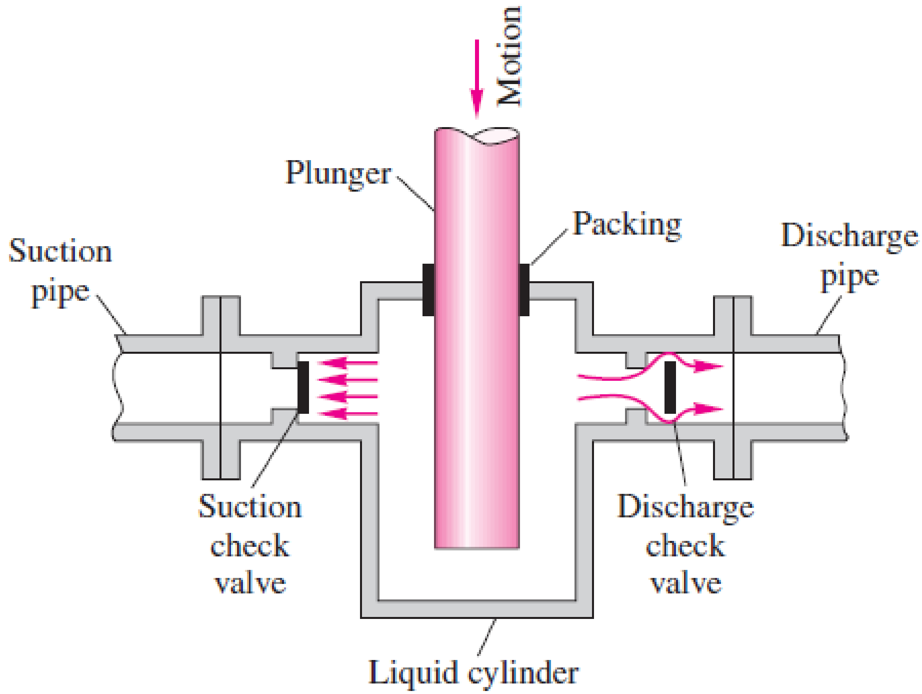
# Introdução às Máquinas de Fluxo

Parte 1

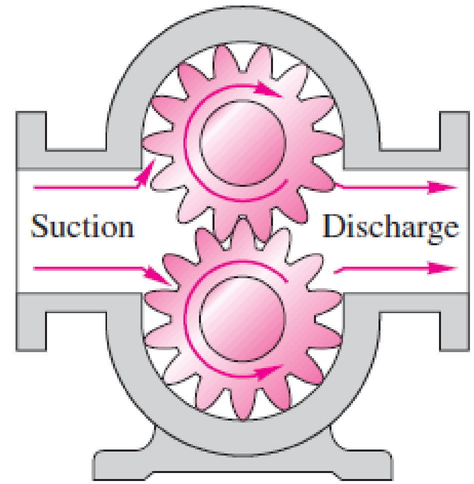
Ref. White F.M., Mecânica dos Fluidos, McGraw-Hill

# Máquinas de fluxo

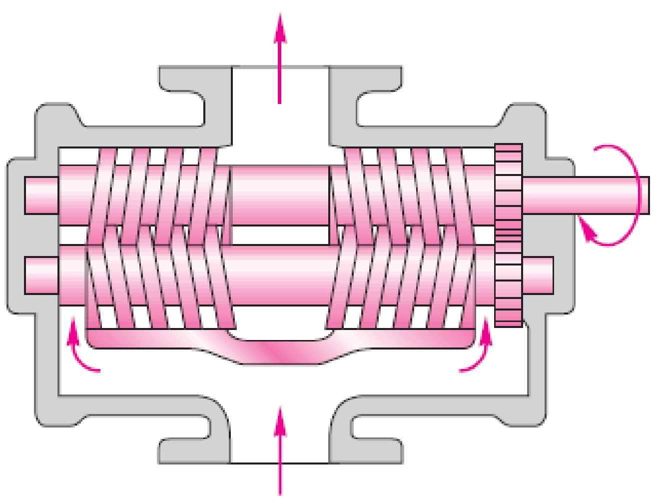
- Interação de QDM/Energia com Fluido
- 2 tipos básicos
  - Fornecem QDM/Energia para o fluido
  - Extraem QDM/Energia do fluido
- Podem ter 2 princípios de funcionamento
  - Deslocamento positivo
    - Pistão cilindro, rosca sem fim, etc.
  - Dinâmicas
    - Bombas centrífugas, compressores e turbinas axiais, etc.


Motion
Plunger
Packing
Suction
pipe
Discharge
pipe
Suction
check
valve
Discharge
check
valve
Liquid cylinder

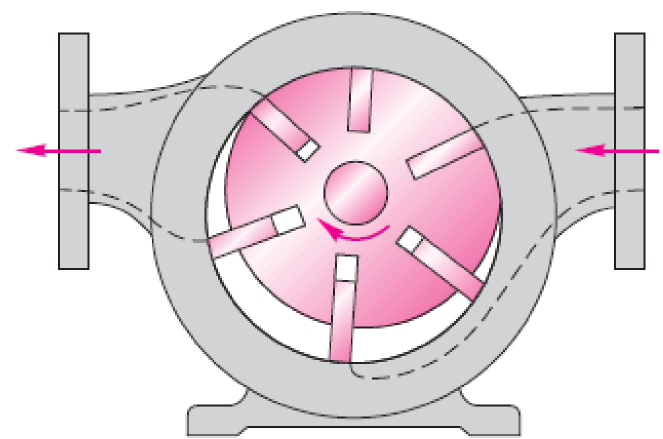
(*a*)


Suction
Discharge

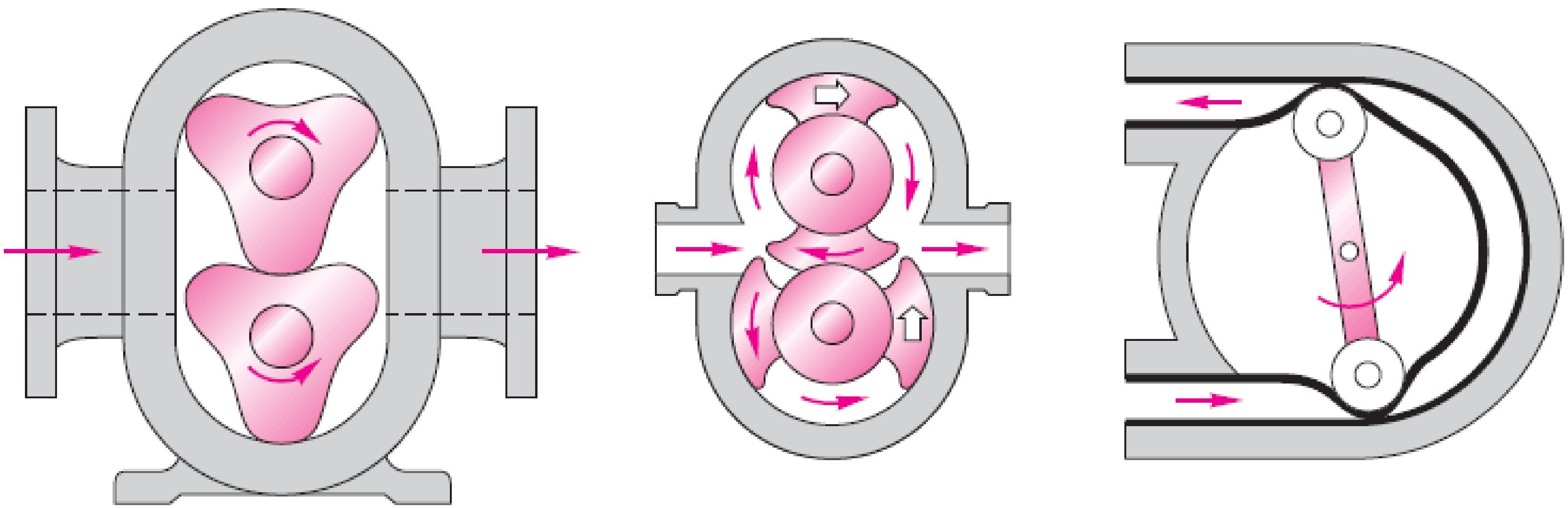
(*b*)



(*c*)

