
MOTORES TÉRMICOS

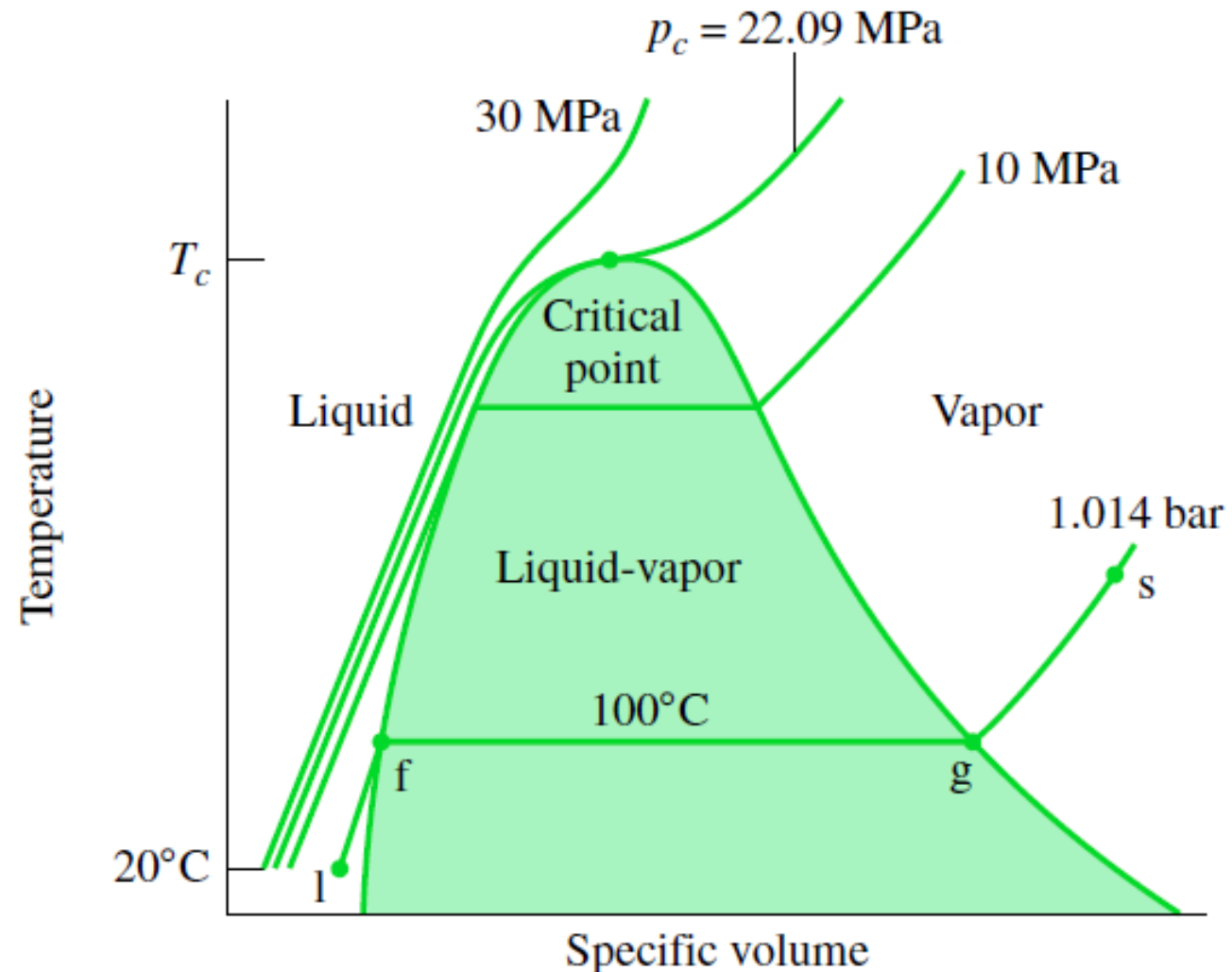
AULA 1-2 – TERMODINÂMICA APLICADA AS MÁQUINAS TÉRMICAS

PROF.: KAIO DUTRA

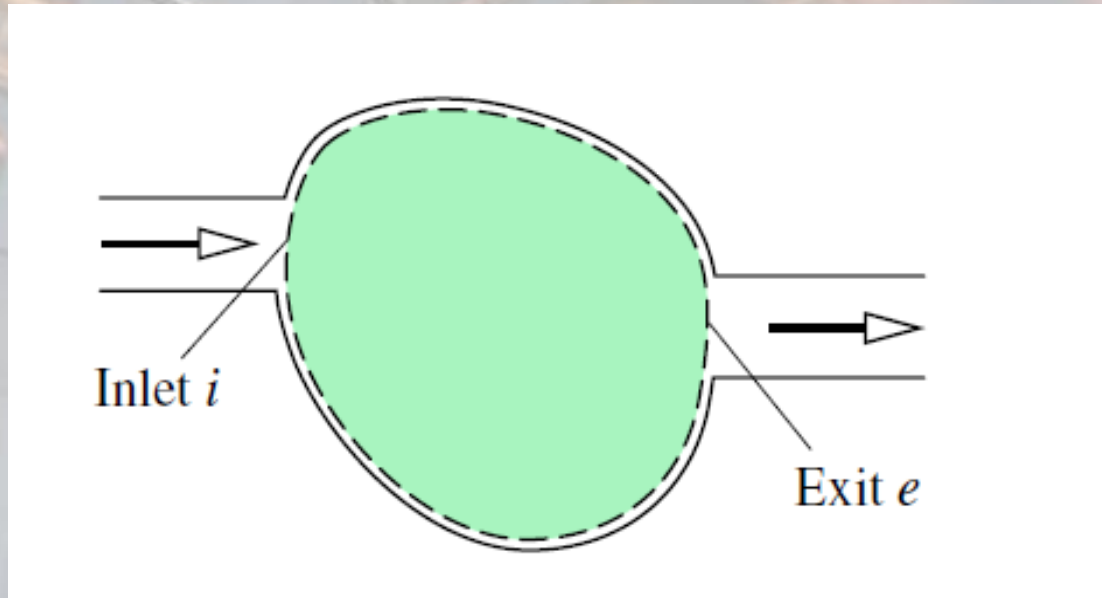
Diagrama de Fases

- Estado líquido
- Mistura bifásica líquido-vapor
- Estado de vapor

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{liquid}} + m_{\text{vapor}}}$$

