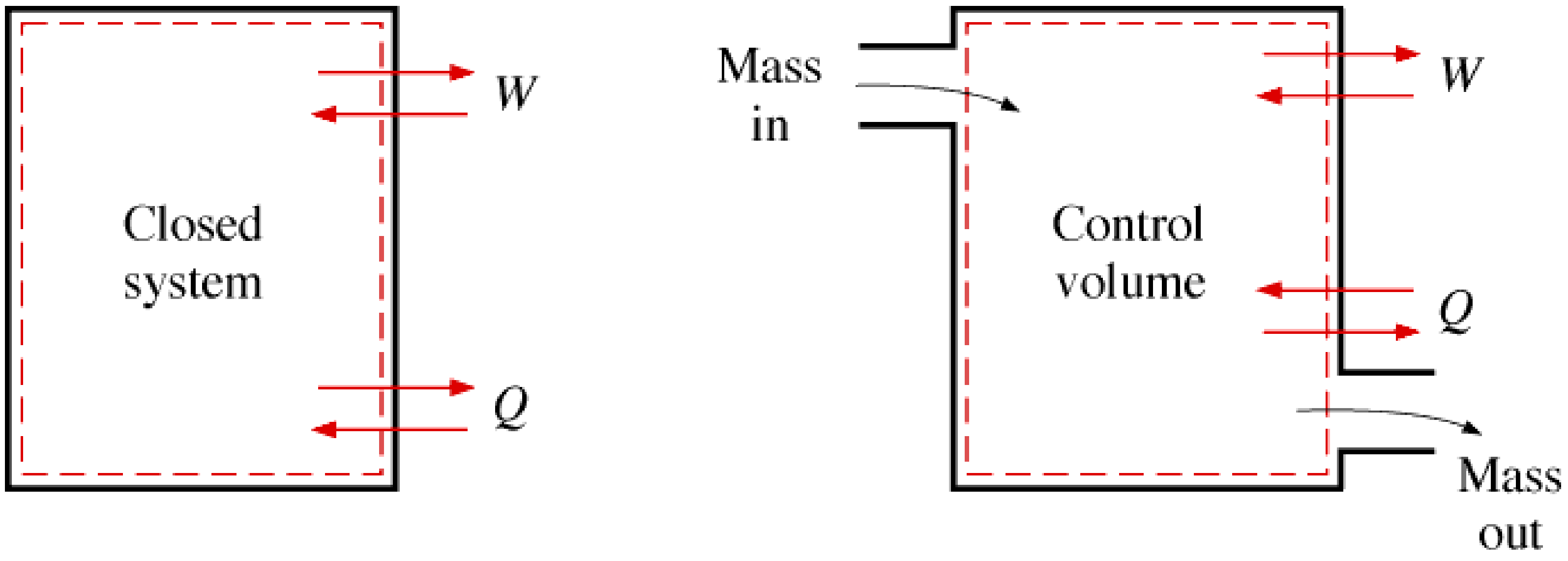
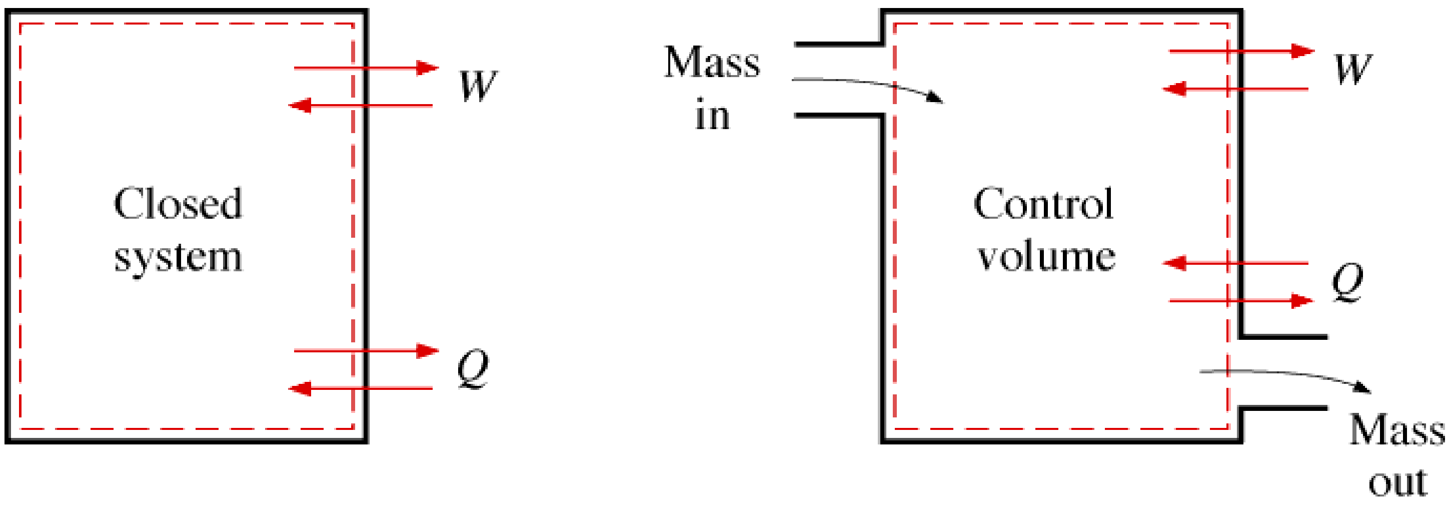
Sistemas abertos
Equações de conservação

Diferenças entre sistemas abertos e fechados



Fluxos de massa, calor e trabalho afetam o conteúdo energético

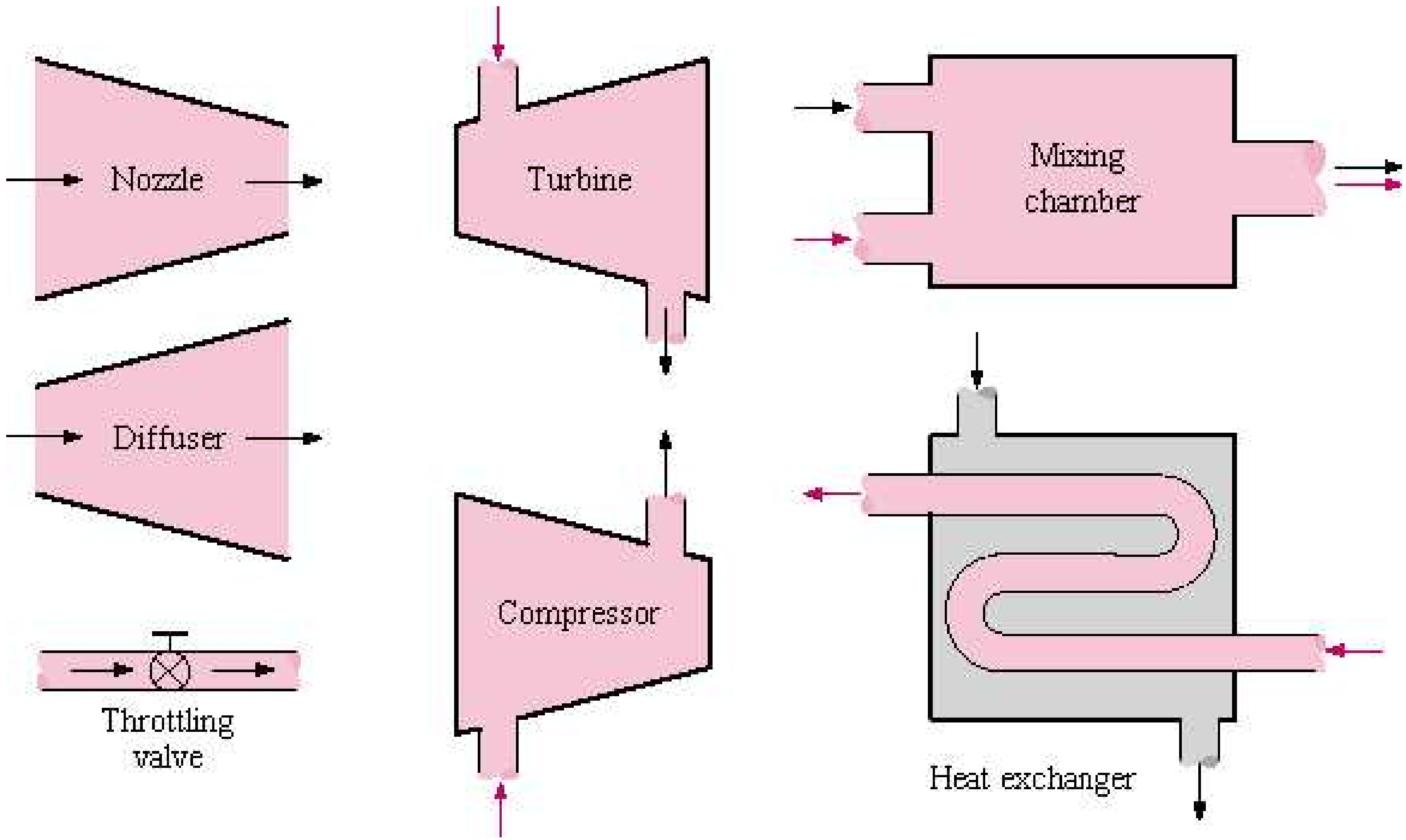
O conteúdo energético de um volume de controle pode ser alterado através de fluxos de massa assim como por interações de trabalho e de calor



