Análise da 1ª e 2ª leis para um V.C.

Equação da Energia: Regime Permanente

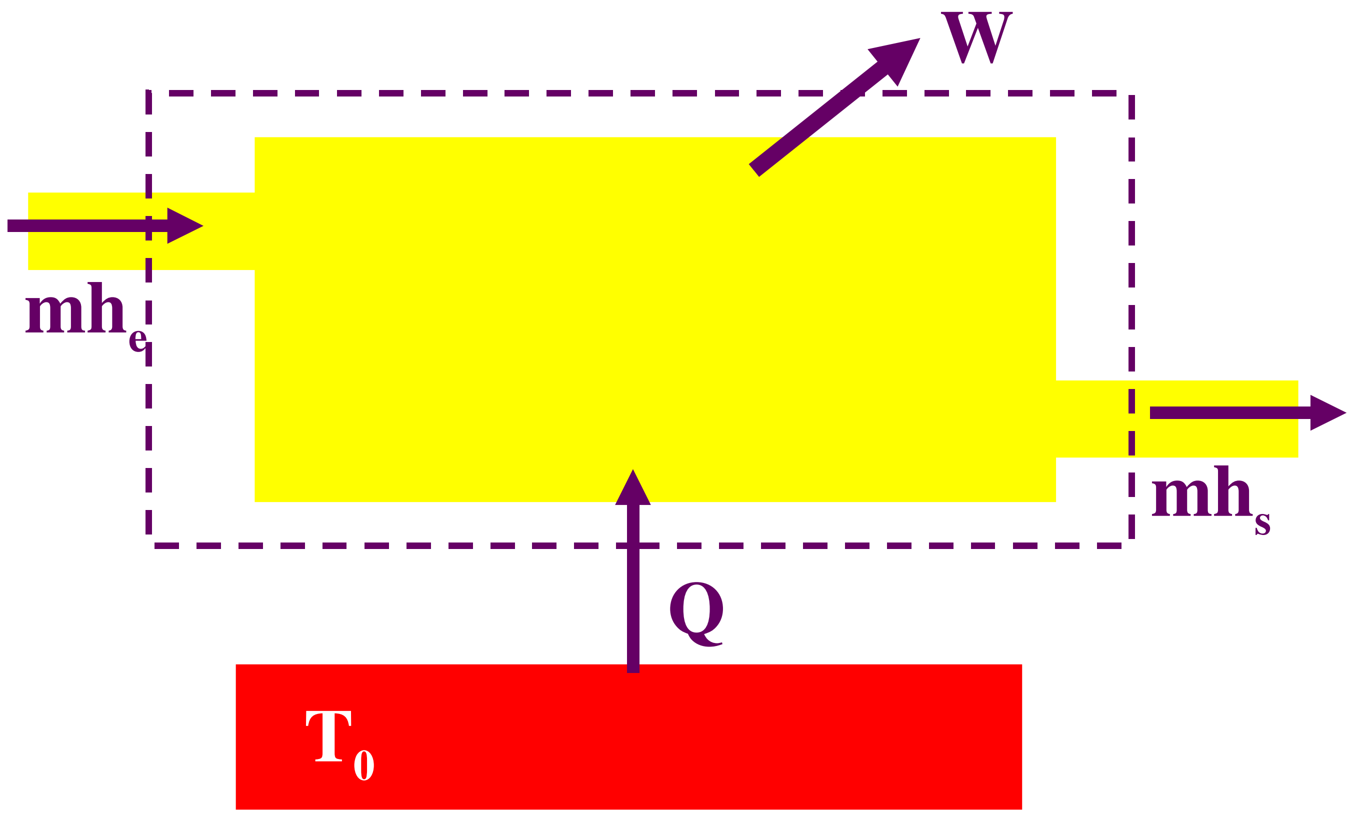
$$-\sum\left[\left(u+\frac{V_I^2}{2}+gz+\frac{P}{\rho}\right)\dot{m}\right]_{IN}+\sum\left[\left(u+\frac{V_I^2}{2}+gz+\frac{P}{\rho}\right)\dot{m}\right]_{OUT}=\dot{Q}-\dot{W}_{shaft}$$

- **Considere o V.C. com duas portas (uma entrada / uma saída)**
- **Expressando em função do <u>calor e trabalho específicos</u> (dividindo por $\dot{m}$):**

$$\left(\frac{V_I^2}{2}+gz+\underbrace{u+\frac{P}{\rho}}_{h}\right)_{\mathrm{OUT}}-\left(\frac{V_I^2}{2}+gz+\underbrace{u+\frac{P}{\rho}}_{h}\right)_{\mathrm{IN}}=q-w_{shaft}\quad\left[\frac{\mathrm{Joules}}{\mathrm{kg}}\right]$$

Caso Estudo

- **Aplicação de um balanço de energia para dispositivos que operam com fluxo de energia (entalpia), produzem trabalho e trocam calor com um reservatório a T_0**



Qual Tipo de Máquina Opera da Maneira do Caso de Estudo?

- **Turbinas a vapor,**
- **Turbinas a gás,**
- **Compressores,**
- **Escoamento em tubulações,**
- **e qualquer outro tipo de processo que envolve transporte de uma propriedade**

Turbina a vapor ATP 4 - ABB

Output range up to 100 MW

Live steam conditions:

Temperature up to 540 °C

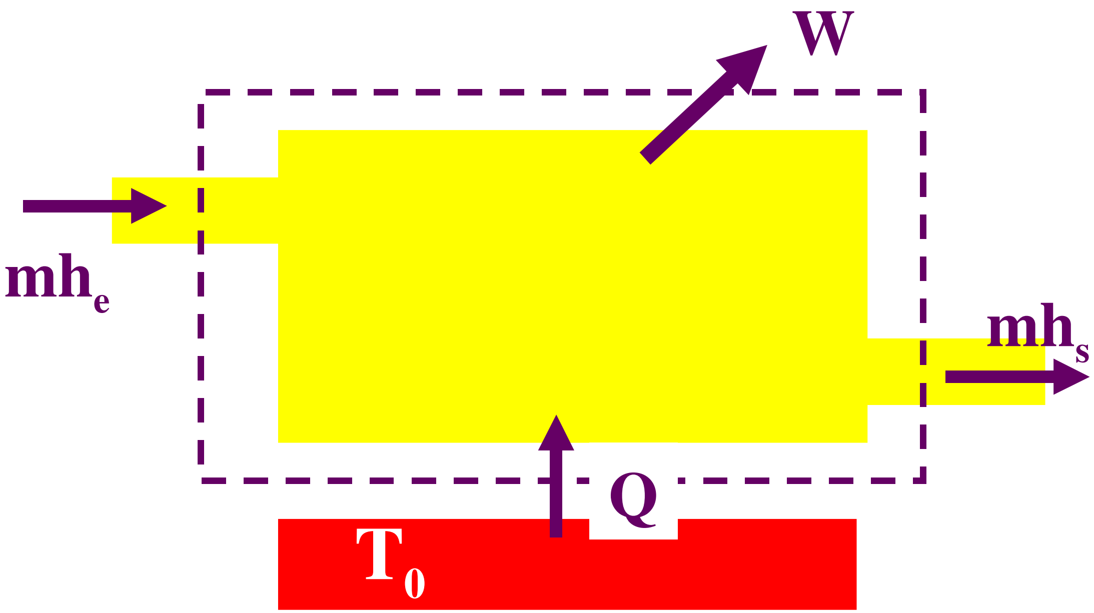
Pressure up to 140 Bar

Exhaust steam conditions:

3-16 Bar/300 °C

Condensing 0,03 - 0,25 Bar

Identifique os fluxos para a Turbina Adiabática



Adiabática, $Q = 0$

A fonte a T_0 não troca calor e portanto não é necessária

$$w = (h_1 - h_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2}$$

Modelagem: se considerarmos entropia cte...