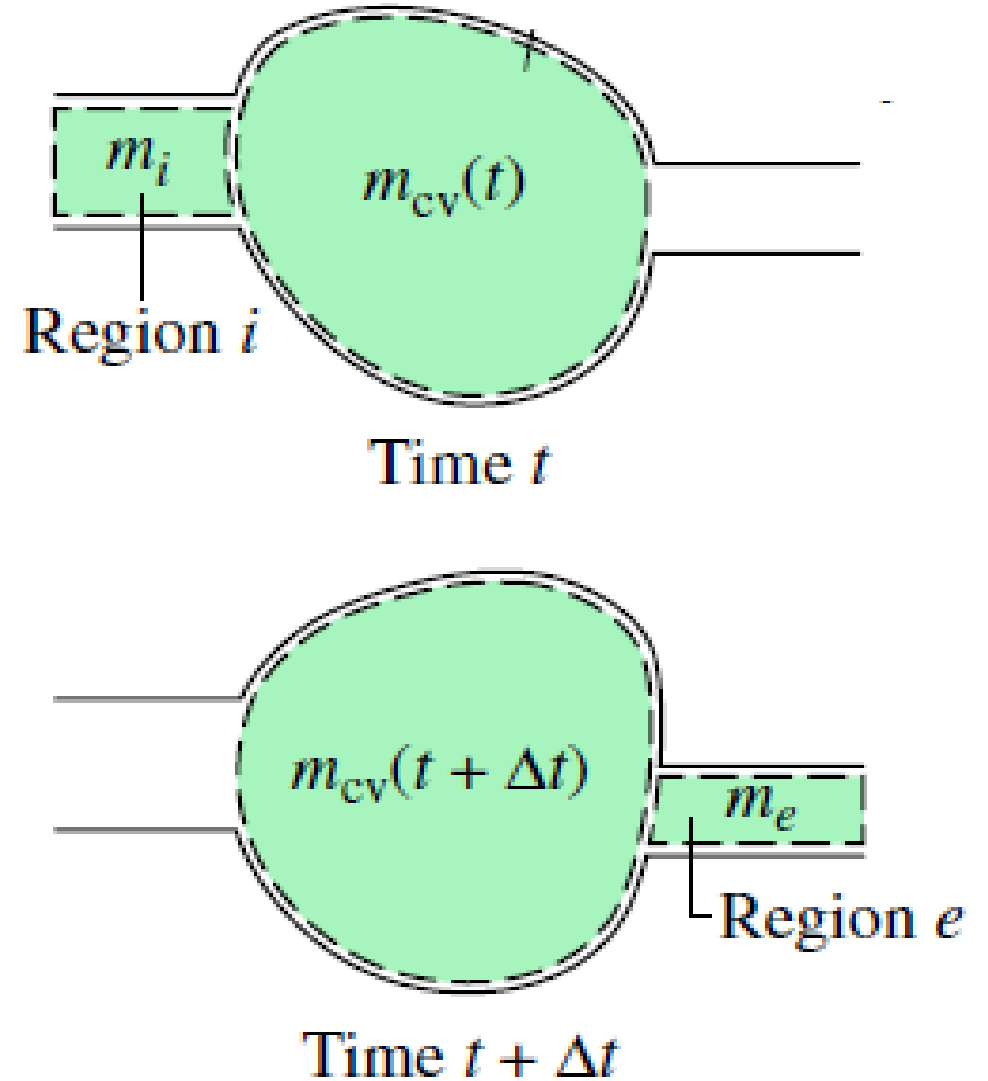


Conservação da Massa Para Um Volume de Controle



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

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



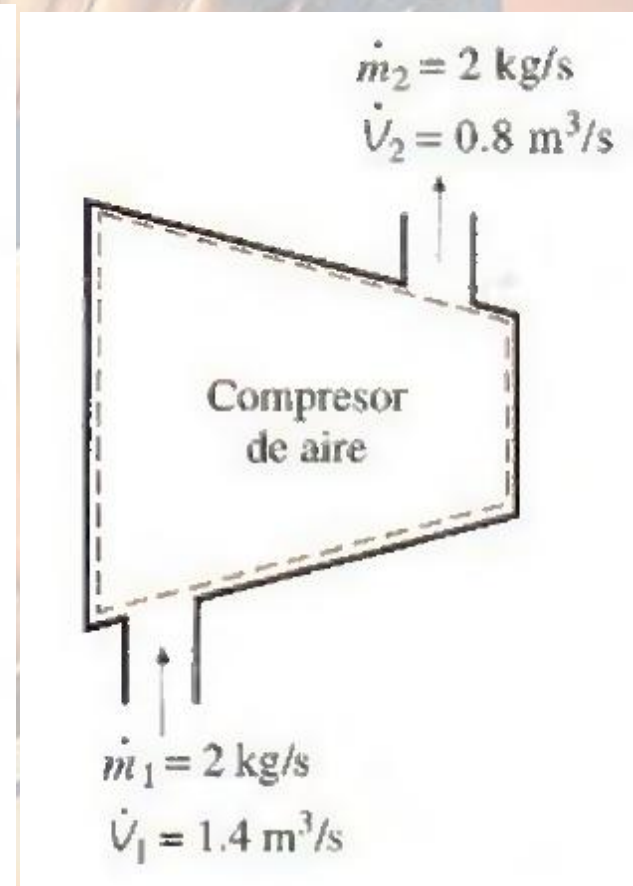
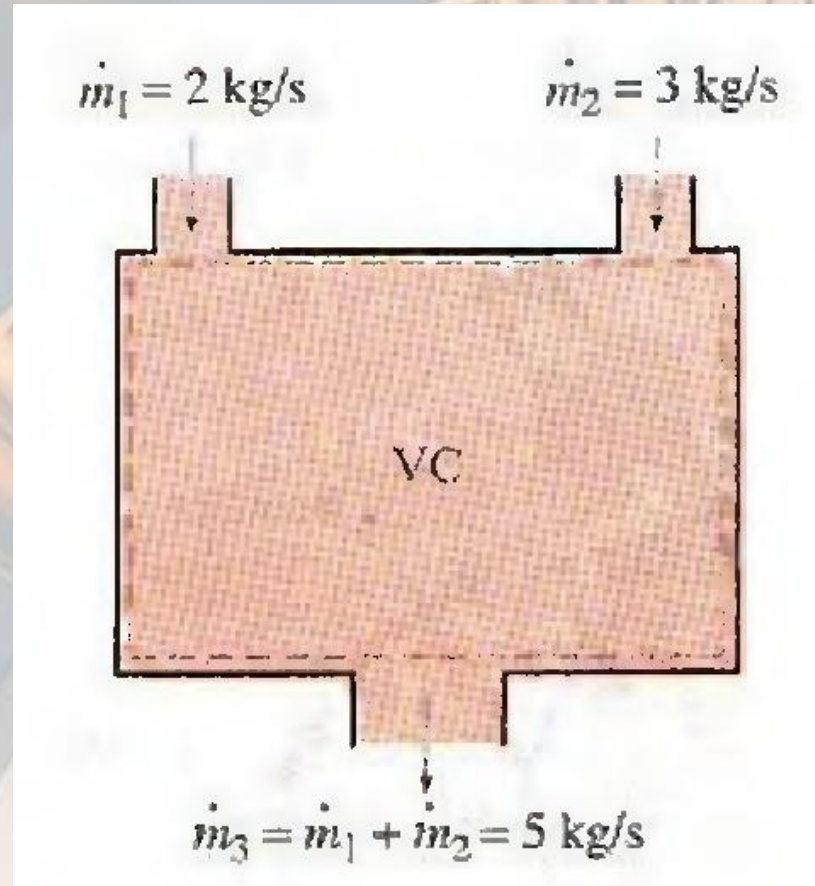
Conservação da Massa Para Um Volume de Controle

- Formulação Geral:

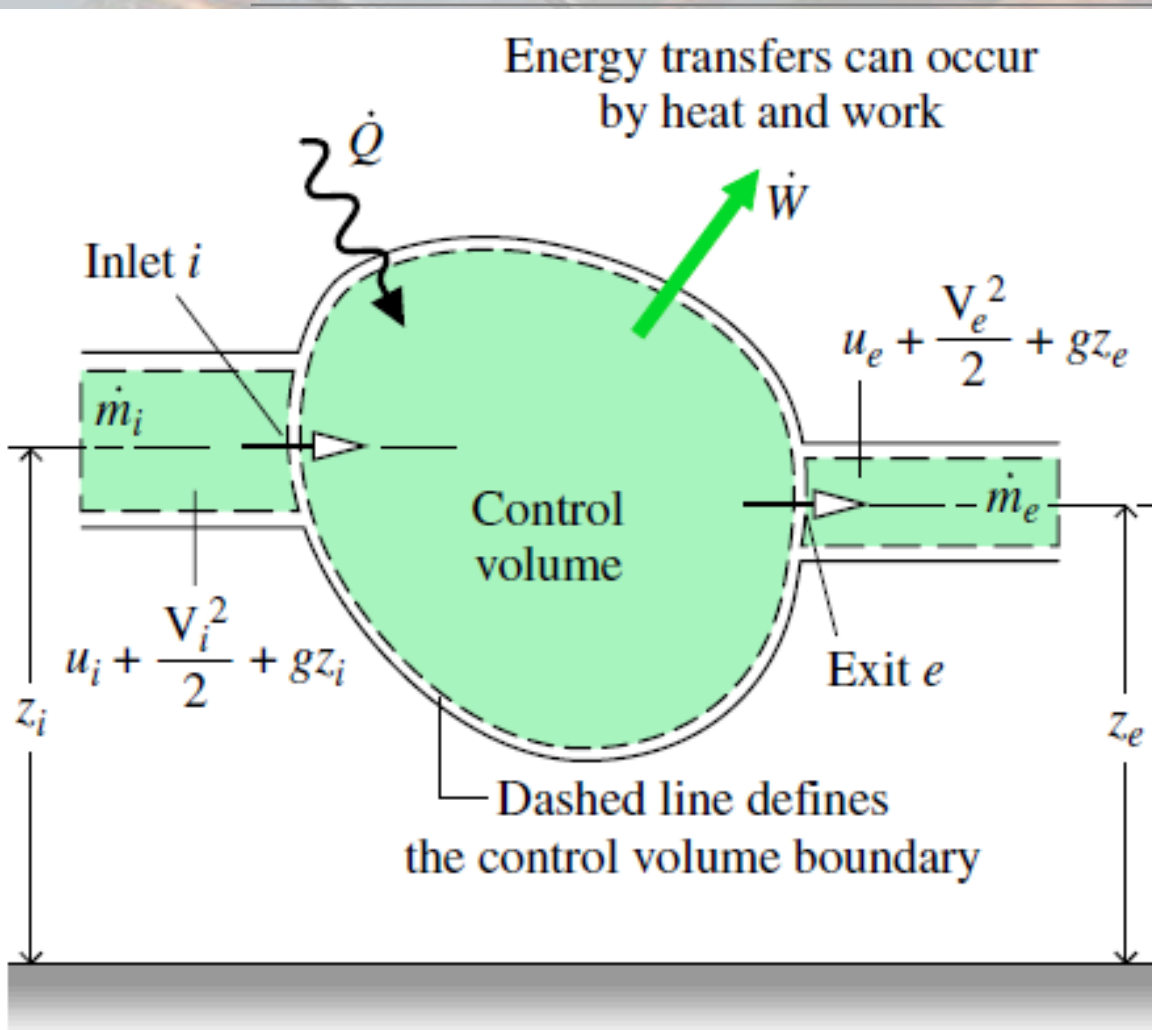
$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \sum_i \dot{m}_i - \sum_e \dot{m}_e$$