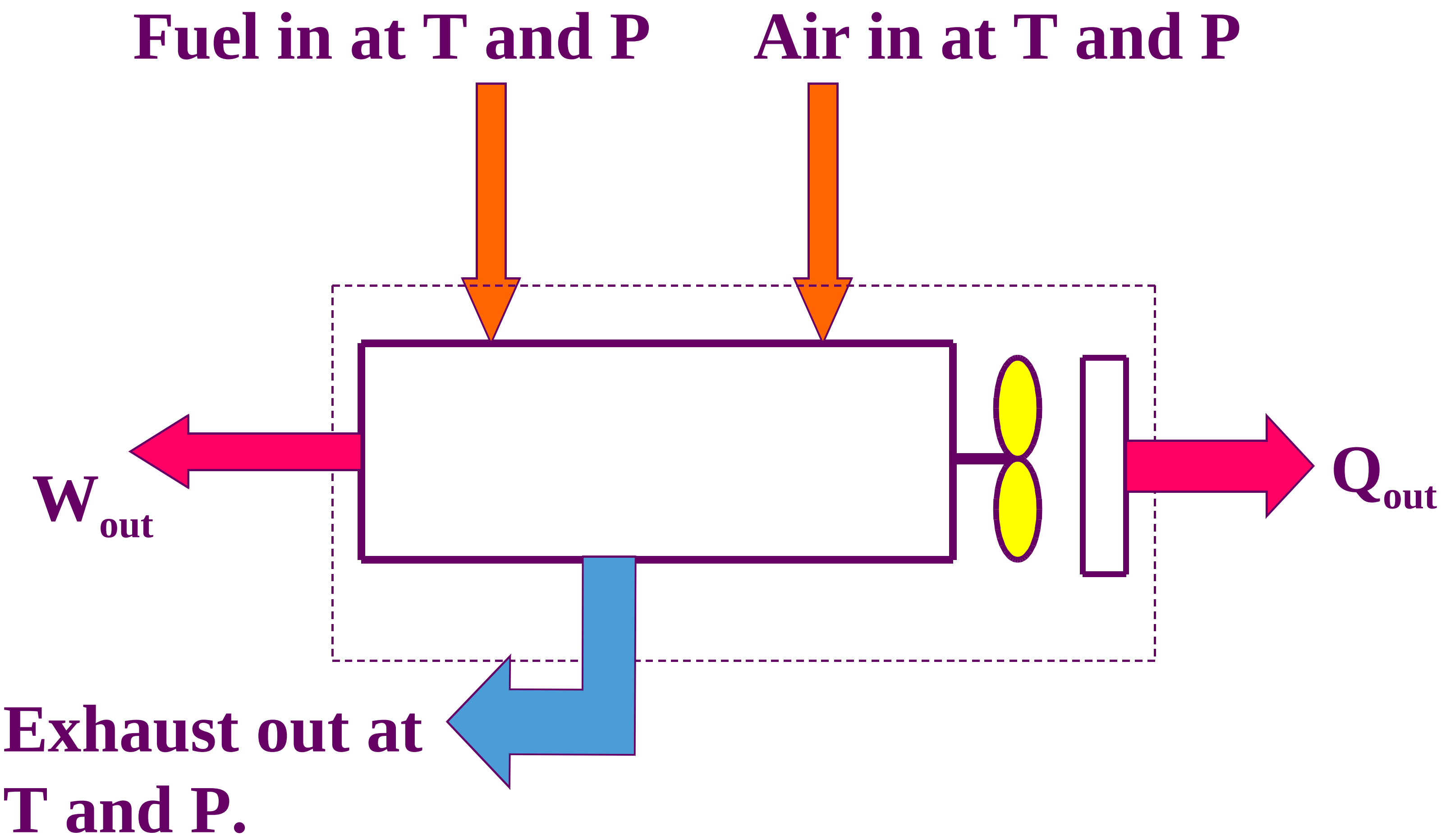
Volume de controle

- Sistema fechado – massa de controle
- Sistema aberto – volume de controle, envolve <u>fluxos de massa</u> 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.)

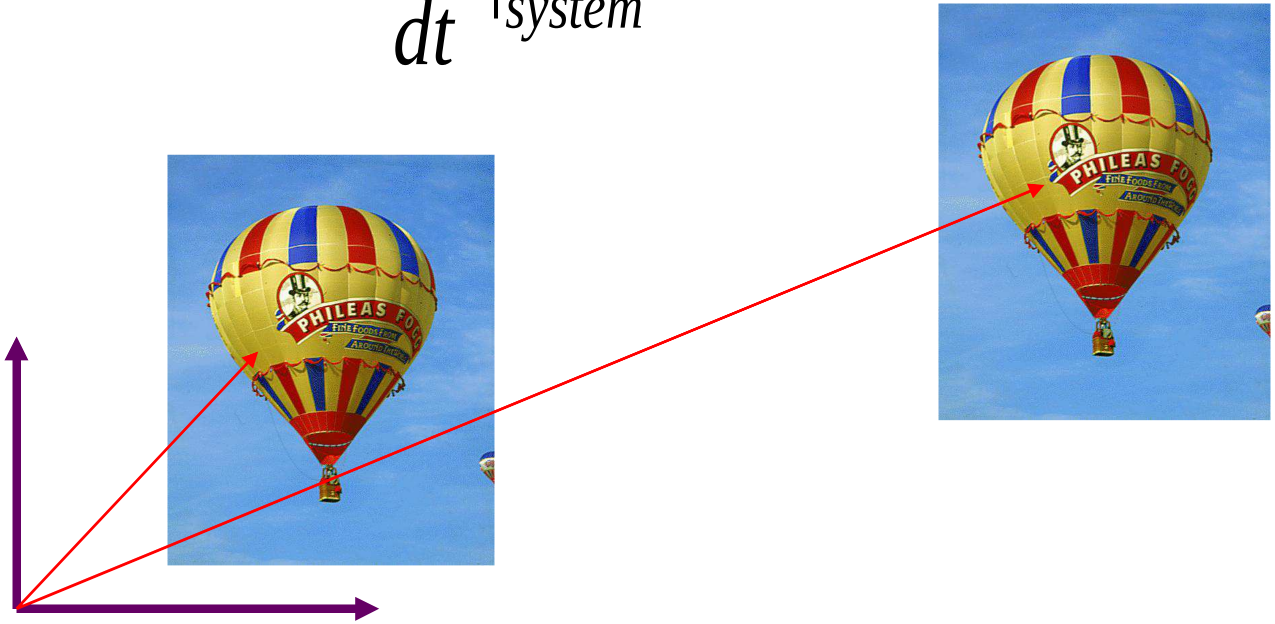
- **Todas as leis físicas vistas até agora foram desenvolvidas para <u>sistemas</u> fechados: um conjunto de partículas com uma identidade.**

