Meeting 13

Sections 5.5 to 5.7

1st and 2nd Law for C.V. Analysis

Equação da Energia: Regime Permanente

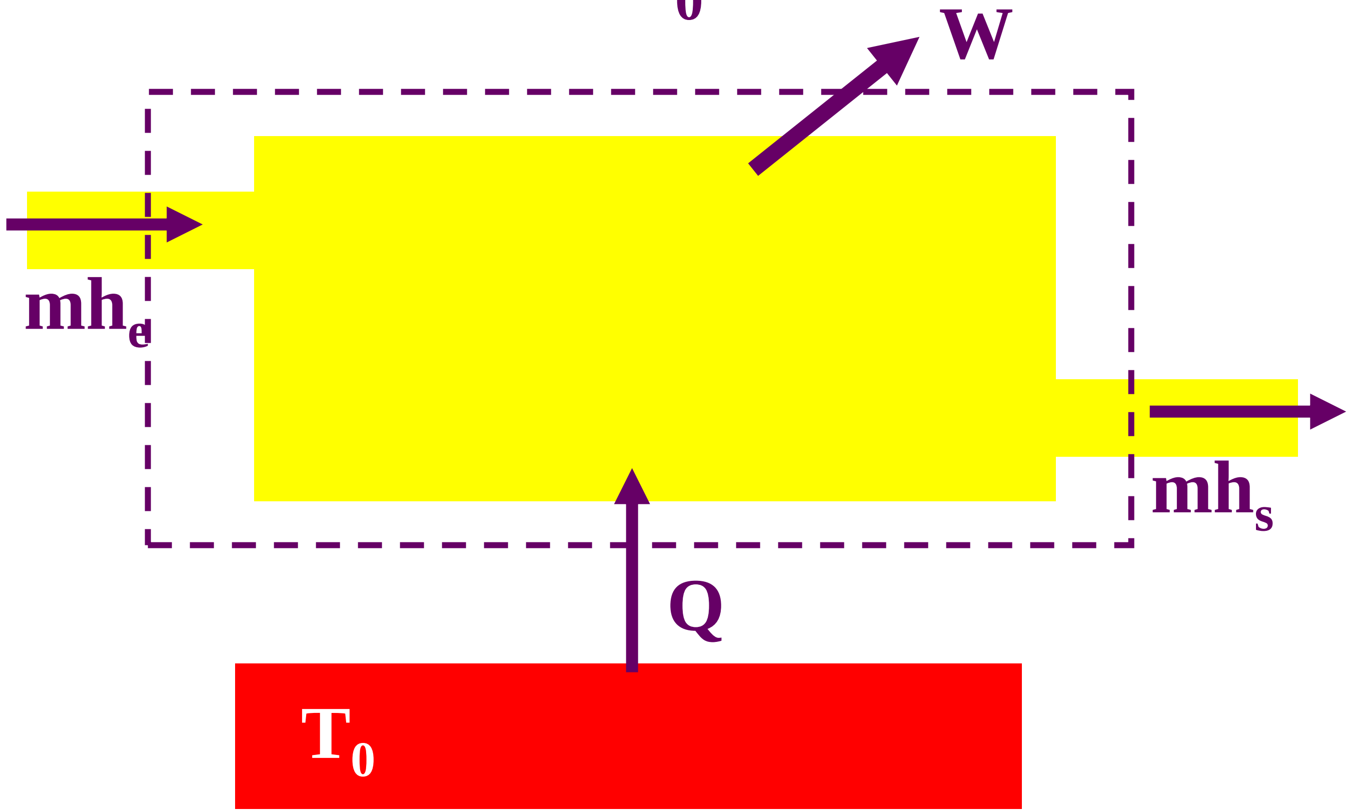
$$-\sum\left[\left(u+\frac{V_I^2}{2}+gz+\frac{P}{\rho}\right)\dot{m}\right]_{IN}+\sum\left[\left(u+\frac{V_I^2}{2}+gz+\frac{P}{\rho}\right)\dot{m}\right]_{OUT}=\dot{Q}-\dot{W}_{shaft}$$

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

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

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 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 ºC

Pressure   up to 140 Bara

Exhaust steam conditions:

Back-pressure:

3-16 Bara/300 ºC

Condensing 0,03 - 0,25 Bar

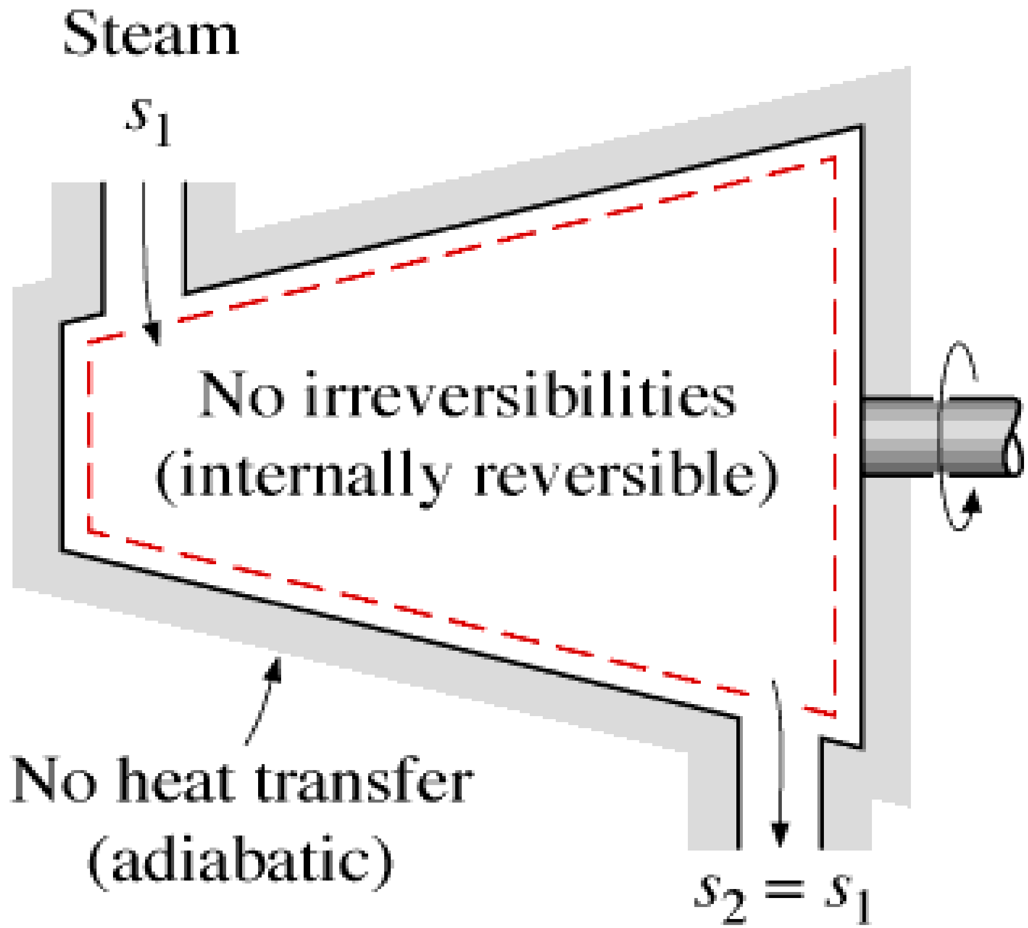
Controlled extraction:

Pressure/Temperature 3-25 Bara/400 ºC

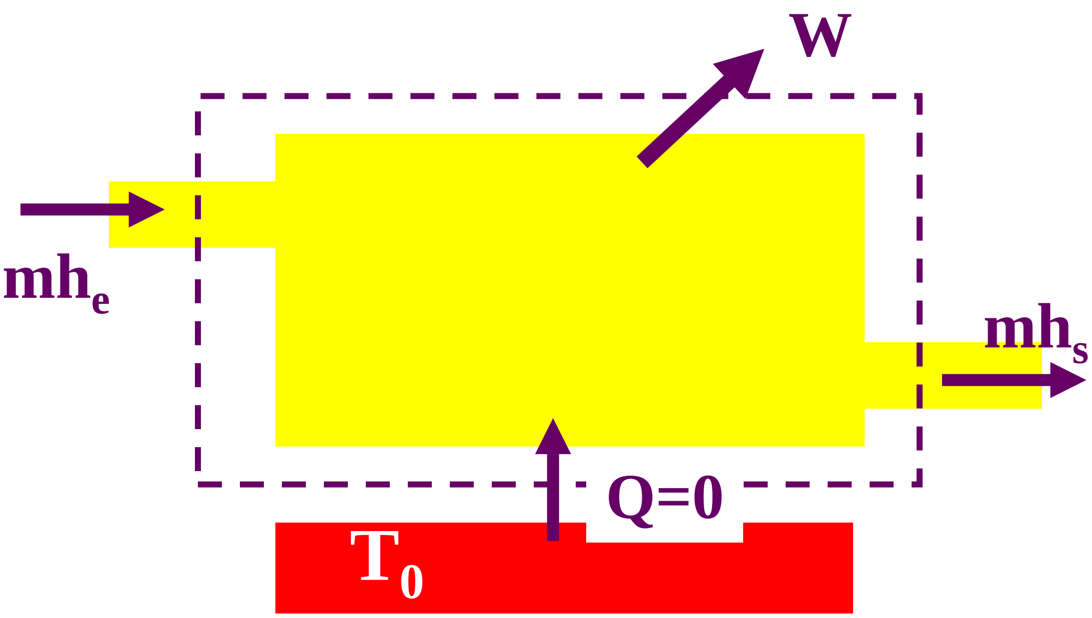
System Entropy Constant During Reversible, Adiabatic Process