- Regime Permanente:

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_e \dot{m}_e$$



Conservação da Energia para um Volume de Controle



$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$\dot{W} = \dot{W}_{cv} + \dot{m}_e(p_e v_e) - \dot{m}_i(p_i v_i)$$

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(u_i + p_i v_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + p_e v_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$h = u + pv$$

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

Balanço de Energia Para Regime Permanente

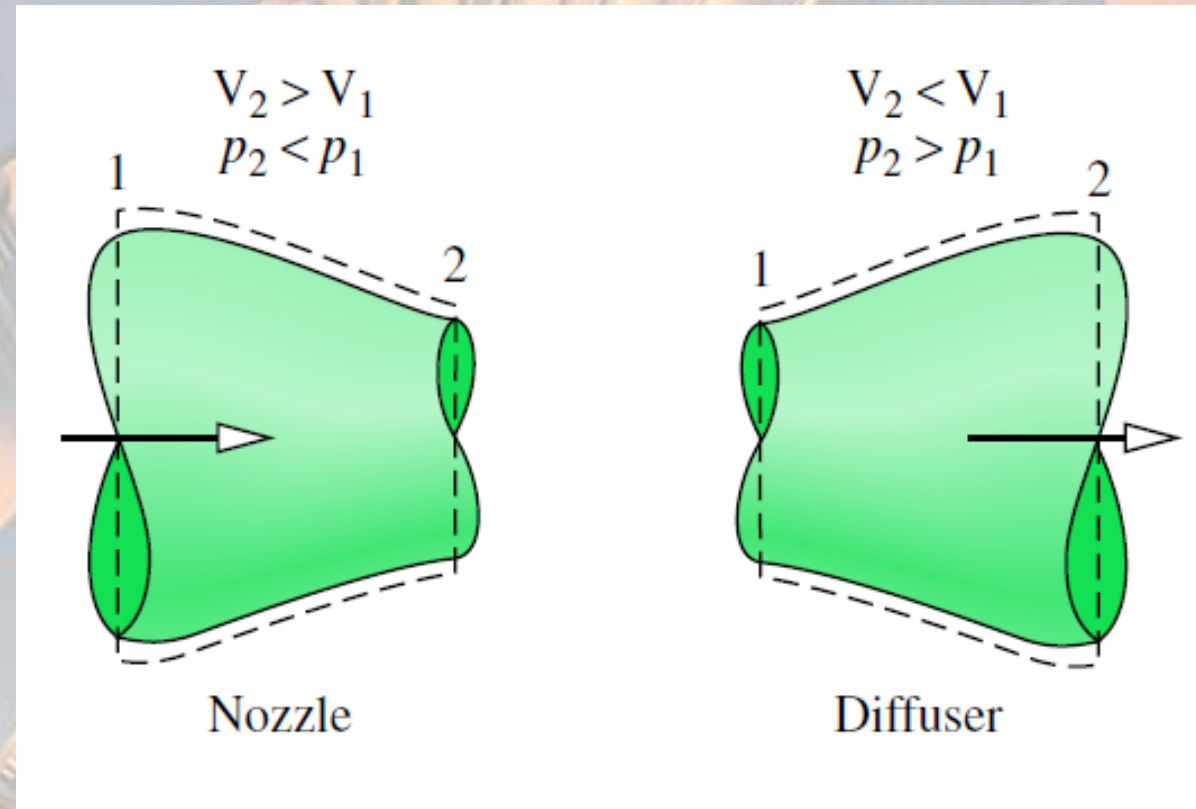
$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

Balanço de Energia

Bocais e Difusores

- Um bocal é um duto com área de seção reta variável na qual a velocidade de um gás ou líquido aumenta na direção do escoamento.
- Em um difusor, o líquido ou gás se desacelera na direção do escoamento.



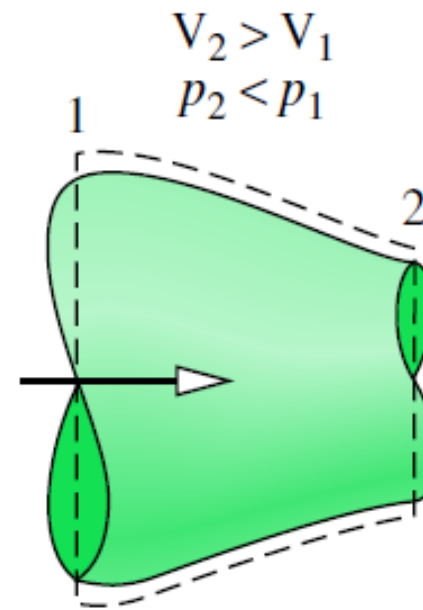
Balanço de Energia

Bocais e Difusores

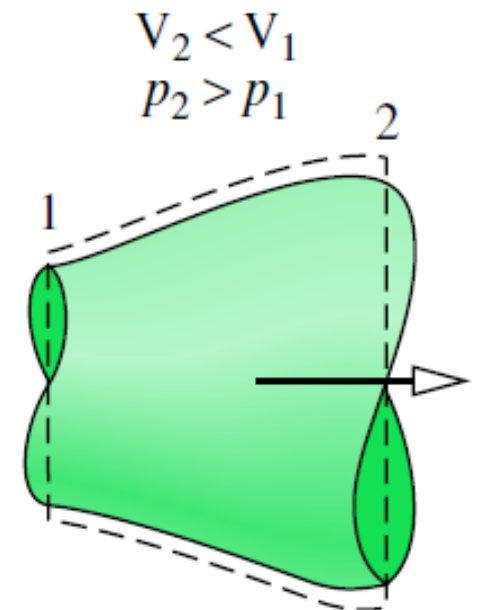
$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2$$

