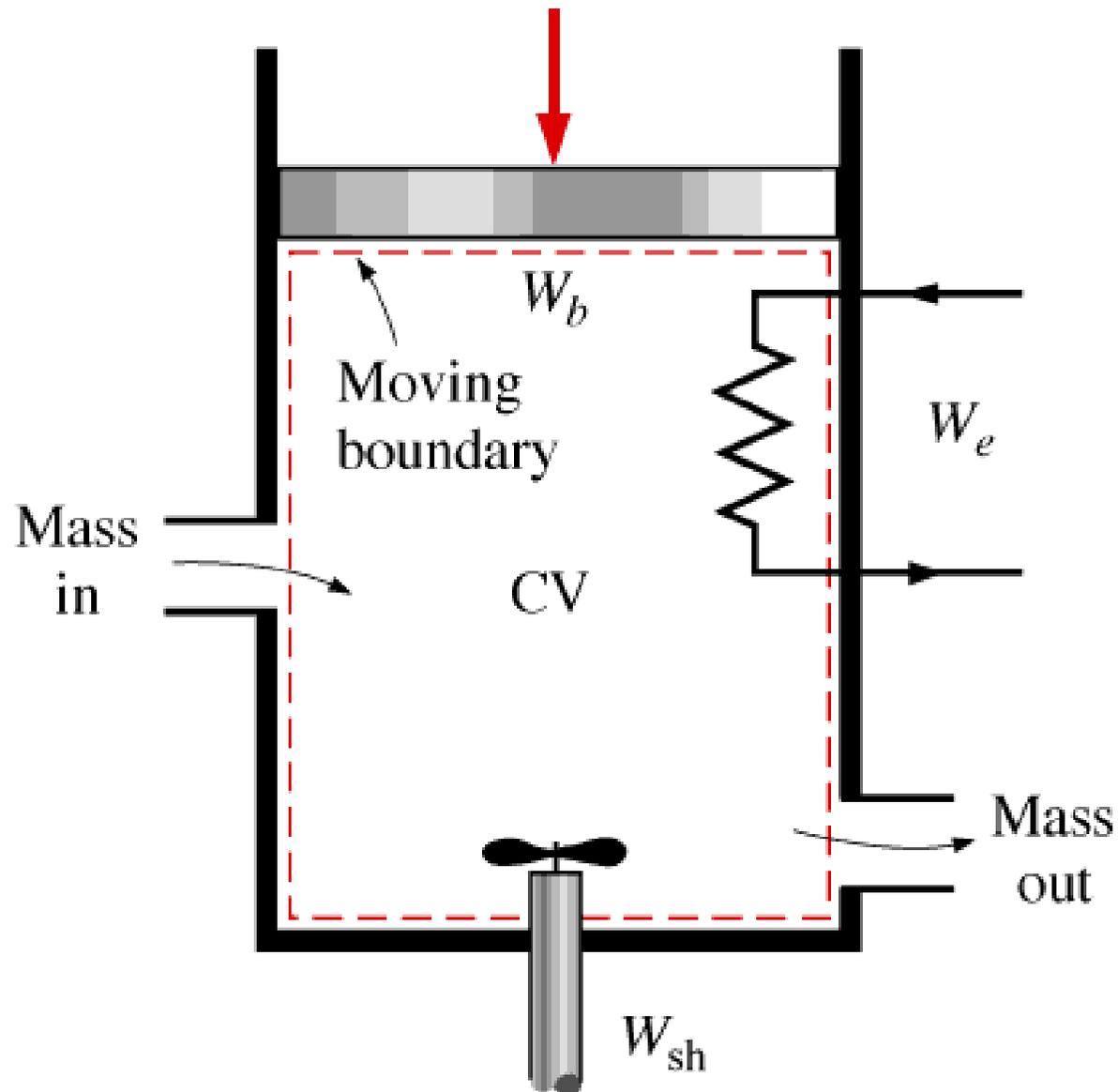
Consideraremos que a energia específica é a contribuição de:

- **Energia interna do fluido,**
- **Energia potencial**
- **Energia cinética:**

$$e = u + gz + \frac{V_I^2}{2}$$

Onde  $V_I$  refere-se à velocidade do fluido relativa a um referencial inercial

O V.C. pode estar sujeito a trabalhos de fronteira, de eixo, elétrico ou outros.



# A separação dos termos do trabalho

- Trabalho de eixo,: ex. pás de turbinas, pás de bomba hidráulica;
- Trabalho do deslocamento da S.C.;
- Trabalho devido a campos magnéticos, tensão superficial, etc.,
- Trabalho para mover matéria para dentro e para fora do V.C.

# A separação dos termos do trabalho

- Normalmente divide-se o trabalho em 2 termos:
- Trabalho realizado no V.C. devido ao incremento  $m_i$  de massa entrando e ao incremento  $m_e$  de massa saindo
- Todos os outros trabalhos, normalmente chamados de Trabalho de Eixo, simbolizado por  $W_{shaft}$  ou  $W$ .