Isentropic

$$s_2 = s_1$$



Identifique os fluxos para a Turbina Adiabática

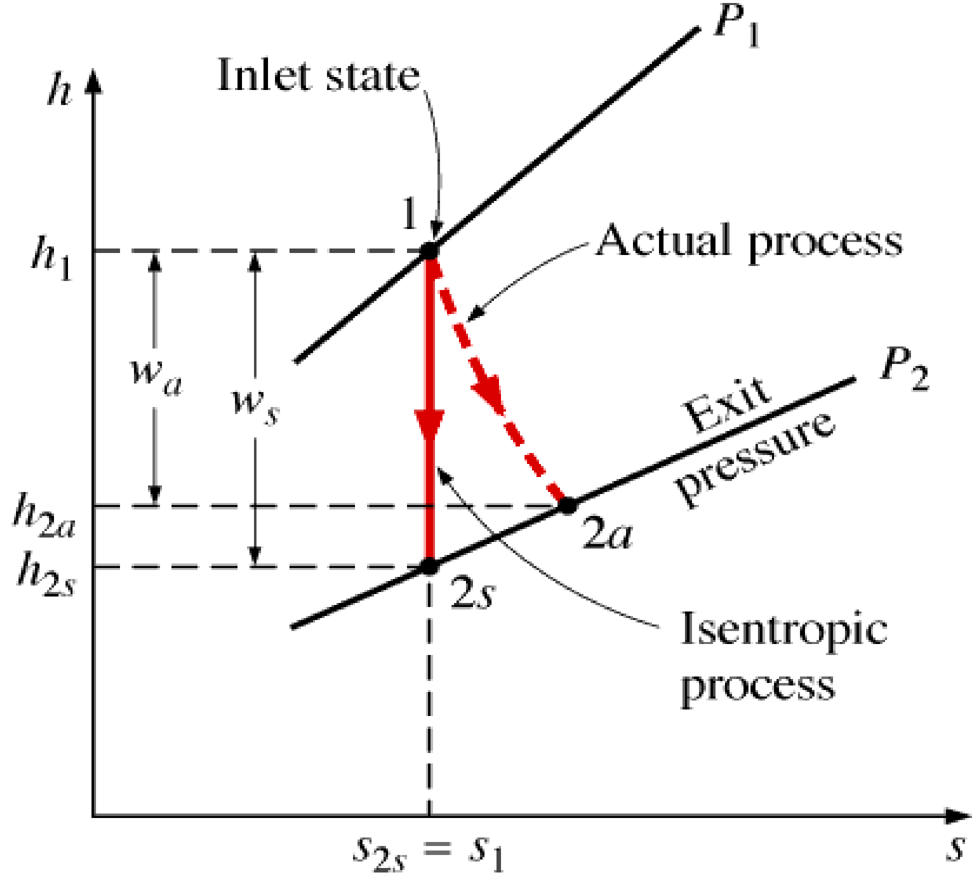


Adiabática, Q = 0

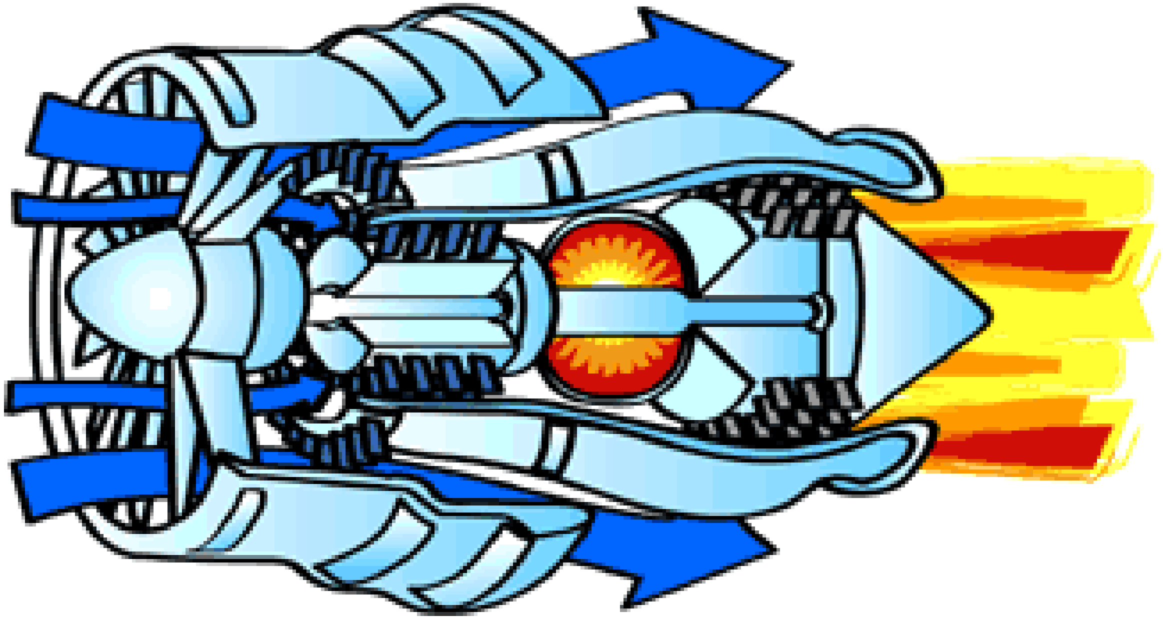
A fonte a T_0 não troca calor e portanto não é necessária