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right)$$

$$0 = \frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right)$$



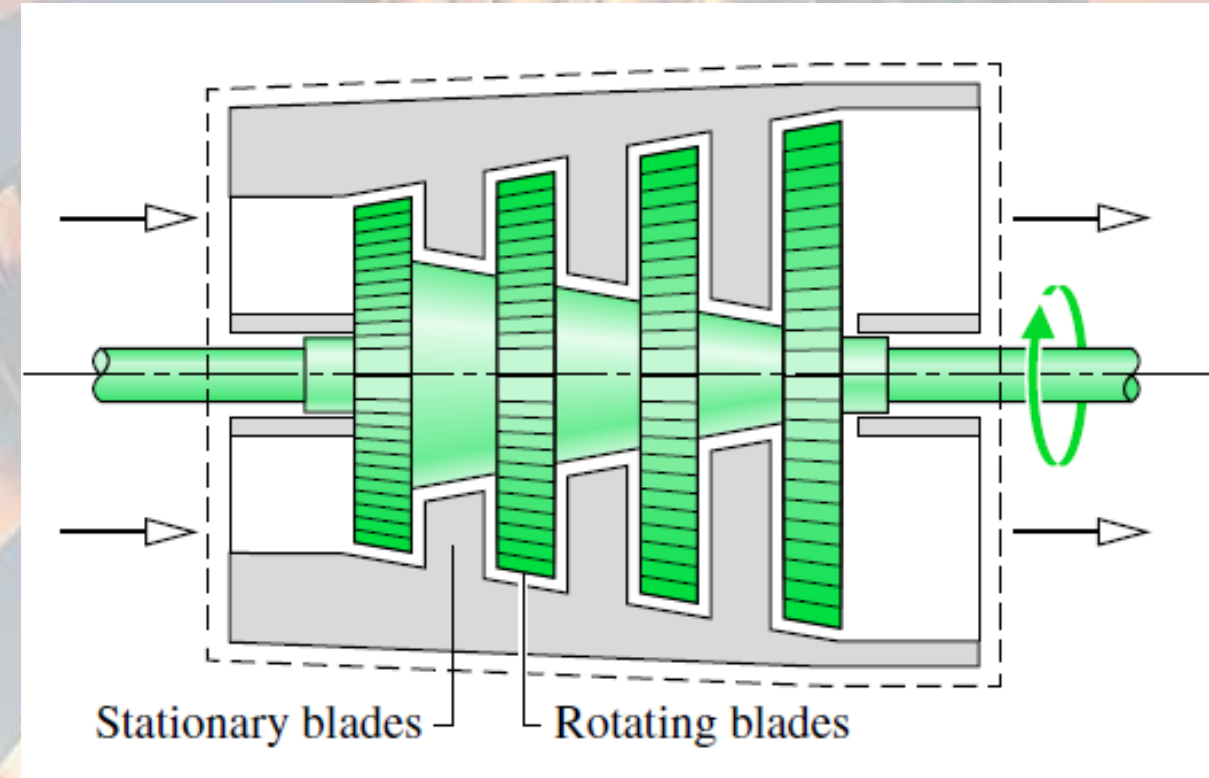
Nozzle



Diffuser

Balanço de Energia Turbina

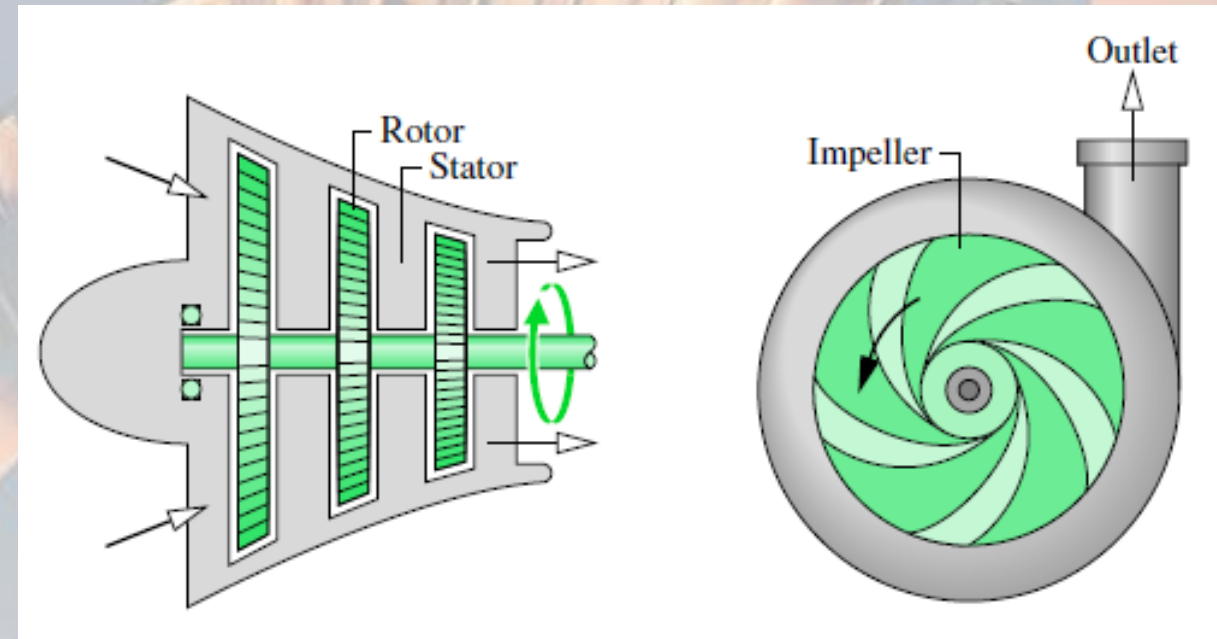
- Uma turbina é um dispositivo que produz trabalho em função da passagem de um gás ou líquido escoando através de uma série de pás colocadas em um eixo que se encontra livre para girar.



Balanço de Energia

Compressores e Bombas

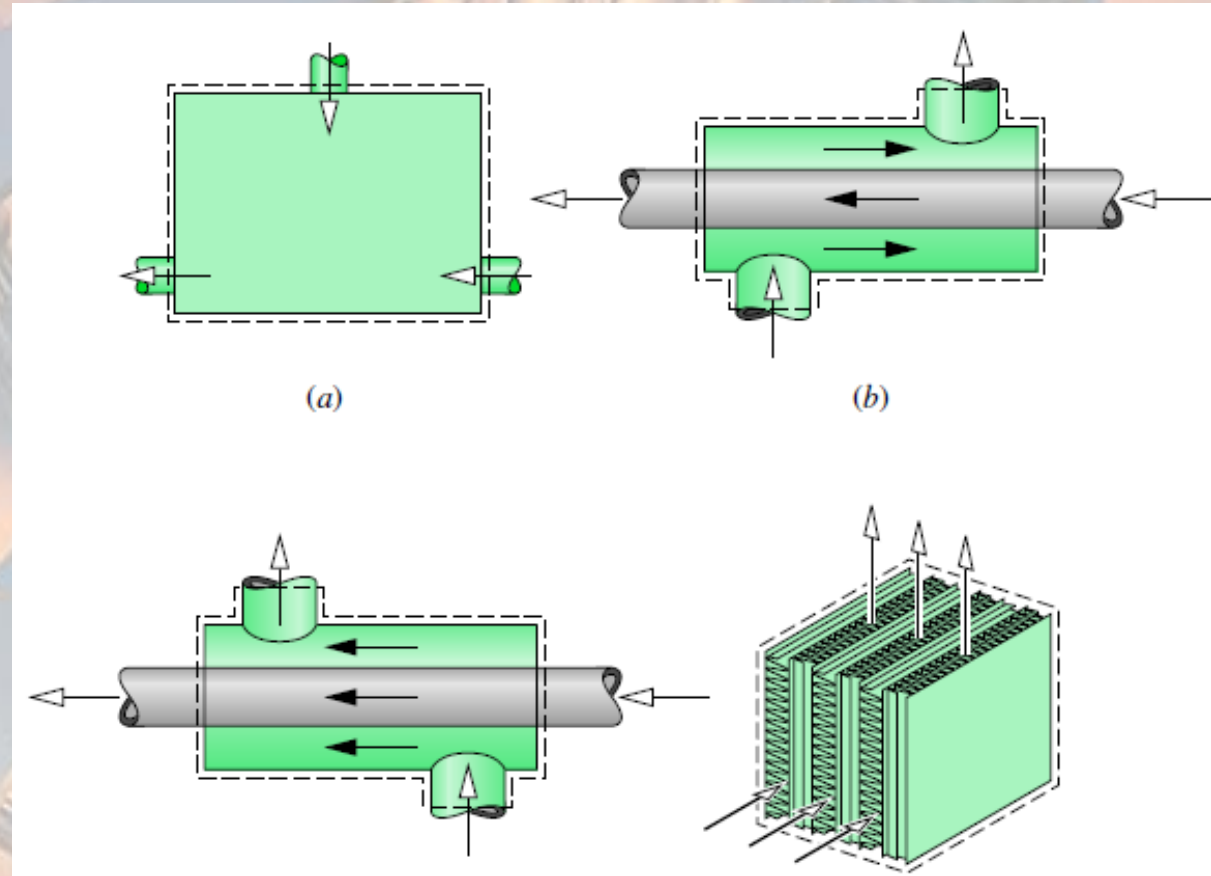
- Compressores são dispositivos nos quais o trabalho é realizado sobre o gás que atravessa de modo a elevar a pressão.
- Nas bombas o trabalho é usado para mudar o estado do líquido e proporcionar seu fluxo em um circuito.



