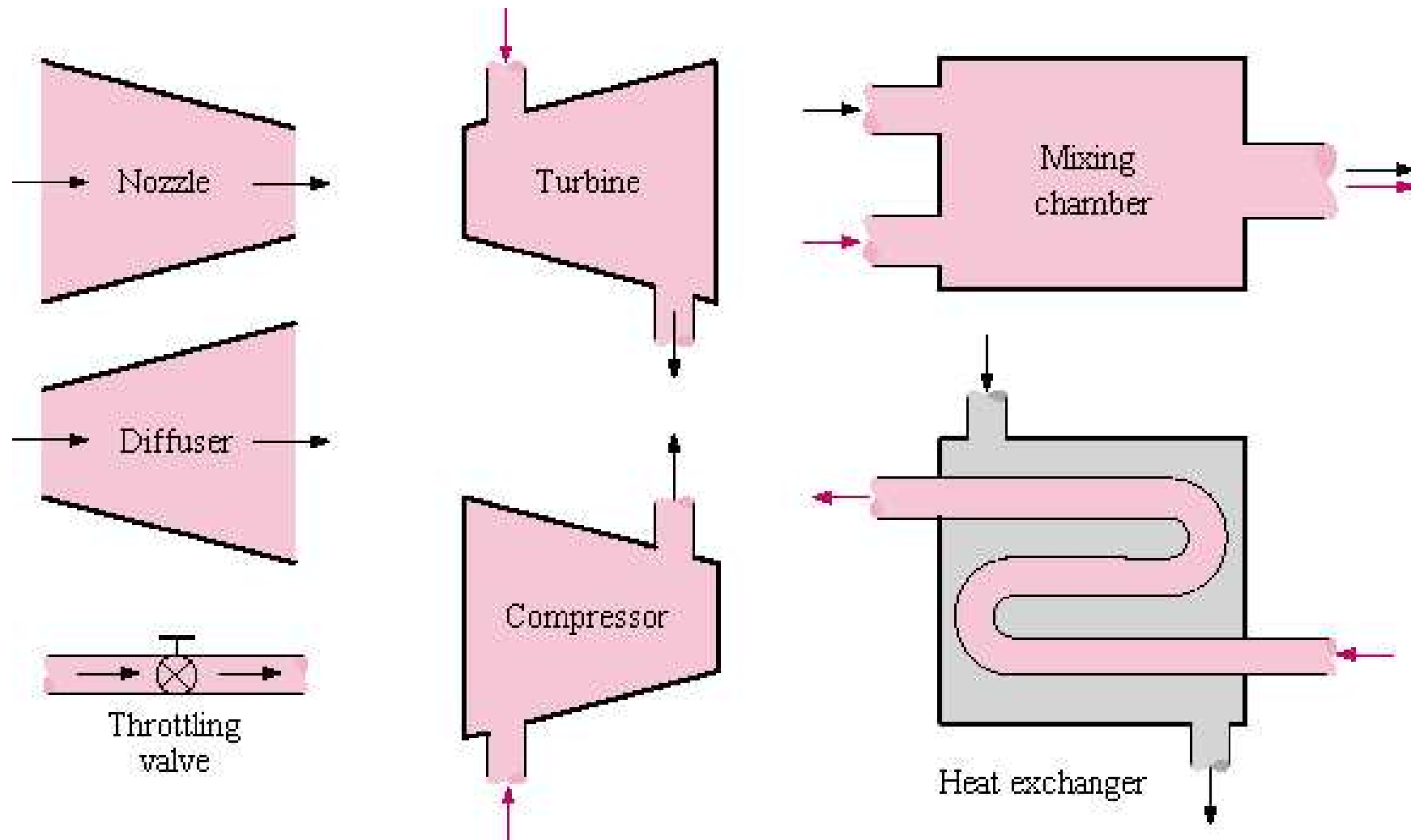


Componentes dos ciclos termodinâmicos

Componentes dos ciclos termodinâmicos

- **Quais podem ser os componentes de um ciclo termodinâmico?**
- **Turbinas, válvulas, compressores, bombas, trocadores de calor (evaporadores, condensadores), misturadores, etc.**

Sistemas abertos - V.C.



Ciclo de potência a vapor: Usina

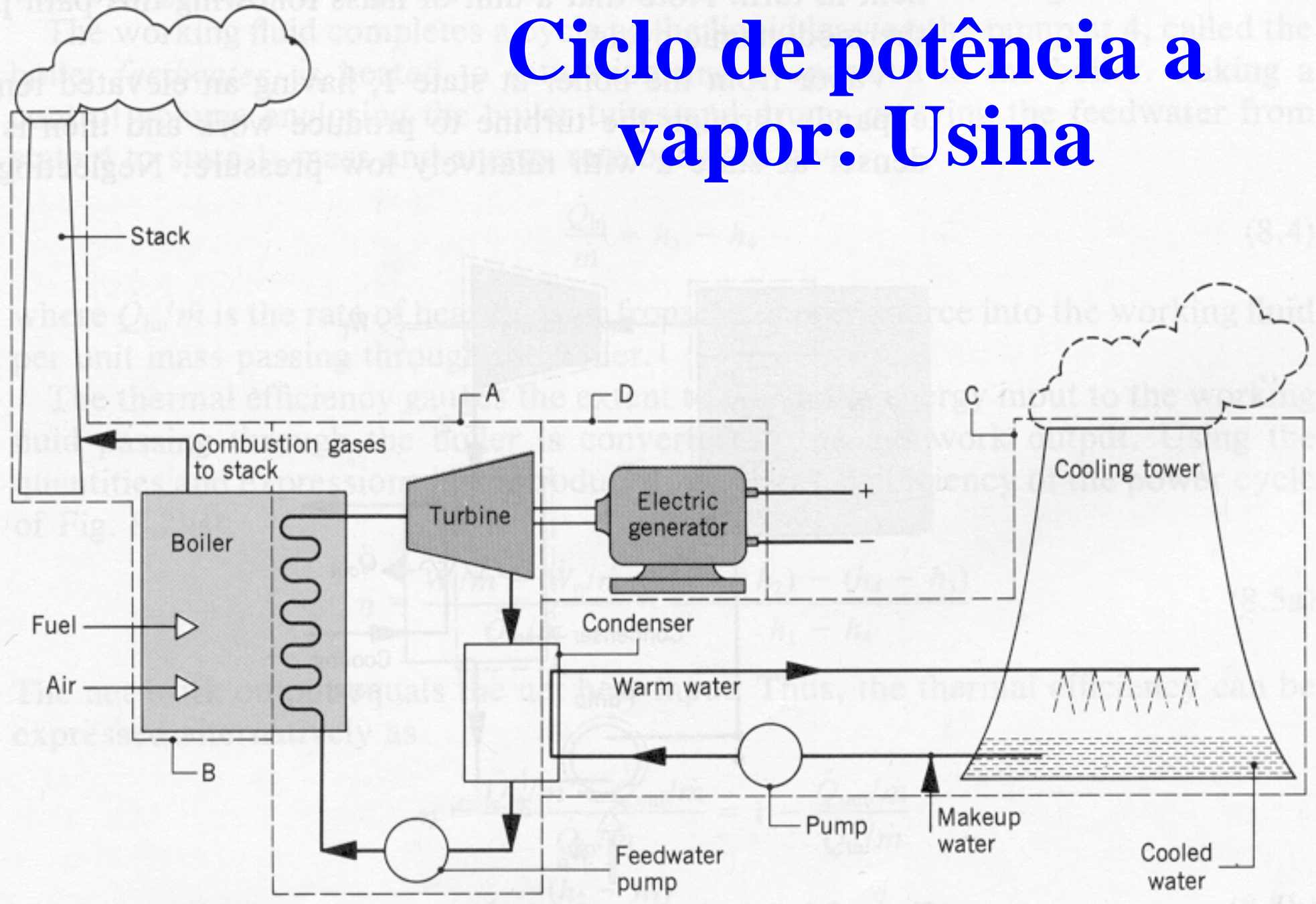


Figure 8.1 Components of a simple vapor power plant.

1ª Lei:

$$q - w = (h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

Aplicações a alguns sistemas em regime permanente

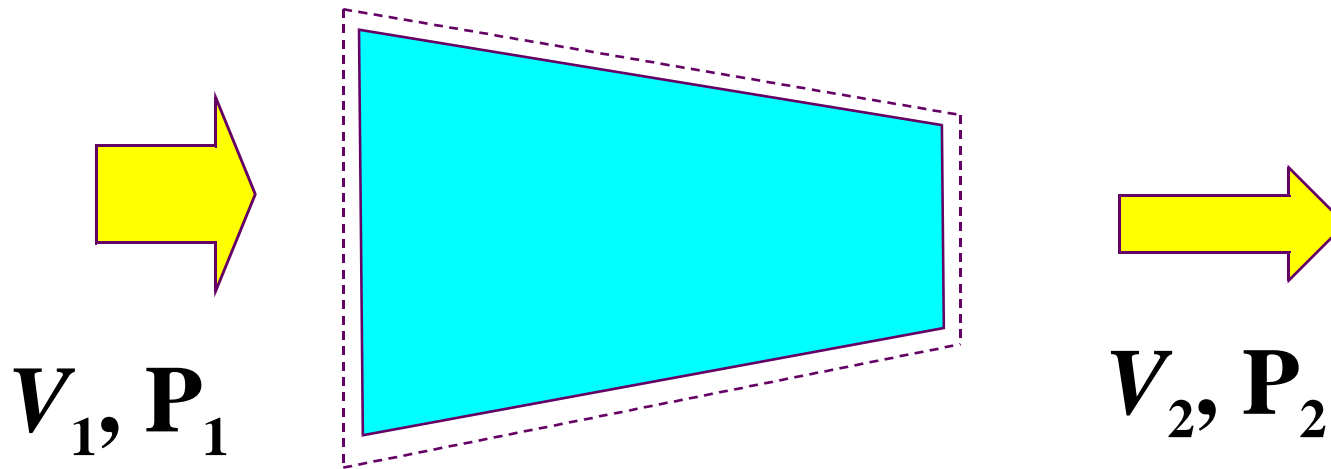
- **Dispositivos simples**
 - Bocais convergentes
 - Difusores
 - Válvulas
- **Dispositivos com entrada/saída de potência**
 - Turbinas
 - Compressores/bombas
- **Dispositivos com múltiplas entradas e saídas**
 - Trocadores de calor
 - Misturadores