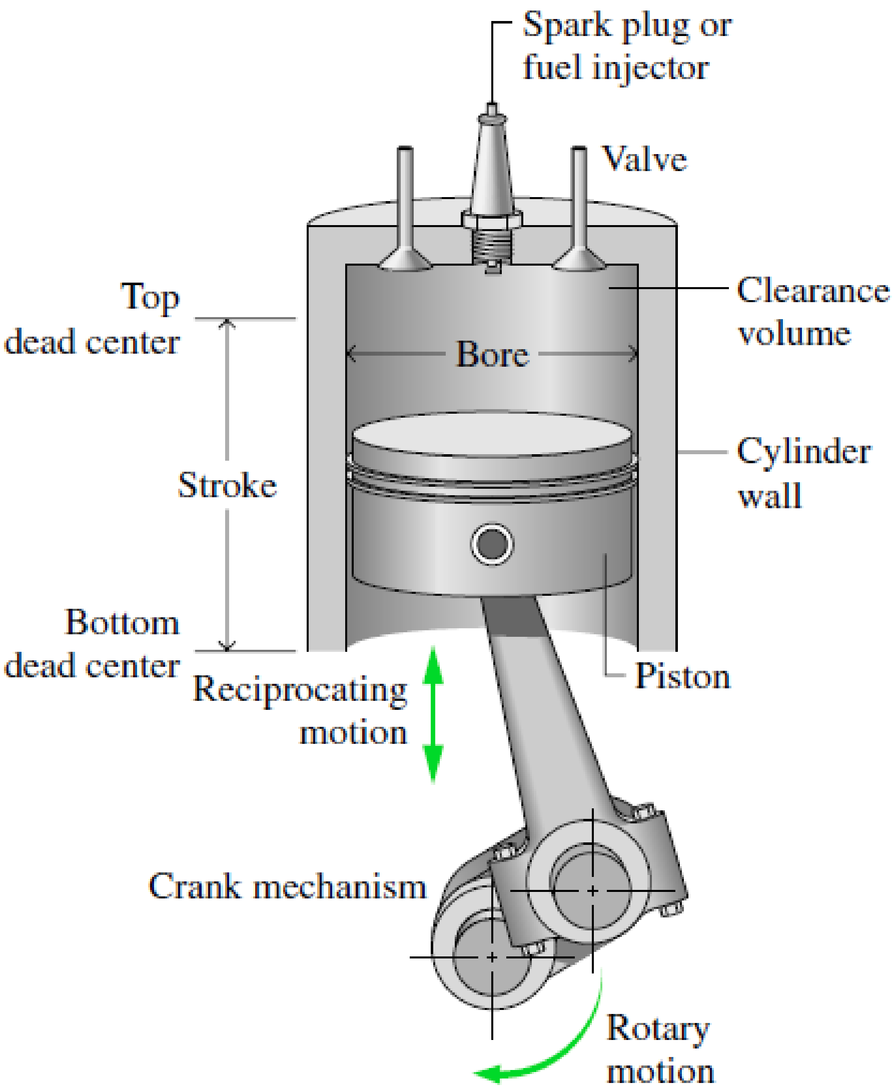


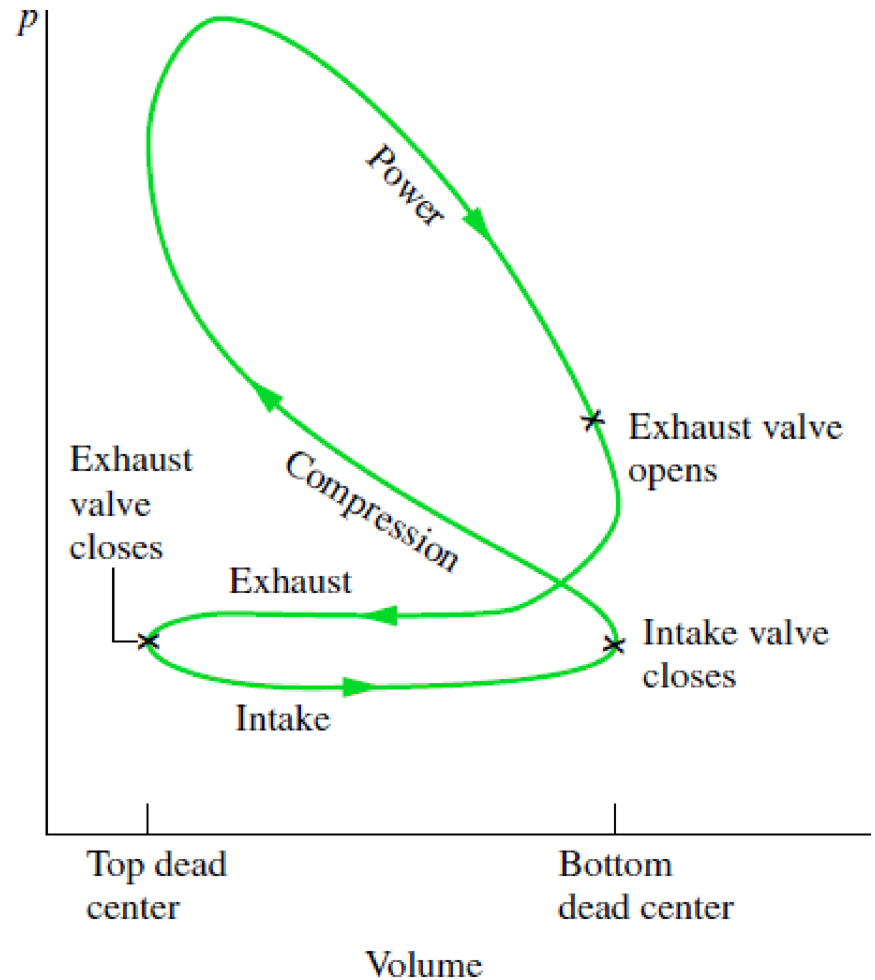
(*d*)

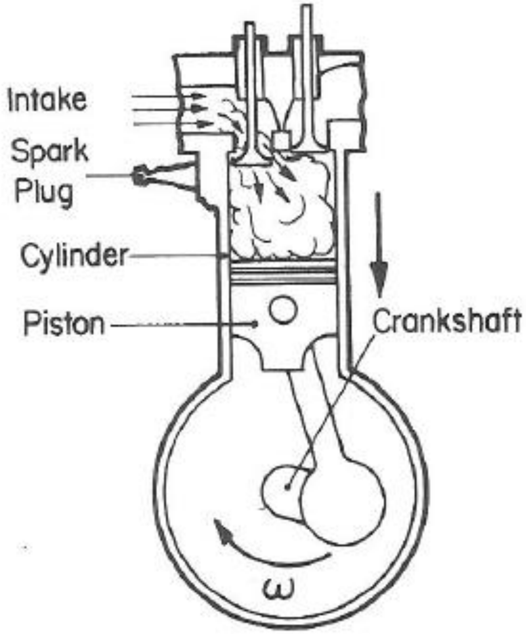


(e) (f) (g)