Balanço de Energia

Trocadores de Calor

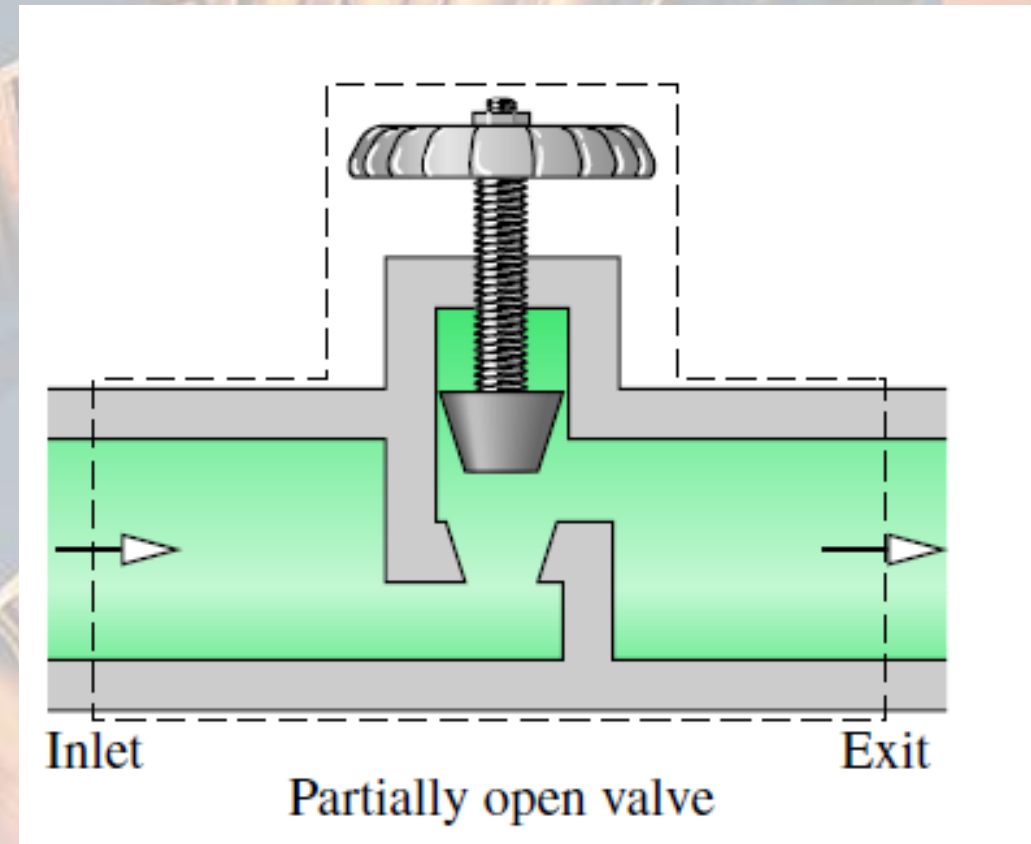
- Os dispositivos que transferem energia entre fluidos de diferentes temperaturas através dos modos de transmissão de calor são denominados trocadores de calor.



Balanço de Energia

Dispositivos de Estrangulamento

- Quando um escoamento em uma válvula ou em outra restrição é idealizado, o processo é chamado de processos de estrangulamento.



$$0 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2$$

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv}^0 + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right)$$

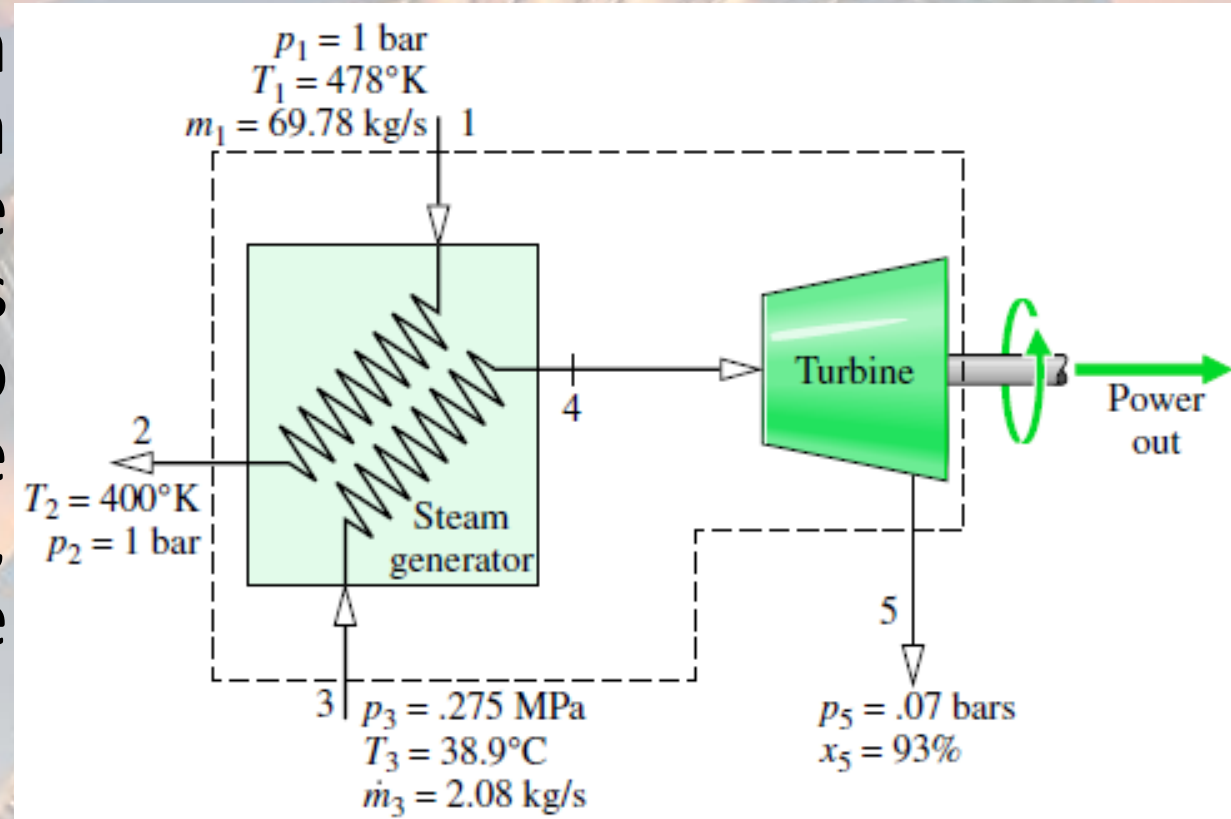
$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

$$h_1 = h_2$$

Balanço de Energia

Exemplo

- O esquema ao lado mostra um circuito de geração de potencia composto por um trocador de calor e uma turbina. Para os parâmetros de operação mostrados na figura, determine a potência gerada pela turbina, adimita que não exista perda de calor para o ambiente.



A Segunda Lei da Termodinâmica

Enunciados

- Kelvin-Planck: É impossível para qualquer sistema operar em um ciclo termodinâmico e fornecer uma quantidade líquida de trabalho para as suas vizinhanças enquanto recebe energia por transferência de calor de um único reservatório térmico.
- Clausius: É impossível para qualquer sistema operar de maneira que o único resultado seria a transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.

A Segunda Lei da Termodinâmica

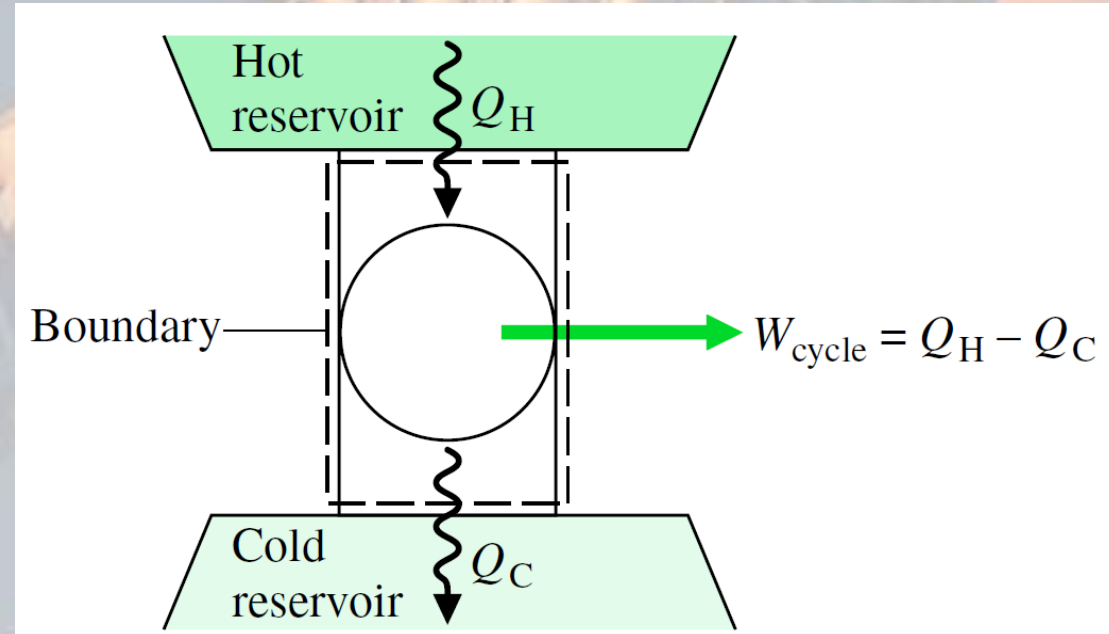
Processos Irreversíveis

- Um processo é chamado de irreversível se o sistema e todas as partes que compõem suas vizinhanças não puderem ser restabelecidos exatamente aos seus respectivos estados iniciais após o processo ter ocorrido.
- O processo é reversível se tanto o sistema quanto as vizinhanças puderem retornar aos seus estados iniciais.