Obtenção de resultados

- **Transporte de massa**
- **Transporte de Q.D.M. ou de transporte de energia**
- **Equações de estado**
- **Tabelas de propriedades**

Bocais convergentes e difusores

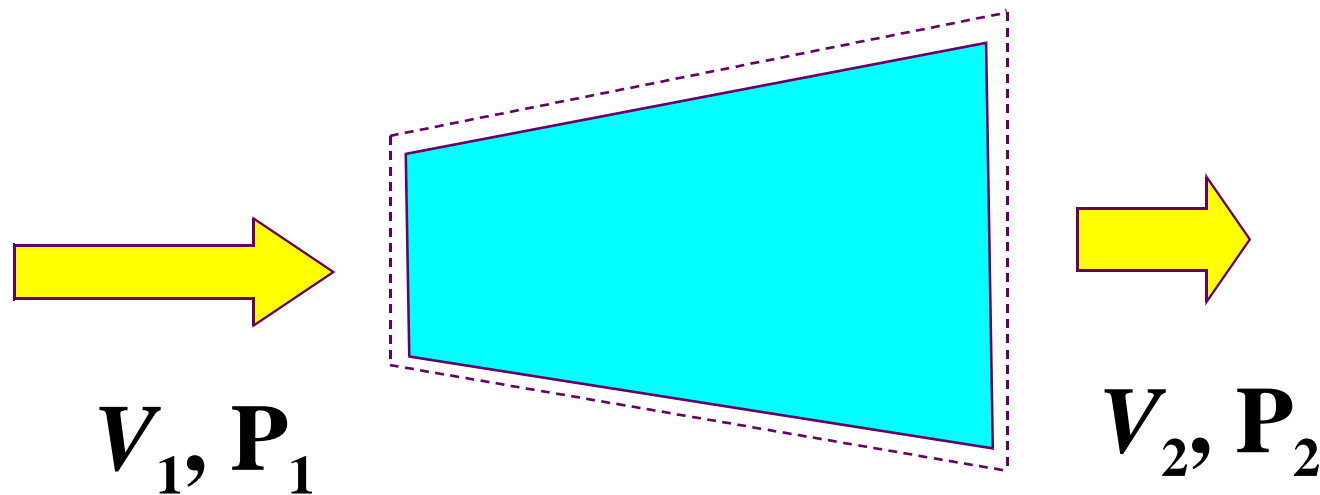
- **Bocal convergente: dispositivo que acelera o fluido, diminuindo sua pressão**



OBS: configuração para um escoamento sub-sônico

Bocais convergentes e difusores

- **Difusor: dispositivo que desacelera o fluido, aumentando a pressão**



OBS: configuração para um escoamento sub-sônico

Hipóteses normalmente utilizadas com convergentes e difusores

- escoamento em regime permanente
- Não há trabalho
- Trocas de calor são desprezíveis
- Variações de energia potencial são desprezíveis

Transporte de massa:

Regime permanente

$$\frac{\partial m_{cv}}{\partial t} = 0$$

logo

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

Conservação de energia

$$\frac{\partial E_{cv}}{\partial t} = \dot{Q} - \dot{W}_{shaft} + \dot{m} \left[(h_i - h_e) + \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} + g(z_i - z_e) \right] = 0$$

Dividindo pelo fluxo de massa e simplificando:

$$\cancel{q} - \cancel{w} = (h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 \cancel{-} z_1)$$

$q = 0$ (adiabático)

$w = 0$ (não são dispositivos que produzem trabalho)

Assim:

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

Com um convergente ou um difusor, converte-se energia interna e do escoamento, representada por $\Delta h = \Delta(u + Pv)$ em energia cinética, ou vice-versa.

Abordagem utilizada na análise do dispositivo

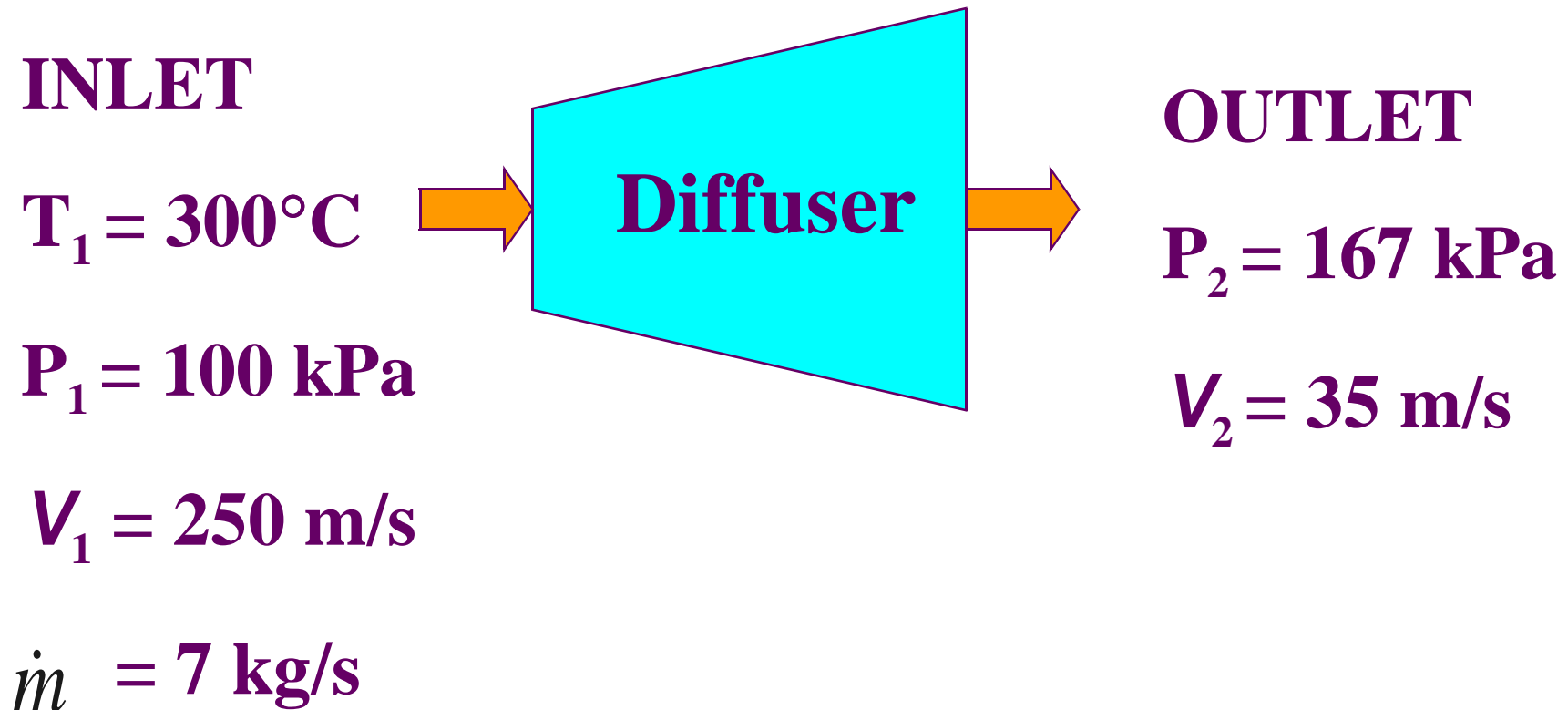
- Hipótese do regime do escoamento no dispositivo
- Equações de transporte de massa e de energia

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

Questão

Um difusor adiabático é utilizado para reduzir a velocidade de uma corrente de ar de 250 m/s para 35 m/s. A pressão na entrada é 100 kPa e a temperatura na entrada é 300°C. Determinar a área de escape (saída) em cm² se o fluxo de massa é 7 kg/s e a pressão no escape 167 kPa.

Solução: dados do pb.



Solução: hipóteses

- **Escoamento em regime permanente**
- **Adiabático**
- **Sem trabalho**
- **Variação de energia potencial = 0**
- **Ar é gás ideal**

Solução: transporte de massa

Transporte de massa

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

$$\dot{m} = \rho V A$$

Resolvendo para A_2

$$A_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 V_2}$$

Solução: equação de estado

Gás ideal:

$$P = \rho RT$$

ou

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1} \quad \text{e} \quad \rho_2 = \frac{P_2}{RT_2}$$

Como conhecemos T_1 e P_1 , achar ρ_1 é simples.

Conhecendo apenas P_2 , como obter T_2 ou ρ_2 ?

Utiliza-se a equação da energia

Solução: equação da energia

$$q - w = (h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

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

V_1 e V_2 são conhecidos. Precisamos de h_2 para obter T_2 e v_2 .