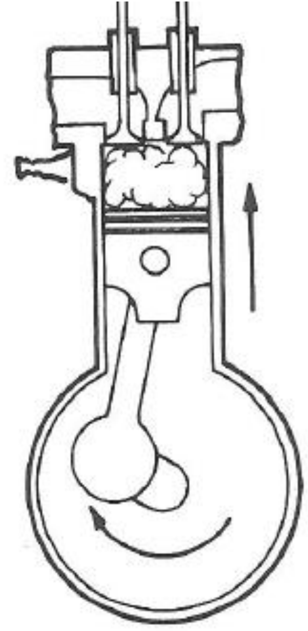
# Pistão Cilindro



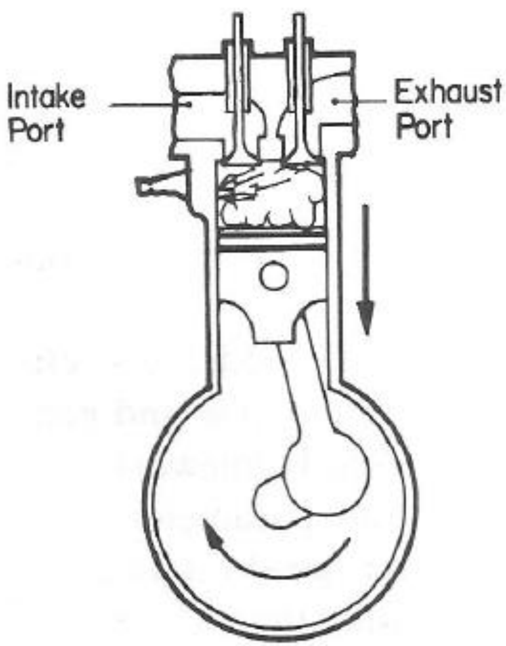





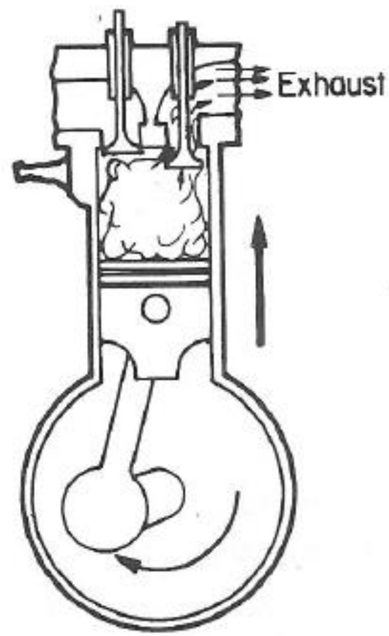

Intake



Compression



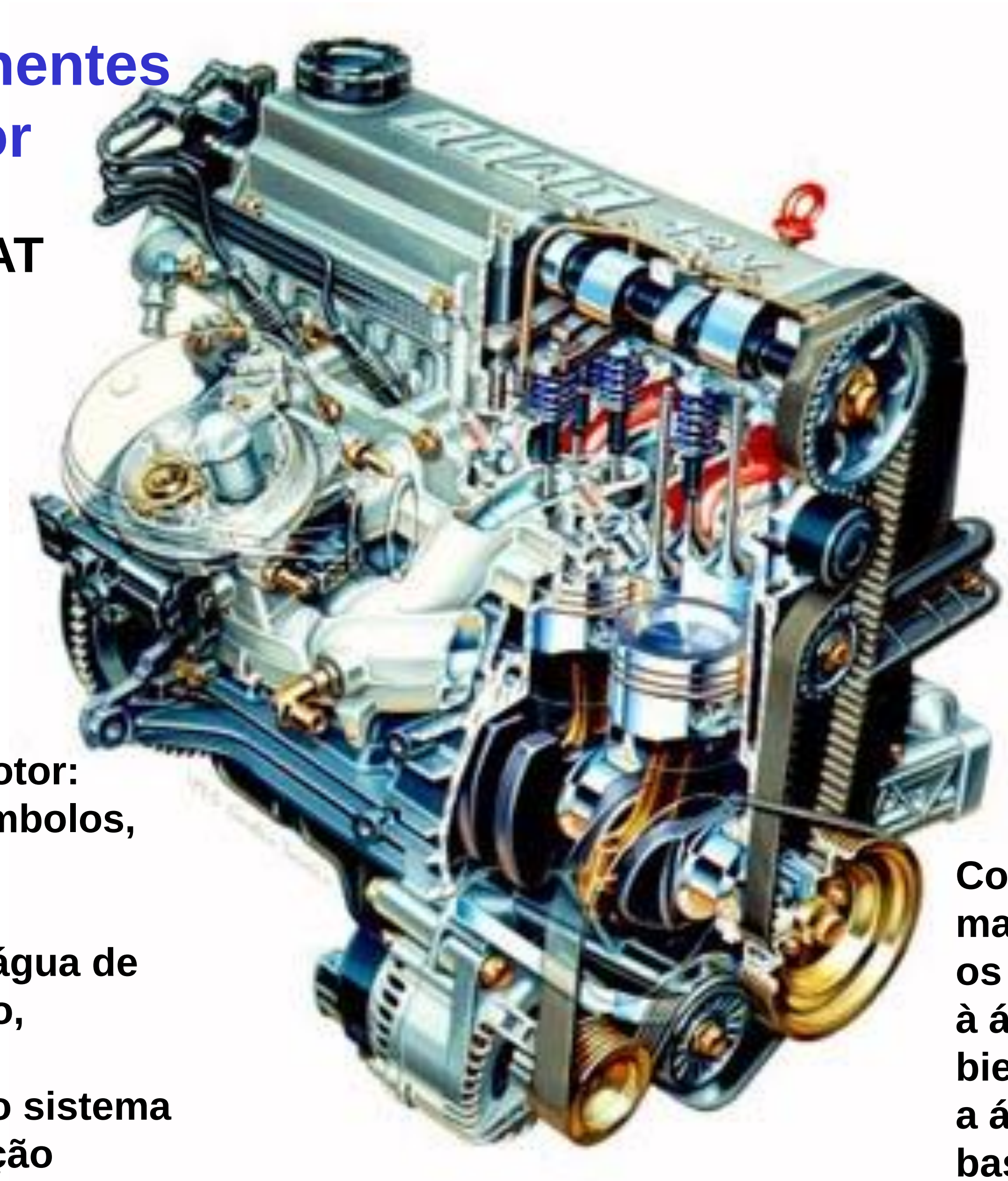

Power




Exhaust

# Componentes do motor

**Motor FIAT**



**Cabeçote do motor :**
**válvulas,**
**velas,**
**Balancim (controla a apertura das válvulas),**
**dutos de admisão e escapamento**
**câmaras de explosão**