A Segunda Lei da Termodinâmica

Processos Irreversíveis – Ciclo de Carnot

- A eficiência térmica de um ciclo de potência irreversível é sempre menor do que a eficiência térmica de um ciclo de potência reversível quando cada um opera entre os mesmos dois reservatórios térmicos.
- Todos os ciclos de potência reversíveis operando entre os mesmo dois reservatórios térmicos possuem a mesma eficiência térmica.



$$\eta = \frac{W_{\text{cycle}}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

$$\left(\frac{Q_C}{Q_H}\right)_{\text{rev cycle}} = \frac{T_C}{T_H}$$

$$\eta_{\text{max}} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

A Segunda Lei da Termodinâmica Utilizando a Entropia

- A desigualdade de Clausius estabelece que:

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_b \leq 0$$

- A equação também pode ser escrita da seguinte forma:

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_b = -\sigma_{\text{cycle}}$$

$\sigma_{\text{cycle}} = 0$	no irreversibilities present within the system
$\sigma_{\text{cycle}} > 0$	irreversibilities present within the system
$\sigma_{\text{cycle}} < 0$	impossible

A Segunda Lei da Termodinâmica

Balanço de Entropia

◦ Por definição a variação de entropia em um processo irreversível é dada por:

$$S_1 - S_2 = \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int rev}}$$

◦ Para um processo real, a geração de entropia é adicionada a equação:

$$\frac{S_2 - S_1}{\text{entropy change}} = \frac{\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_b}{\text{entropy transfer}} + \frac{\sigma}{\text{entropy production}}$$

A Segunda Lei da Termodinâmica

Balanco de Entropia

- O balanço diferencial de entropia em um volume de controle pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e + \dot{\sigma}_{cv}$$

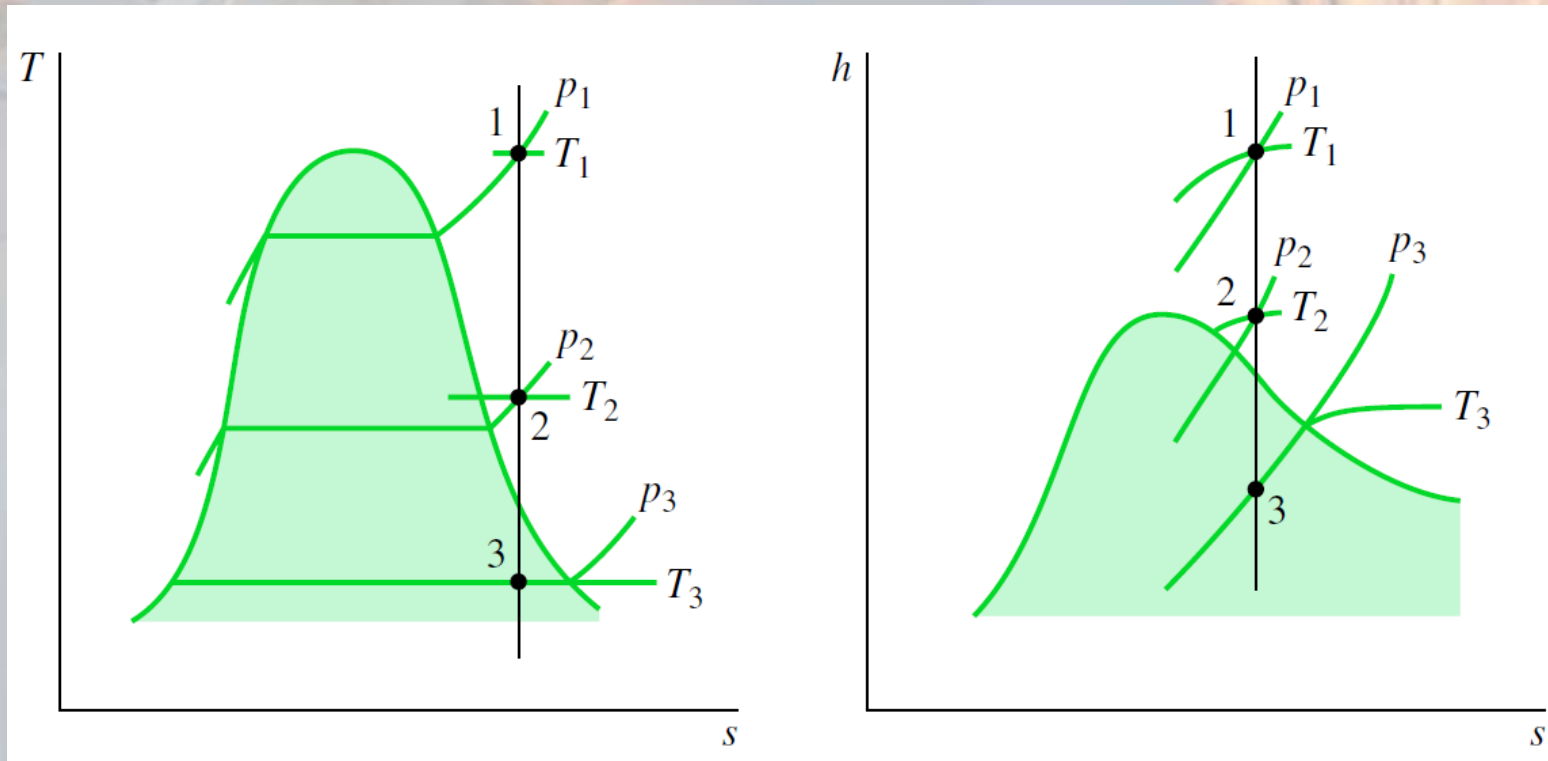
rate of entropy change rates of entropy transfer rate of entropy production

$$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e + \dot{\sigma}_{cv}$$

A Segunda Lei da Termodinâmica

Processos Isentrópicos

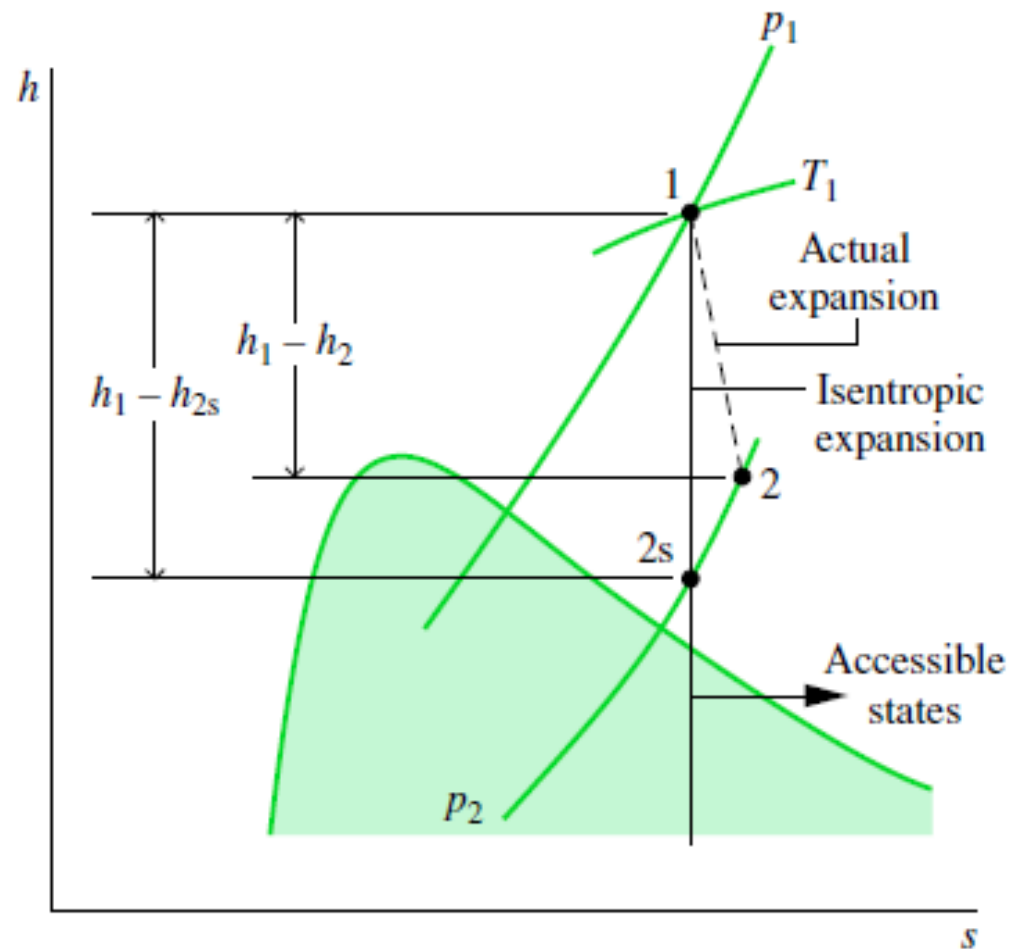
- O termo isentrópico denota entropia constante:



A Segunda Lei da Termodinâmica

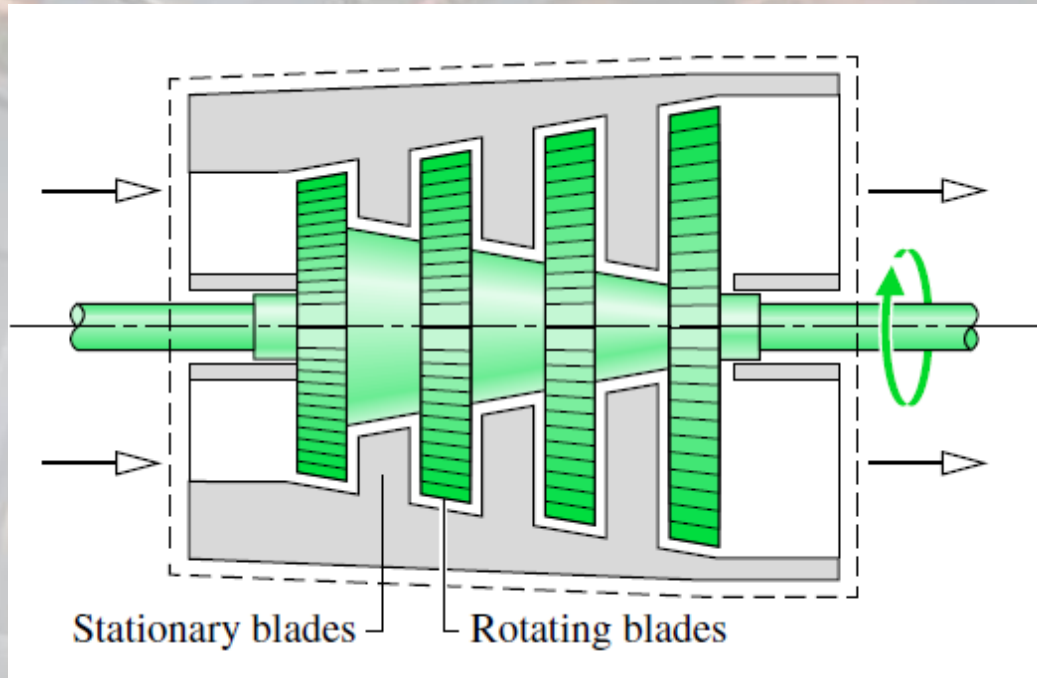
Eficiência Isoentrópica – Turbinas

- A eficiência isoentrópica consiste na comparação entre o desempenho real de um equipamento e o desempenho que seria atingido em condições idealizadas para o mesmo estado inicial e a mesma pressão de saída.



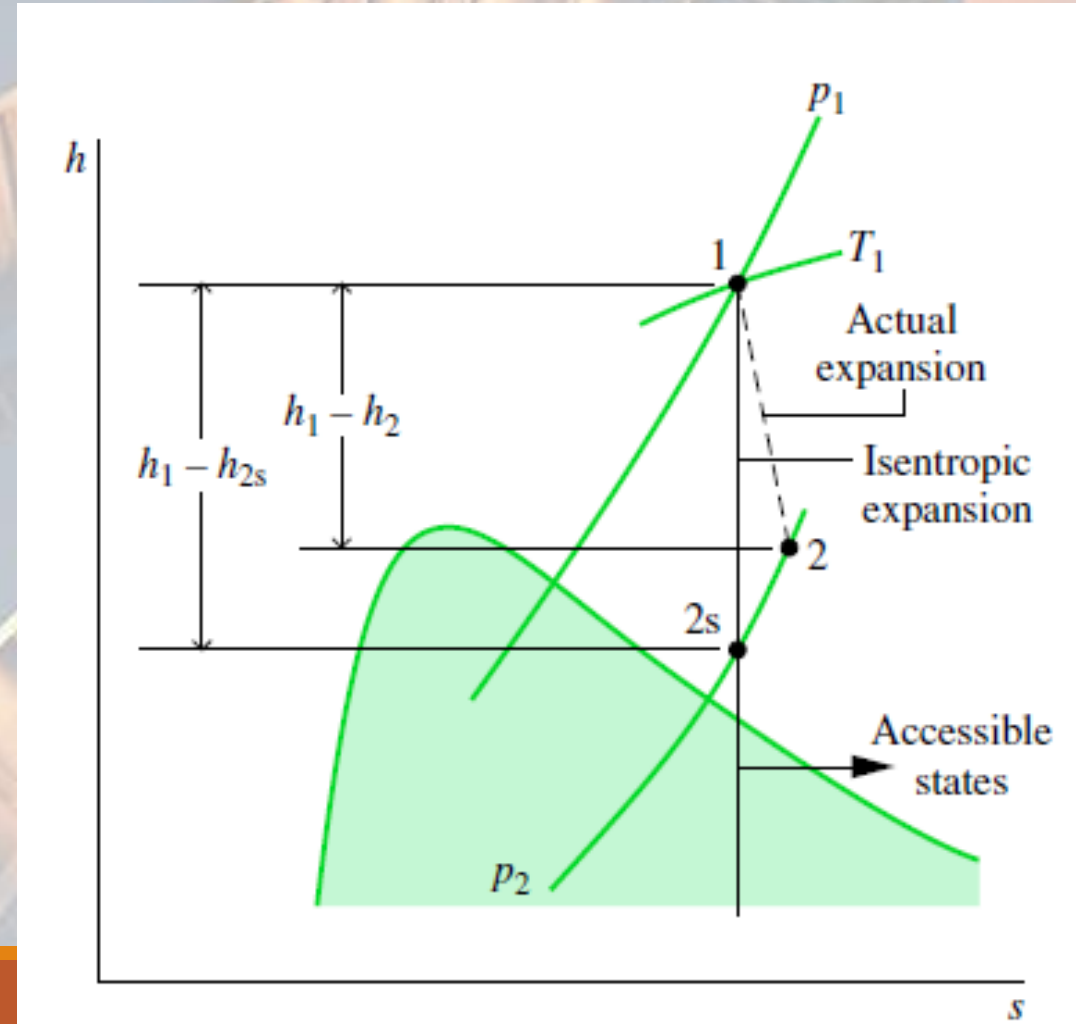
A Segunda Lei da Termodinâmica Eficiência Isoentrópica – Turbinas

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{cv}/\dot{m}}{(\dot{W}_{cv}/\dot{m})_s}$$



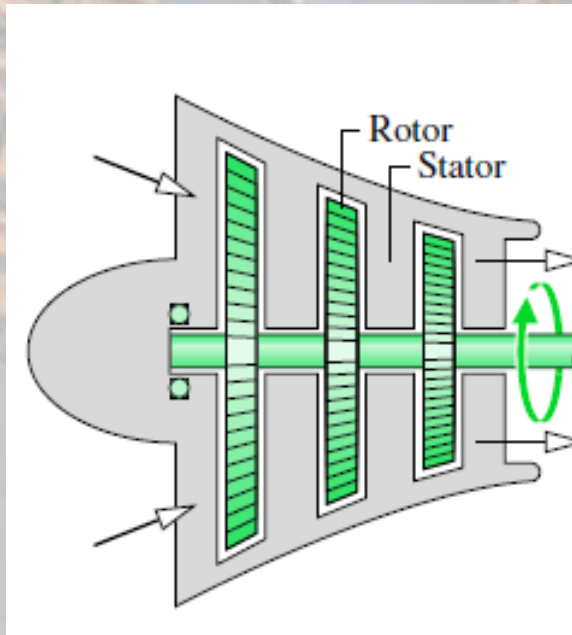
$$\frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

$$\left(\frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{m}}\right)_s = h_1 - h_{2s}$$