Se assumirmos calores específicos constantes, podemos obter diretamente T_2

$$c_p (T_2 - T_1) = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2}$$

Solução

$$c_p(T_2 - T_1) = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2}$$

$$T_2 = 590\text{K}$$

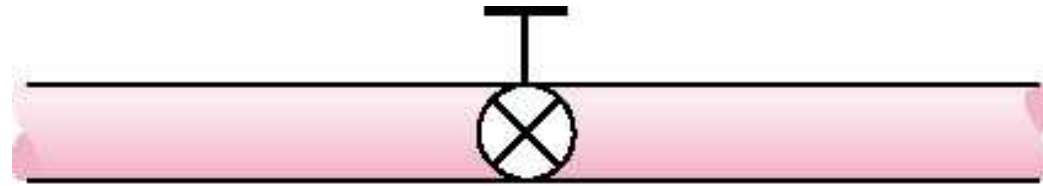
$$\rho_2 = \frac{P_2}{RT_2}$$

$$\rho_2 = 0,9858 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$A_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 V_2}$$

$$A_2 = 2030 \text{ cm}^2$$

Dispositivos de “ajuste” (Válvulas)



(a) An adjustable valve



(b) A porous plug



(c) A capillary tube

Hipóteses típicas para estes dispositivos:

- **Não há trabalho**
- **Variações de energia potencial são desprezíveis**
- **Variações de energia cinética são desprezíveis**
- **Transferência de calor é desprezível**
- **Apenas duas portas**

Equação da energia

Aplicando as hipóteses precedentes:

$$\cancel{q} - \cancel{w} = (h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - \cancel{V_1^2}}{2} + g(z_2 - \cancel{z_1})$$

obtemos: $(h_2 - h_1) = 0$

ou $h_2 = h_1$

Questão

A temperatura do fluido

aumenta,

diminui, ou

permanece constante

quando ele passa por uma válvula adiabática?

Análise durante passagem pela válvula

Se o fluido é um gás ideal:

$$(h_2 - h_1) = C_p (T_2 - T_1) = 0$$

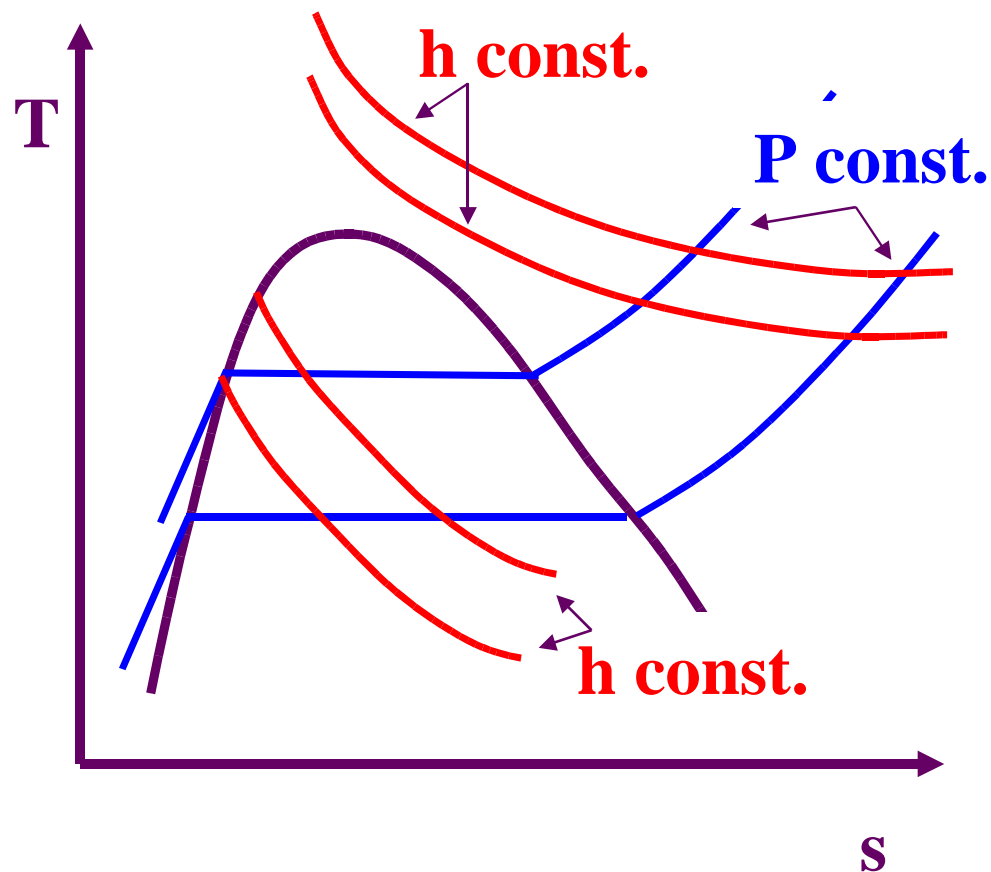
C_p é sempre positivo, logo:

$$T_2 = T_1$$

Análise durante passagem pela válvula

Se o fluido está em equilíbrio líquido/vapor:

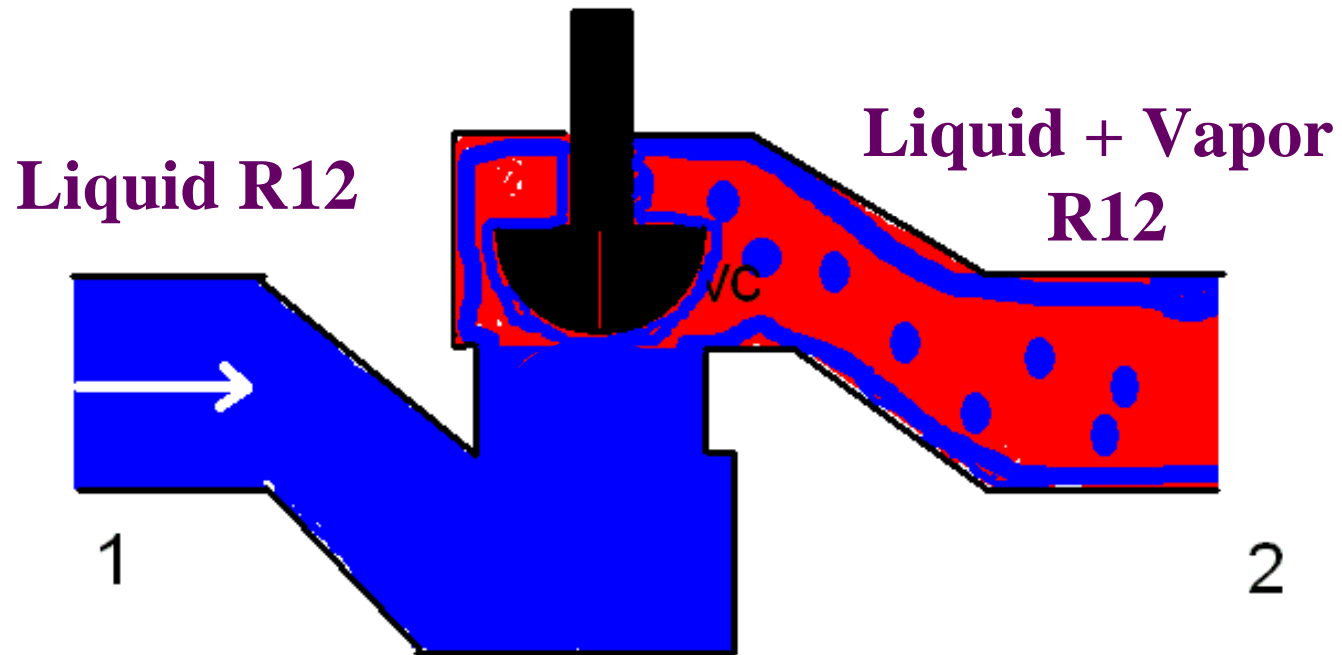
- A pressão cai,
- A temperatura cai
- A entalpia permanece constante



Questão

R12 entra em uma válvula como líquido saturado a 0.9607 Mpa e sai a 0.1826 MPa. Qual é o título e a temperatura do R12 na saída da válvula?

Questão (cont)



State (1)

Liquid saturated, $x=0$

$P_{sat} = 0.9607 \text{ MPa}$

$T_{sat} = ?$

$H_{liq} = ?$

State (2)

Liquid+vapor, $x=?$

$P_{sat} = 0.1826 \text{ MPa}$

$T_{sat} = ?$

$H_{liq} = ?$

Turbina

- É um dispositivo no qual trabalho é produzido por um gás passando por uma série de pás fixas a um eixo, o qual pode girar livremente