A entropia do sistema é constante durante um processo reversível adiabático

Isoentrópico

$$s_2 = s_1$$

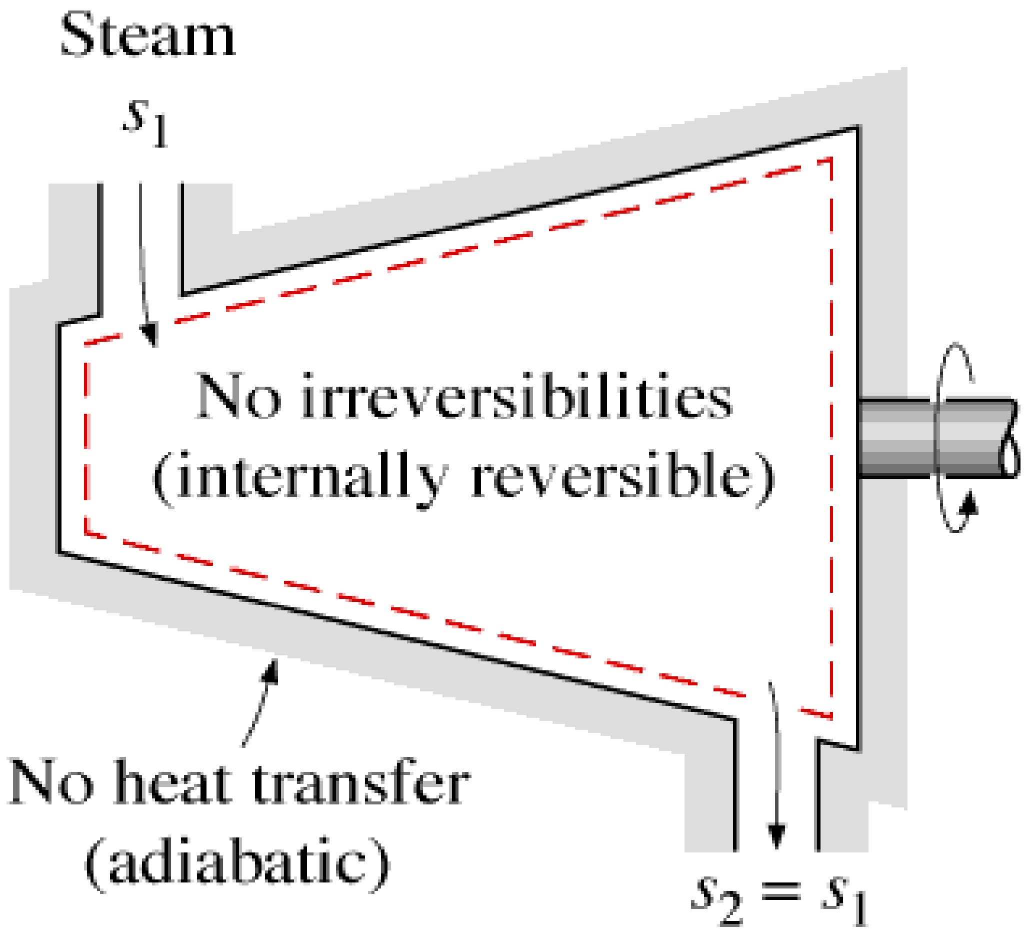
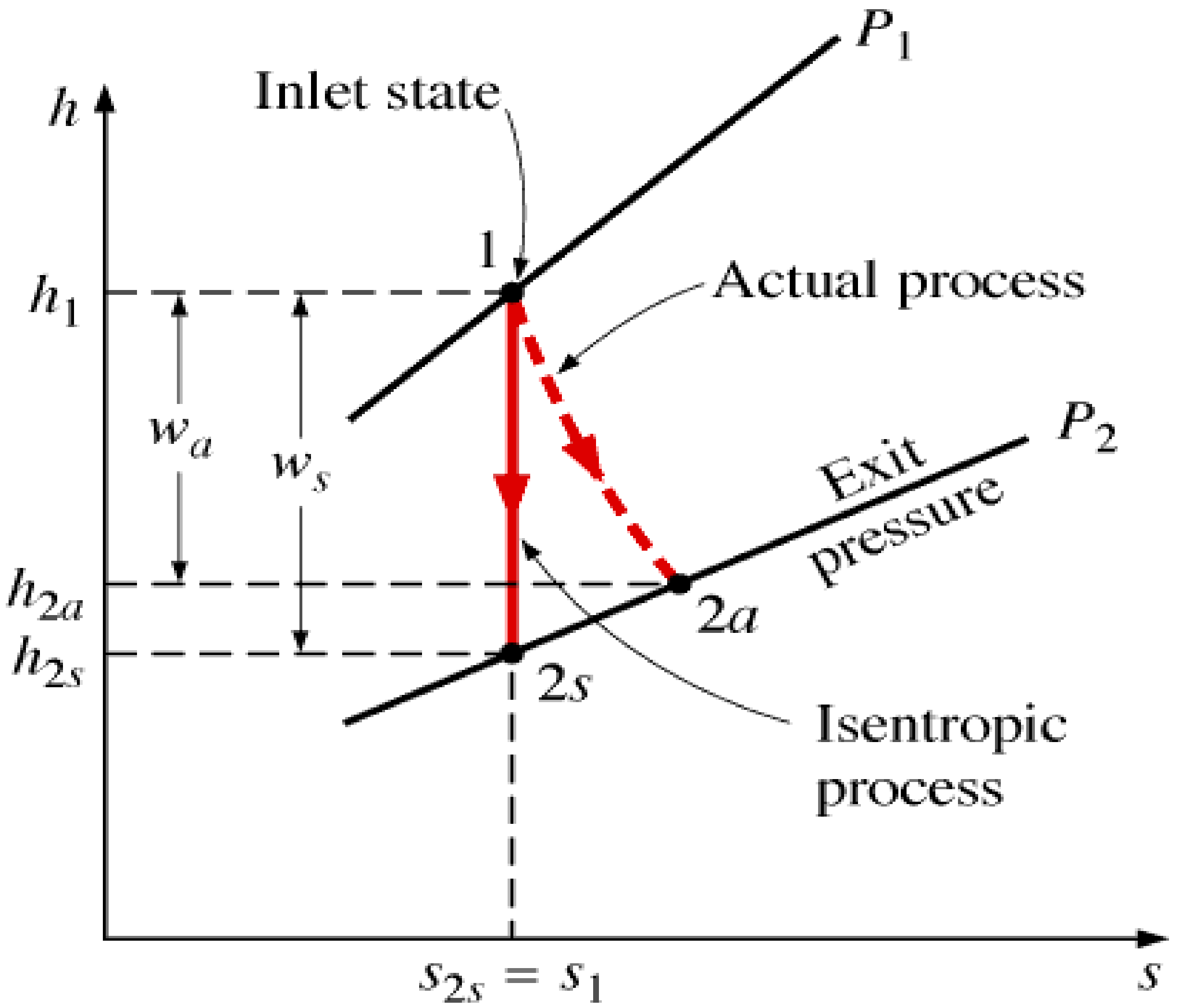
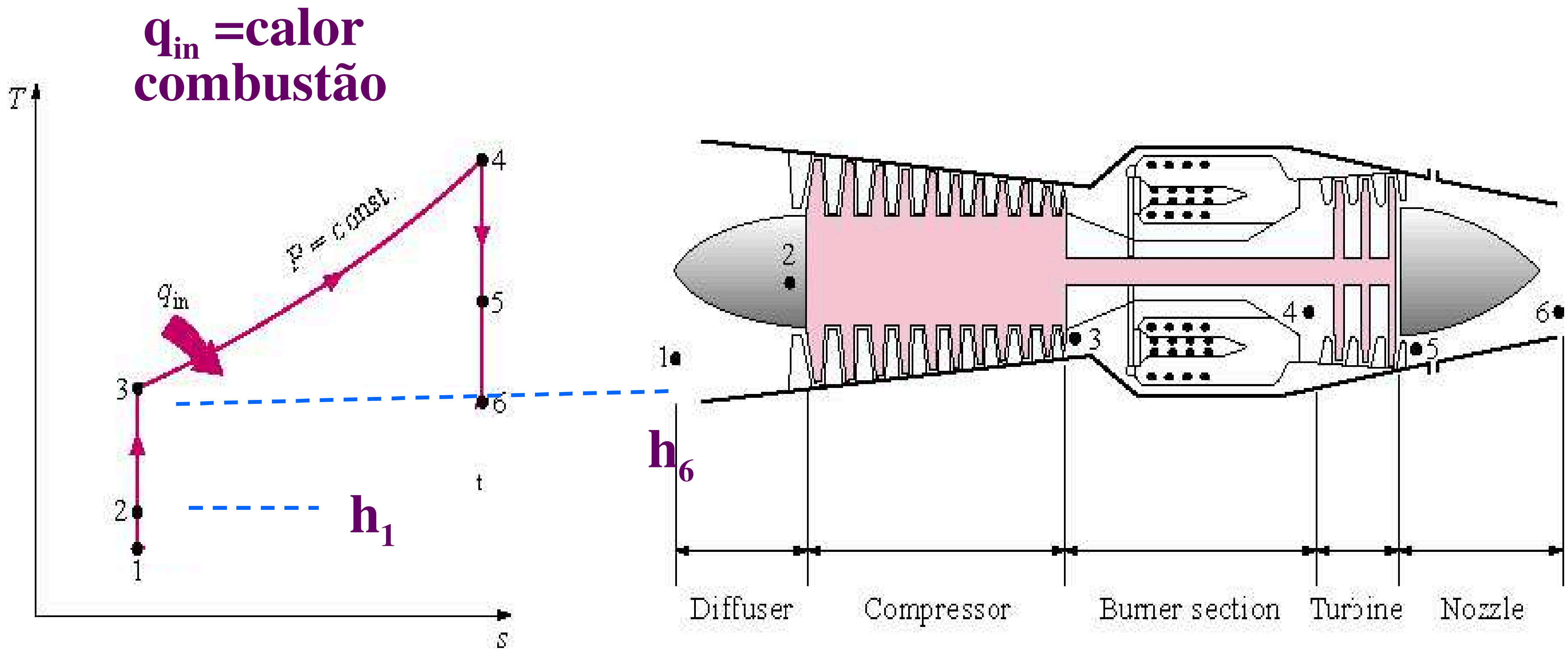


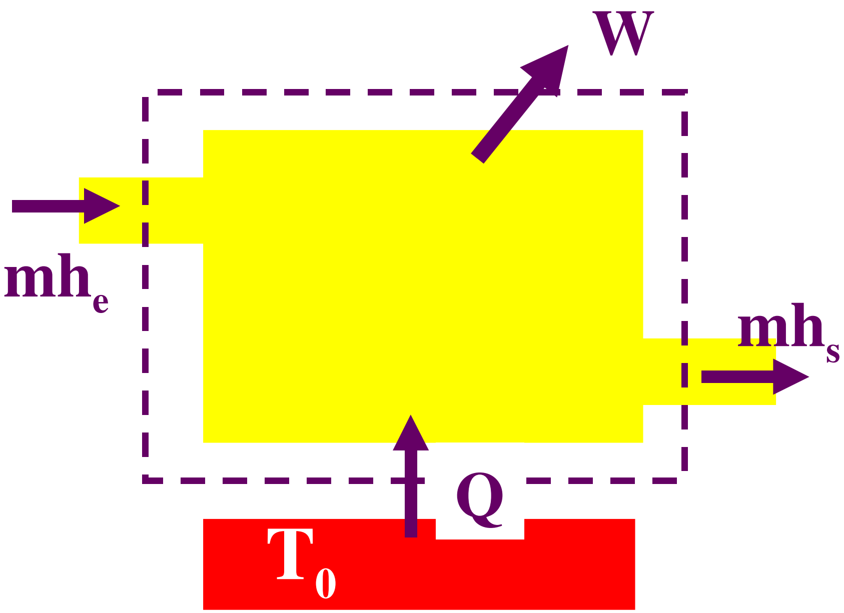
Diagrama h-s para uma turbina adiabática



Componentes básicos e diagrama T-s de um turbojato ideal.