1ª lei:
w = he-hs

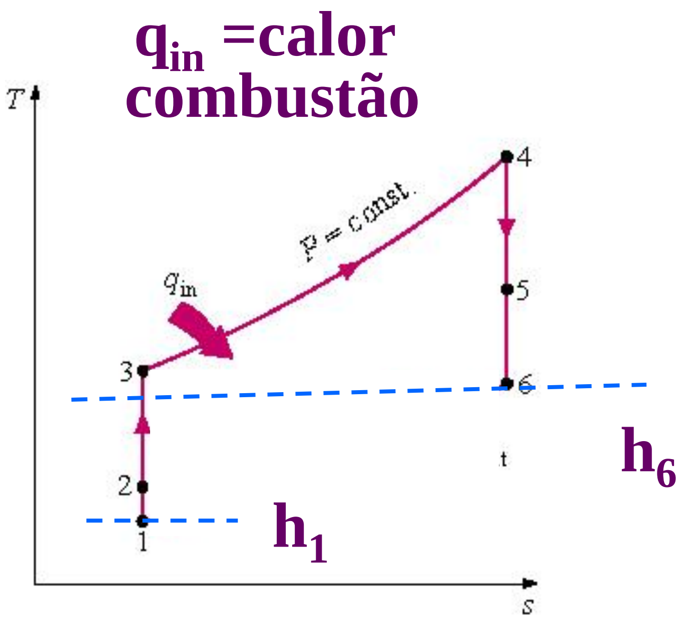
h-s Diagram of an Adiabatic Turbine

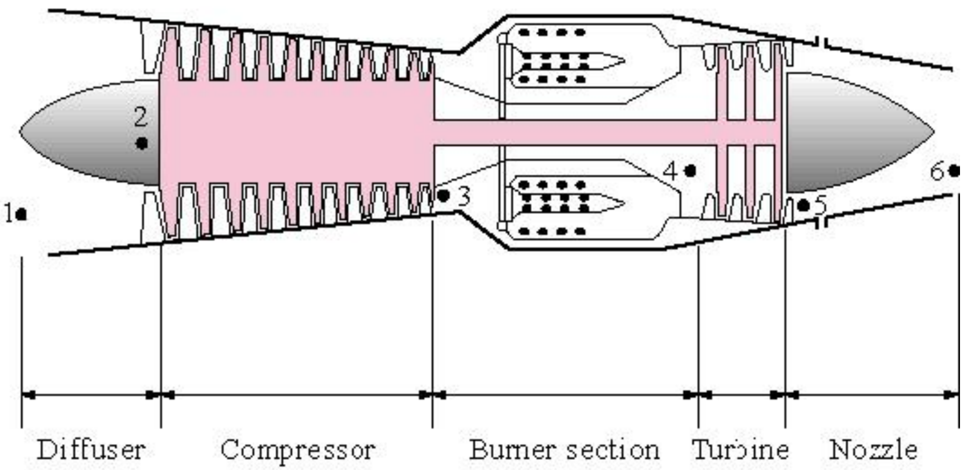


Turbojet Engine Basic Components

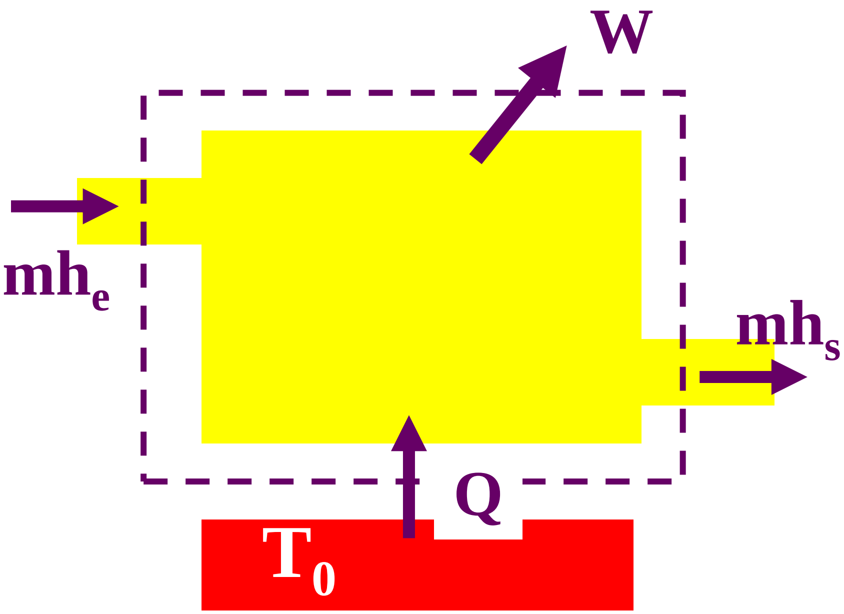


Turbojet Engine Basic Components and T-s Diagram for Ideal Turbojet Process





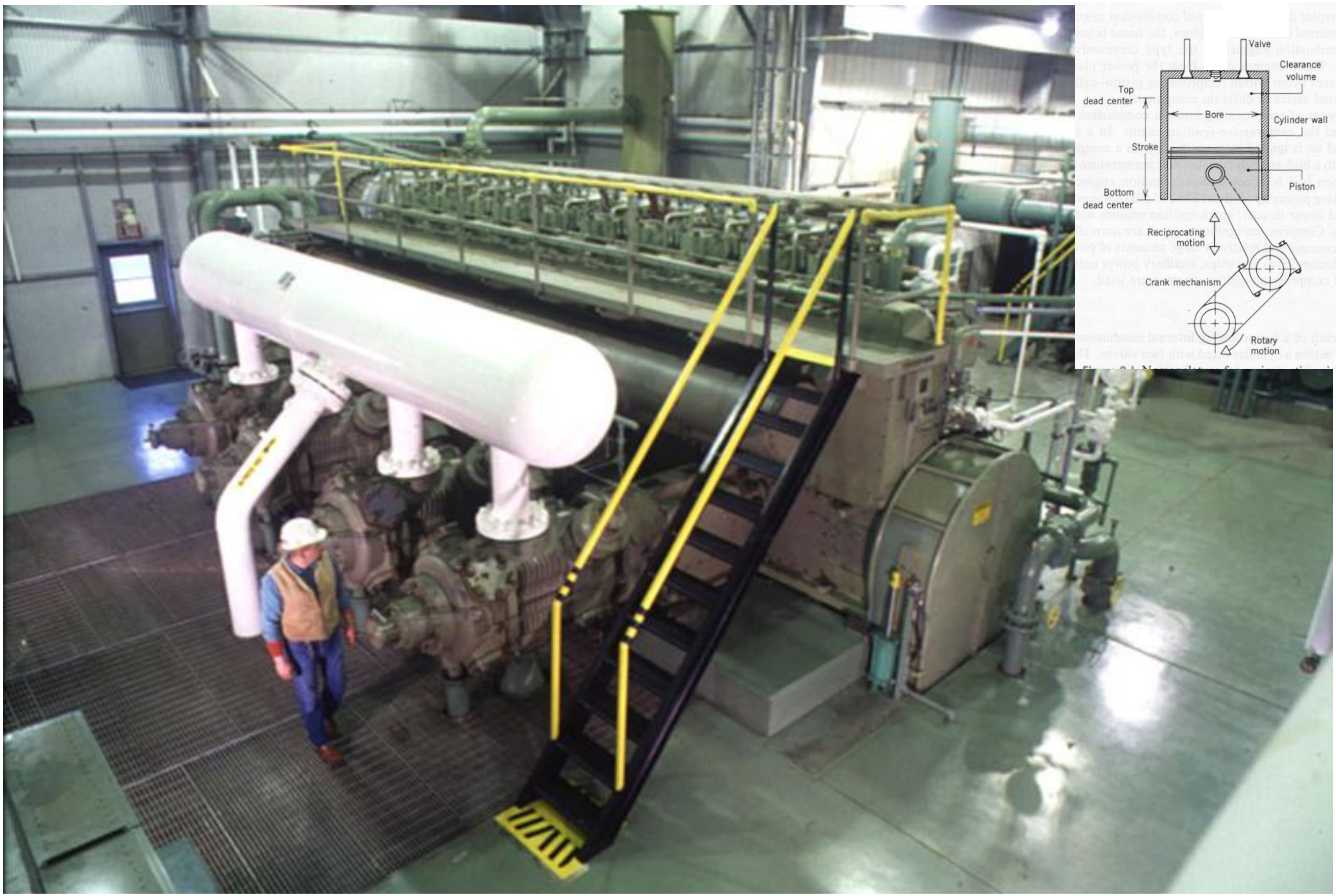
Identifique os fluxos para um Motor a Jato



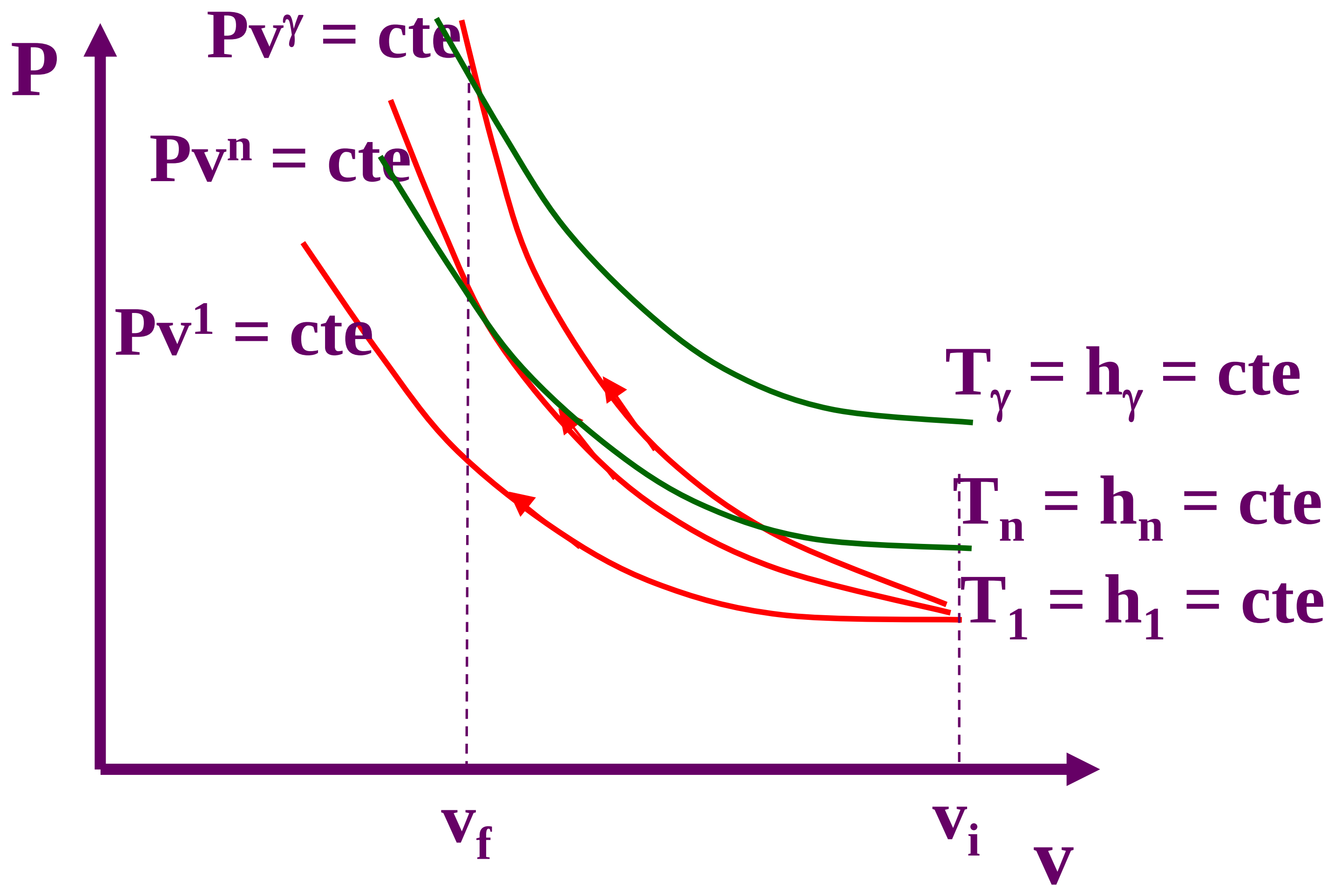
- **Há adição de calor a pressão constante pela queima do combustível.**
- **A temperatura T_0 é a temperatura da câmara de combustão**