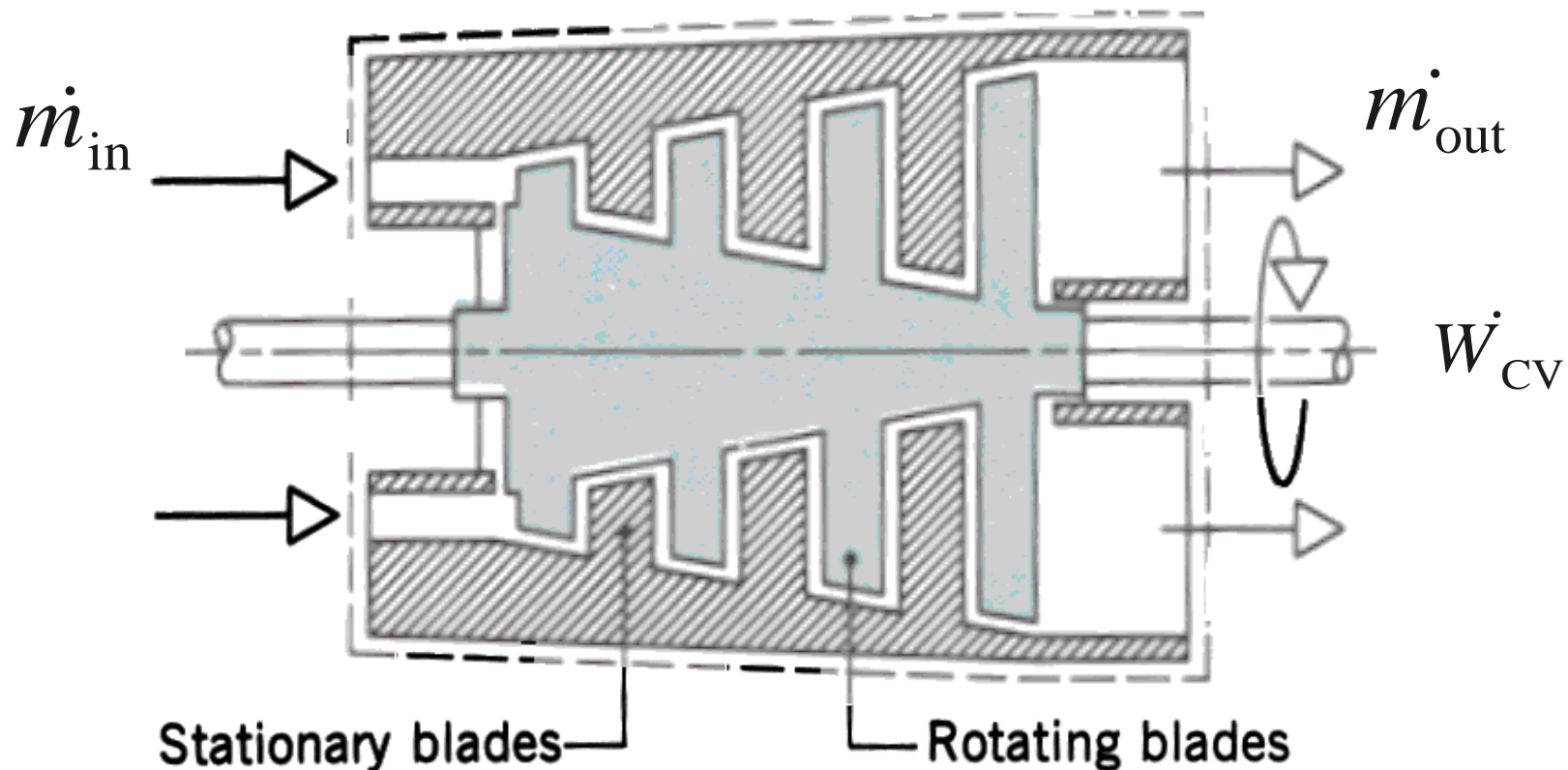


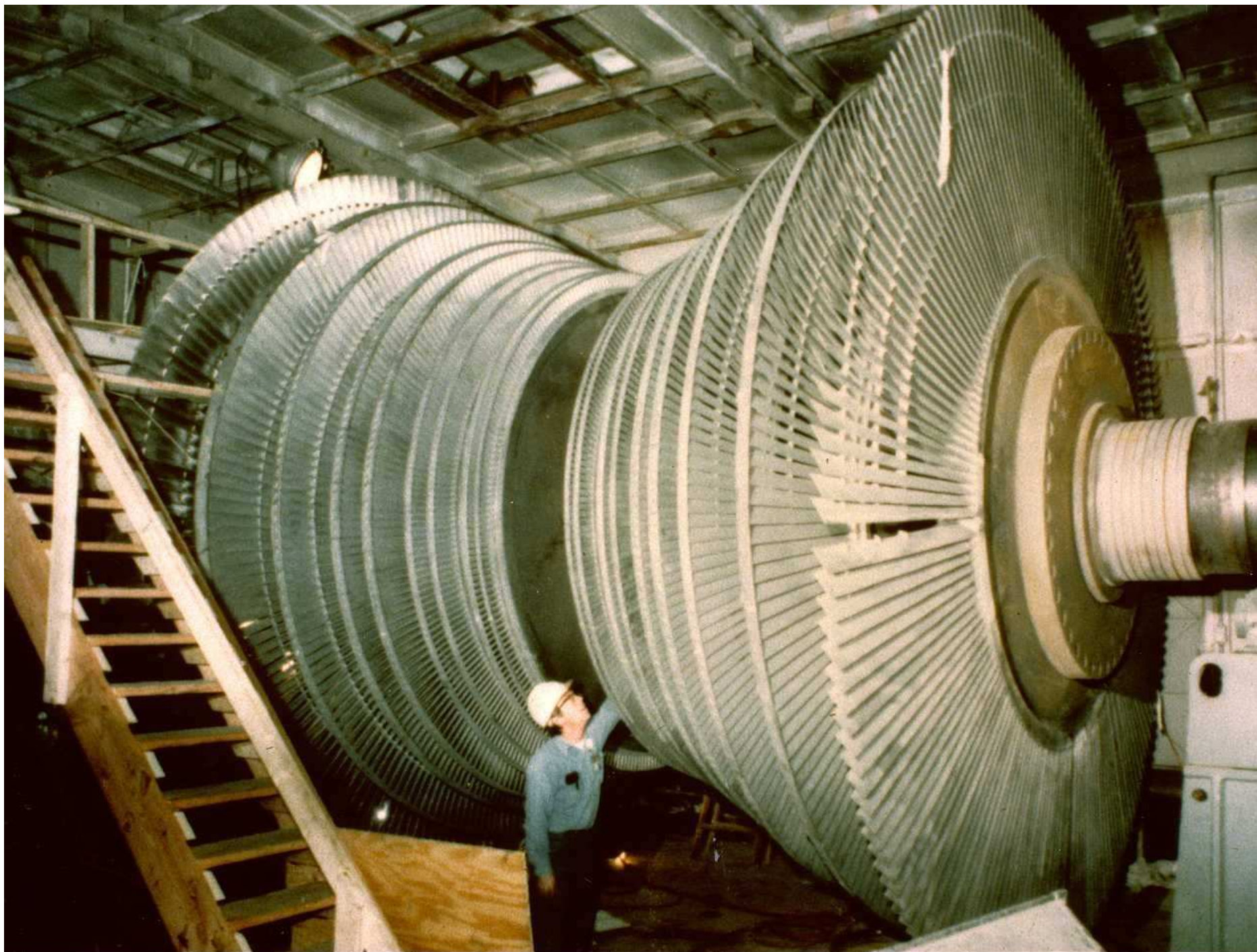
Figure 4.5 Schematic of an axial-flow turbine.



Overview of a steam turbine and main generator for a nuclear steam power station.
(Courtesy of Carolina Power and Light Company)



Turbine bed for a steam power station.
(Courtesy of Carolina Power and Light Company)



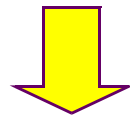
Low pressure steam turbine wheel.

(Courtesy of Carolina Power and Light Company)