Identifique os fluxos para um Motor a Jato

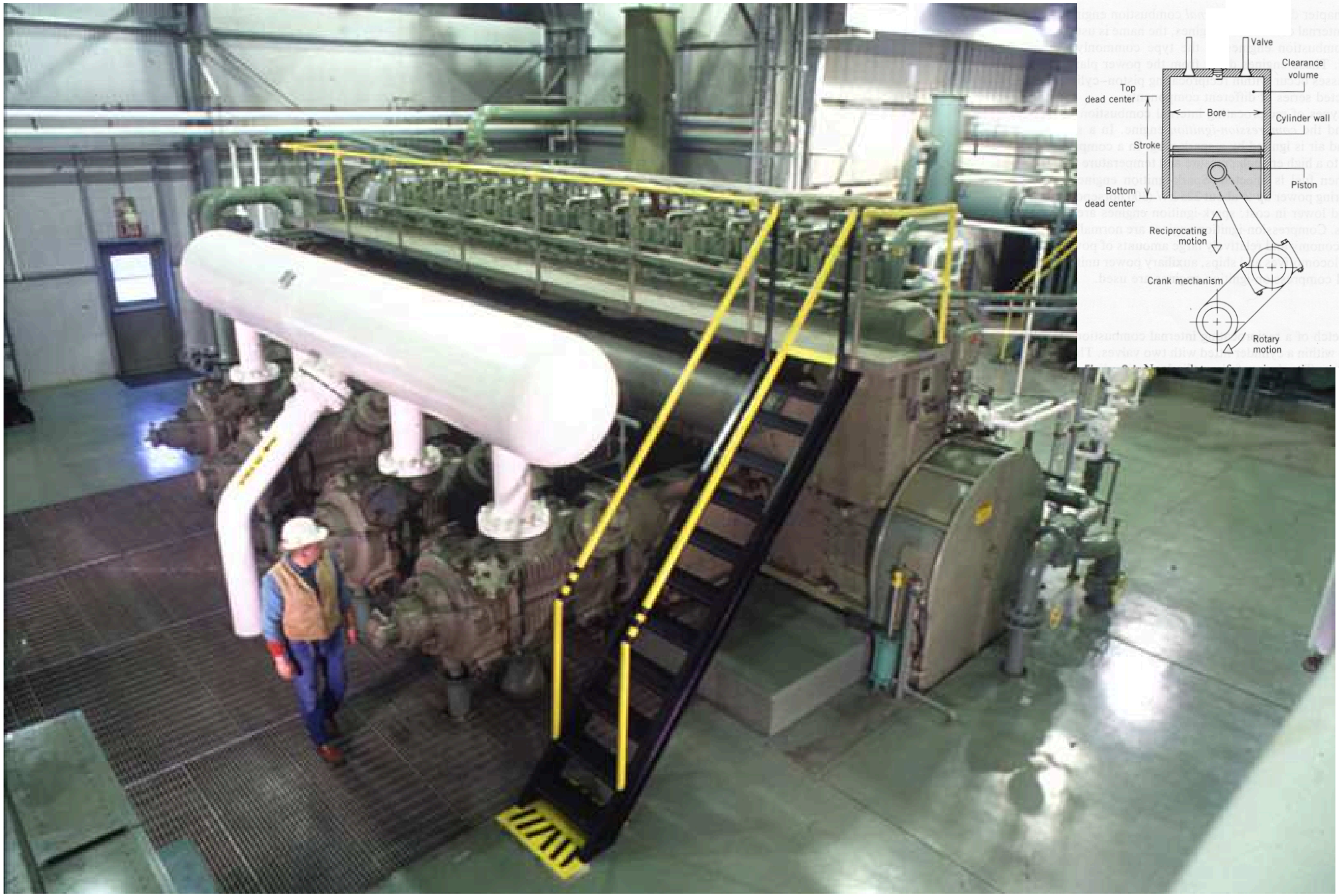


- **Há adição de calor a pressão constante pela queima do combustível.**

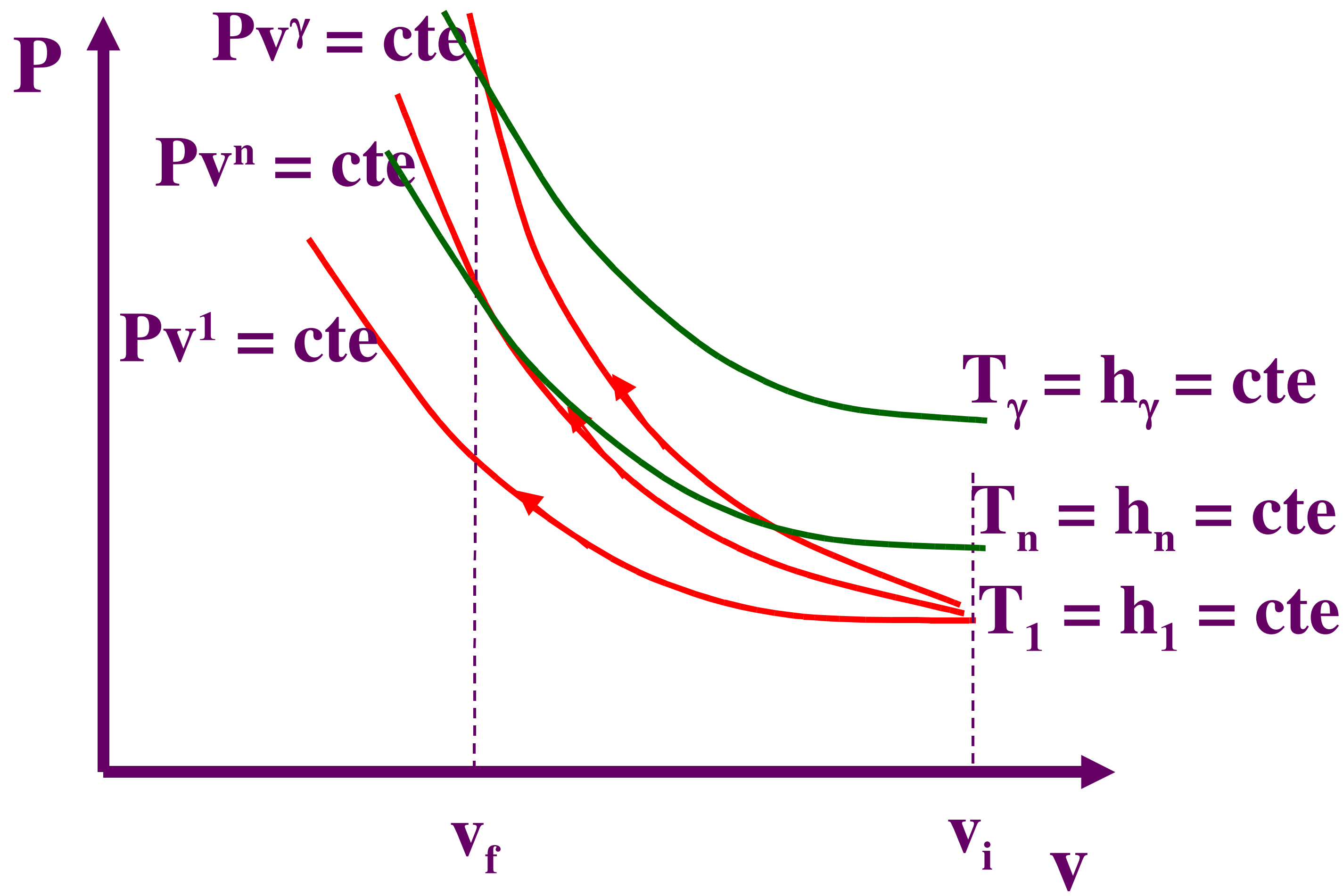
- **A temperatura T_0 é a temperatura da câmara de combustão**