- **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.**

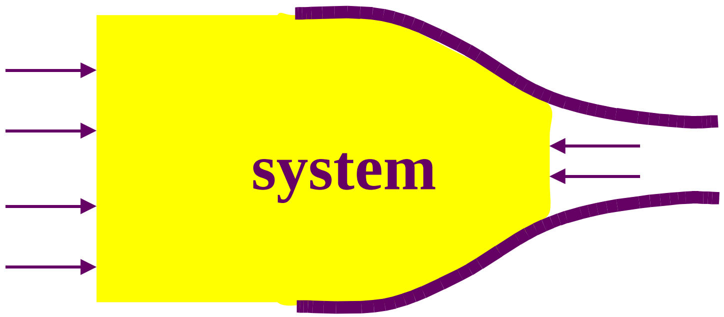
$$\left.\frac{dm}{dt}\right|_{system} = 0$$

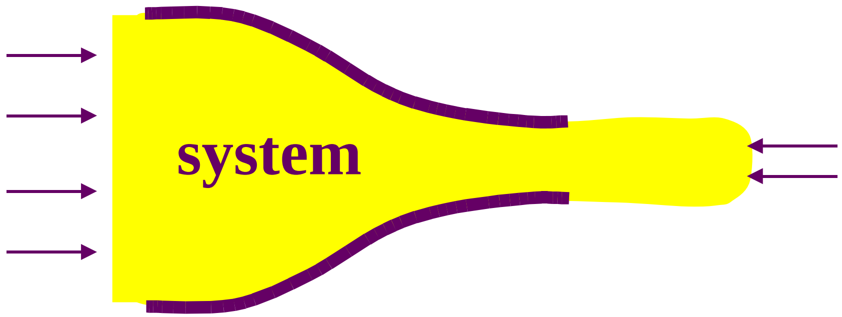


Conservação da quantidade de movimento

- **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:**

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





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:**

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

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**

$$\left.\frac{d\left(me\right)}{dt}\right|_{system} = \oiint_{boundary} \left(\dot{Q}'' - \dot{W}''\right) dA$$

- **e = u+gz+v²/2 energia específica (J/kg)**
- $\dot{Q}''$ e $\dot{W}''$ **= fluxos de energia por unidade área, ($Js^{-1}m^{-2}$)**

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:**

$$\frac{d\left(ms\right)}{dt}\bigg|_{system} = \oiint_{boundary} \frac{\delta \dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

Forma geral equações de conservação/transporte

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

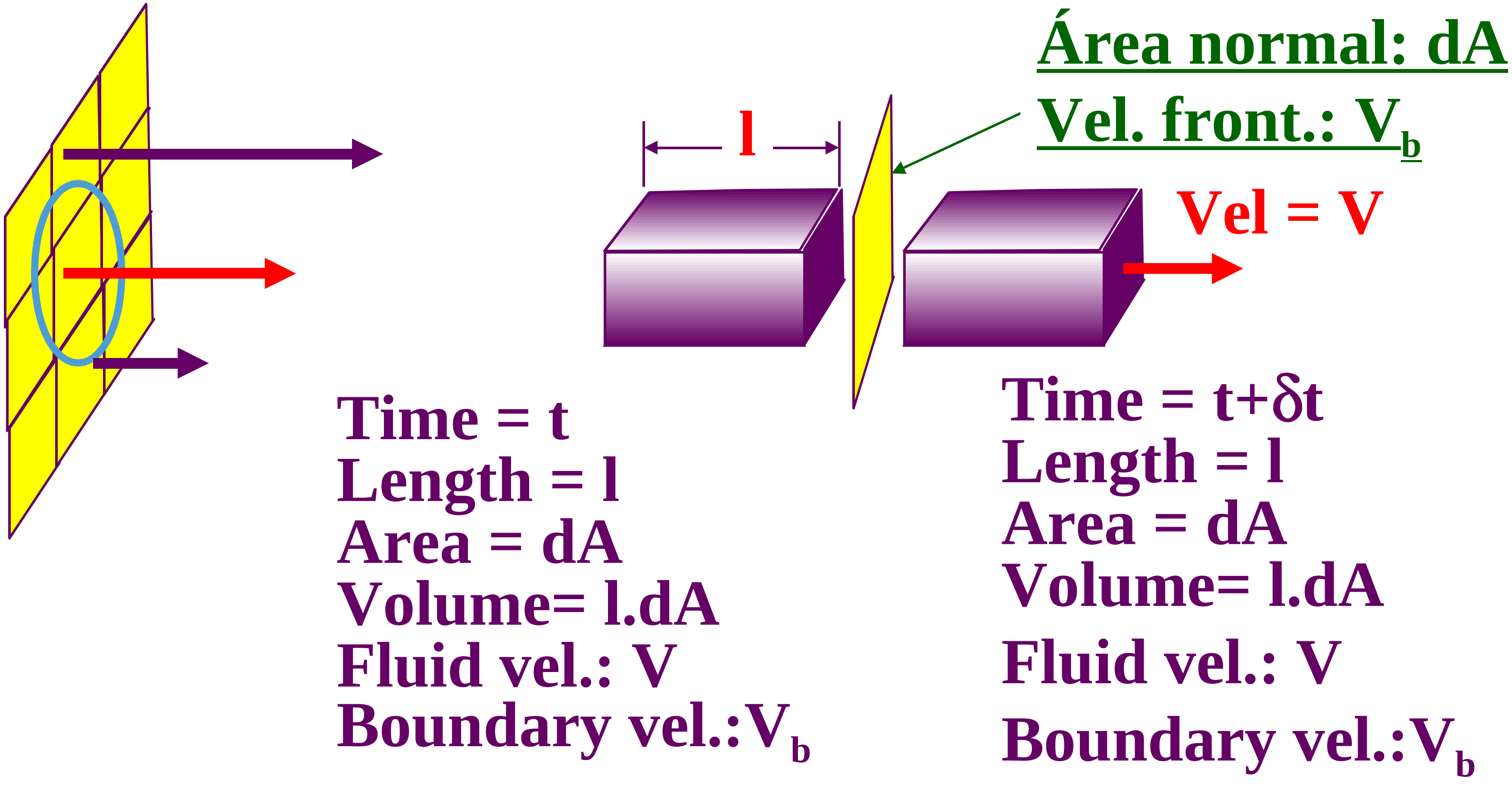
	B	β	Fonte
Massa	m	1	0
QDM	mV	V	$\sum F_{ext}$
QDMA	mr_xV	r_xV	$\sum r_x F_{ext}$
1ª Lei	E	e	$\oint (Q''-W'')dA$
2ª Lei	S	s	$\oint \delta Q/T + S_{gen}$