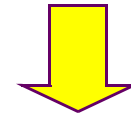
Turbinas

Podemos assumir regime permanente,

$$q - w = (h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$



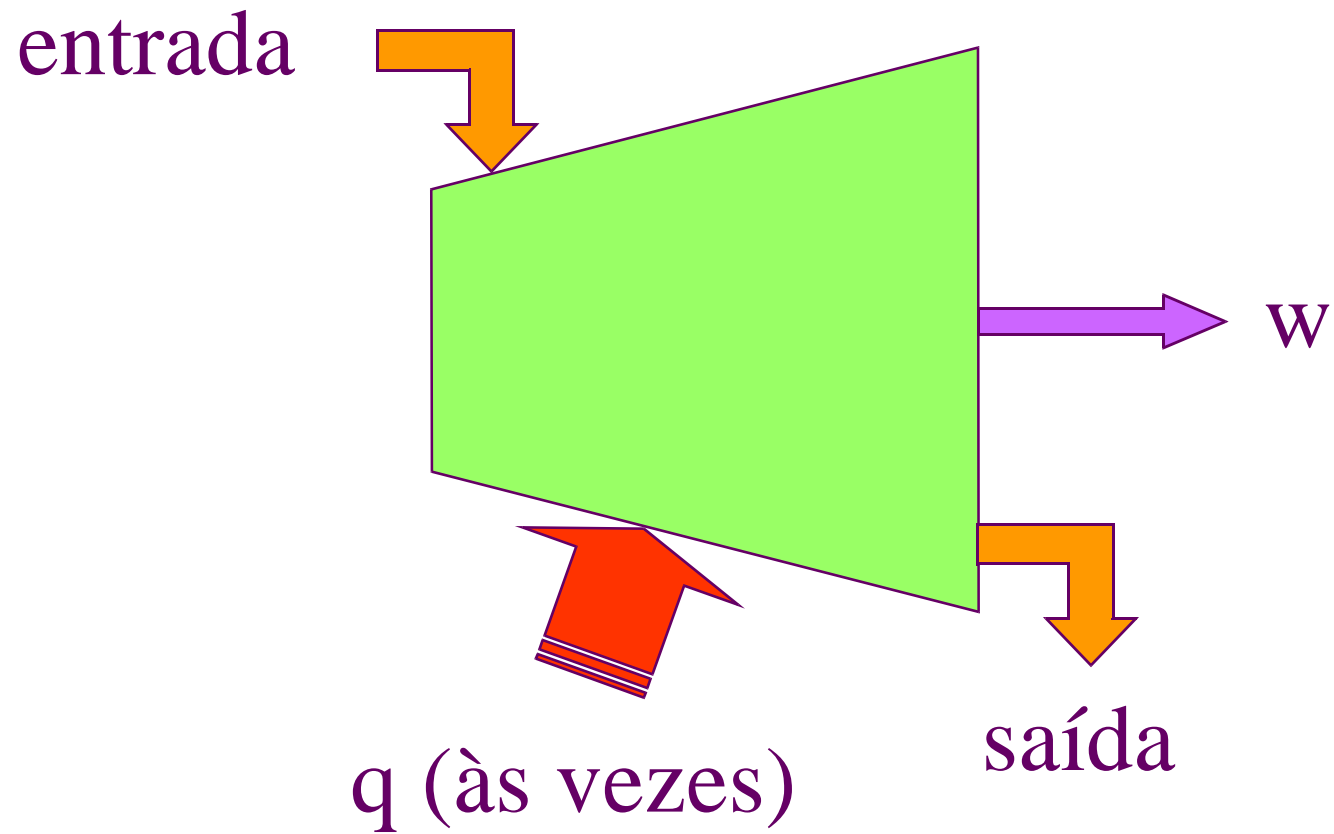
Às vezes
desprezado



Quase
sempre
desprezado

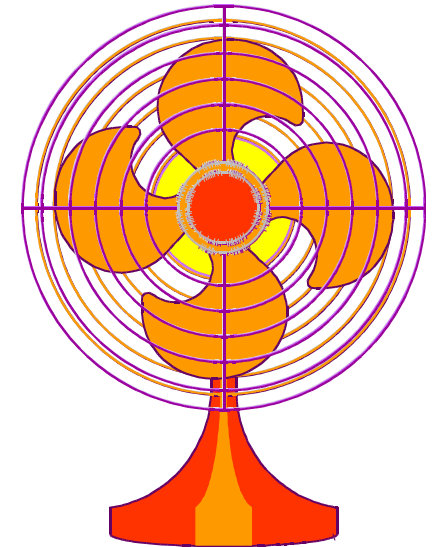
$$q - w = (h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

Turbinas



Compressores, bombas e ventiladores

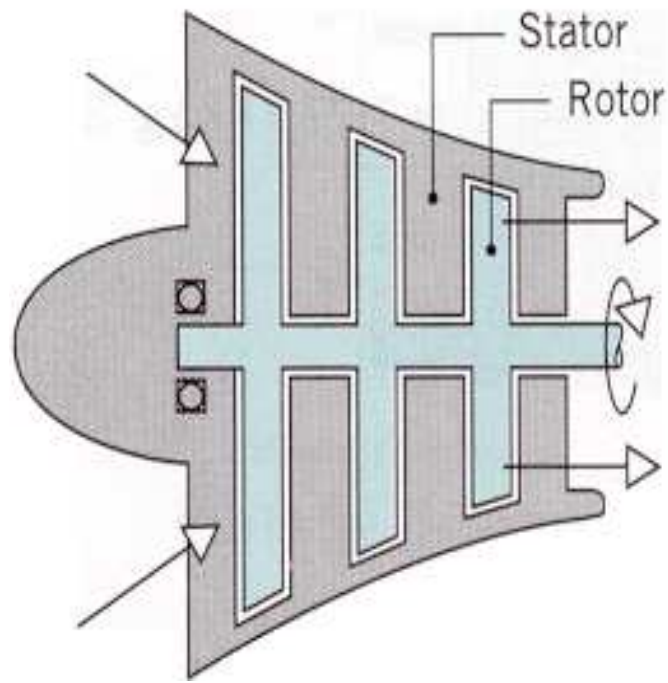
- **Dispositivos que realizam trabalho sobre um fluido para aumentar sua pressão, seu potencial ou sua velocidade**
- **A análise é a mesma que para turbinas, mas os sinais podem variar**



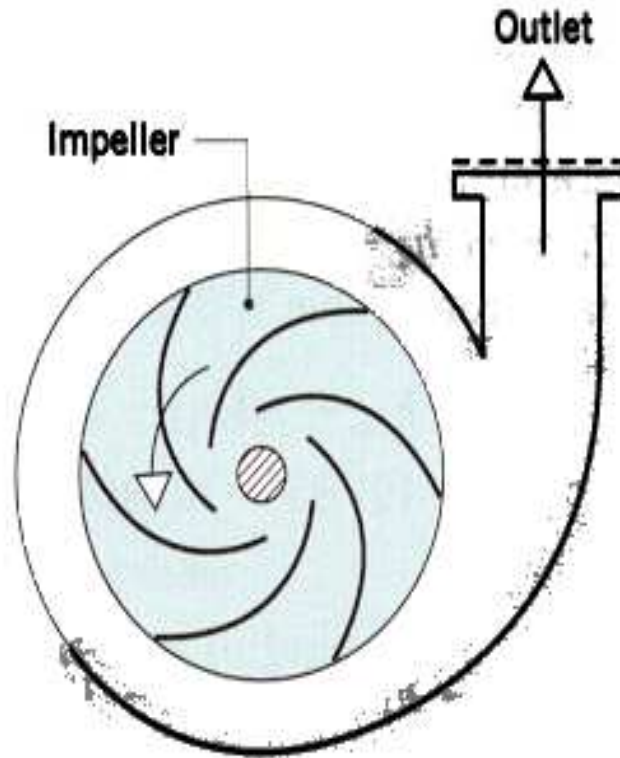
Principais diferenças

- **Compressor:** utilizado para aumentar a pressão de um fluido compressível
- **Bomba:** utilizada para aumentar a pressão ou o potencial de um fluido incompressível
- **Ventilador:** utilizado para deslocar grandes quantidades de gás, mas normalmente quase sem aumento de pressão

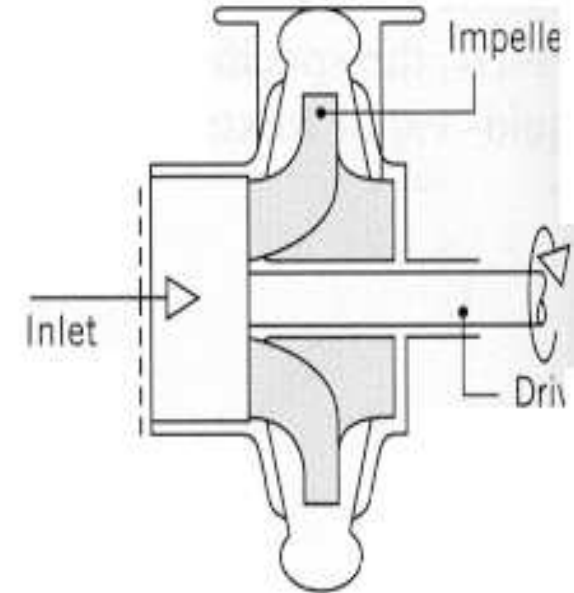
Compressores, bombas e ventiladores



Compressor



**Bomba:
vista lateral**



**Bomba:
vista frontal**



Axial flow compressor for a gas generator unit.
(Courtesy of S. Laney)