$$w = q + (h_1 - h_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2}$$

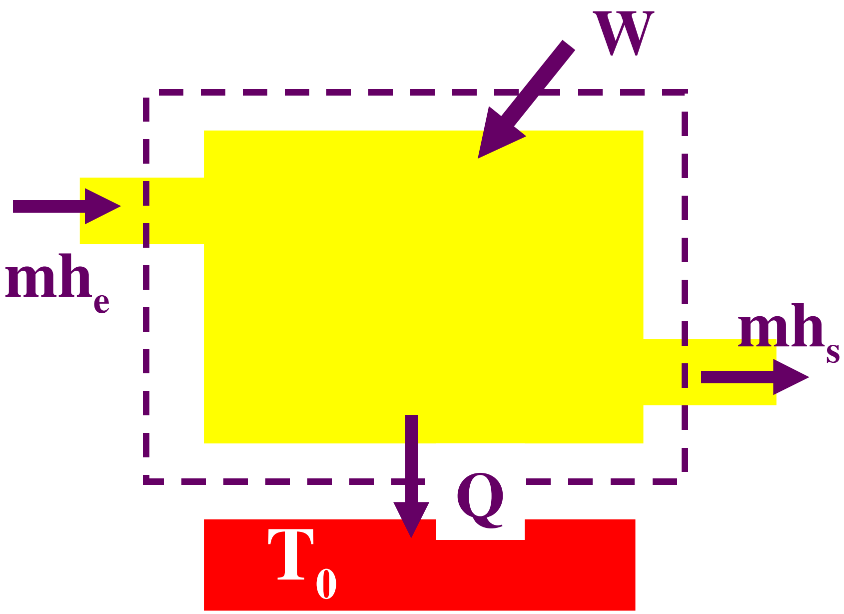
Compressores de Deslocamento Positivo



Compressor e o Diagrama P-v para um processo reversível



Identifique os fluxos para um Compressor



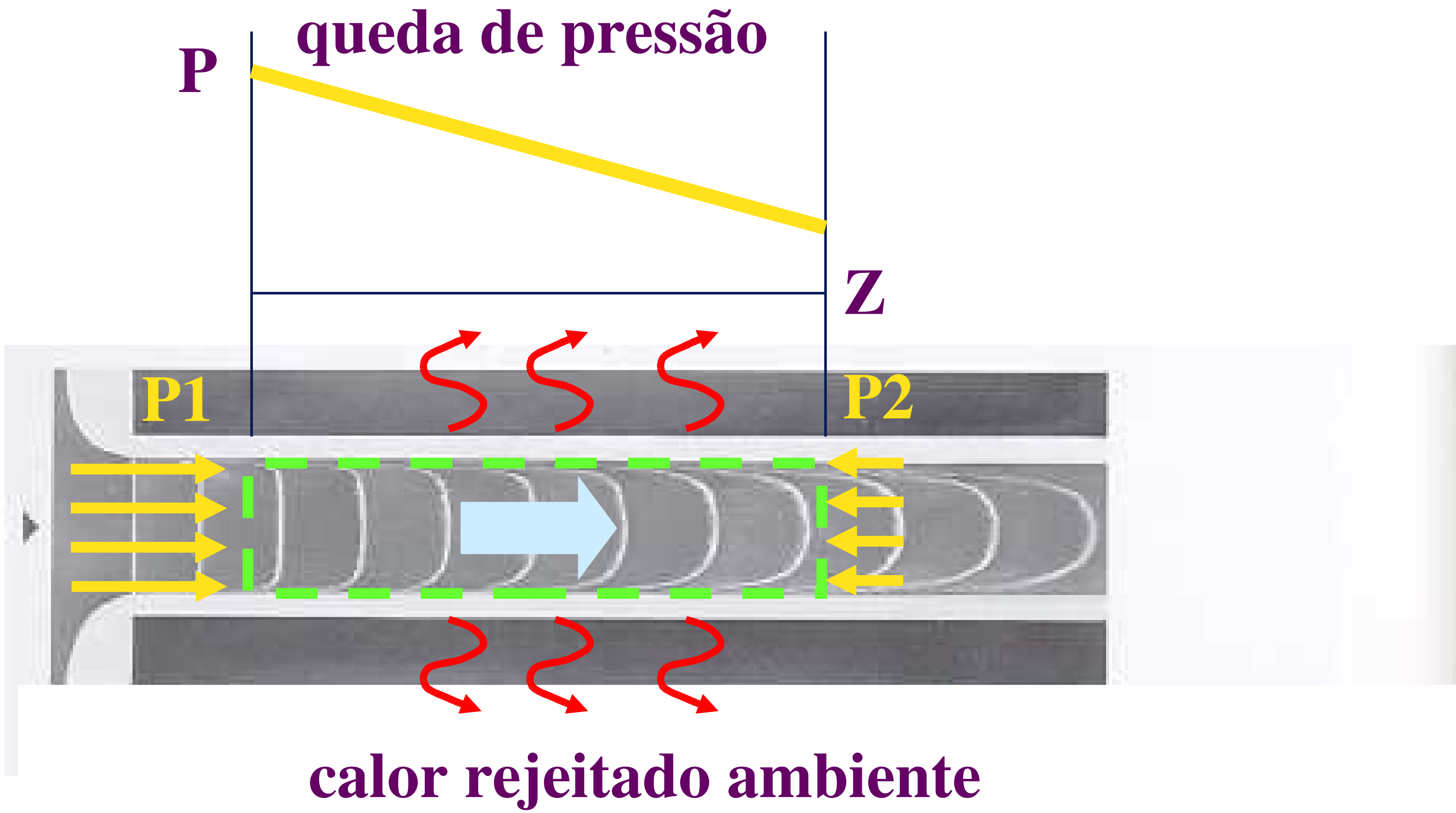
- **O compressor rejeita calor para o ambiente.**

- **A temperatura T_0 é a temperatura do ambiente**

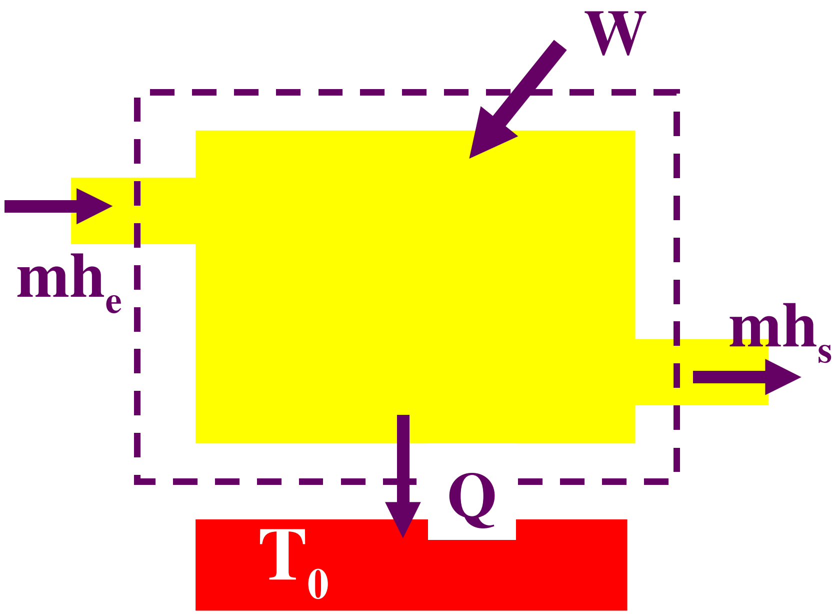
- **Em geral $V_1 = V_2$**

- **1ª lei: $w = q - (h_2 - h_1)$**

Escoamento Incompressível e Isotérmico em Tubulações



Identifique os fluxos para a Tubulação



- O v.c. não realiza nem recebe trabalho

- O atrito do fluido nas paredes é transformado em calor (irreversibilidade).

- A temperatura T_0 é a temperatura do ambiente

- 1ª lei: $0 = q - (hs - he)$
- Se Δu é despr.: $q = \Delta p/\rho$

Onde Chegamos Até Agora?

- **A 1ª lei expressa o balanço de energia, isto é, se conhecermos dois dos termos envolvidos poderemos determinar o terceiro.**
- **É interessante estabelecer limites e sentido das transformações,**
- **<u>Com limites</u> se estabelece padrões de comparação com processos reais,**
- **<u>Com o sentido</u> pode-se saber se tal processo pode ocorrer ou não**

Como Estabelecer o Máximo/Mínimo Trabalho/Calor que se Pode Extrair/Necessitar?

Como Determinar se um Processo Pode ou Não Ocorrer?

Utilizando a 2ª lei que envolve os conceitos de processos reversíveis e irreversíveis e geração de entropia

2ª Lei V.C. & Regime Permanente

- A 1ª lei expressa o balanço de energia, a 2ª lei indica o sentido da transformação.

$$\left(\dot{m}\,s\right)_{out}-\left(\dot{m}\,s\right)_{in} \;=\; \frac{\dot{Q}}{T_0}+\dot{S}_{gen}$$

- Vamos expressar o calor em função da 2ª lei:

$$q=T_0\left[\left(s\right)_{out}-\left(s\right)_{in}\right]-T_0\,s_{gen}$$

- *OOps*, o que é mesmo T_0? É a temperatura do reservatório térmico onde o processo troca calor
- O que de especial tem $T_0 s_{gen}$? Este termo é sempre MAIOR ou IGUAL a zero.

1ª e 2ª Lei Combinadas, Limite Trabalho

Substituindo a expressão do calor da 2ª lei na primeira lei e isolando o termo de trabalho chega-se a:

$$w_{shaft} = \left(\underbrace{\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s}_{b} \right)_{\mathrm{IN}} - \left(\underbrace{\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s}_{b} \right)_{\mathrm{OUT}} - T_0 S_{gen}$$

Como $T_0 S_{gen} \geq 0$, a 2ª lei estabelece um limite superior para o trabalho

$$w_{shaft} \leq \left(\underbrace{\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s}_{b} \right)_{\mathrm{IN}} - \left(\underbrace{\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s}_{b} \right)_{\mathrm{OUT}}$$

1ª e 2ª Lei Combinadas: Conclusões

O maior trabalho produzido ocorre para processos reversíveis. Neste caso, S_{gen}=0.

$$w_{real} \leq w_{rev}$$

Pode-se definir a eficiência do processo utilizando w_{rev} como referência:

$$\eta_{processo} = \frac{w_{real}}{w_{rev}}$$

1ª e 2ª Lei Combinadas: O que significa ´*b*´?

- ***b*** **é uma variável termodinâmica denominada por ´EXERGIA´**
- **Para ΔPE = ΔKE = 0: b = (u+pv-T_0s) = (h-T_0s)**
- **O trabalho máximo que se pode extrair num processo é igual a variação de exergia:**

$$w_{\max} = w_{rev} = \left(b\right)_{\mathrm{IN}} - \left(b\right)_{\mathrm{OUT}}$$

b **também é conhecido por *´disponibilidade´* (availiability).**

Trabalho Reversível p/ V.C.

- O termo de trabalho que aparece exclui o trabalho de fluxo.

- Ele representa os outros modos de trabalho (usualmente executados por meio de um eixo)

$$w_{rev} = \left(h - T_0 s\right)_{in} - \left(h - T_0 s\right)_{out}$$

Trabalho Reversível p/ V.C.