$$w = q + (he - hs) - \left(V_I^2/2\Big|_s - \underbrace{V_I^2/2\Big|_e}_{\cong 0} \right)$$

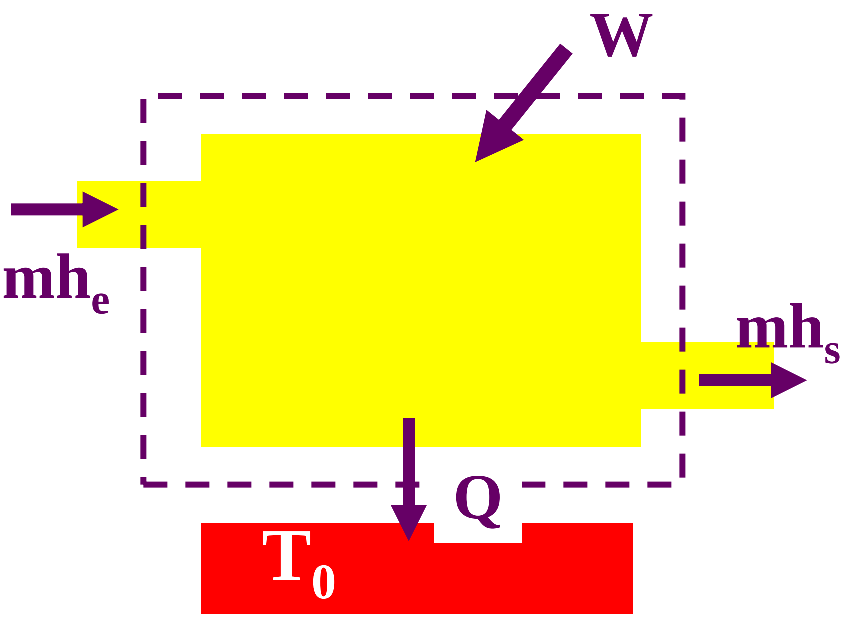
Compressores de Deslocamento Positivo



Compressor e o Diagrama P-v para um processo reversível



Identifique os fluxos para um Compressor

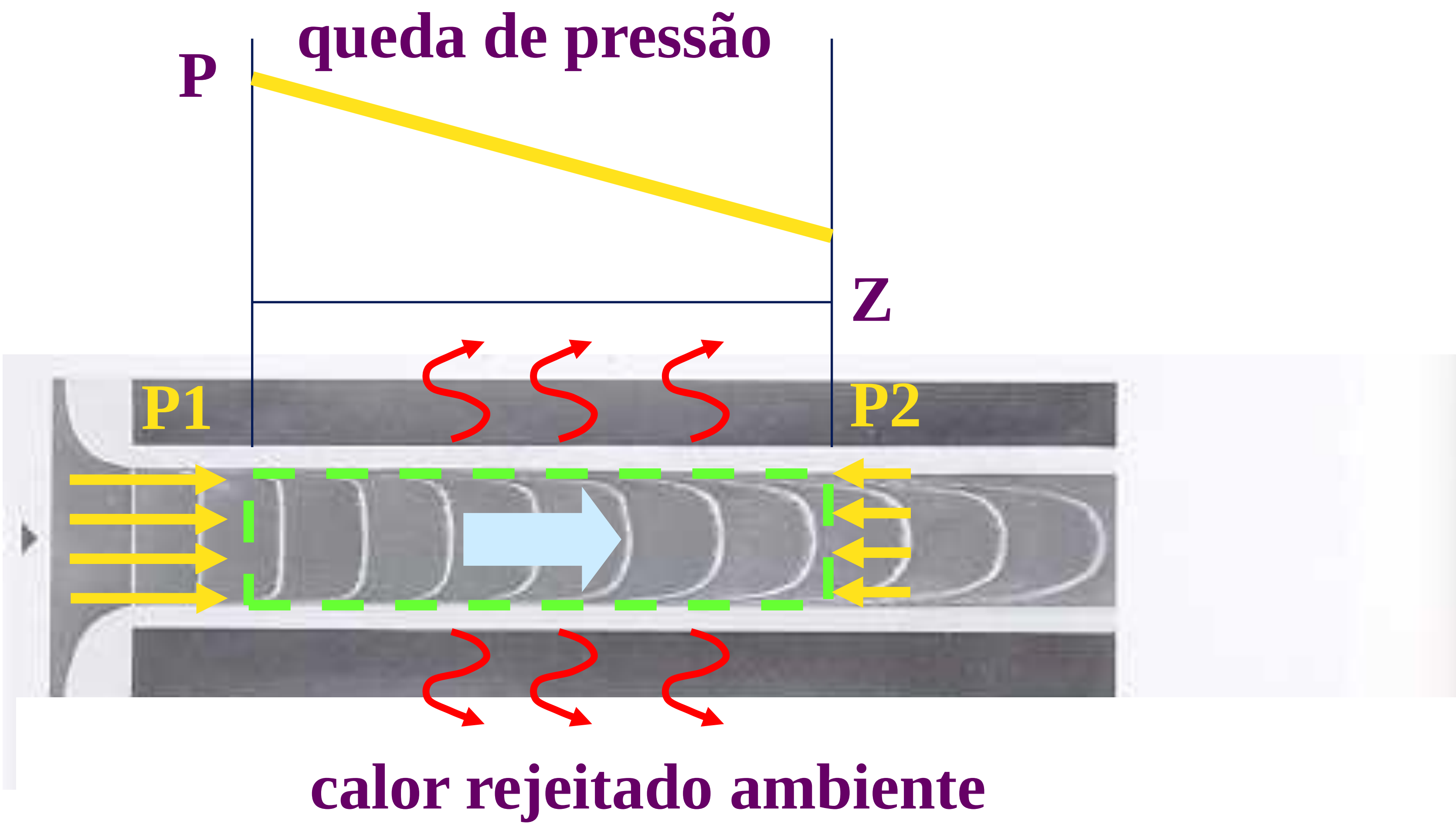


- O compressor rejeita calor para o ambiente.

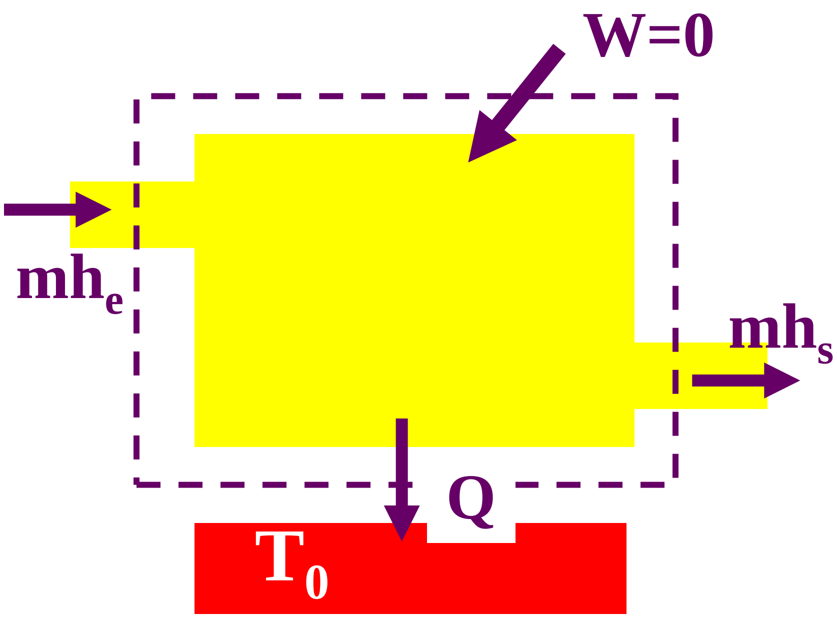
- A temperatura T_0 é a temperatura do ambiente

- 1ª lei: $w = q - (h_s - h_e)$

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: $0 = q - (hs - he)$
- $q = \Delta p/\rho$ se incompress.