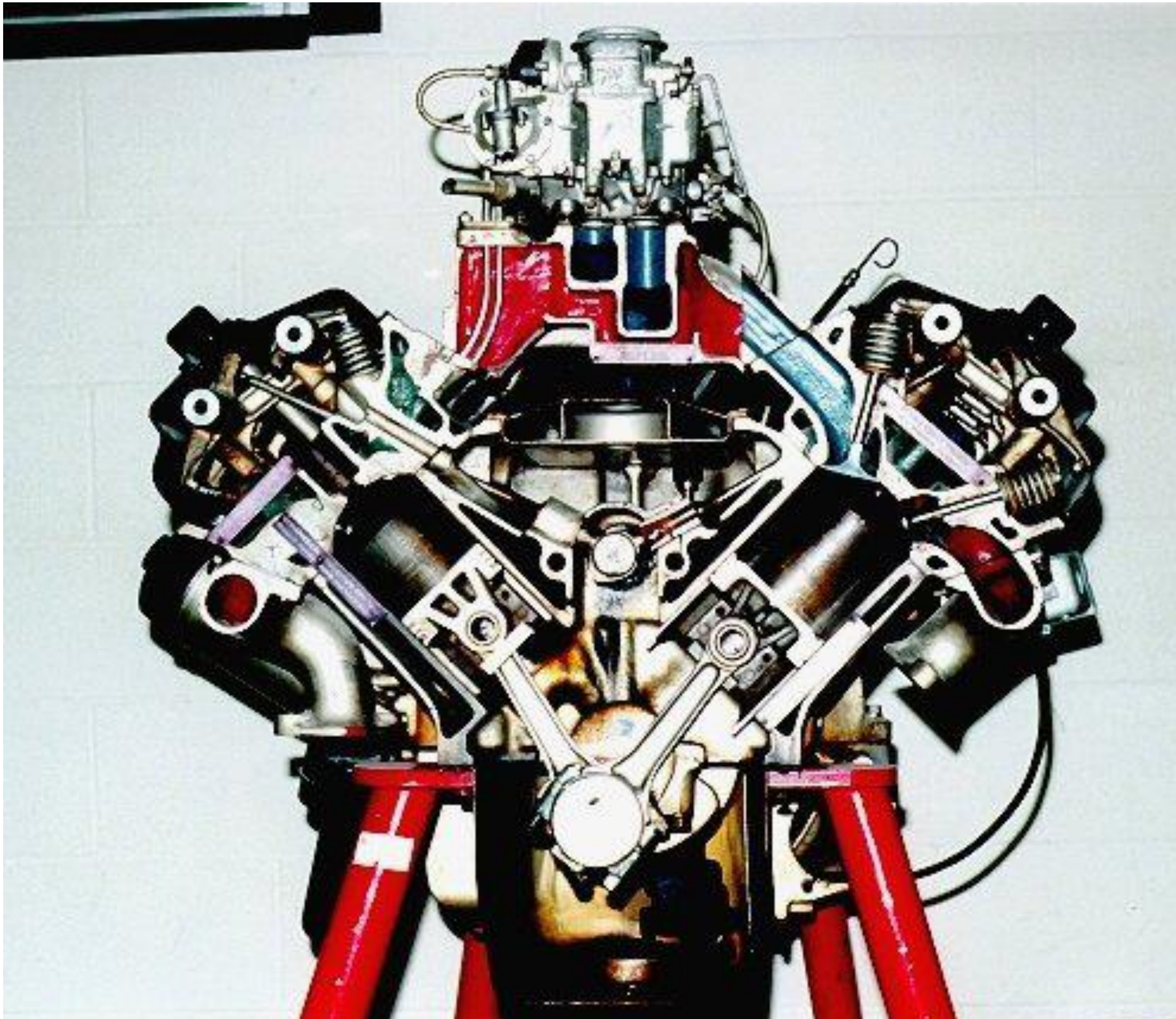
**Correia de transmissão**

**Bloco do motor:**
**cilindros, êmbolos, bielas**

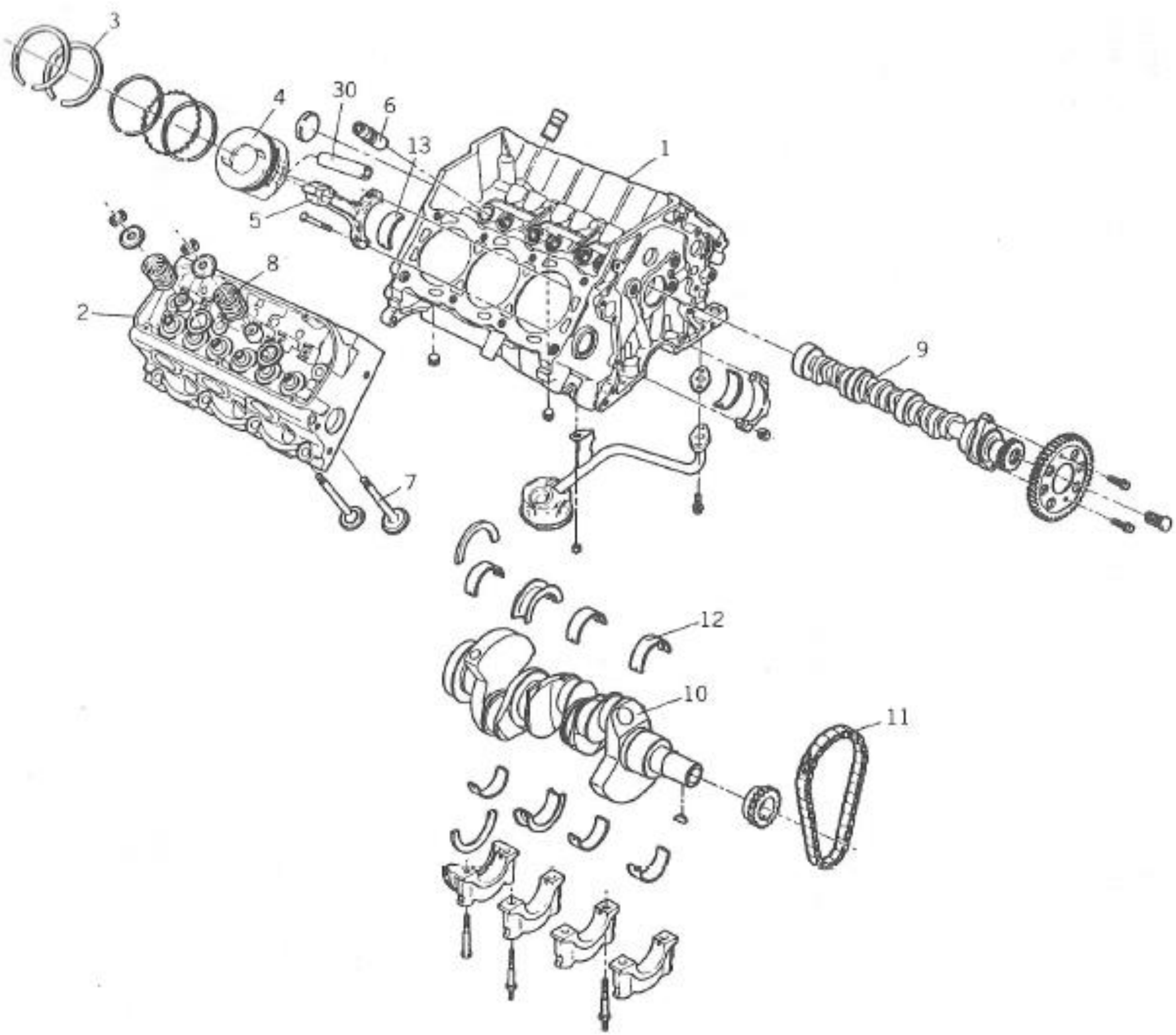
**dutos para água de resfriamento,**

**dutos para o sistema de lubrificação**

**Conjunto de árvores de manivelas,**
**os pistões estão ligados à árvore por meio das bielas,**
**a árvore está apoiada na base do bloco do motor**



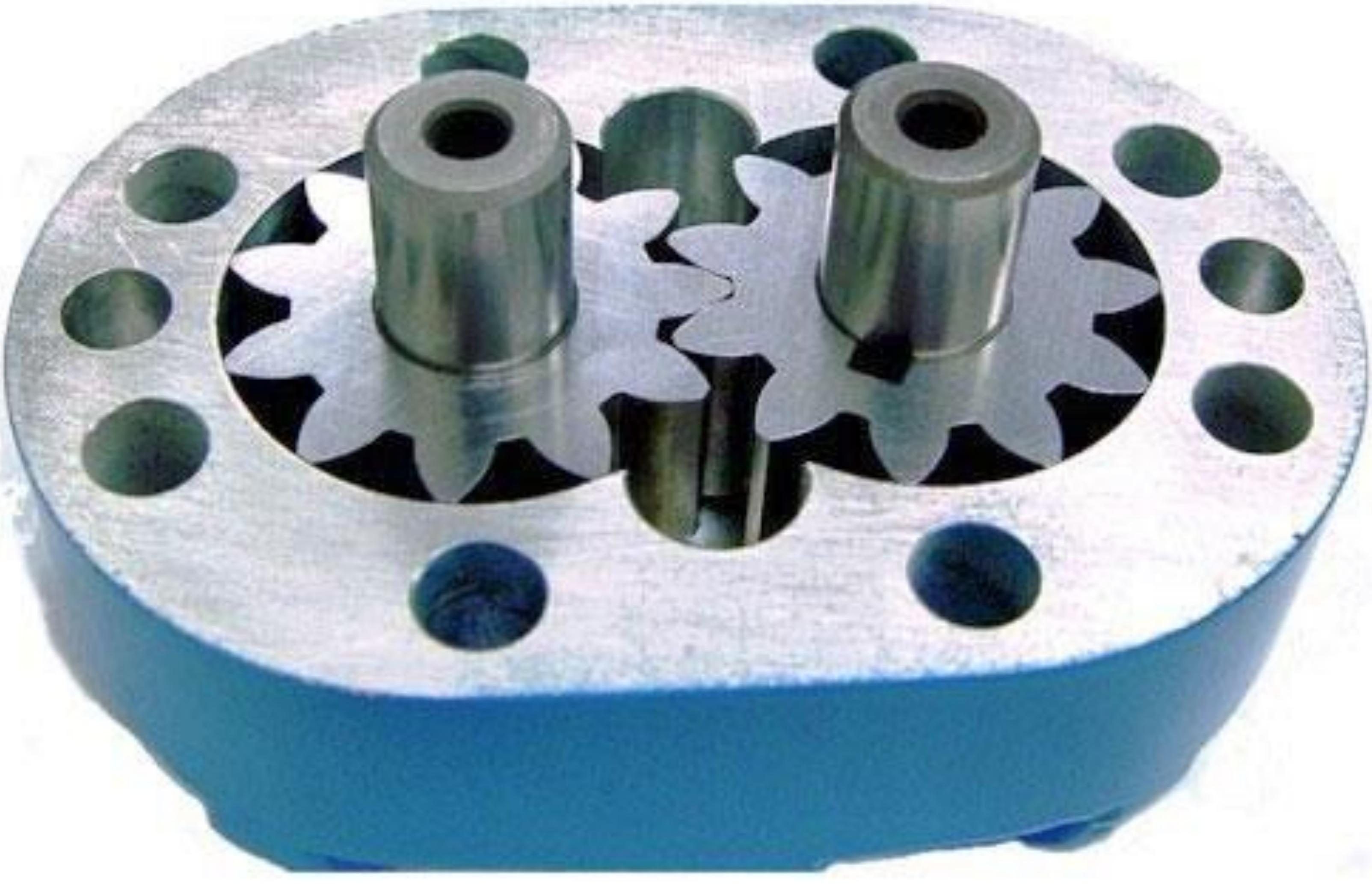
Inside view of a V-8 gasoline engine.




Key to Figs. 1-1 and 1-2

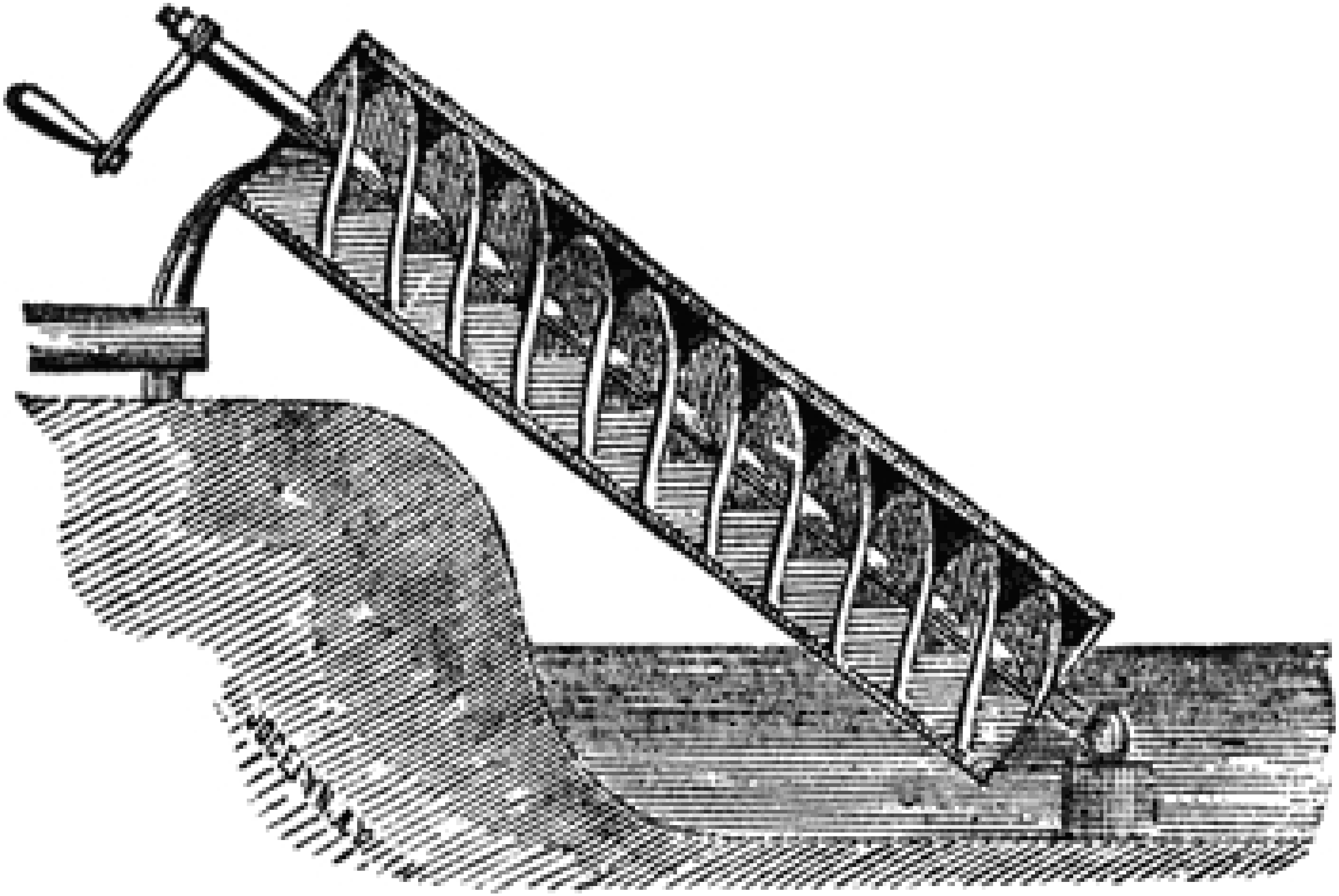
1 Cylinder block
2 Cylinder head
3 Piston ring
4 Piston
5 Connecting rod
6 Lifter
7 Valve
8 Valve spring
9 Camshaft
10 Crankshaft
11 Timing chain
12 Main bearing
13 Rod bearing
14 Carburetor
15 Throttle
16 Intake manifold
17 Thermostat
18 Flywheel
19 Distributor
20 Head gasket
21 Oil pan
22 Fuel pump
23 Water pump
24 Oil filter
25 Exhaust manifold
26 Rocker arm
27 Pushrod
28 Oil pump inside front cover
29 Spark plug