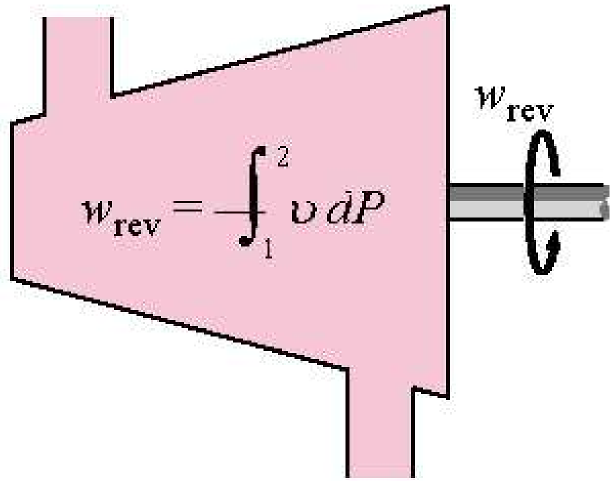
Um processo reversível, $T_0 ds = dh - vdP$.
Integrando do estado (out) – (in) temos que:

$$\int_{in}^{out} vdP = \int_{in}^{out} dh - T_0 \int_{in}^{out} ds \equiv \left(h - T_0 s\right)_{out} - \left(h - T_0 s\right)_{in}$$

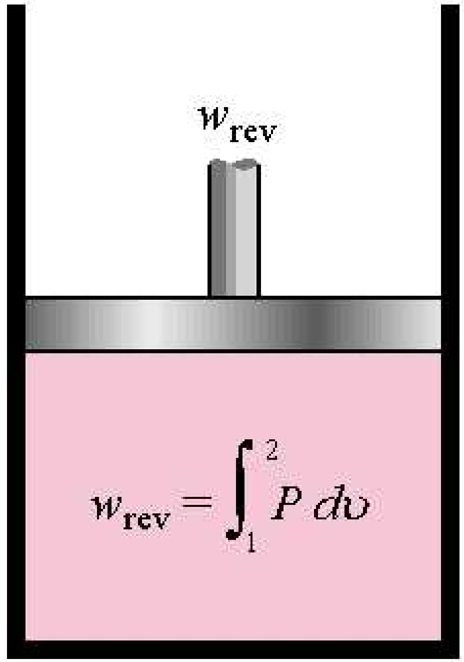
Substituindo na expressão do trabalho reversível, tem-se que para um V.C.:

$$w_{rev} = -\int vdP$$

Relações de trabalho reversível para regime permanente e sistemas fechados



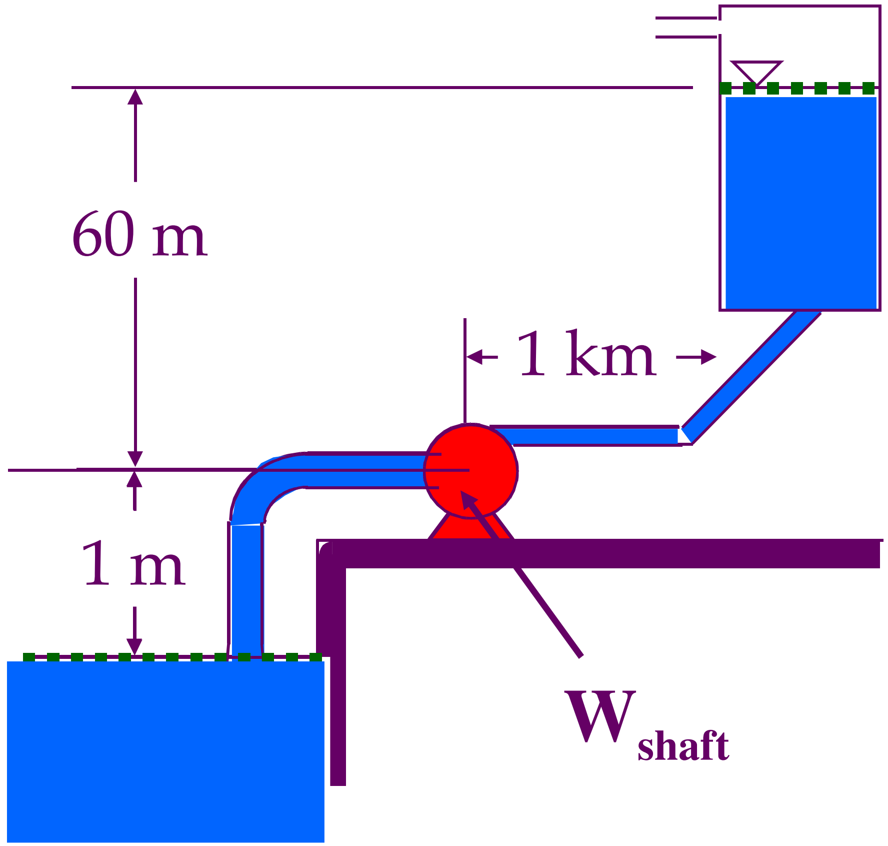
(a) Steady-flow system



(b) Closed system

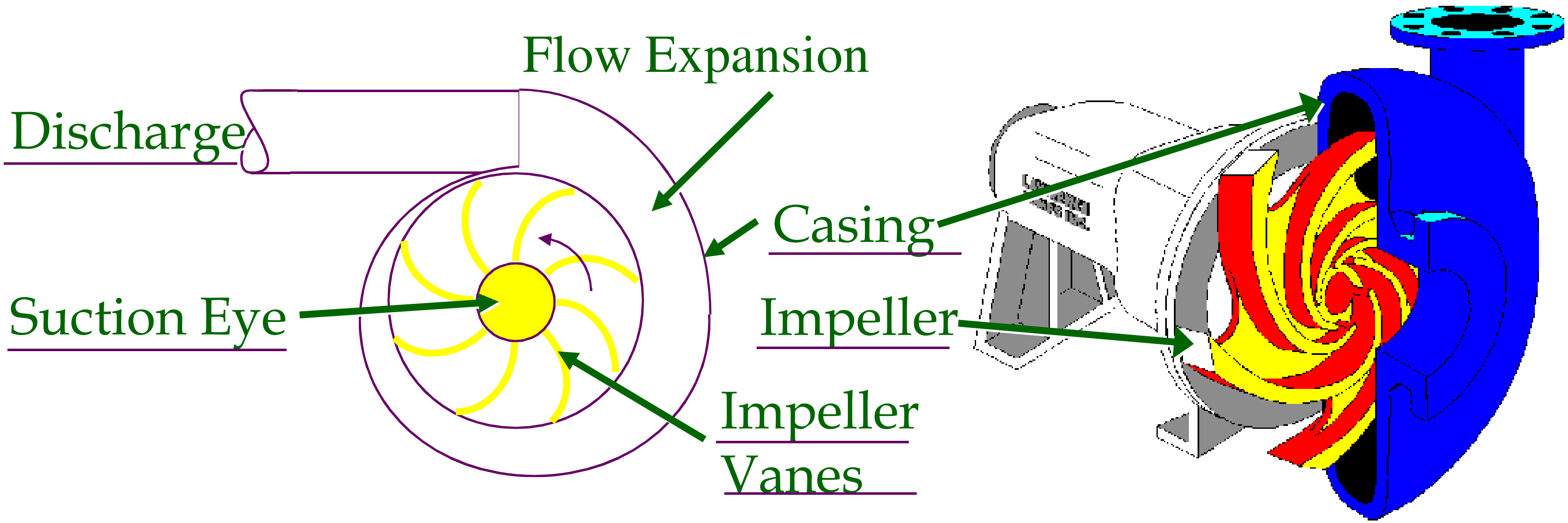
CASO ESTUDO:
ELEVAÇÃO DE FLUIDO

Dadas as alturas entre reservatórios e o diâmetro da tubulação, deseja-se determinar a potência da bomba para transferir um volume de fluido por unidade de tempo



Como é uma bomba?

- **Elas também são chamadas de bombas centrífugas**
- **Possuem uma grande faixa de pressão e vazão de operação**
- **Pressões elevadas são atingidas com o aumento da rotação ou do diâmetro do rotor.**



ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES

Uma instalação típica possui:

- **Uma bomba que transfere trabalho de eixo para o fluido**
- **O fluido é bombeado de um reservatório baixo para outro elevado**
- **O processo normalmente ocorre com pouca transferência de calor**
- **Há perdas do trabalho transferido pela bomba ao fluido que se traduzem na redução da capacidade de elevação ou na queda de pressão**

ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES

- **Vamos isolar os termos associados ao trabalho mecânico daqueles associados ao calor:**

$$w_{shaft} = \underbrace{\left(\frac{V_I^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho}\right)_{\mathrm{IN}} - \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho}\right)_{\mathrm{OUT}}}_{\text{TERMOS MECÂNICOS}}$$

$$+ \underbrace{\left(u - T_0 s\right)_{IN} - \left(u - T_0 s\right)_{OUT} - T_0 S_{gen}}_{\text{TERMOS TÉRMICOS}}$$

TERMOS MECÂNICOS x TÉRMICOS

- O trabalho de eixo transfere energia às parcelas dos termos mecânicos e térmicos
- <u>PORÉM</u> a conversão entre os termos mecânicos e térmicos não é reversível
- Toda energia mecânica pode ser convertida em térmica nas não ocorre no sentido inverso

$$V^2/2 \rightleftarrows gz \rightleftarrows P/\rho$$

MECÂNICOS

$$\text{MECÂNICOS} \longrightarrow \text{TÉRMICOS}$$

$$u \rightleftarrows T_0 s \rightleftarrows T_0 s_{gen}$$

TÉRMICOS

OS TERMOS TÉRMICOS

- **Uma parcela da energia mecânica é convertida nos termos térmicos de forma irreversível**

$$w_{irr} = \underbrace{\left(u - T_0 s\right)_{IN} - \left(u - T_0 s\right)_{OUT} - T_0 S_{gen}}_{\text{TERMOS TÉRMICOS}} \leqslant 0$$

$$w_{shaft} = \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho}\right)_{\text{IN}} - \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho}\right)_{\text{OUT}} + w_{\text{irr}}$$

- **O papel da bomba é transferir energia para os termos mecânicos e também para as irreversibilidades.**