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

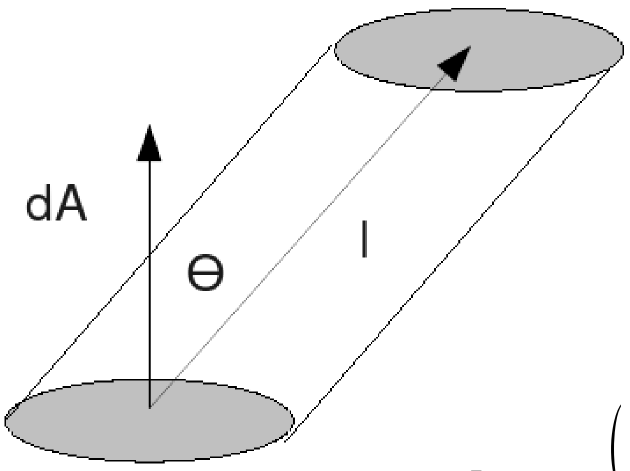
- **Antes de fazer uma análise em volume de controle, é necessário definir o fluxo de massa em termos da velocidade.**



Fluxo de massa: kg.sec^{-1}

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

$$d\,\dot{m} = \lim_{\delta t \to 0}\left(\frac{m^{t+\delta t} - m^{t}}{\delta t}\right) = \frac{\left(\rho\, d\,\forall\right)^{t+\delta t} - \left(\rho\, d\,\forall\right)^{t}}{\delta t}$$



$$d\,\forall = l\, dA \cos(\theta) = \vec{l} \cdot d\vec{A}$$

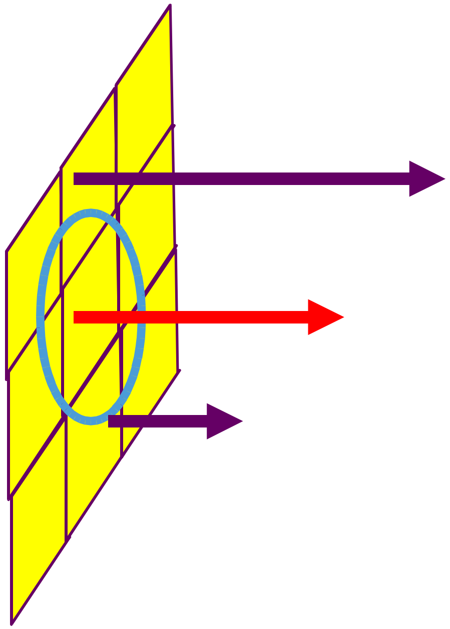
$$d\,\dot{m} = \frac{\left(\rho\, \vec{l} \cdot d\vec{A}\right)^{t+\delta t} - \left(\rho\, \vec{l} \cdot d\vec{A}\right)^{t}}{\delta t} \equiv \rho\left(\vec{V}_r \cdot d\vec{A}\right)$$

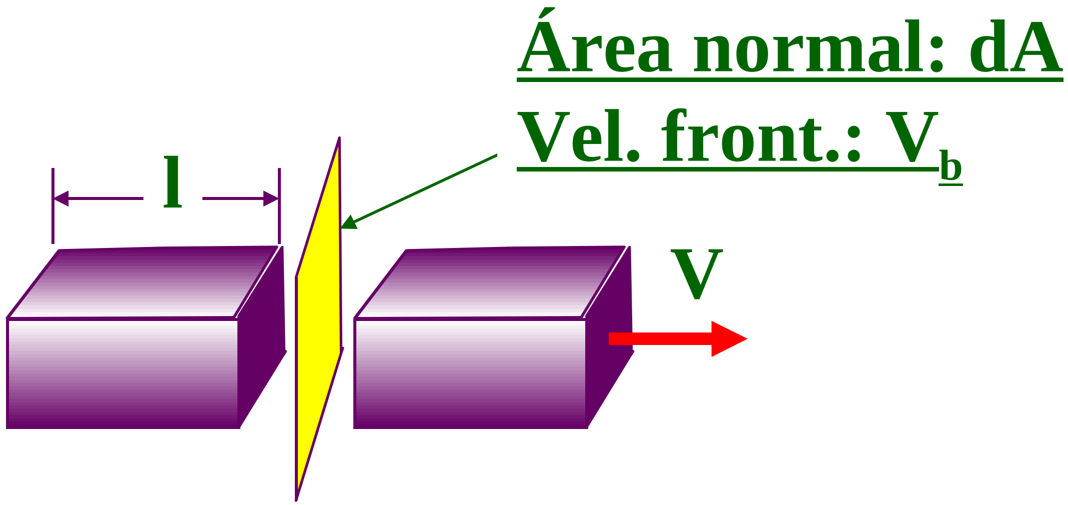
- **V_r é a velocidade relativa entre o fluido e a fronteira:**
  $V_r = V - V_b$