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,**
- **Com limites se estabelece padrões de comparação com processos reais,**
- **Com o sentido 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.**

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

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

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

- ***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.**

1^a e 2^a Lei Combinadas ∞ Limite Trabalho

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

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

Como $T_0 Sgen \geq 0$, a 2^a lei estabelece um limite superior para o trabalho

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

1ª e 2ª Lei Combinadas ∾ Conclusões

O maior trabalho produzido ocorre para processos reversíveis. Neste caso, Sgen=0.

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

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

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

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

- *b* é uma variável termodinâmica denominada por ´EXERGIA´
- Sua definição é: $b = (u+pv-T_0s) = (h-T_0s)$
- Se as variações de energia cinética e potencial forem desprezíveis, o trabalho máximo que se pode extrair num processo é igual a variação de exergia:

$$w_{max} = w_{rev} = (b)_{IN} - (b)_{OUT}$$

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)

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

Trabalho Reversível p/ V.C.

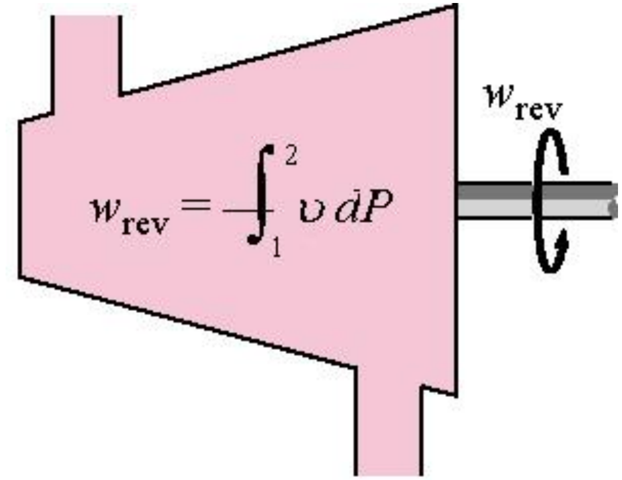
Um processo reversível, $T_0 ds = dh - vdP$.
Integrando do estado (out) – (in) temos que:

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

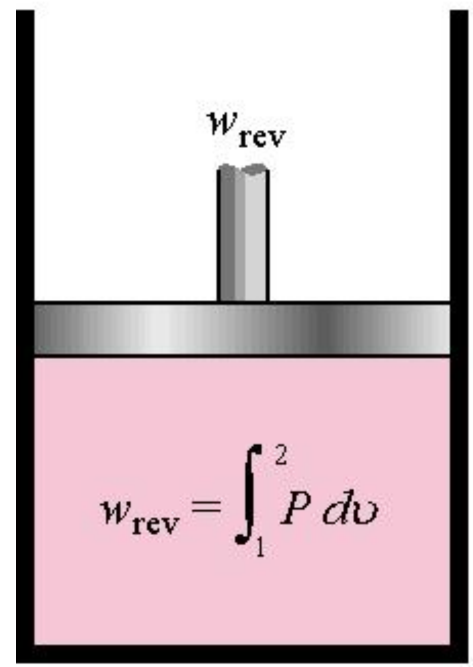
Substituindo na expressão do trabalho reversível, tem-se que para um V.C.:

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

Reversible work relations for steady-flow and closed systems



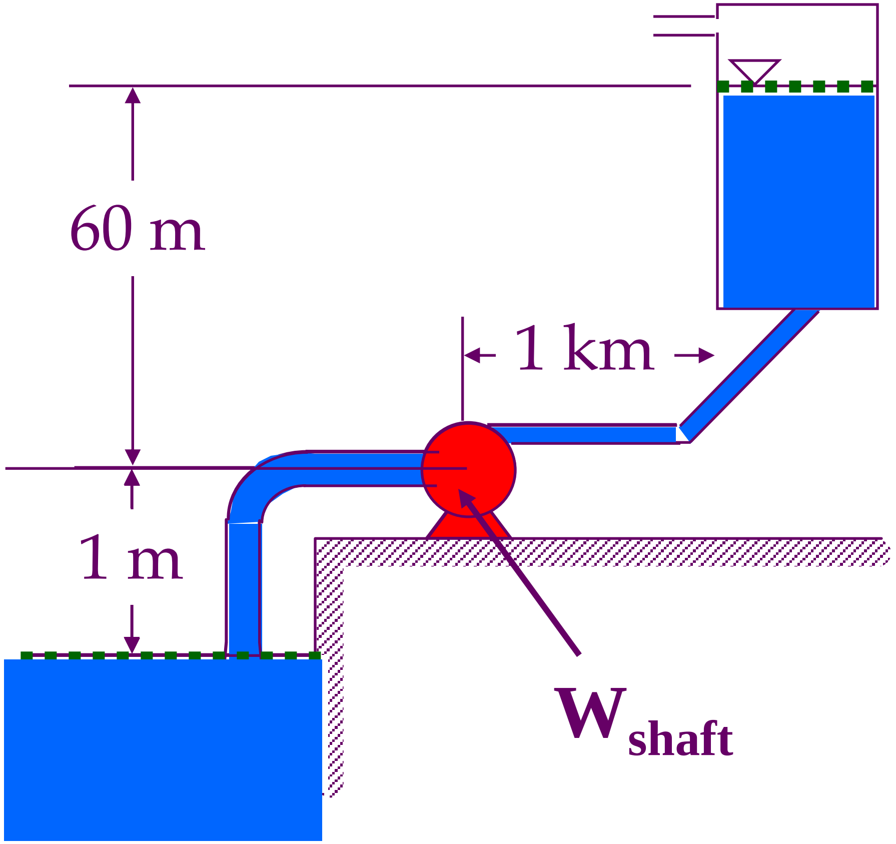
(*a*) Steady-flow system



(*b*) Closed system

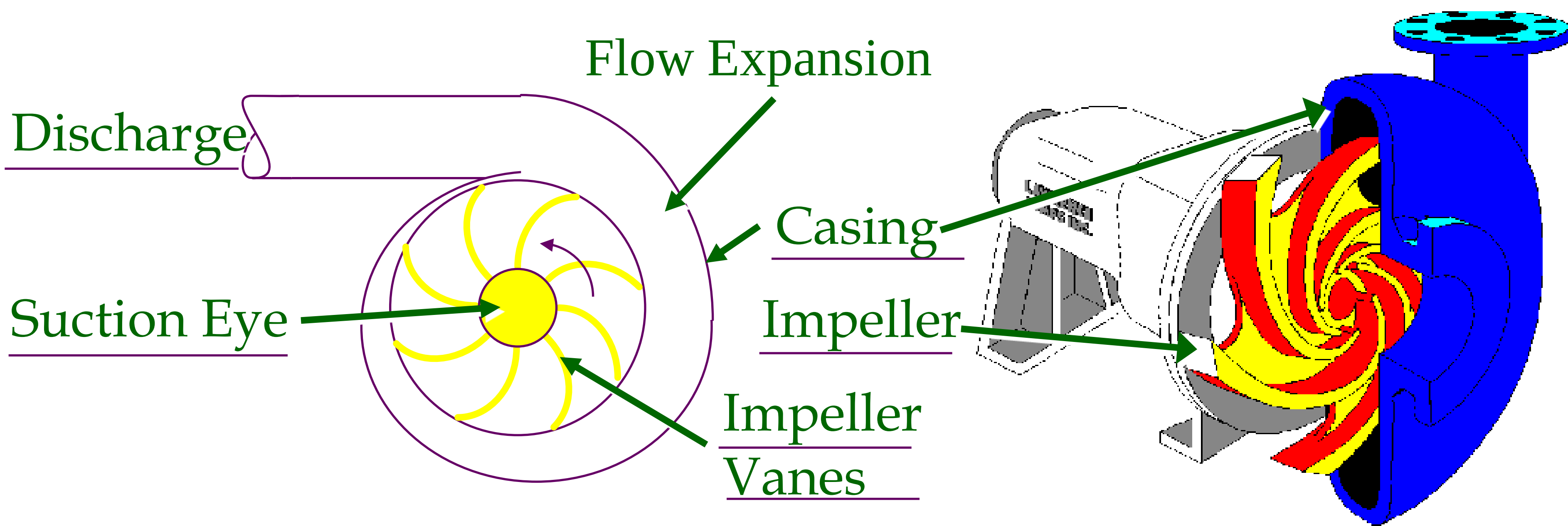
CASO PROBLEMA:
ELEVAÇÃO DE FLUIDO

Dadas as alturas entre reservatórios, o diâmetro da tubulação deseja-se determinar a potência da bomba para transferir um volume de fluido na 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:

1. **Uma bomba que transfere trabalho de eixo para o fluido**
2. **O fluido é bombeado de um reservatório baixo para outro elevado**
3. **O processo normalmente ocorre <u>sem transferência de calor</u>**
4. **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:**

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

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

TERMOS MECÂNICOS x TÉRMICOS

- O trabalho de eixo transfere energia às parcelas dos termos mecânicos e térmicos
- PORÉM 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

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

TÉRMICOS

Se houver efeitos compressíveis

OS TERMOS TÉRMICOS

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

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

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

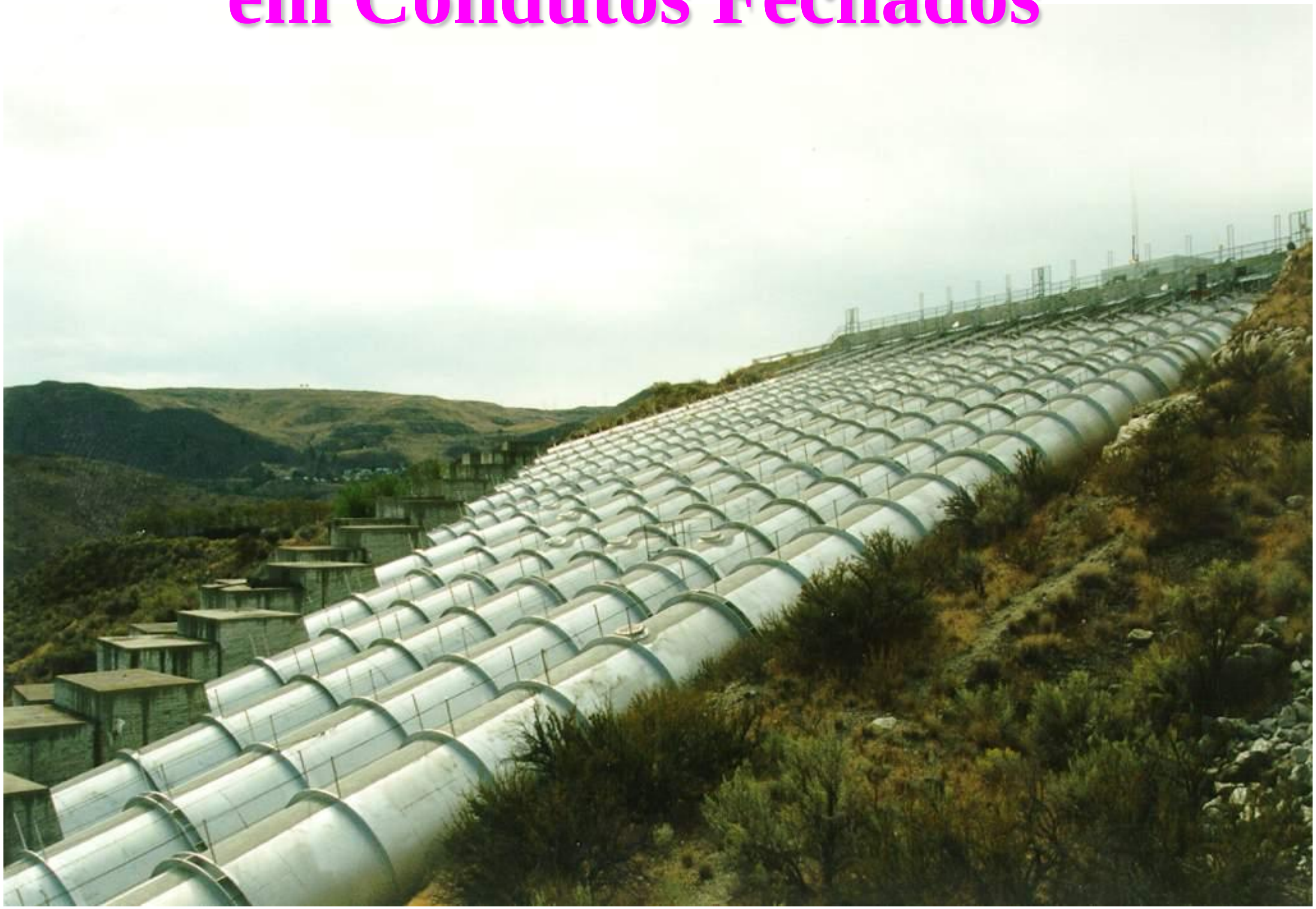
- O papel da bomba é transferir energia para os termos mecânicos e também para as irreversibilidades.

Equação em Termos da Altura

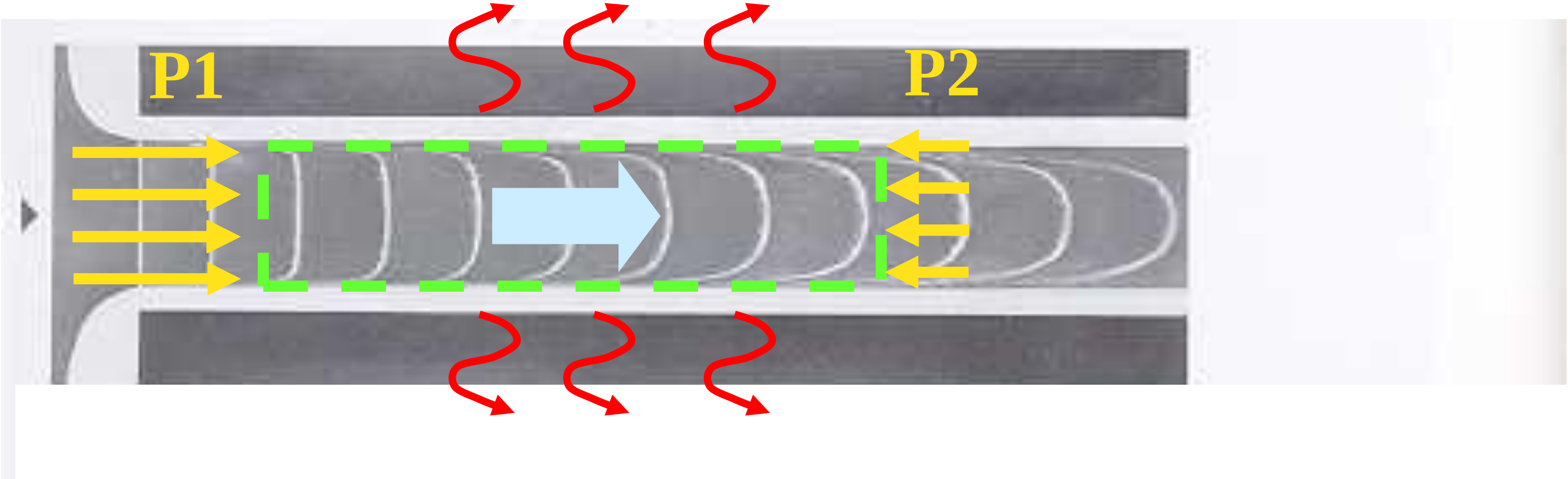
- É usual expressar estas energias em termos de altura equivalente h. (🕑 g)