# Bomba de engrenagem



http://www.ravi.ind.br/engrenagens-bombas

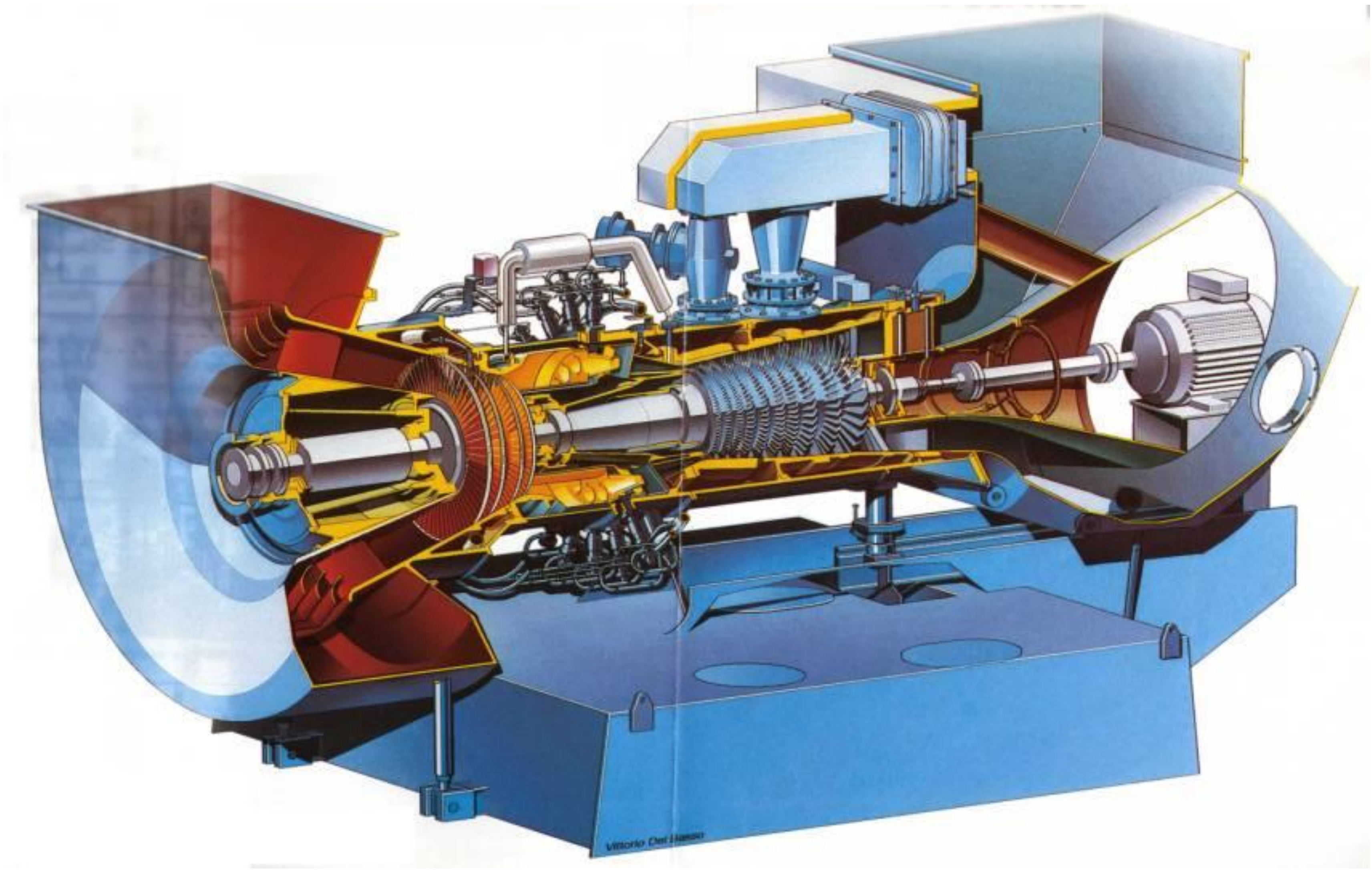
# Rosca sem fim

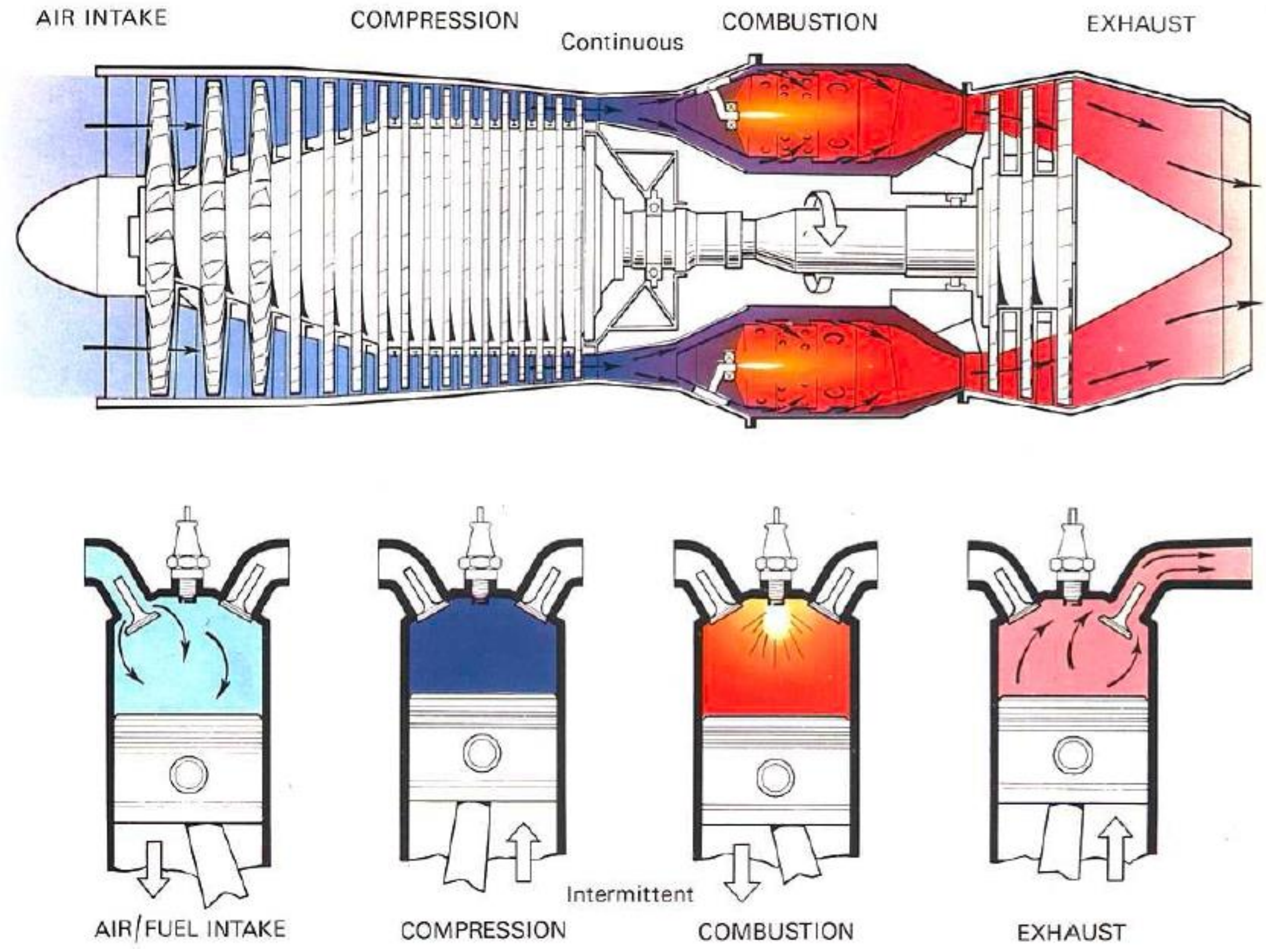


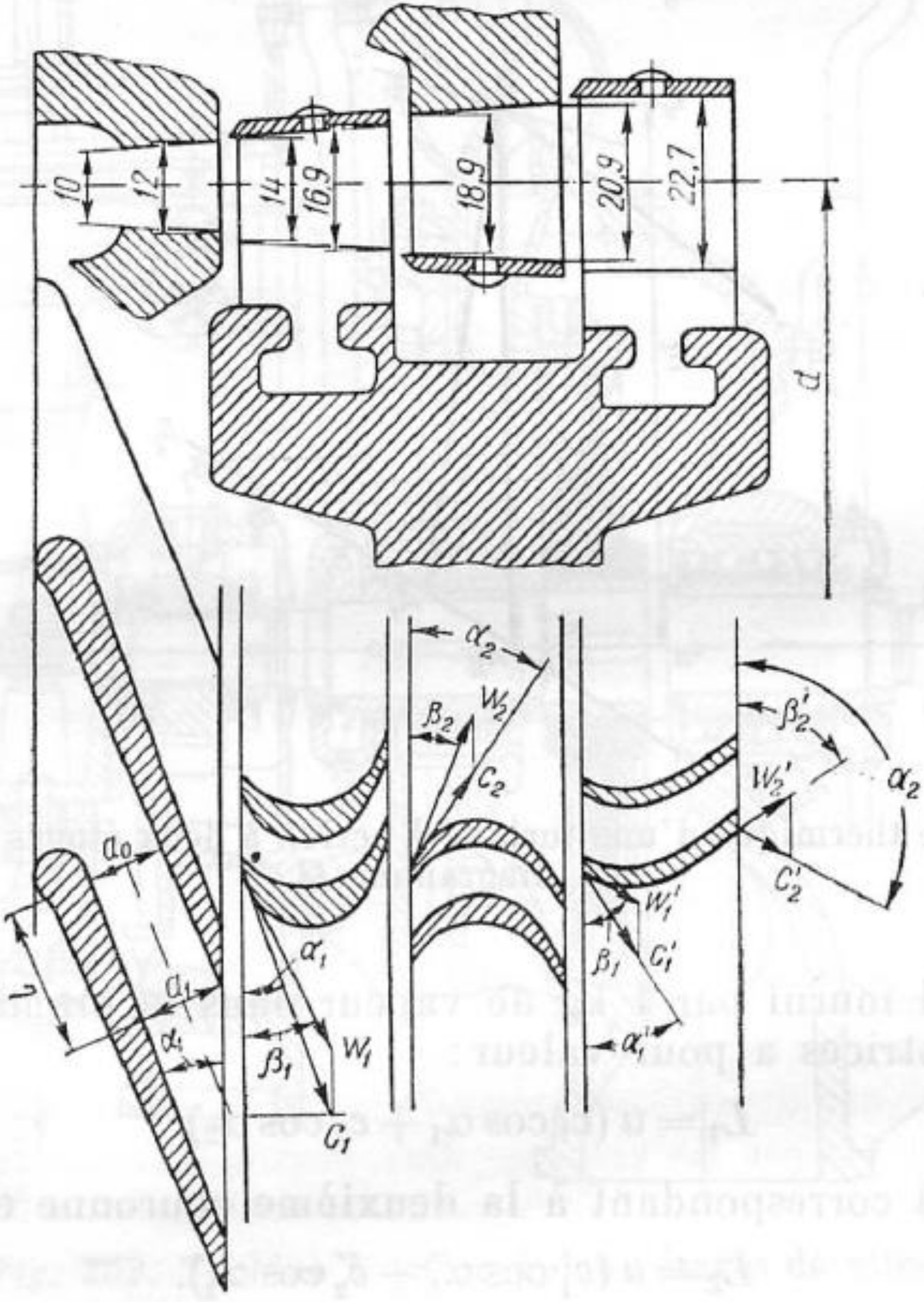
https://en.wikipedia.org

https://en.wikipedia.org

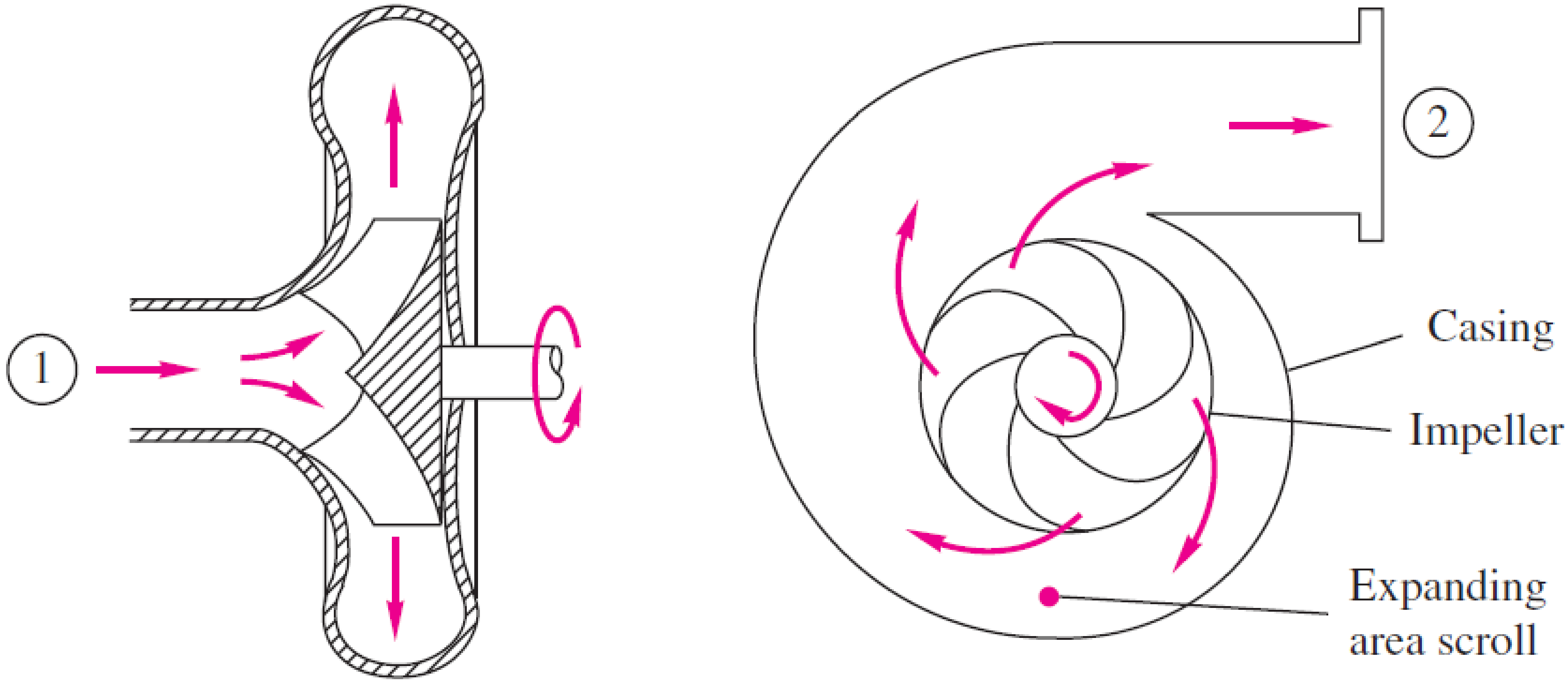
# Turbina a gás

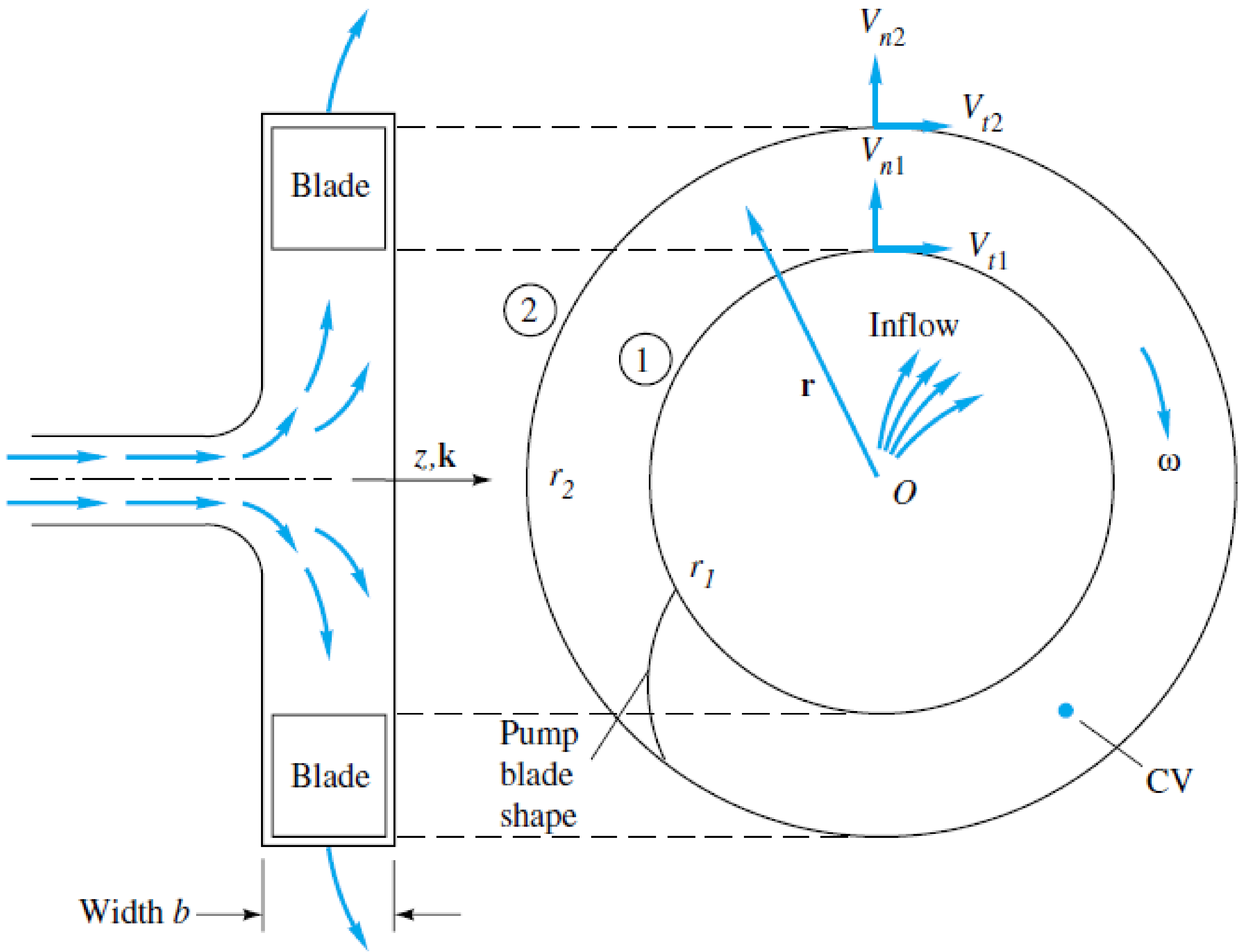



AIR INTAKE
COMPRESSION
Continuous
COMBUSTION
EXHAUST
Intermittent