Fluxo de massa: kg.sec^{-1}

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

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





Variável genérica β

$$B = \int \beta \, \rho \, d\forall$$

B = variável extensiva

β = 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 β

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

Fluxo de B: kg.sec^{-1}

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

Fluxo de massa: kg.sec^{-1}

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

Fluxo energia interna: J.sec^{-1}

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

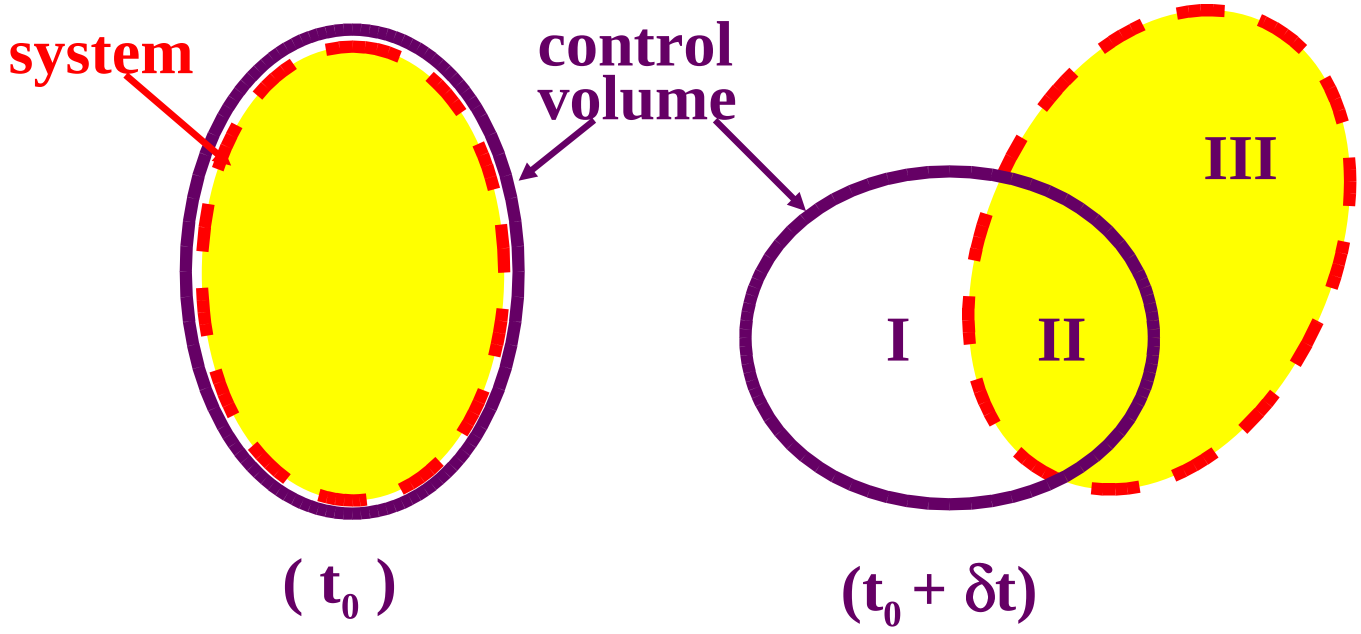
Fluxo de QDM: Nm/s

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



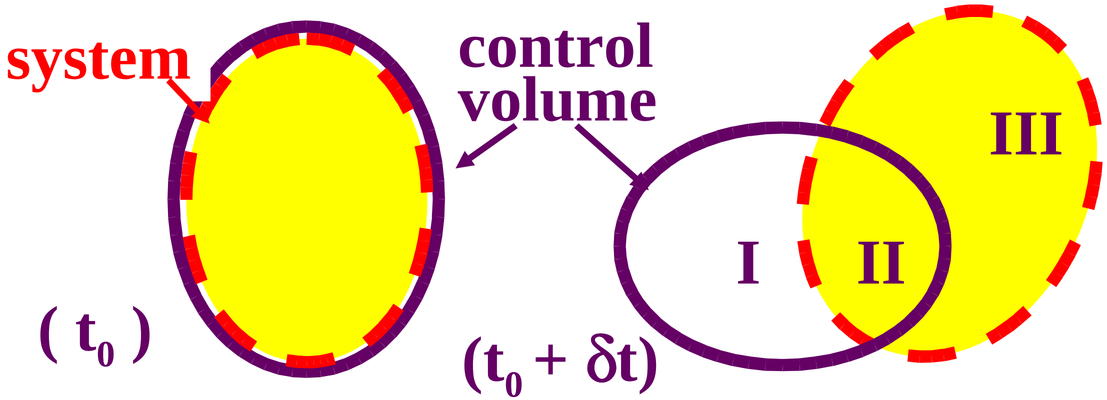
- No instante $t_0+\delta t$ o sistema deixa parcialmente o V.C.. III fora do V.C.; II ainda encontra-se no V.C. e I encontra-se com um novo "sistema".

Teorema do Transporte de Reynolds

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

$$\frac{dB}{dt}\Big|_{sys} = \underset{\delta t \to 0}{Lim}\left(\frac{B_{III}^{t+\delta t} + B_{II}^{t+\delta t} - B^{t}}{\delta t}\right)$$

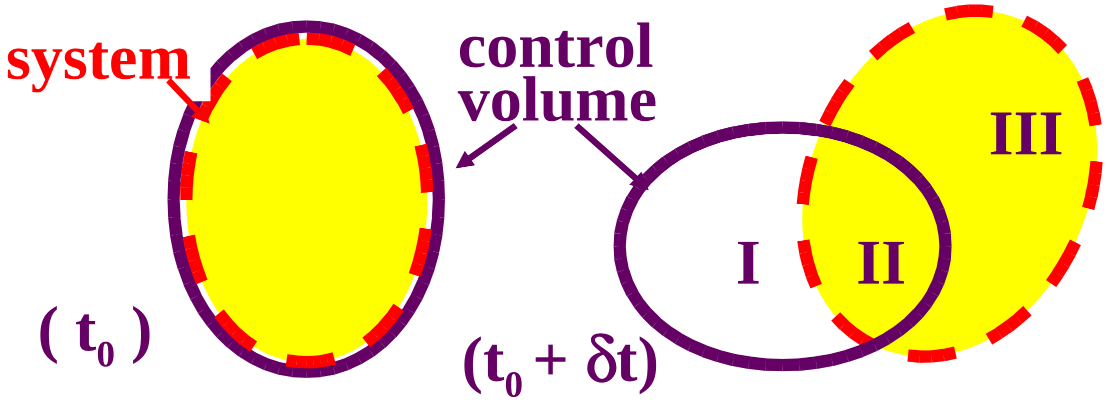
$$\equiv \underset{\delta t \to 0}{Lim}\left(\frac{B_{I}^{t+\delta t} + B_{II}^{t+\delta t} - B^{t}}{\delta t} + \frac{B_{III}^{t+\delta t}}{\delta t} - \frac{B_{I}^{t+\delta t}}{\delta t}\right)$$



Teorema do Transporte de Reynolds

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

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

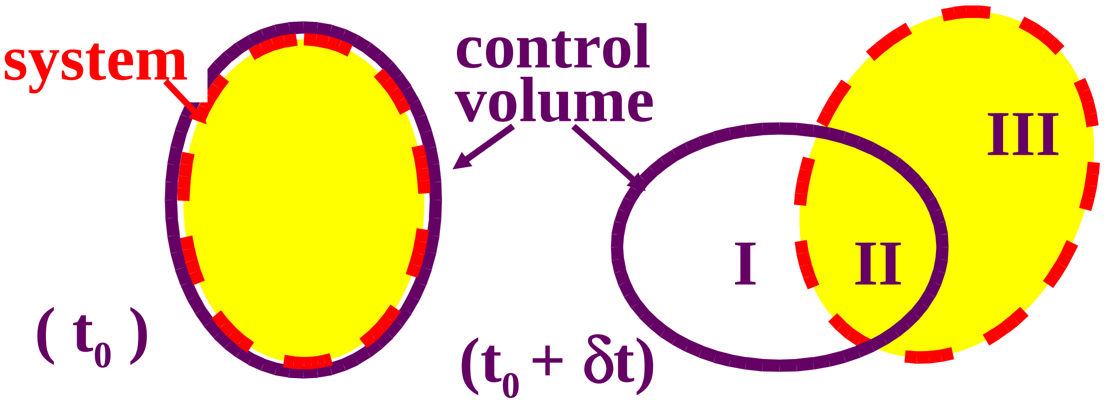


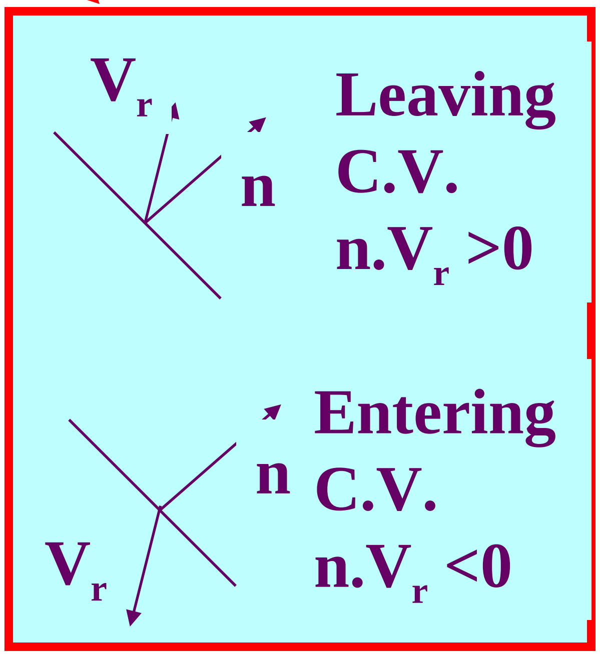
Teorema do Transporte de Reynolds

O 2º e o 3º termos representam o fluxo de B <u>saindo</u> e <u>entrando</u> no V.C.:

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

$$=\oint\!\!\oint_{C.S.}\beta\rho\left(\vec{n}\cdot\vec{V}_r\right)dA$$





Teorema do Transporte de Reynolds

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

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

- **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.**

$$\frac{dB}{dt}\Big|_{sys} = \frac{\partial}{\partial t}\iiint\limits_{C.V.} \beta\,\rho\, d\,\forall + \oiint\limits_{C.S.} \beta\,\rho\left(\vec{n}\cdot\vec{V}_r\right) dA$$

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 escoa 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 <u>podem variar espacialmente</u>.