A Segunda Lei da Termodinâmica

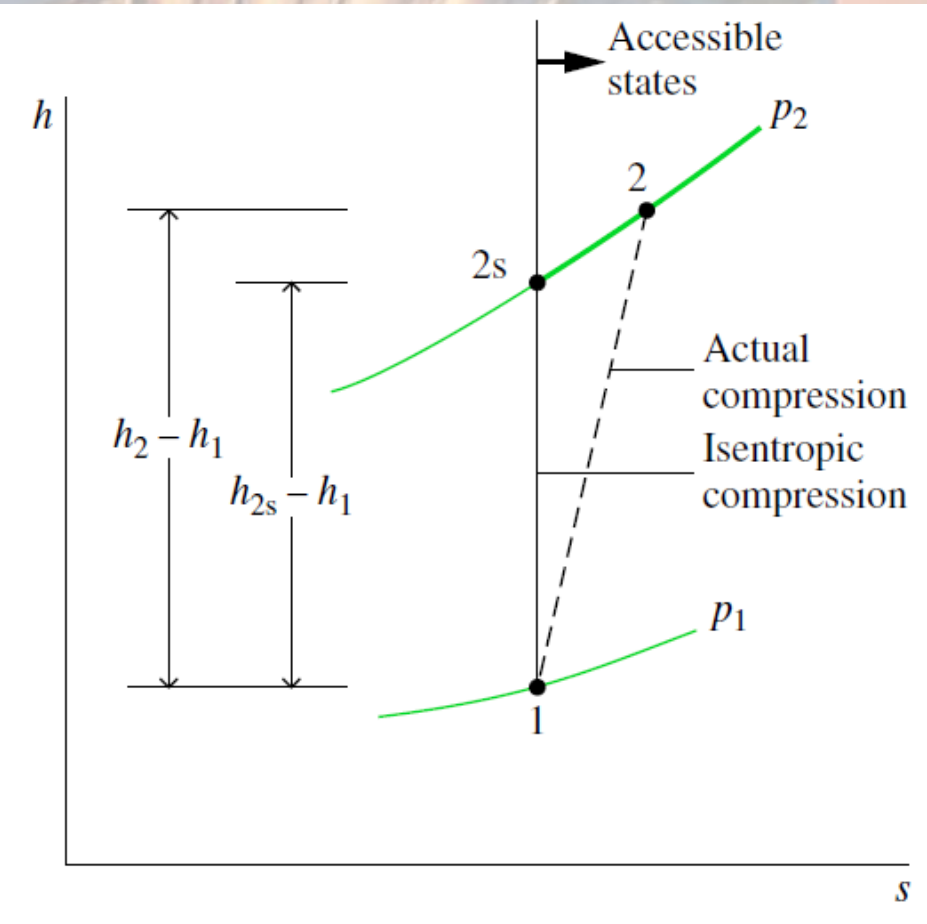
Eficiência Isoentrópica – Compressores



$$\eta_c = \frac{(-\dot{W}_{cv}/\dot{m})_s}{(-\dot{W}_{cv}/\dot{m})}$$

$$\left(-\frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{m}}\right) = h_2 - h_1$$

$$\left(-\frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{m}}\right)_s = h_{2s} - h_1$$



A Segunda Lei da Termodinâmica

Eficiência Isoentrópica – Compressores

◦ Para Gases ideais:

◦ Onde: $h_1(T)$ e $h_2(T)$.

$$\left(-\frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{m}} \right) = h_2 - h_1$$

$$\eta_c = \frac{(-\dot{W}_{cv}/\dot{m})_s}{(-\dot{W}_{cv}/\dot{m})}$$

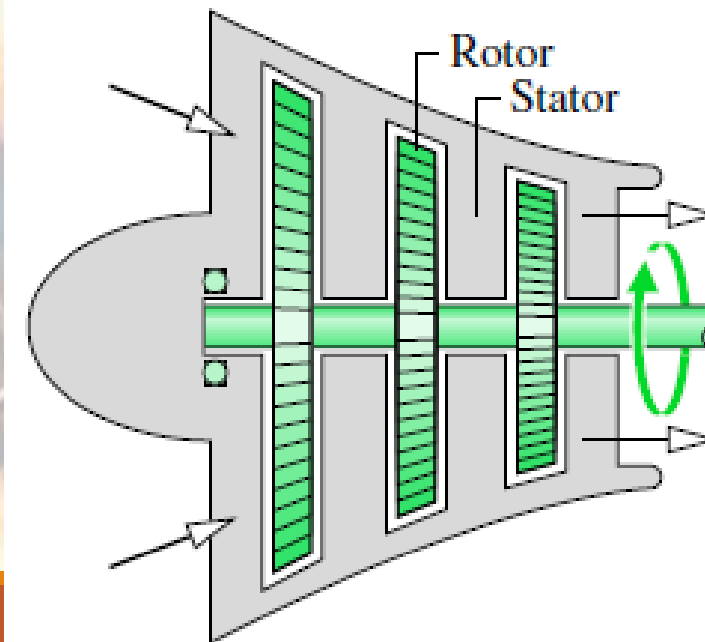
◦ Para processos reversíveis:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}}$$

$$s_1 = s_2$$

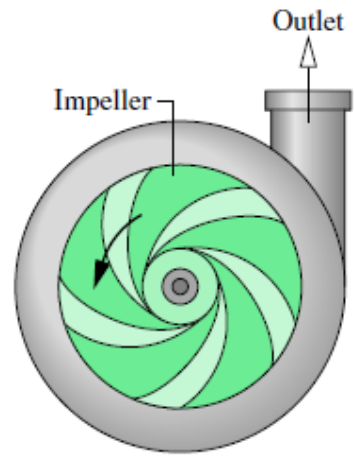
Tables A-22

$$p_{r1} = p_r(T_1) \text{ and } p_{r2} = p_r(T_2)$$



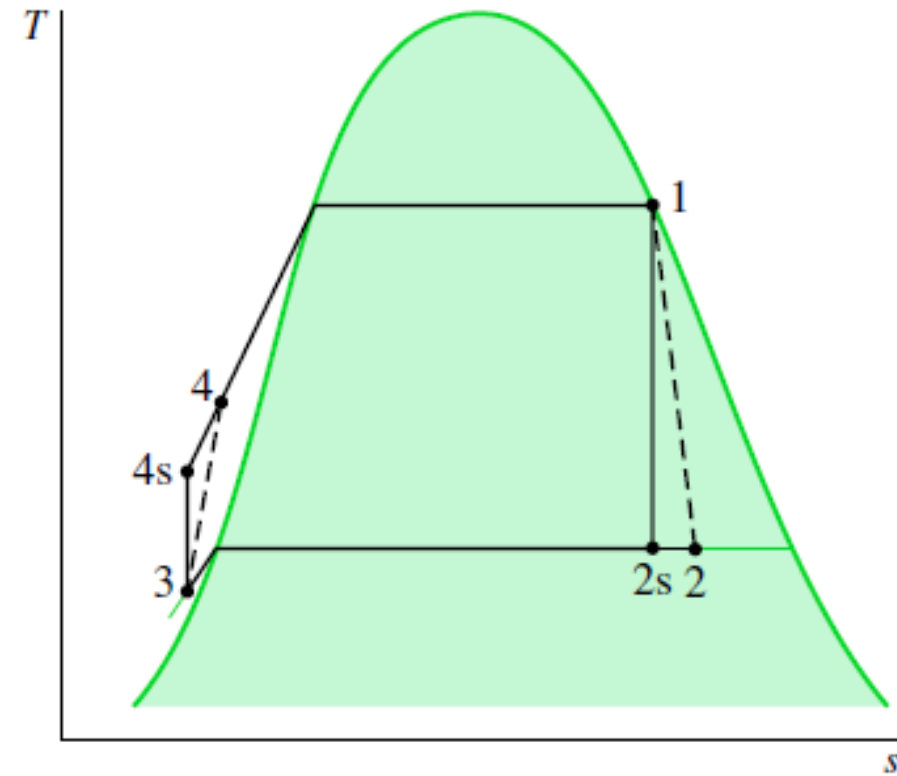
A Segunda Lei da Termodinâmica

Eficiência Isoentrópica – Bombas



$$\eta_p = \frac{(\dot{W}_p/\dot{m})_s}{(\dot{W}_p/\dot{m})} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$$

$$\left(\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}}\right)_{\text{int rev}} \approx v_3(p_4 - p_3)$$



A Segunda Lei da Termodinâmica

Eficiência Isoentrópica – Exercício

- Uma turbina a vapor opera em regime permanente com condições de entrada de $P_1=5$ bar, $T_1=320^\circ\text{C}$. Vapor deixa a turbina a uma pressão de 1 bar. Não ocorre transferência significativa de calor. Se a eficiência isoentrópica da turbina é de 75%, determine o trabalho produzido por unidade de massa de vapor, em KJ/Kg.