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

Escoamento
em Condutos Fechados



Escoamento numa Tubulação



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

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

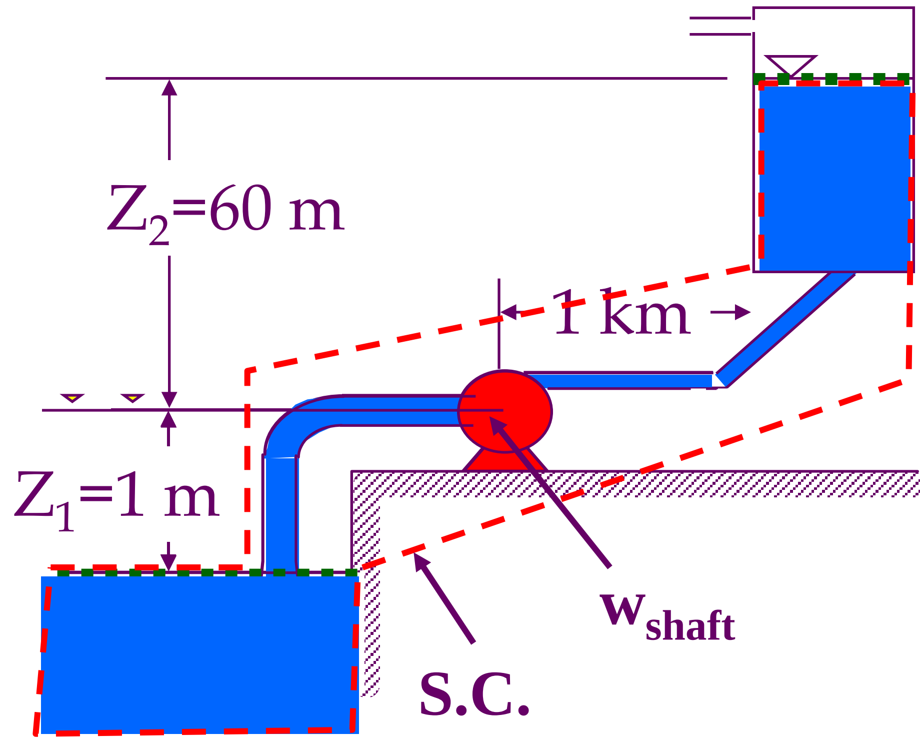
$$\left(\frac{P}{\rho g}\right)_{IN} - \left(\frac{P}{\rho g}\right)_{OUT} = h_{irr} \quad \rightarrow \quad \boxed{\Delta P = \rho\, g\, h_{irr}}$$

- 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 Q pela tubulação ela necessita de um DP para suprir as irreversibilidades,
- Será visto no Cap. 6 como estimar h_{irr}.
- $\underline{h_{irr} \sim V^2}$

Qual é a potência necessária para bombear uma vazão Q?



Considerações:

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

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

$$2. \Rightarrow \quad \frac{w_{shaft}}{g} = \left(0 - Z1 + P_{atm}/\rho g\right)_{IN} - \left(0 + Z2 + P_{atm}/\rho g\right)_{OUT} - h_{irr}$$

$$3. \Rightarrow \quad \frac{w_{shaft}}{g} = -\left(Z1 + Z2 + h_{irr}\right) \quad \rightarrow \quad \boxed{\dot{W} = -\dot{m}g\left(Z1 + Z2 + h_{irr}\right)}$$

BERNOULLI: *UM CASO ESPECIAL*

Considere um processo:

1. ***Reversível*** ⇒ $s_{gen} = 0$
2. ***Sem Transf. de Calor*** ⇒ $s_{in} = s_{out}$
3. ***Sem realização de trabalho*** ⇒ $w_{shaft} = 0$

O que restou da Equação da Energia?

$$\left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho}\right)_{IN} - \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho}\right)_{OUT} = 0$$

A equação é válida para <u>escoamentos</u> incompressíveis ou compressíveis.

BERNOULLI:
Compressível x Incompressível

1. Um escoamento incompressível, ‘u’ constante
2. Um escoamento compressível, $u+Pv+V^2/2$ const.
3. Um fluido pode ter densidade variável (gás ideal) e ainda ter seu escoamento se comportando como incompressível.
4. O número de Mach indica se os efeitos de compressibilidade estão presentes ou não.

Vamos utilizar hipótese de escoamento incompressível para desenvolver Bernoulli, note porém que ele poderá ser empregado para gases.

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)

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

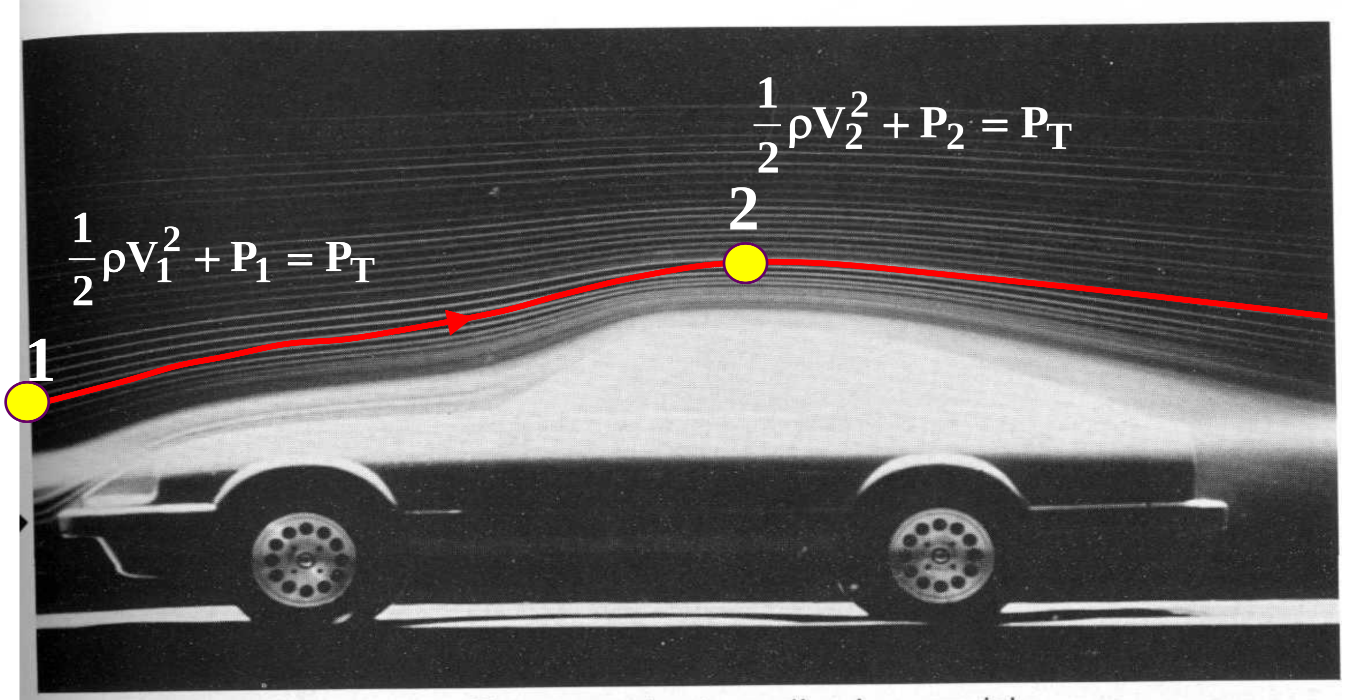
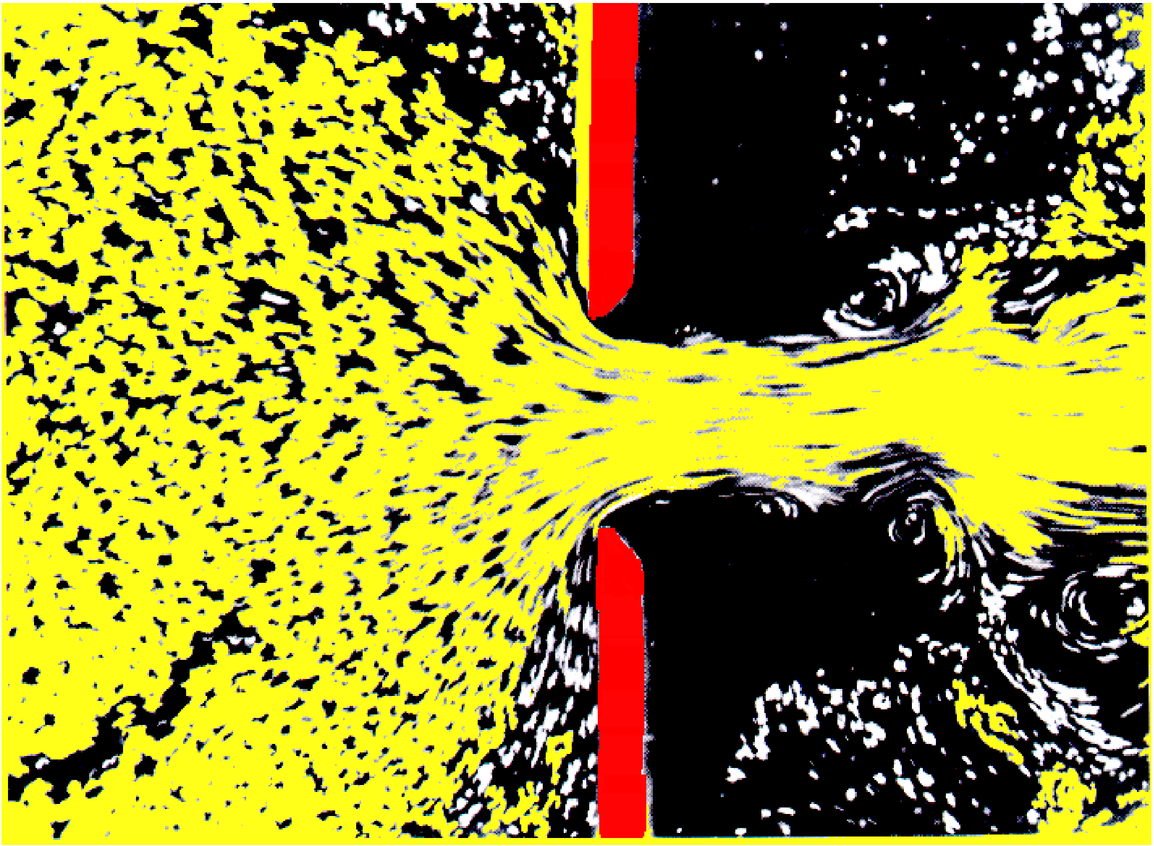