AIR/FUEL INTAKE
COMPRESSION
COMBUSTION
EXHAUST

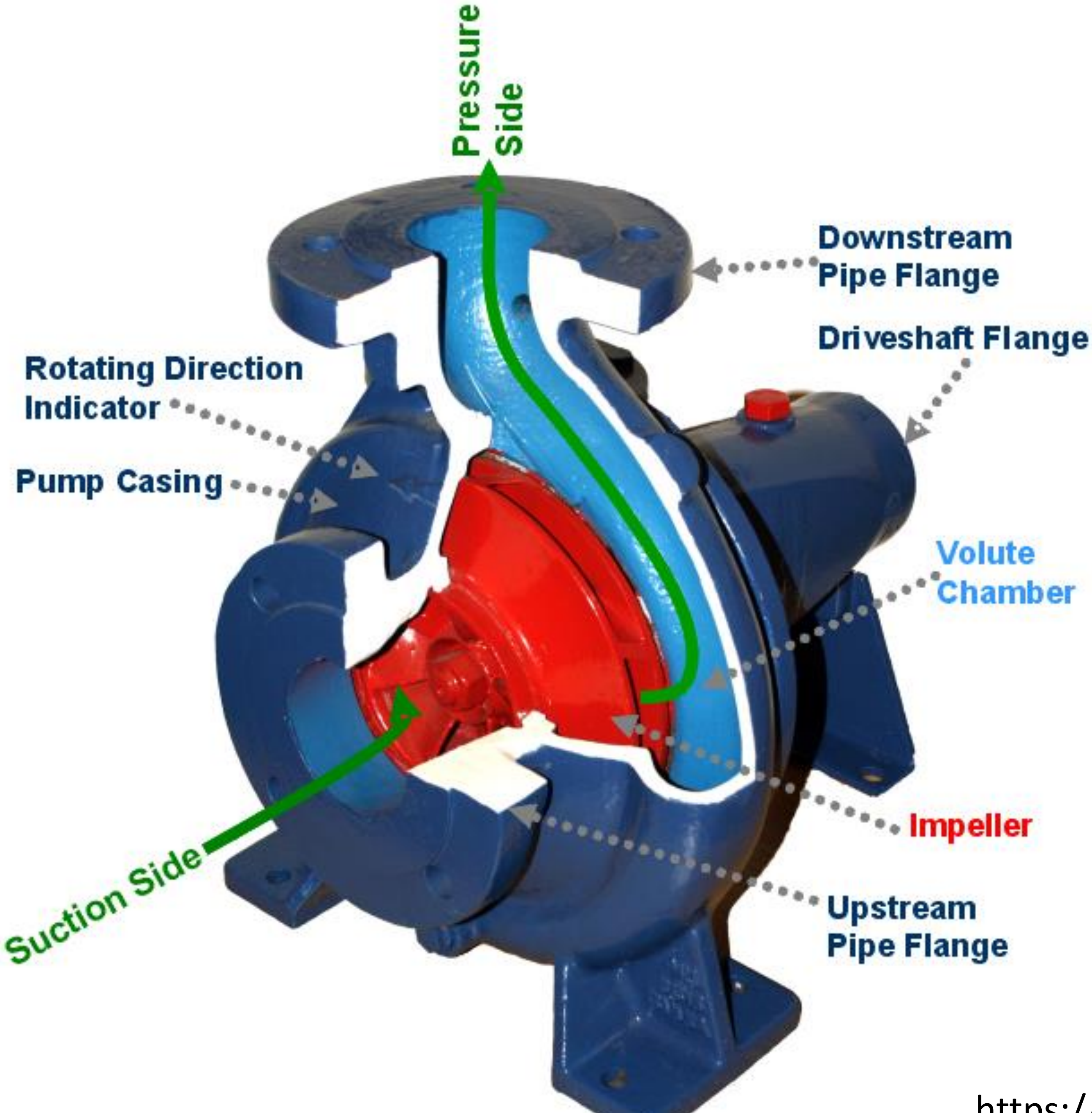

10
12
14
16,9
18,9
20,9
22,7
d
α2
β2
W2
C2
β2'
α2
W2'
C2'
W1'
C1'
β1
α1'
a0
a1
α1
t
β1
W1
C1

# Bomba centrífuga





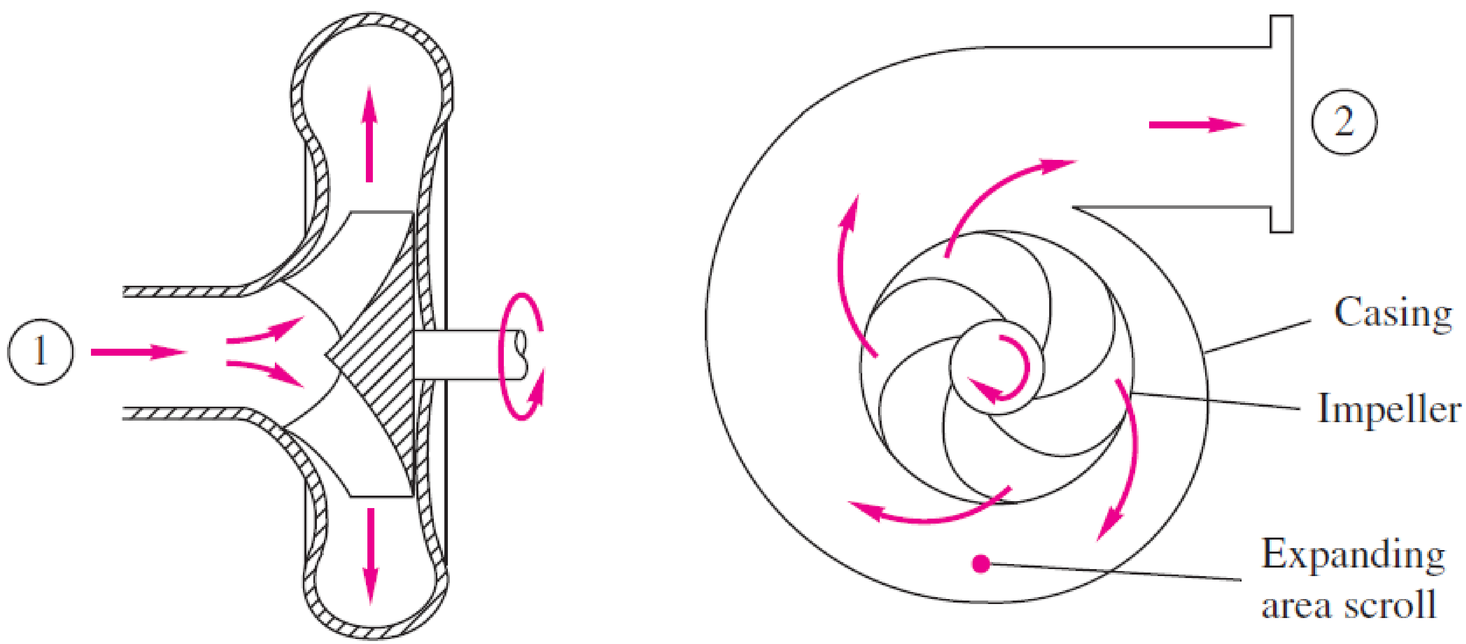
Blade
Blade
$V_{n2}$
$V_{t2}$
$V_{n1}$
$V_{t1}$
2
1
Inflow
r
ω
$z$,**k**
$r_2$
O
$r_1$
Pump
blade
shape
CV
Width $b$




https://en.wikipedia.org

# Turbomáquinas

- Este curso foca em Turbomáquinas  e em escoamento incompressível
- Turbomáquinas: são basicamente as máquinas de fluxo dinâmicas
- Para escoamento incompressível em turbomáquinas:
  - Bombas centrífugas, bombas axiais, ventiladores



# Bombas: Equação da energia

- A carga ideal da bomba(desprezando as perdas):

$$H = \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z\right)_2 - \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z\right)_1$$