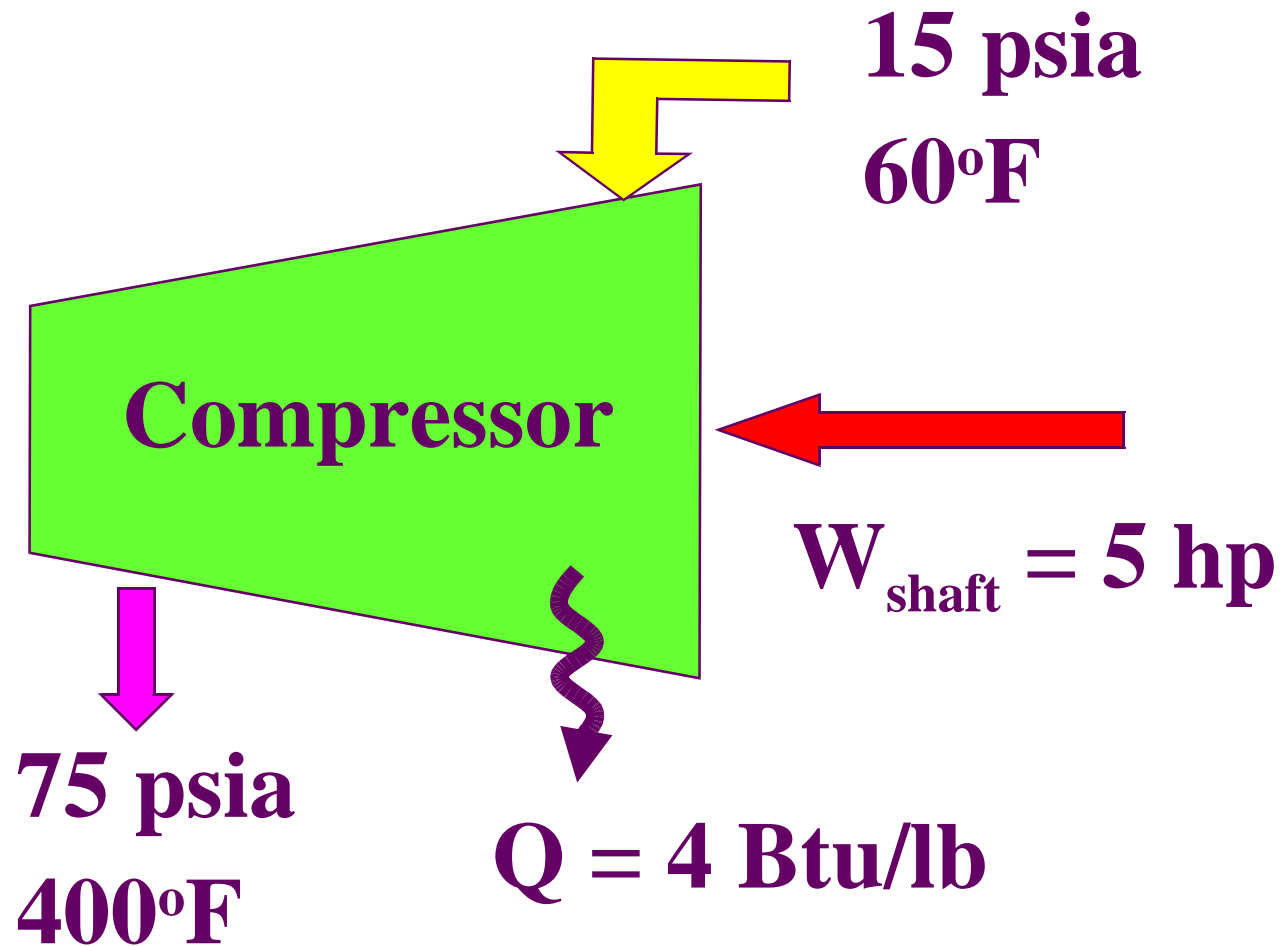


Compressor and turbine rotor blades for an industrial gas turbine.
(Courtesy of S. Laney)

Questão

Ar inicialmente a 15 psia e 60°F é comprimido a 75 psia e 400°F. A potência transferida ao ar é 5 hp e uma perda de calor de 4 Btu/lbm ocorre durante o processo. Determinar a vazão mássica em lbm/min.

Solução: Diagrama



Solução: Hipóteses

- **Escoamento em regime permanente**
- **Variações de energia potencial desprezíveis**
- **Variações de energia cinética desprezíveis**
- **É gás ideal**

Solução: primeira lei

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

Simplificando:

$$\dot{m} q - \dot{W}_{\text{shaft}} = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{\text{shaft}}}{q - (h_2 - h_1)}$$

Solução: primeira lei

$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{\text{shaft}}}{q - c_p (T_2 - T_1)}$$

$$\dot{m} \approx 5 \frac{\text{lbm}}{\text{min}}$$

Trocadores de calor e misturadores

- **Trocadores de calor: são dispositivos que promovem a troca de calor entre diferentes fluidos**
- **Misturadores (às vezes também chamados de trocadores de calor): são dispositivos que combinam 2 ou mais fluidos para obter a saída desejada (temperatura, título, etc.)**

Inúmeras aplicações

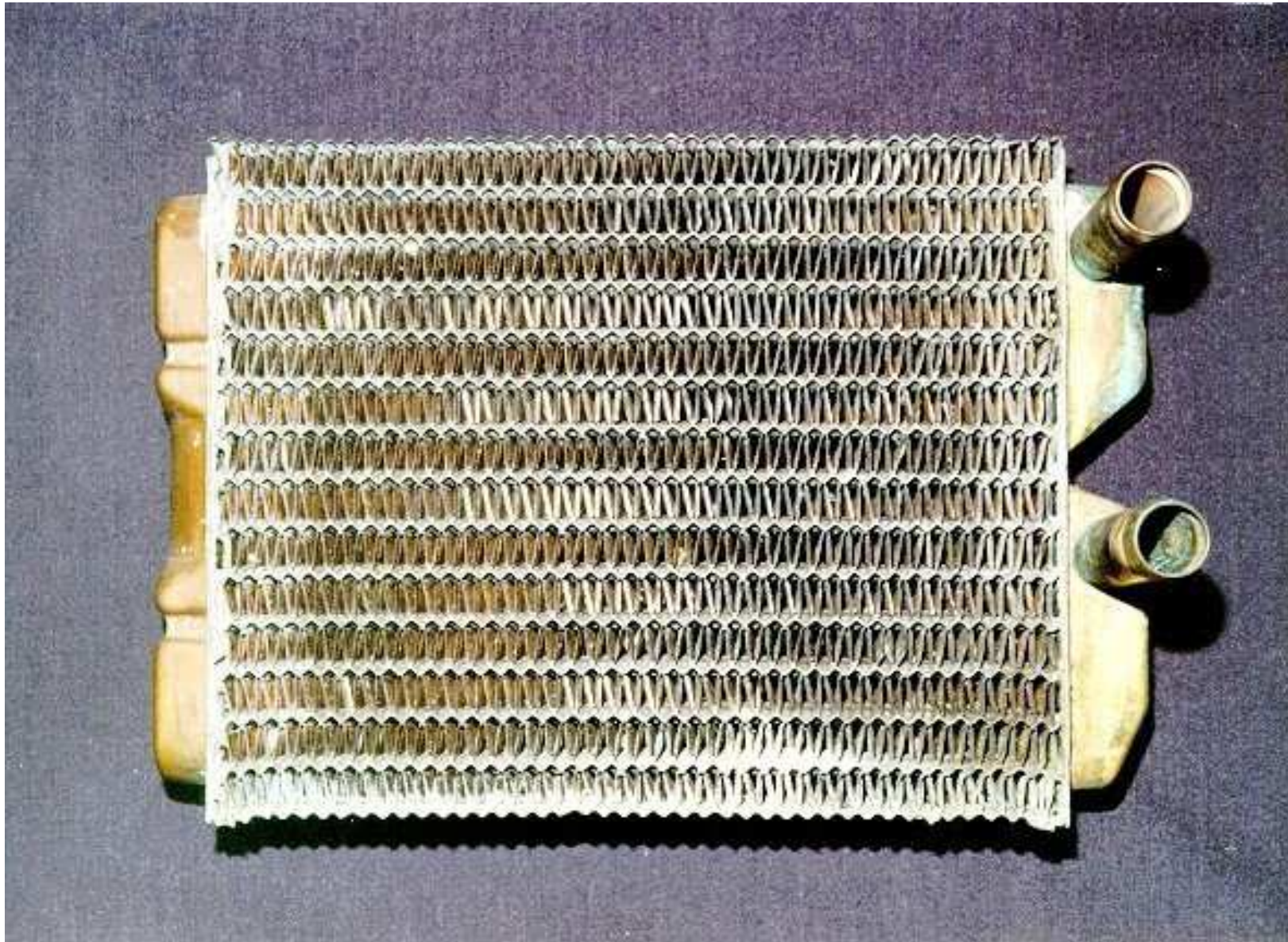
- **Radiador automotivo**
- **Radiador doméstico**
- **Evaporadores/condensadores**
(refrigeração, produção de energia elétrica)
- **Indústria petroquímica**

Trocador de calor industrial



Large Paraflow plate heat exchanger being assembled.
(Courtesy of APV Heat Exchanger Product Group)

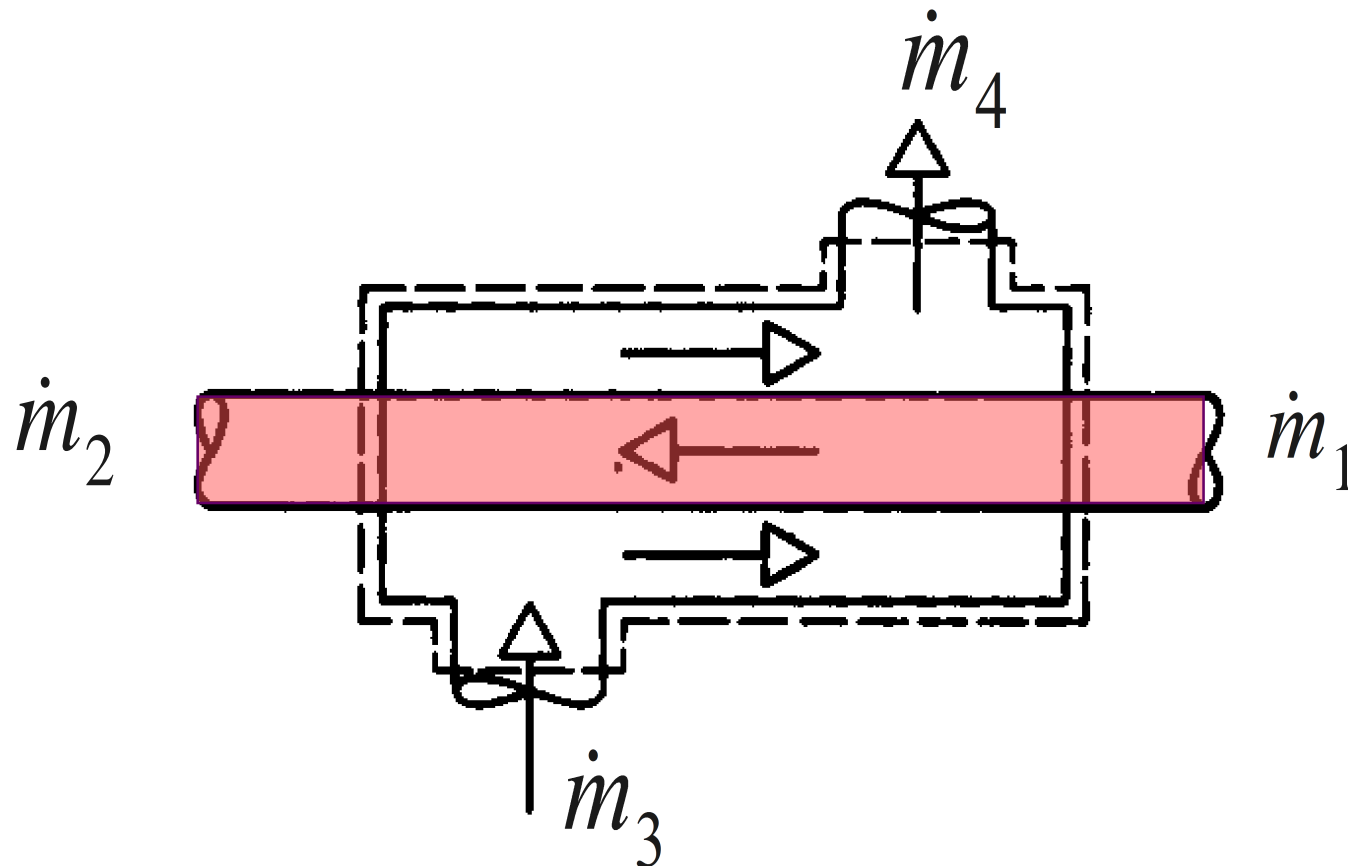
Radiador automotivo



Heat exchanger or heater core for a 1966 Mustang heating system.