# Normalmente dividimos o trabalho em 2 termos:

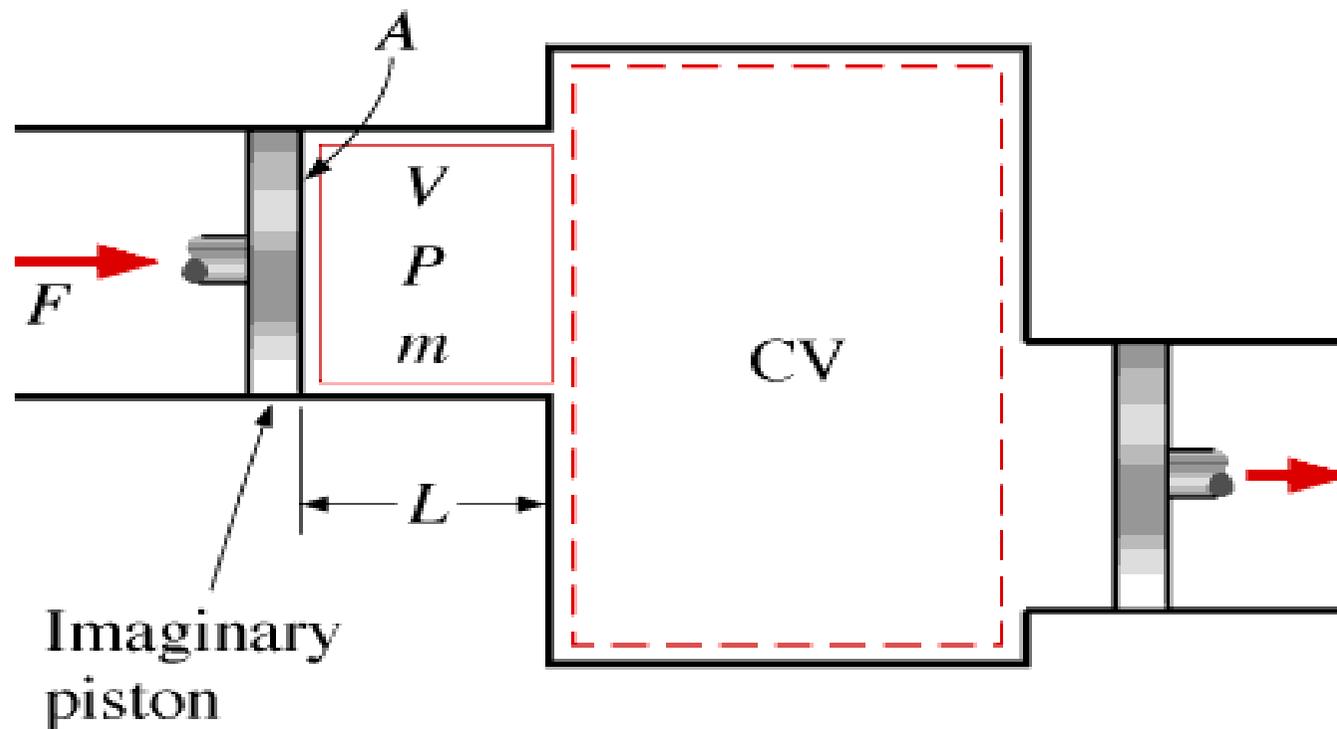
$$\dot{W} = \dot{W}_{\text{FLOW}} + \dot{W}_{\text{SHAFT}}$$

$\dot{W}_{\text{FLOW}}$  = *work done moving  
fluid in/out of c.v.*

$\dot{W}_{\text{SHAFT}}$  = *net shaft work*

# Esquema do trabalho devido ao fluxo

Imagine um pistão comprimindo uma quantidade de massa prestes a entrar no V.C



# Esquema do trabalho devido ao fluxo

O trabalho de fluxo é :

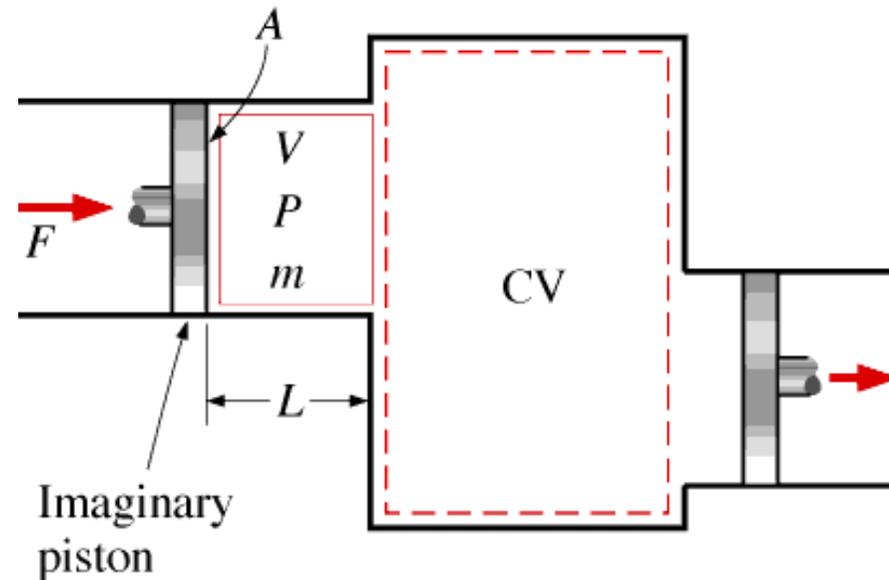
$$W_f = P\Delta V$$

e sua taxa:

$$\dot{W}_f = P \frac{\partial(\Delta V)}{\partial t} = P (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) A = \frac{P}{\rho} \dot{m}$$

Que é o trabalho volumétrico para empurrar ou puxar massa do V.C.

O produto escalar fornece o sinal correto se o V.C. recebe ou produz trabalho



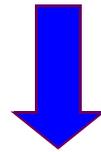
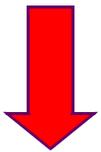
# Equação da energia

Inserindo as definições de 'e' e  $W_f$  na equação da energia:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( u + \frac{V_I^2}{2} + gz \right) \forall \right] + \sum \left[ \left( u + \frac{V_I^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho} \right) \dot{m} \right]_{OUT} - \sum \left[ \left( u + \frac{V_I^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho} \right) \dot{m} \right]_{IN} = \dot{Q} - \dot{W}_{shaft}$$

# Significado termo a termo

$$\frac{\partial E}{\partial t} \Big|_{cv} - \dot{m} \left( u + \frac{P}{\rho} + \frac{V_I^2}{2} + gz \right)_{in} + \dot{m} \left( u + \frac{P}{\rho} + \frac{V_I^2}{2} + gz \right)_{out} = \dot{Q} - \dot{W}_{shaft}$$



**Taxa de  
variação  
da  
energia  
no V.C**

**Taxa de  
convecção de  
energia para o  
V.C.**

**Taxa de  
convecção de  
energia p/ fora  
do V.C.**

**Taxas das  
interações  
de calor e  
trabalho**

# **OBS a respeito de calor**

- **Transferência de calor não deve ser confundida com a energia transportada junto com a massa para dentro e para fora do V.C.**
- **Calor é a forma de transferência de energia devido a uma diferença de temperatura**

# Equação da energia

Utilizando-se a entalpia

$$\mathbf{h = u + P/\rho}$$

obtemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( u + \frac{V_I^2}{2} \right) \forall \right] + \sum \left[ \left( h + \frac{V_I^2}{2} + gz \right) \dot{m} \right]_{OUT} - \sum \left[ \left( h + \frac{V_I^2}{2} + gz \right) \dot{m} \right]_{IN} = \dot{Q} - \dot{W}_{shaft}$$

# Podemos simplificar ainda mais...

Dividindo tudo pelo fluxo mássico:

$$q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$$

**Transf. de calor por  
unidade de massa**

$$w_{\text{shaft}} = \frac{\dot{W}_{\text{shaft}}}{\dot{m}}$$

**Trabalho de eixo por  
unidade de massa**

# E para R.P. e apenas duas portas no V.C.:

$$q - w_{\text{shaft}} = (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) + \left( \frac{V_{\text{out}}^2}{2} - \frac{V_{\text{in}}^2}{2} \right) + g(z_{\text{out}} - z_{\text{in}})$$

Onde  $z_{\text{out}}$  e  $z_{\text{in}}$  referem-se à cota na saída e na entrada do V.C.

**Ou ainda em notação reduzida:**

$$q - w_{\text{shaft}} = \Delta h + \Delta ke + \Delta pe$$

# Equação da 2ª lei, B=S; $\beta = s$ , (eq. escalar)

- Expressa o transporte de entropia pelo escoamento médio

$$\frac{dms}{dt}\Big|_{sys} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V.} \rho s dV + \iint_{C.S.} \rho (\vec{n} \cdot \vec{V}_r) s dA = \iint_{C.S.} \frac{\dot{Q}''}{T} dA + \dot{S}_{gen}$$

Onde,

$Q''$  é o fluxo local de calor por unidade de área,  
[W/m<sup>2</sup>]

$S_{gen}$  é o termo de produção de entropia devido às  
irreversibilidades,  $S_{gen} \geq 0$

# Equação da 2ª lei, $\beta = s$ , (eq. escalar)

- Para propriedades uniformes:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V.} \rho s dV - \sum (\dot{m} s)_{in} + \sum (\dot{m} s)_{out} = \iint_{C.S.} \frac{\dot{Q}''}{T} dA + \dot{S}_{gen}$$

Onde,

$Q''$  é o fluxo local de calor por unidade de área,  
[W/m<sup>2</sup>]

$S_{gen}$  é o termo de produção de entropia devido às  
irreversibilidades,  $S_{gen} \geq 0$