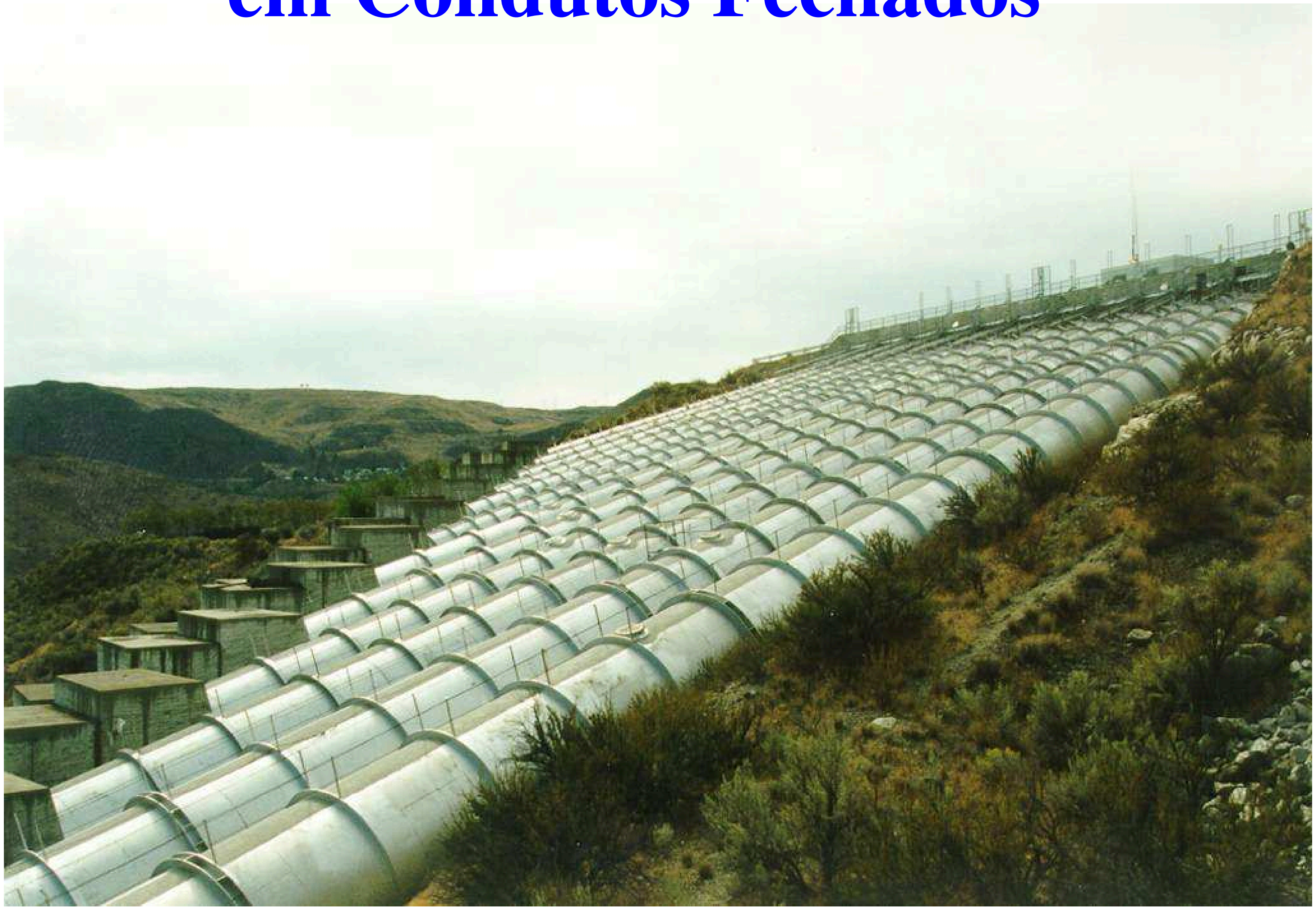
Equação em Termos da Altura

- **É usual expressar estas energias em termos de altura equivalente h (basta fazer eq./g). Como $w_{irr} \leq 0$, é comum utilizar:**

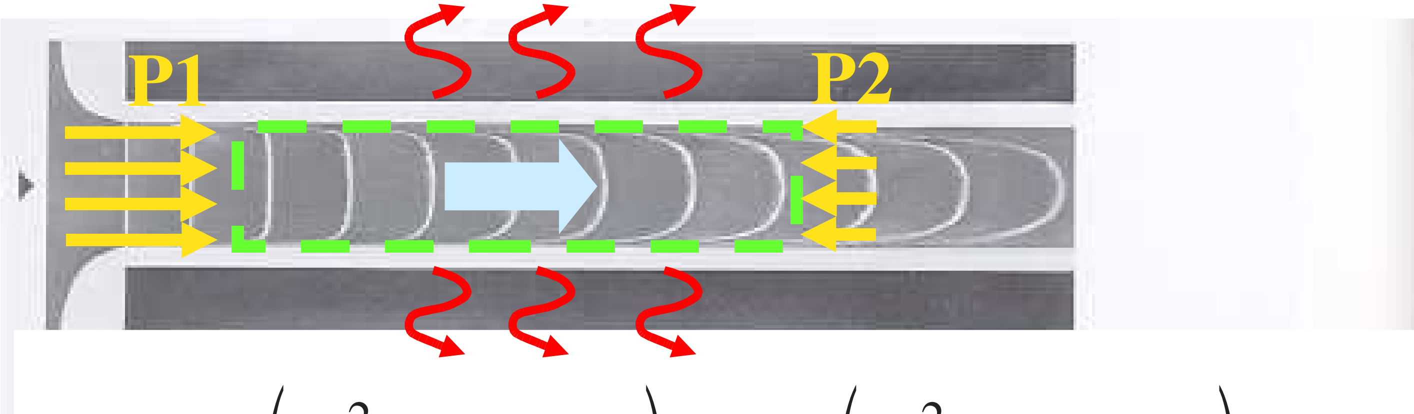
$$h_{irr} = \frac{-w_{irr}}{g}$$

$$\frac{w_{shaft}}{g} = \left(\frac{V_I^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} \right)_{\mathrm{IN}} - \left(\frac{V_I^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} \right)_{\mathrm{OUT}} - h_{\mathrm{irr}}$$

Escoamento em Condutos Fechados



Escoamento numa Tubulação



$$\frac{w_{shaft}}{g} = \left(\frac{V_I^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g}\right)_{\mathrm{IN}} - \left(\frac{V_I^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g}\right)_{\mathrm{OUT}} - h_{\mathrm{irr}}$$

- $\mathbf{w_{shaft} = 0,\quad V_{in} = V_{out},\quad z_{in} = z_{out}}$
- **Quem supre as irreversibilidades é a diferença de pressão:**

$$\left(\frac{P}{\rho g}\right)_{\mathrm{IN}} - \left(\frac{P}{\rho g}\right)_{\mathrm{OUT}} = h_{\mathrm{irr}} \qquad \rightarrow \qquad \boxed{\Delta P = \rho\, g\, h_{irr}}$$

Escoamento numa Tubulação

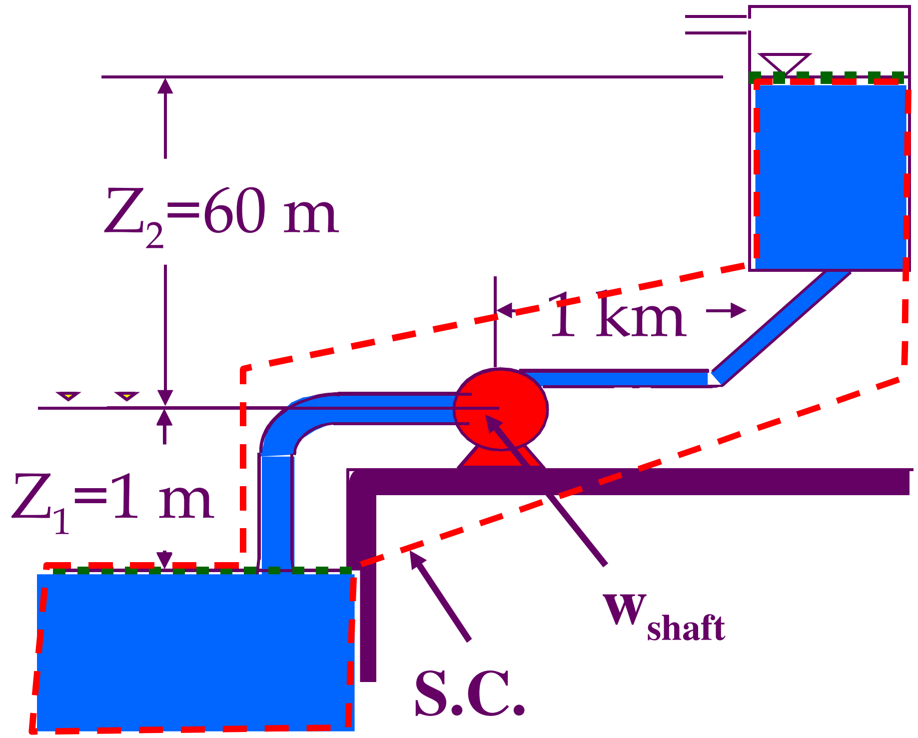
- **A queda de pressão é proporcional a altura equivalente das perdas (irreversibilidades)**

$$\Delta P = \rho \; g \, h_{irr}$$

- **Isto é, para passar uma determinada vazão pela tubulação ela necessita de um ΔP para suprir as irreversibilidades,**
- **Será visto no Cap. 6 como estimar h_{irr}.**

$$h_{irr} \sim V^2$$

Qual é a potência necessária para bombear uma vazão Q?