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:**

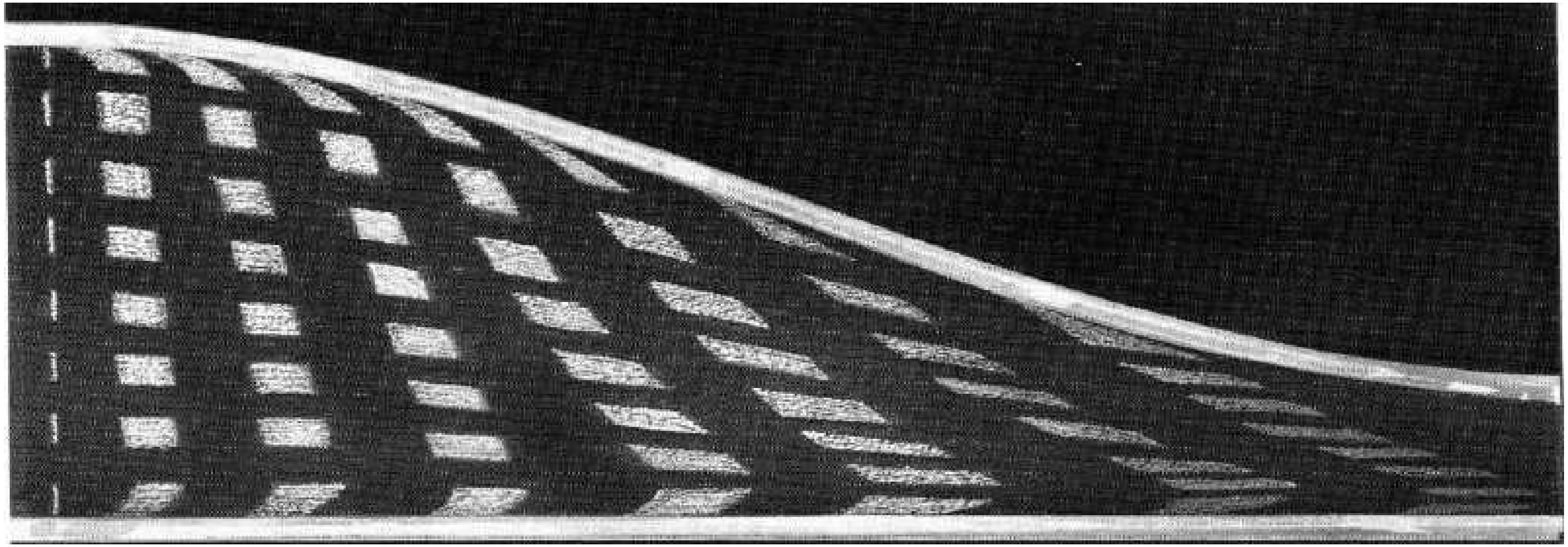
$$\left.\frac{dB}{dt}\right|_{SYS} \neq \left.\frac{\partial B}{\partial t}\right|_{CV} \equiv \frac{\partial}{\partial t}\iiint_{vc} \rho\,\beta\, d\forall$$

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

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

- **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 ; β = 1

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

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

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

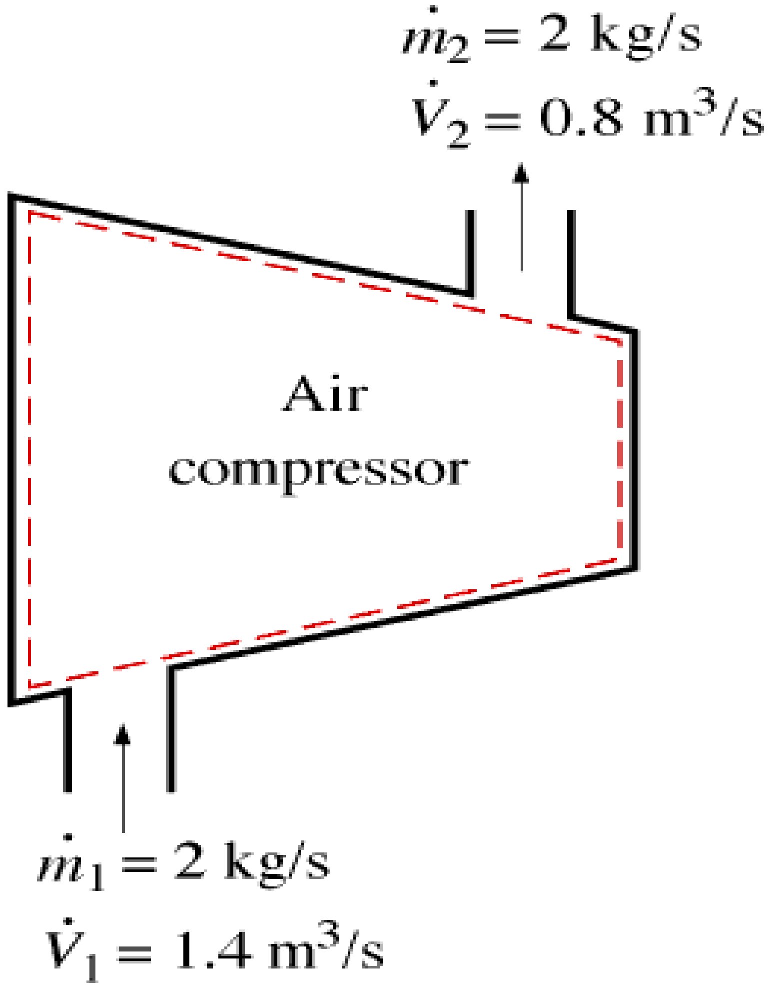
$$\frac{dm}{dt}\Big|_{sys} = \frac{\partial m}{\partial t}\Big|_{C.V.} + \underbrace{\sum \left(\rho VA\right)_{out}}_{\dot{m}_{out}} - \underbrace{\sum \left(\rho VA\right)_{in}}_{\dot{m}_{in}} = 0$$

Conservação de massa

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

Durante um processo a regime permanente, <u>fluxos de volumes</u> não são necessariamente conservados

- **Regime permanente**
- **Uma entrada**
- **Uma saída**



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

$$\dot{\forall}_1 \neq \dot{\forall}_2$$

- **Problema 5.9** **Um tanque recebe água através da válvula 1 com V_1 = 10ft/s e através da válvula 3 com Q_3 = 0.35 ft3/s. Determine a velocidade através da válvula 2 para manter o nível de água constante.**

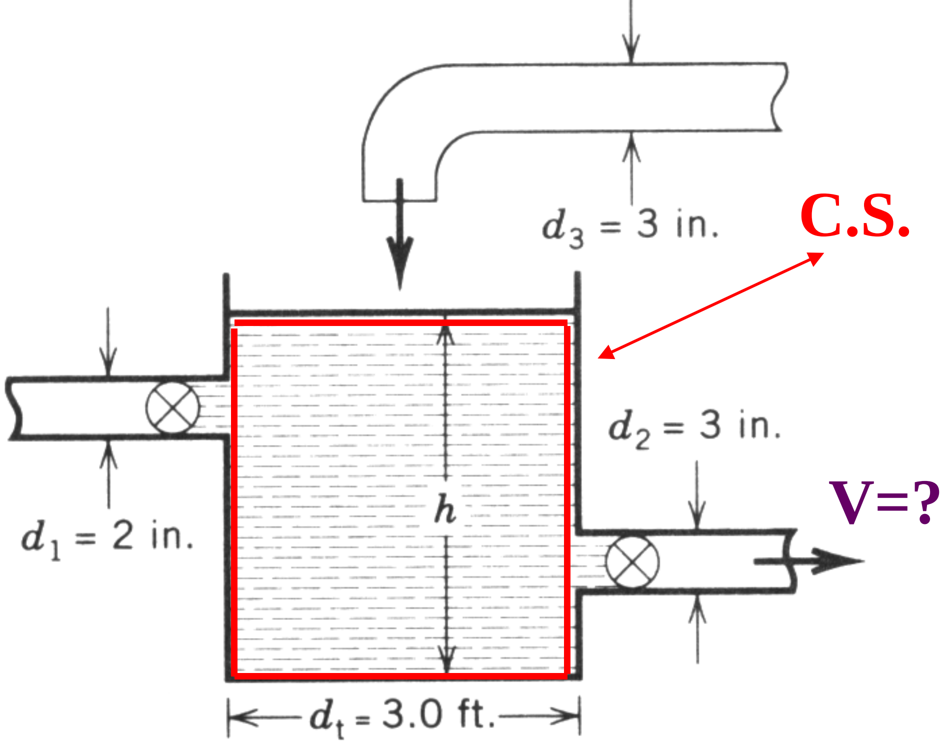


Figure P5-9 Water distribution tank.