Trocador de calor

- **Múltiplas entradas e saídas:**



Questão

- Em regime permanente, qual a relação entre

$$\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \text{ e } \dot{m}_4?$$

Transporte de massa

Hipóteses

- **Há produção ou consumo de potência de eixo?**
- **Há efeitos ligados à energia potencial?**
- **Há variação de energia cinética?**
- **Podemos desprezar as trocas de calor?**

Aplicando a conservação da massa às duas correntes:

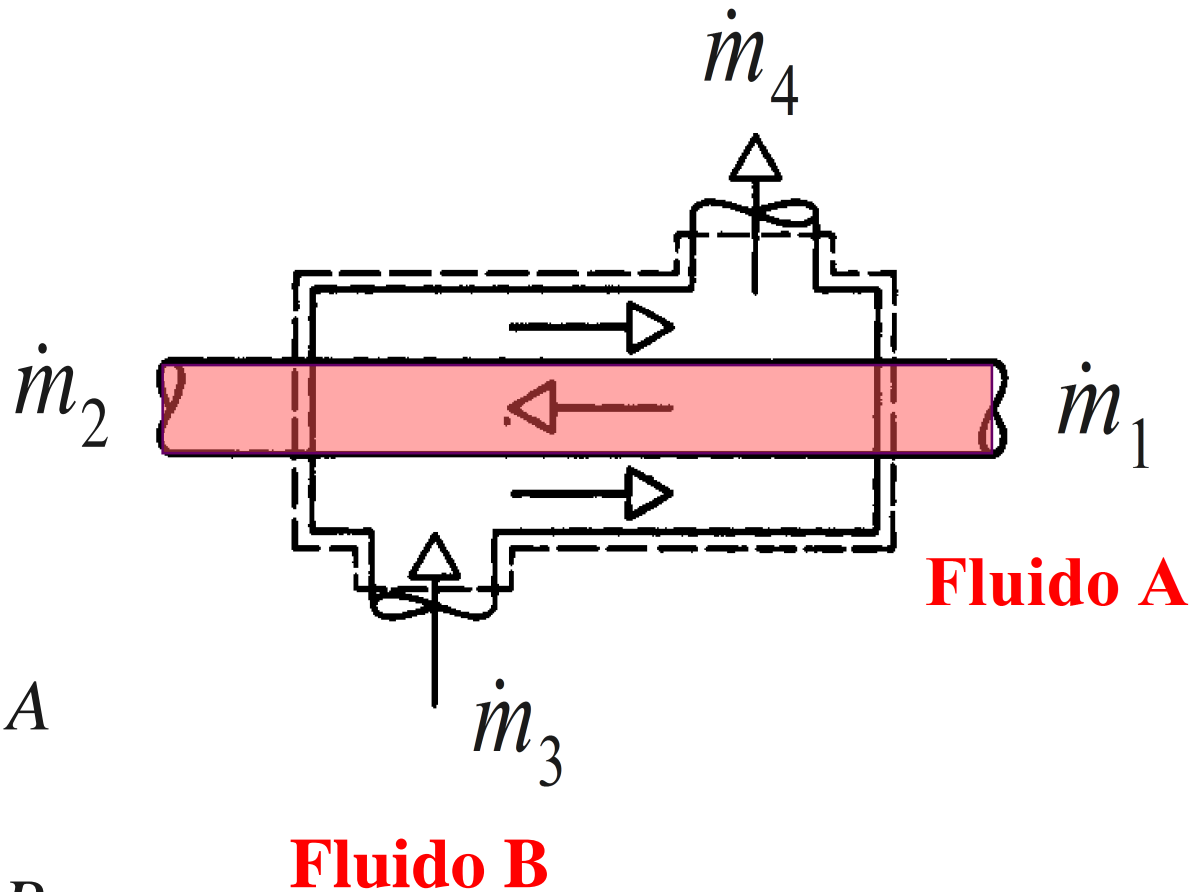
Em R.P.:

$$\frac{\partial m_{cv}}{\partial t} = 0$$

logo

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

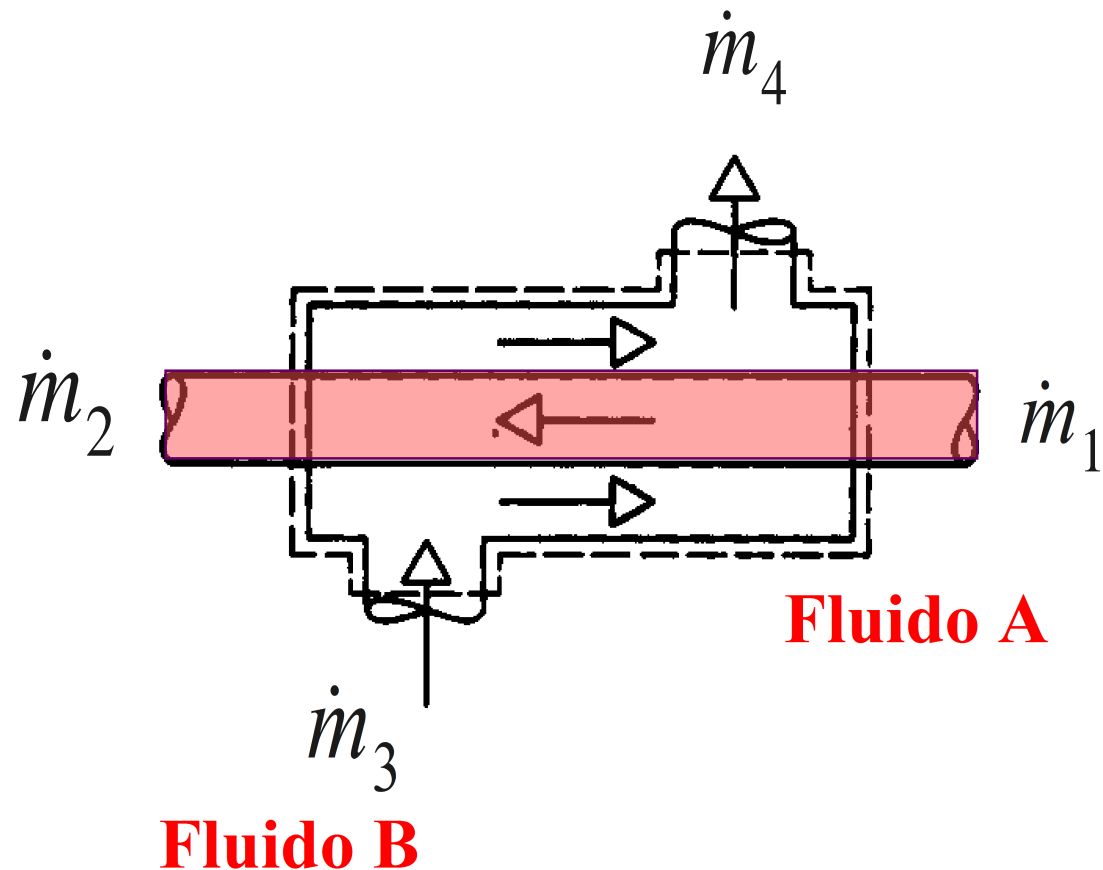
$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_B$$



Conservação da energia

Se o V.C englobar todo o trocador de calor:

Não haverá calor cruzando o V.C.



Conservação de energia

$$\dot{Q} - \dot{W}_{CV} + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{m}_3 \left(h_3 + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) - \dot{m}_4 \left(h_4 + \frac{V_4^2}{2} + gz_4 \right) = 0$$

Sabemos da conservação da massa:

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

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_B$$

Conservação de energia

Substituindo:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{CV} + \dot{m}_A \left((h_1 - h_2) + \frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right)_A$$
$$+ \dot{m}_B \left((h_3 - h_4) + \frac{V_3^2}{2} - \frac{V_4^2}{2} + g(z_3 - z_4) \right)_B = 0$$

Trocadores de calor

- Em geral não há transferência de calor de ou para o trocador como um todo, exceto aquela entrando ou deixando o trocador através das entradas e saídas.
- Assim, $\dot{Q} \approx 0$
- O dispositivo não realiza/recebe trabalho:
- $\dot{W}_{CV} = 0$
- Variações de energia cinética e potencial são desprezíveis.