Considerações:

- **D reserv. >> d tubulação**
- **Vel. Reserv. ~ 0**
- **h_{irr} representa uma altura equivalente das perdas da en. mecânica**

$$1.\Rightarrow \quad \frac{w_{shaft}}{g} = \left(V_I^2/2g + z + P/\rho g\right)_{IN} - \left(V_I^2/2g + z + P/\rho g\right)_{OUT} - h_{irr}$$

$$2.\Rightarrow \quad \frac{w_{shaft}}{g} = \left(0 + Z_1 + P_{atm}/\rho g\right)_{IN} - \left(0 + Z_2 + P_{atm}/\rho g\right)_{OUT} - h_{irr}$$

$$3.\Rightarrow \quad \frac{w_{shaft}}{g} = \left(Z_1 - Z_2 - h_{irr}\right) \quad \rightarrow \dot{W} = \dot{m}\, g \left(Z_1 - Z_2 - h_{irr}\right)$$

BERNOULLI: *UM CASO ESPECIAL*

Considere um processo:

- ***Reversível:*** $s_{gen} = 0$
- ***Sem Transf. de Calor:*** $s_{in} = s_{out}$
- ***Sem realização de trabalho:*** $w_{shaft} = 0$

O que restou da Equação da Energia?

$$\left(\frac{V_I^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho}\right)_1 = \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho}\right)_2$$

EQUAÇÃO DE BERNOULLI

Primeira solução que relaciona campo de velocidade com campo de pressão.

$$\left(\frac{V_I^2}{2}+gz+\frac{P}{\rho}\right)_1 = \left(\frac{V_I^2}{2}+gz+\frac{P}{\rho}\right)_2$$

- **Ela estabelece a conservação da energia mecânica entre dois pontos do escoamento.**

- **Há uma conversão reversível entre os termos de energia potencial, de campo e de pressão**

EQUAÇÃO DE BERNOULLI

Primeira solução que relaciona campo de velocidade com campo de pressão.

P_T é constante em (1) e (2)

$$V_2 = [\, 2\,(P_T - P_2)/\rho\,]^{0.5}$$

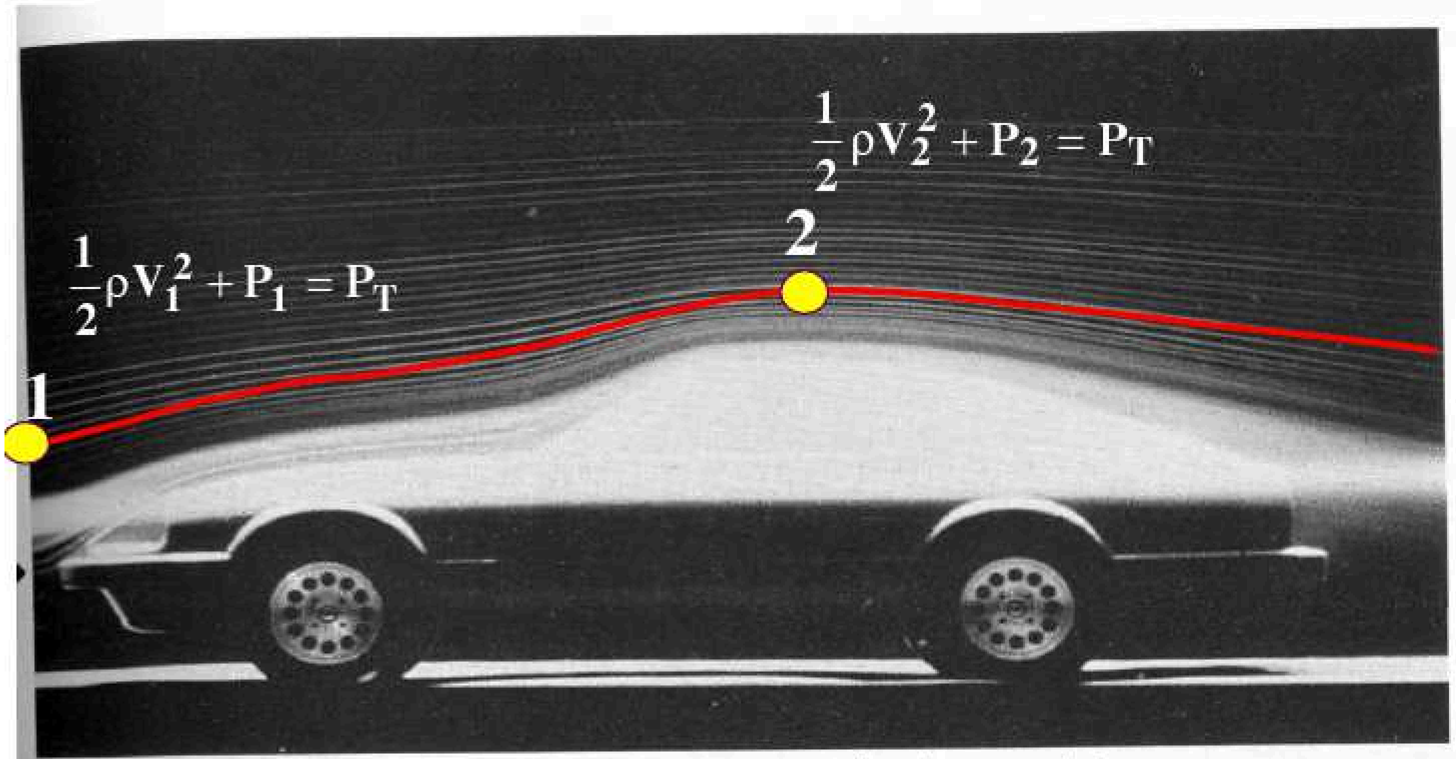
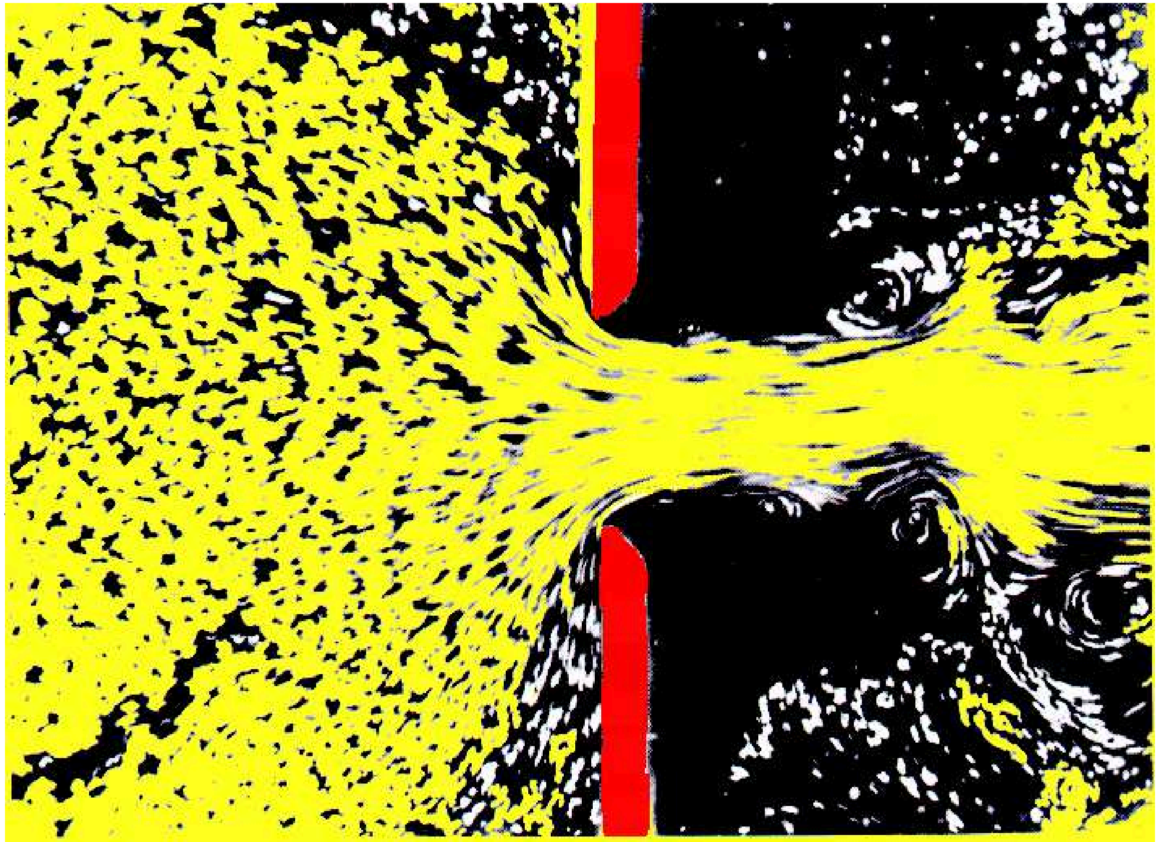


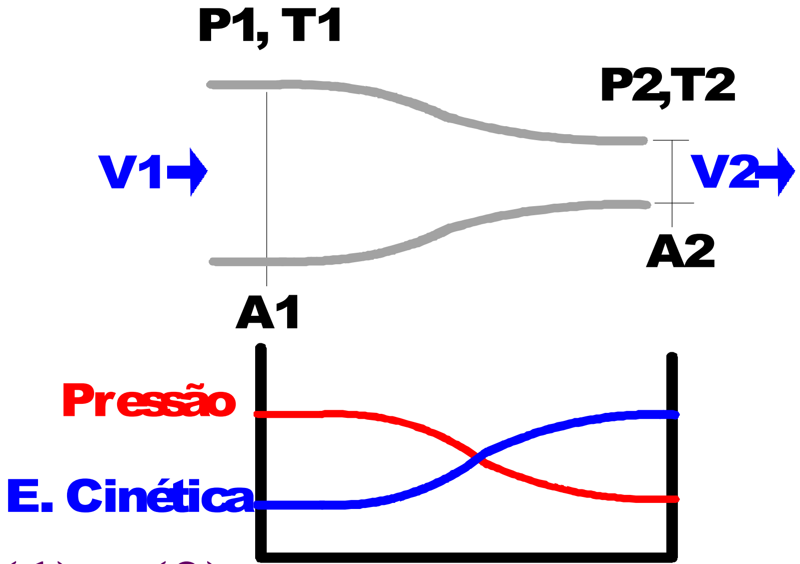
Fig. 96. Flow around a streamlined car model (air, flow speed 4 m/s, wheel base 500 mm, $Re = 1.3 \times 10^5$, three-dimensional smoke tunnel).