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

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

Equação QDM, B=mV ; β = 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.**

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

Equação QDM, β = V,
(eq. Vetorial, 3 comp. Sistema Inercial)

Inserindo as forças externas,

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_{C.V.} \rho \vec{V}\, d\forall + \oiint_{C.S.} \rho \vec{V}\left(\vec{n}\cdot\vec{V}_r\right) dA = \iiint_{C.V.} \rho \vec{g}\, d\forall + \oiint_{C.S.} \left(-\vec{n}\cdot P\right) dA + \oiint_{C.S.} \left(\vec{n}\cdot\tau\right) dA$$

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

Equação QDM, β = 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**

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

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?

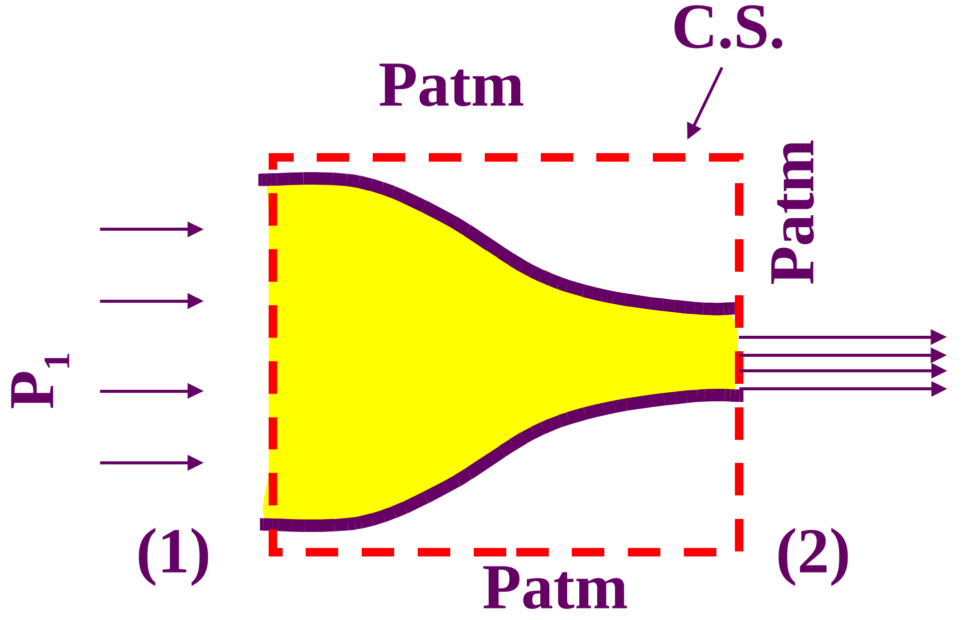
Por que ao acelerar a água aparece uma força de reação?

Bico com ajuste do diâmetro

100 Psi & 50 – 350 GPM

Força de reação: bico difusor (convergente)

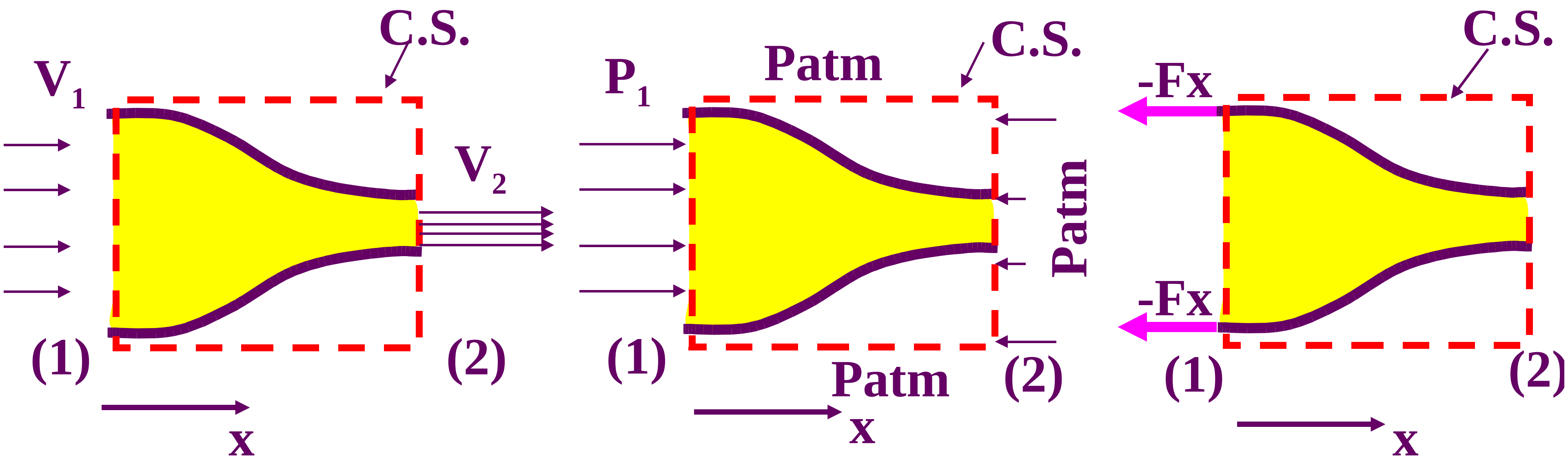
S.C. engloba o bico (sólido) + o fluido.
Sempre que a S.C. cruzar um sólido podemos ter forças mecânicas devido à reação.
Entrada e saída do bico possuem diâmetros d_1 e d_2



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)

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



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

$$F_{Bico}=-F_x$$

Equação da energia, B=E; β= 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.**

$$\left.\frac{dme}{dt}\right|_{sys} = \frac{\partial}{\partial t}\iiint_{C.V.} \rho\, e\, d\forall + \oiint_{C.S.} \rho\, e\, \left(\vec{n}\cdot\vec{V}_r\right) dA = \dot{Q} - \dot{W}$$

Equação da energia, B=E β= e, (escalar)

- **Aproximação: propriedades uniformes:**

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

- **As convensões 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:

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

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.:**

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

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

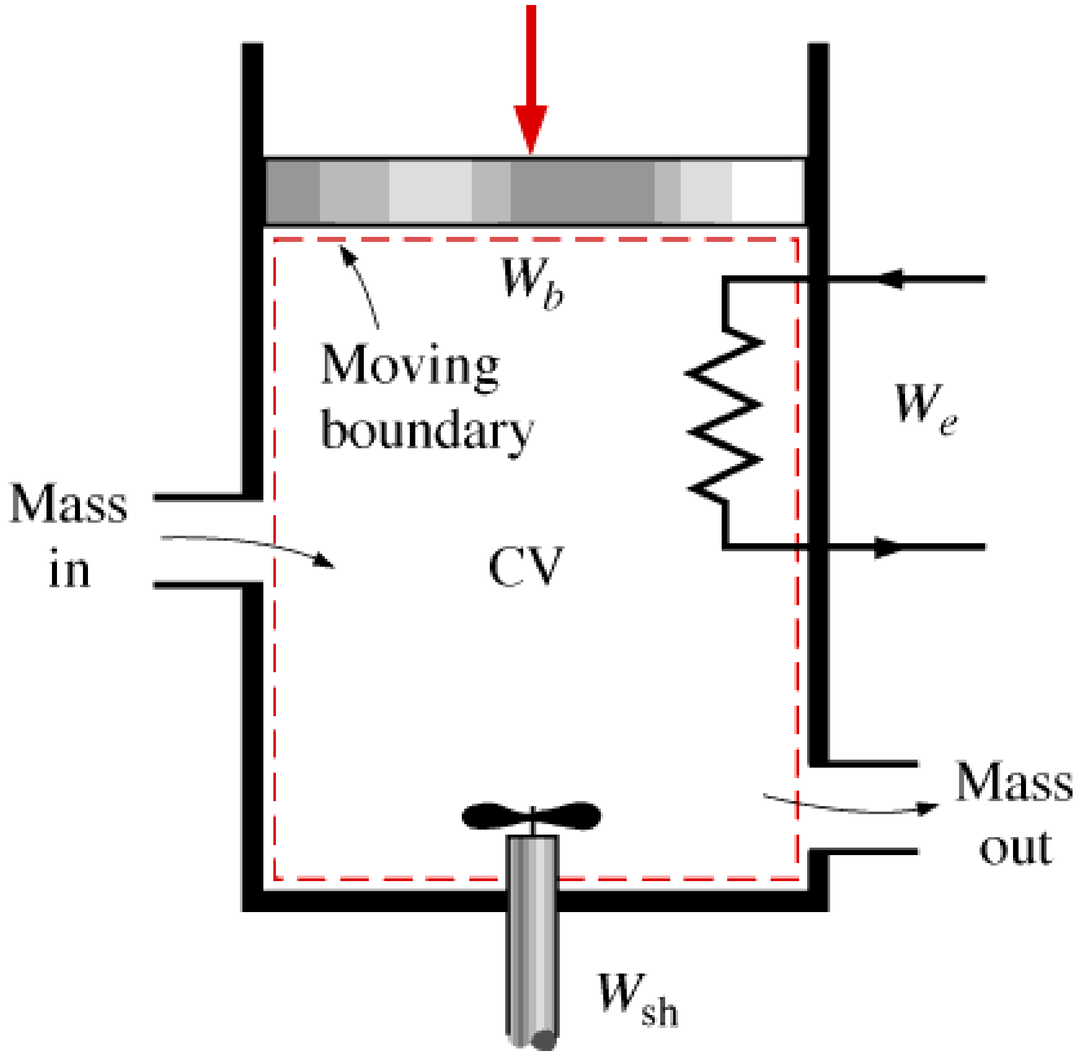
Consideraremos que a energia específica é a contribuição de:

- **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:

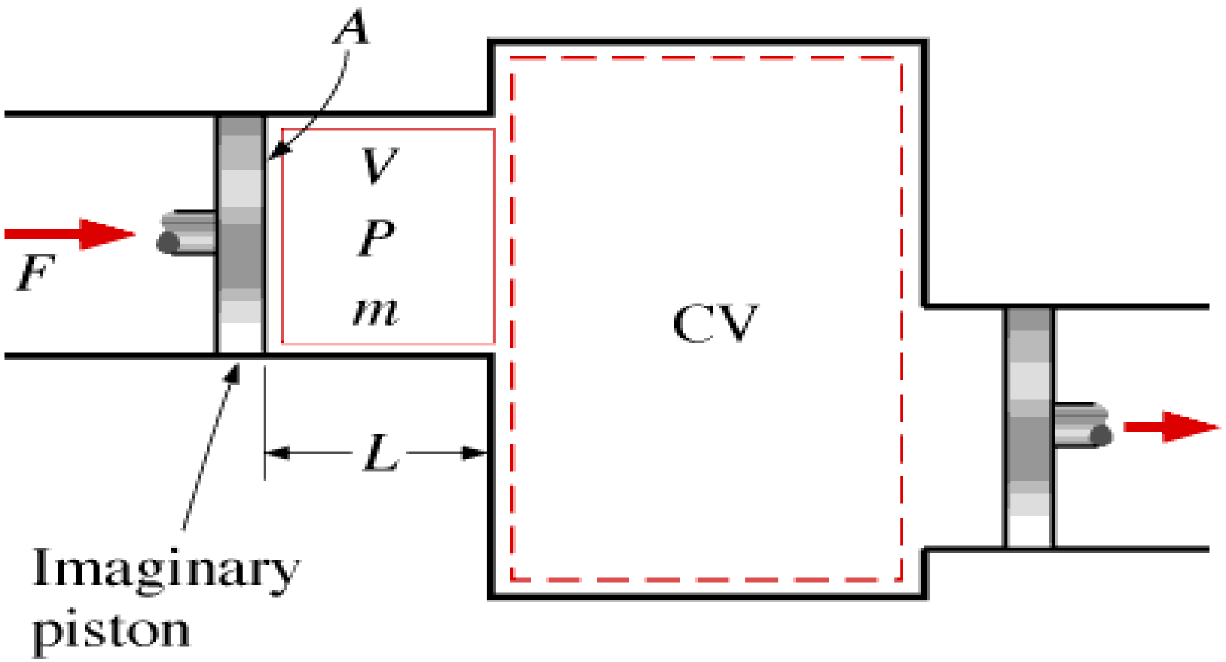
$$\dot{W} = \dot{W}_{\mathrm{FLOW}} + \dot{W}_{\mathrm{SHAFT}}$$

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

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

Esquema do trabalho devido ao fluxo

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



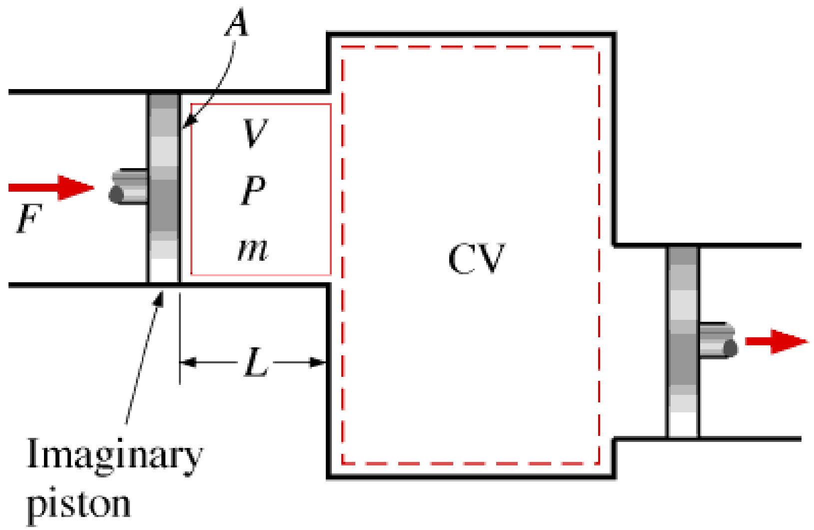
Esquema do trabalho devido ao fluxo

O trabalho de fluxo é : $$W_f = P\Delta V$$

e sua taxa: $$\dot{W}_f = P\frac{\partial(\Delta V)}{\partial t} = P\left(\vec{n}\cdot\vec{V}_r\right)A = \frac{P}{\rho}\dot{m}$$

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

h = u +P/ρ

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.:

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

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

Ou ainda em notação reduzida:

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

Equação da 2ª lei, B=S; β= s, (eq. escalar)

- Expressa o transporte de entropia pelo escoamento médio

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

Onde,

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

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

Equação da 2ª lei, β= s, (eq. escalar)

- **Para propriedades uniformes:**

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

Onde,

Q'' é o fluxo local de calor por unidade de área, [W/m^2]

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