Trocadores de calor

$$\begin{array}{c} \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \\ \nearrow \quad \nearrow \\ Q - \dot{W}_{CV} + \dot{m}_A \left((h_1 - h_2) + \underbrace{\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2}} + g \underbrace{(z_1 - z_2)} \right)_A \end{array}$$

0, (as vezes desprezível)

0, (normalm. desprezível)

$$+ \dot{m}_B \left((h_3 - h_4) + \underbrace{\frac{V_3^2}{2} - \frac{V_4^2}{2}} + g \underbrace{(z_3 - z_4)} \right)_B = 0$$

0, (as vezes desprezível)

0, (normalm. desprezível)

Trocadores de calor

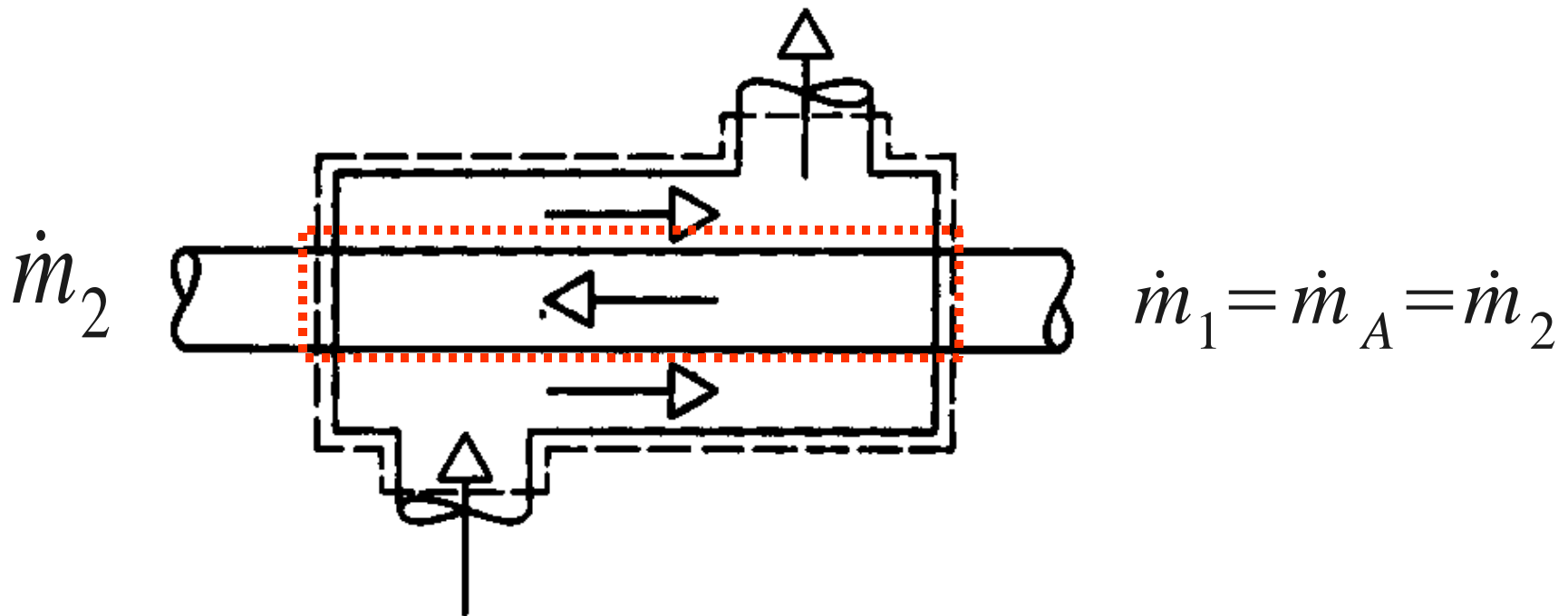
- **Assim:**

$$\dot{m}_A (h_1 - h_2) = \dot{m}_B (h_4 - h_3)$$

A variação de energia no fluido A é igual à variação de energia do fluido B (sinal oposto)

OBS: Trocadores de calor

- Se quisermos conhecer o calor perdido ou recebido por **cada um dos fluidos**, devemos fazer um deles ser o V.C.



Questão

Como seria a equação da energia se tivéssemos desenhado uma S.C. em torno de cada fluido?

Trocadores de calor

Considerando o fluido A:

$$\dot{Q}_{CV, A} + \dot{m}_A (h_1 - h_2) = 0$$

Ou, dividindo pela vazão mássica:

$$q_A = h_2 - h_1$$

Questão

Refrigerante 134a com uma vazão mássica de 5 kg/min entra em um trocador de calor a 1.2 MPa e 50°C e o deixa a 1.2 MPa e 44°C. Ar entra pelo outro lado do trocador a 34 °C e 101 kPa e o deixa a 42 °C e 101 kPa. Calcular:

- a) A transferência de calor do refrigerante para o ar
- b) A vazão mássica do ar

Diagrama

AIR
OUTLET

$$T_4 = 42^\circ\text{C}$$

$$P_4 = 101 \text{ kPa}$$

$$\dot{m}_{\text{Ref}} = 5 \text{ kg/min}$$

R-134a
OUTLET

$$T_2 = 44^\circ\text{C}$$

$$P_2 = 1.2 \text{ MPa}$$

R-134a
INLET

$$T_1 = 50^\circ\text{C}$$

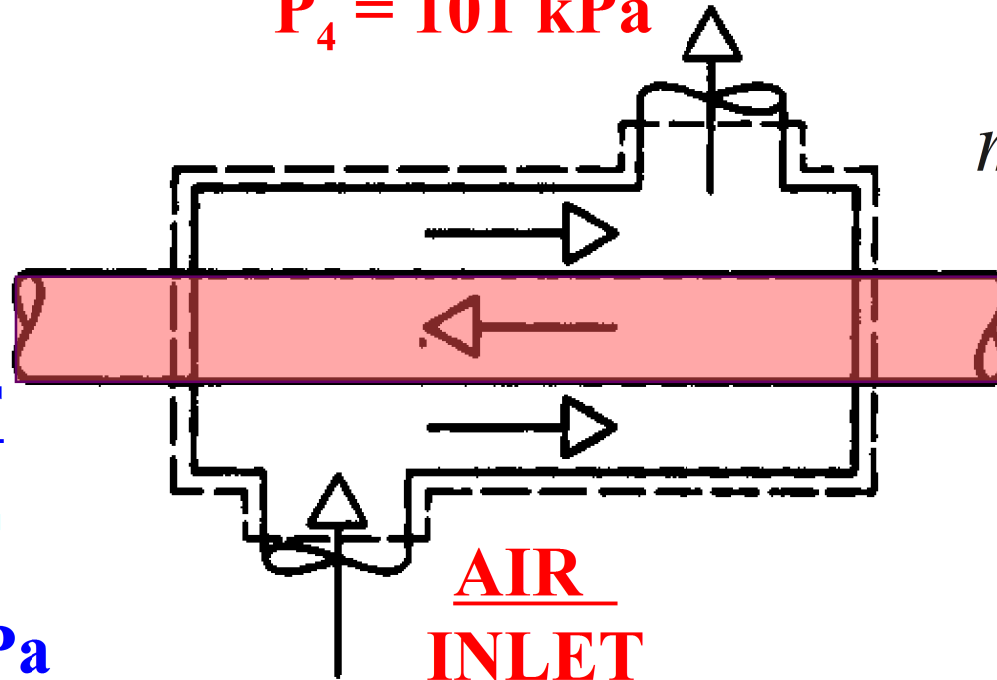
$$P_1 = 1.2 \text{ MPa}$$

AIR
INLET

$$T_3 = 34^\circ\text{C}$$

$$P_3 = 101 \text{ kPa}$$

$$\dot{m}_{\text{air}} = ?$$



Hipóteses

- **Regime permanente**
- **Não há trabalho**
- **Ar é gás ideal**
- **Variação de energias cinética e potencial desprezíveis**

Análise do R-134a

$$\dot{Q}_{\text{Ref}} - \dot{W}_{\text{CV}} = \dot{m}_{\text{Ref}} \left[(h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Assim

$$\dot{Q}_{\text{Ref}} = \dot{m}_{\text{Ref}} (h_2 - h_1)$$

Podemos obter h_1 e h_2 das tabelas termodinâmicas.

Análise do R-134a

$$h_1 = 275.52 \text{ kJ/kg} \quad h_2 = 112.22 \text{ kJ/kg}$$

Inserindo-os na equação da energia:

$$\dot{Q}_{\text{Ref}} = 5 \frac{\text{kg}}{\text{min}} (112.22 - 275.52) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{\text{Ref}} = -816.5 \frac{\text{kJ}}{\text{min}}$$

Análise do ar

Considerando agora um V.C. Englobando o ar:

$$\dot{Q}_{air} - \dot{W}_{CV} = \dot{m}_{air} \left[(h_4 - h_3) + \frac{V_4^2 - V_3^2}{2} + g(z_4 - z_3) \right]$$

Assim,

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air} (h_4 - h_3)$$

Análise do ar

Para um gás ideal, podemos escrever:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air} C_p (T_4 - T_3)$$

Rearrmando:

$$\dot{m}_{air} = \frac{\dot{Q}_{air}}{C_p (T_4 - T_3)}$$

Quanto vale \dot{Q}_{air} ?

Análise do ar

Podemos escrever:

$$\dot{Q}_{\text{air}} = -\dot{Q}_{\text{ref}} \quad \therefore \dot{Q}_{\text{air}} = + 816.5 \text{ kJ/min}$$

Das tabelas termodinâmicas: $C_p = 1.006 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

$$\dot{m}_{\text{air}} = \frac{816.5 \frac{\text{kJ}}{\text{min}}}{\left(1.006 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right)(42 - 34) \text{ K}} = 101.4 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$