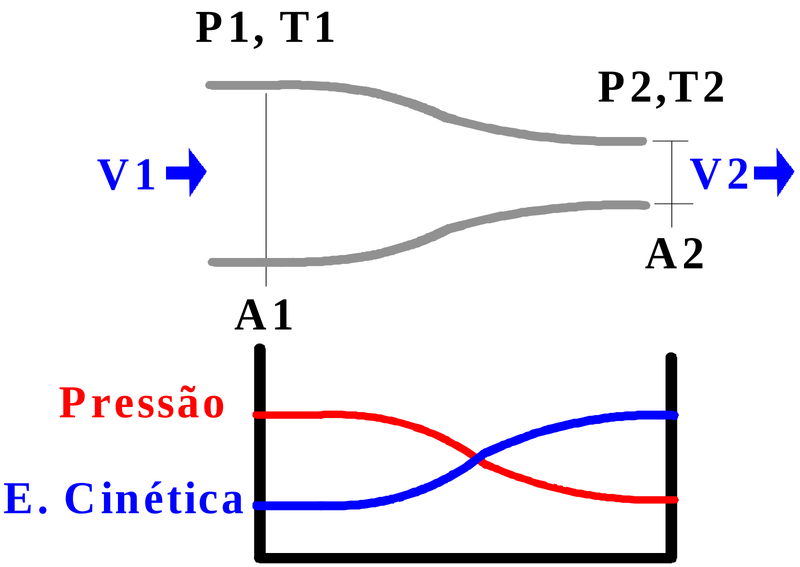
Fig. 96. Flow around a streamlined car model (air, flow speed 4 m/s, wheel base 500 mm, $Re = 1.3 \times 10^5$, three-dimensional smoke tunnel).

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 constantes, Cd e Y, que levam 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:

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

Tubos de Pitot (1732)

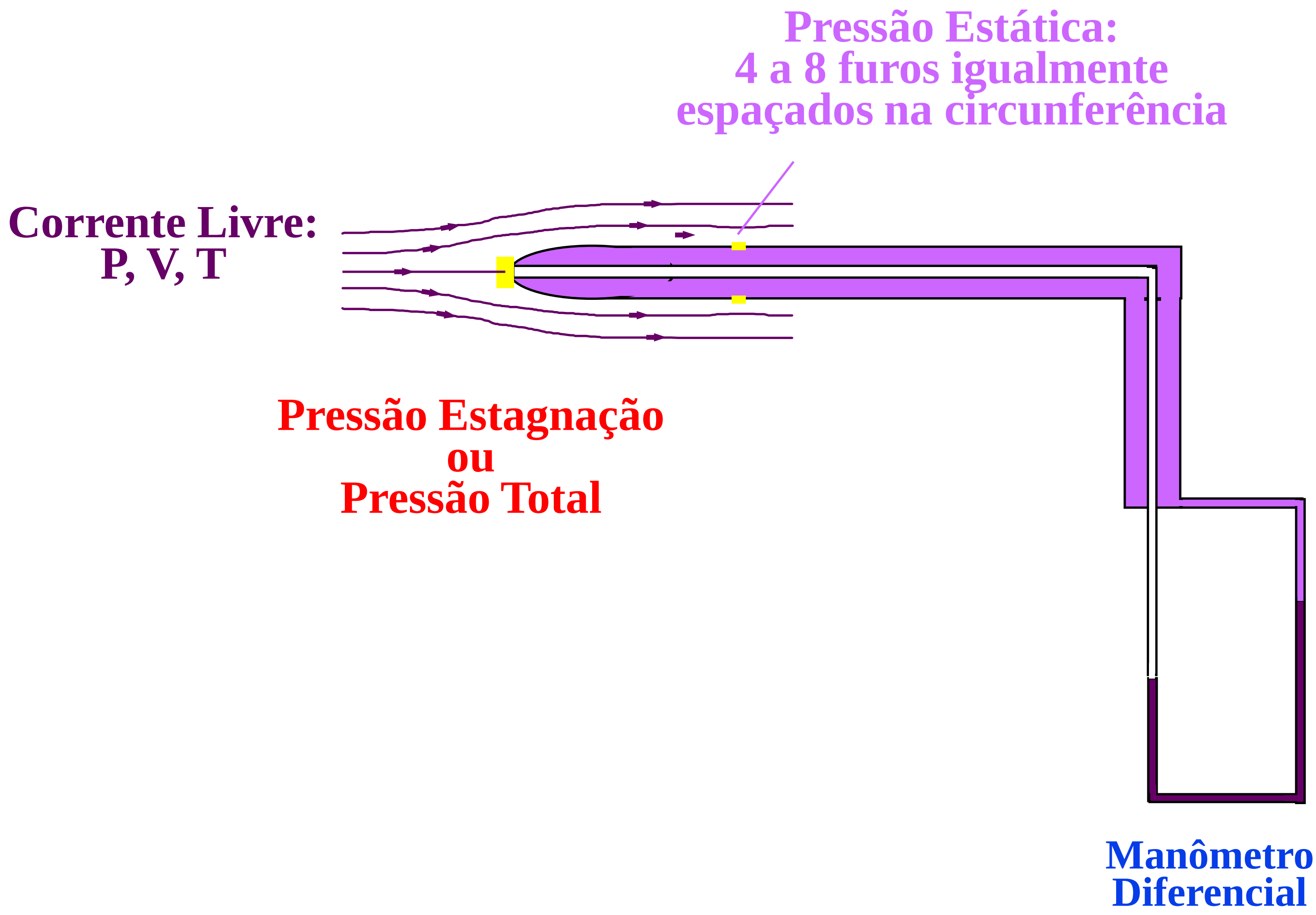
- **Foi desenvolvido em 1732 por Henry Pitot para realizar medidas locais da velocidade de correntezas em rios.**

- **Até hoje muito utilizado na indústria aeronáutica, em instalações indústriais (linhas de vapor, gases e líquidos) em sistemas de ventilação e laboratórios de pesquisa.**

- **Realiza uma medida local da velocidade do escoamento**

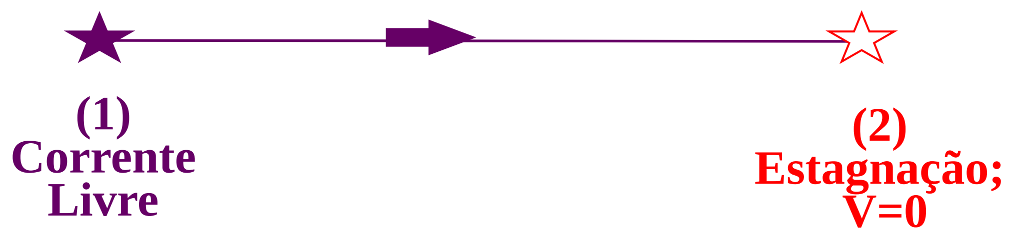
- **Pode ser empregados tanto para fluidos compressíveis como para incompressíveis.**

Tubos de Pitot (1732)



Princípio Básico dos Pitots

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



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

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

Hora da Revisão: Parte I

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

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

Hora da Revisão: Parte II

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

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

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

$$w_{rev} = (h - T_0 s)_{in} - (h - T_0 s)_{out} = -\int v dP$$

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

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

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

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

Hora da Revisão: Parte IV

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

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

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

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

Hora da Revisão: Parte V

BERNOULLI: este você não pode esquecer!

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

- **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.**