Aplicação em Medidores de Vazão: Escoamento numa Obstrução



Vazão Teórica Incompressível

- *Escoamento Unidimensional*
- *Regime Permanente*
- *Fluido Incompressível*
- *Sem viscosidade (esc. reversível)*



- **Equação Continuidade seções (1) - (2)**

$$\dot{m} = (\rho \cdot V \cdot A)_1 = (\rho \cdot V \cdot A)_2$$

- **Equação Energia seções (1) - (2)**

$$\left(P + \frac{1}{2}\rho \cdot V^2\right)_1 = \left(P + \frac{1}{2}\rho \cdot V^2\right)_2$$

$$\dot{m}_{T,i} = \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta P}\,; \qquad \beta = \frac{d}{D}$$

Medição Real

- **A vazão real é determinada por meio da vazão teórica incompressível multiplicada por uma constante, Cd, que leva ao modelo teórico os efeitos de viscosidade e compressibilidade do escoamento**

$$m_{REAL} = C_d \cdot \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \sqrt{2\rho_1 \Delta P}$$

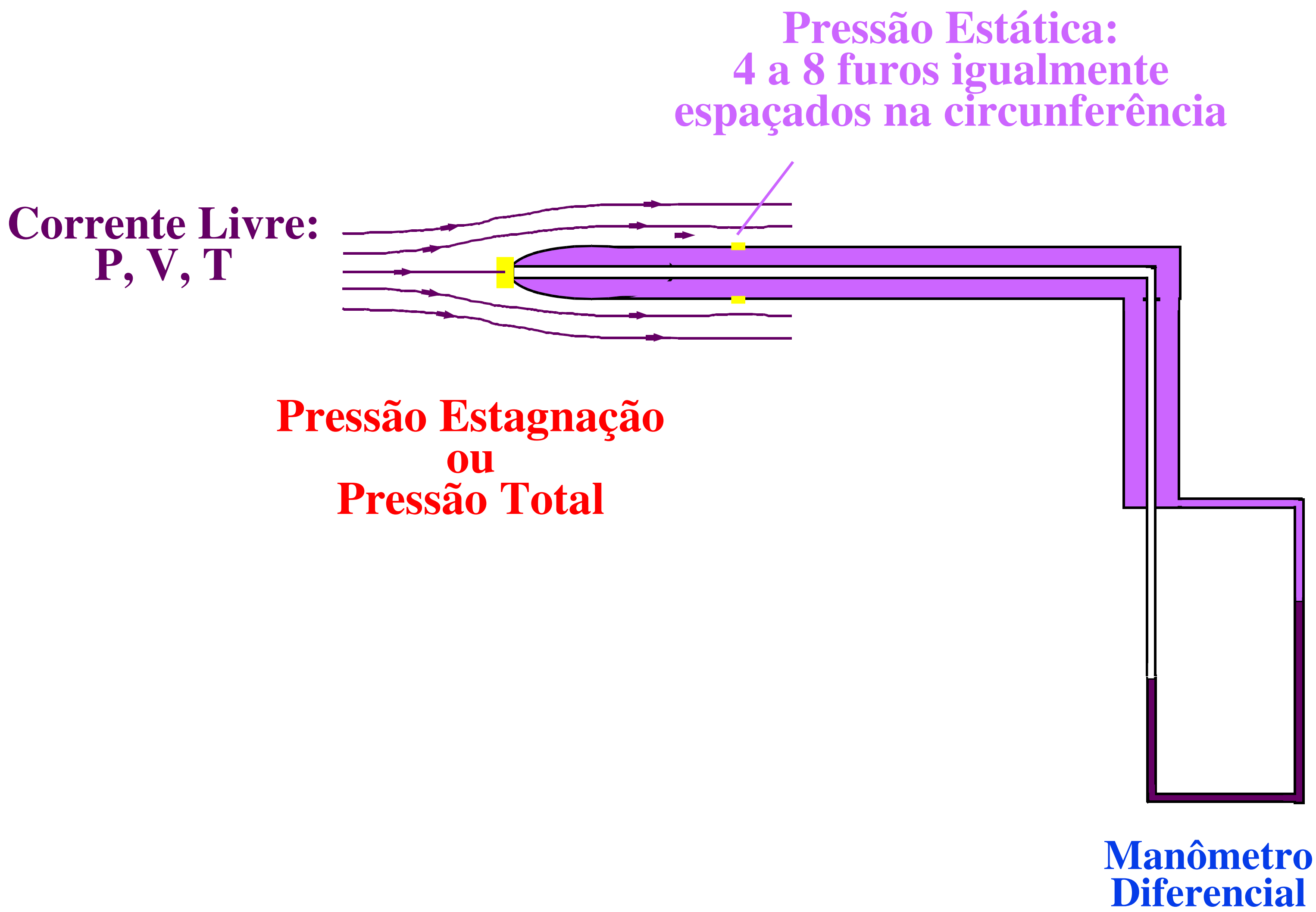
- **O coef. de descarga corrige os efeitos de viscosidade e turbulência. Ele é determinado experimentalmente como:**

$$C_d = \frac{m_{\mathrm{Re}al,\, incomp}}{m_{Teo,\, incomp}} = f(\beta, \mathrm{Re}) < 1$$

Tubos de Pitot (1732)

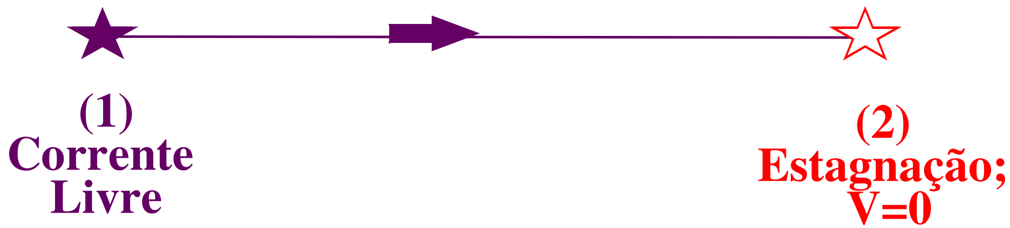
- Foi desenvolvido em 1732 por Henry Pitot para realizar medidas locais da velocidade de correntezas em rios.
- Até hoje muito utilizado em aeronaves, em instalações industriais (linhas de vapor, gases e líquidos) em sistemas de ventilação e laboratórios de pesquisa.
- Realiza uma medida local da velocidade do escoamento
- Pode ser empregados tanto para fluidos compressíveis como para incompressíveis.

Tubos de Pitot (1732)



Princípio Básico dos Pitots

- **O escoamento livre é desacelerado de modo reversível até a estagnação, a Energia total se conserva**



$$\underbrace{P_1}_{\text{P. Estat}} + \underbrace{\frac{1}{2}\rho_1 V_1^2}_{\text{P. Din}} = \underbrace{P_2}_{\text{P. Estag.}} + \underbrace{\frac{1}{2}\rho_2 V_2^2}_{=0}$$

$$\Rightarrow P_2 - P_1 = \frac{1}{2}\rho \cdot V_1^2 \quad \text{ou} \quad \boxed{V_1 = \sqrt{\frac{2\left(P_2 - P1\right)}{\rho}}}$$

Hora da Revisão: Parte I

A equação da energia para Regime Permanente aplicada a um volume de controle em termos de energia específica:

$$\left(\frac{V_I^2}{2}+gz+\underbrace{u+\frac{P}{\rho}}_{h}\right)_{OUT}-\left(\frac{V_I^2}{2}+gz+\underbrace{u+\frac{P}{\rho}}_{h}\right)_{IN} = q-w_{shaft} \quad \left[\frac{\text{Joules}}{\text{kg}}\right]$$

Hora da Revisão: Parte II

Combinando a 1a e 2a chega-se a forma de trabalho reversível para um processo:

$$w_{rev} = \left(\underbrace{\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s}_{b} \right)_{\mathrm{IN}} - \left(\underbrace{\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s}_{b} \right)_{\mathrm{OUT}}$$

Se energia cinética e potencial forem muito menores que os outros termos:

$$w_{rev} = \left(h - T_0 s \right)_{in} - \left(h - T_0 s \right)_{out} = -\int vdP$$

$$\eta_{processo} = \frac{w_{rev}}{w_{real}}$$

Hora da Revisão: Parte III

Pela 2ª lei pode-se mostrar que um processo reversível sempre produz mais trabalho que um processo irreversível.

Isto permite definir a eficiência de um processo em termos do trabalho reversível

$\frac{1}{2}\rho V_2^2 + P_2 = P_T$

$$\eta_{processo} = \frac{w_{real}}{w_{rev}}$$

Corolário: ***se o processo recebe trabalho, então o trabalho recebido num processo reversível é sempre menor que aquele de um processo irrev.***

Hora da Revisão: Parte IV

1ª Lei isotérmica, aplicação para determinar potência de bombas, turbinas:

$$\frac{w_{shaft}}{g} = \left(\frac{V_I^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} \right)_{\text{IN}} - \left(\frac{V_I^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} \right)_{\text{OUT}} - h_{\text{irr}}$$

1ª Lei isotérmica, aplicação para queda de pressão em escoamento em tubulações

$$\left(\frac{V_I^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} \right)_{\text{IN}} = \left(\frac{V_I^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} \right)_{\text{OUT}} - h_{\text{irr}}$$

Hora da Revisão: Parte V

BERNOULLI

$$\left(\frac{V_I^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho}\right)_1 = \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho}\right)_2$$

- **A energia mecânica se conserva: energia cinética, energia potencial e trabalho de fluxo podem permutar valores de tal forma que a soma dos três termos em qualquer posição do escoamento é sempre constante.**
- **Válido somente para processos reversíveis e adiabáticos em escoamentos incompressíveis.**