- Normalmente $\Delta z$ é desprezível
- Para muitas máquinas, $\Delta V$ é desprezível também
  - Nestes casos:

$$H \approx \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

  - Logo, a potência ideal entregue ao fluido é:

$$P_w = \rho g Q H$$

    - Onde Q = vazão. OBS: $P_w$ também conhecida como Water Horsepower

# Bombas

- Já a potência necessária para fazer a bomba funcionar é:

$$\text{bhp} = \omega T$$

  - Onde T= torque. OBS: bhp também conhecida como Brake Horsepower

- Na ausência de perdas hidrodinâmicas $P_w = bhp$
- Se houver perdas, então $P_w < bhp$
- A eficiência da bomba é definida como:

$$\eta = \frac{P_w}{\text{bhp}} = \frac{\rho g Q H}{\omega T}$$

- A eficiência da bomba pode ser decomposta em 3 termos

$$\eta \equiv \eta_v \eta_h \eta_m$$

# Bombas

- Eficiência Volumétrica

$$\eta \equiv \eta_v \eta_h \eta_m$$

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + Q_L}$$

  - Onde $Q_L$ é a vazão perdida em vazamentos

- Eficiência hidráulica

$$\eta_h = 1 - \frac{h_f}{h_s}$$

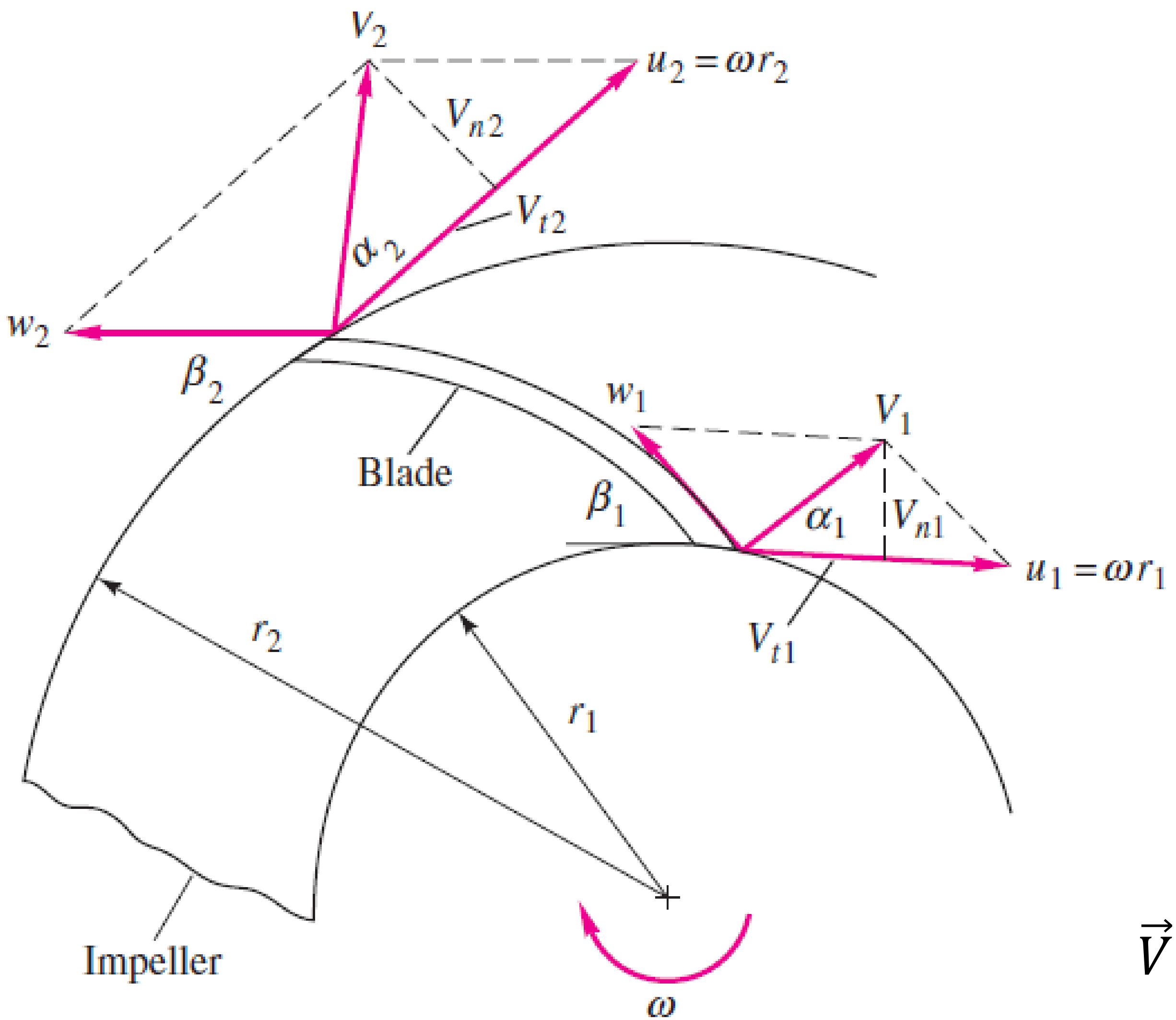
  - Onde $h_f$ é inclui todas as perdas hidrodinâmicas.
  - $h_s$ é o total da carga (energia mecânica) que a bomba consegue fornecer ao fluido na ausência de perdas hidráulicas

- Eficiência mecânica

$$\eta_m = 1 - \frac{P_f}{\text{bhp}}$$

  - Onde $P_f$ corresponde às perdas de potência em mancais, etc.

# Bombas: Eq. QDMA

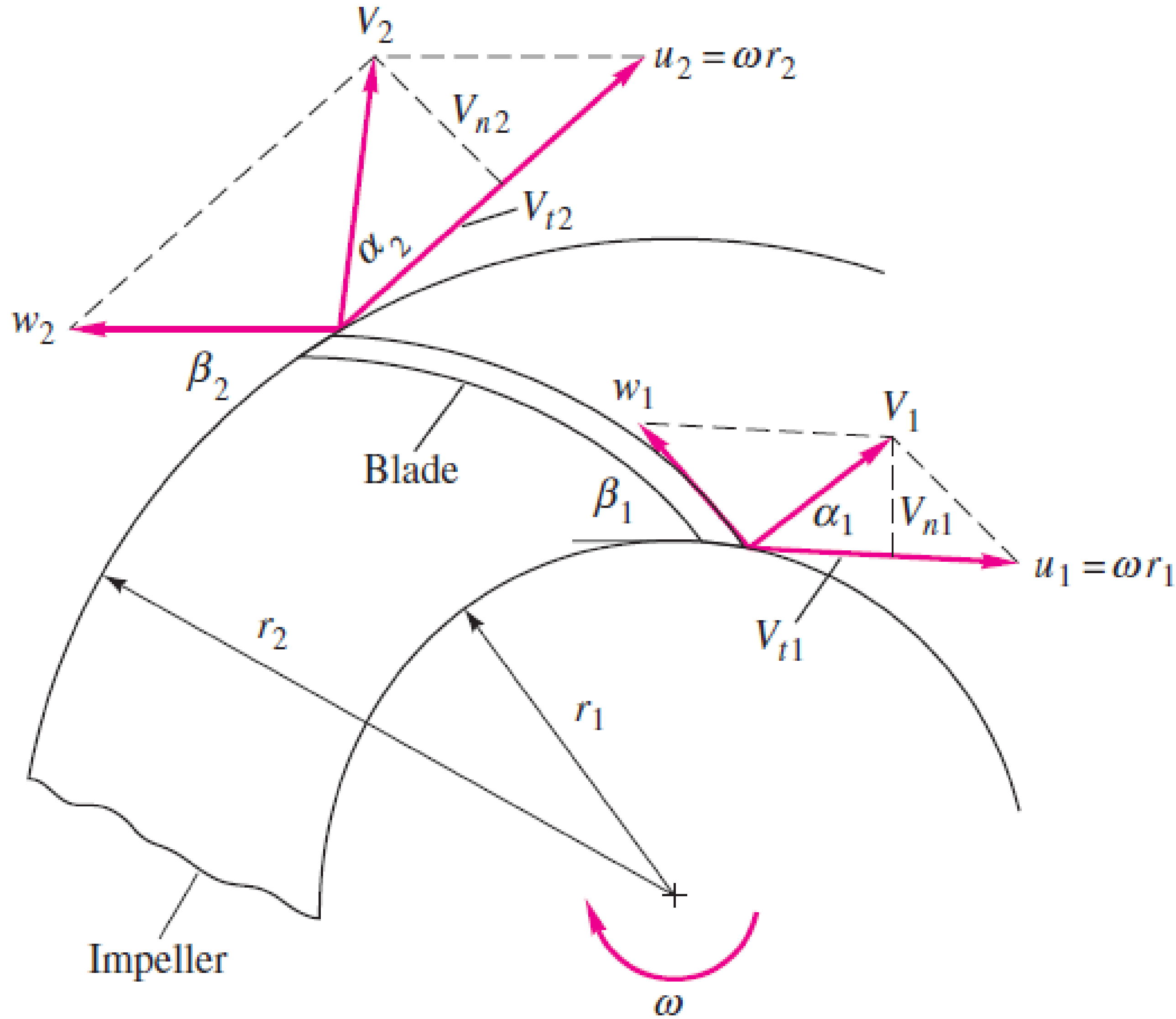



$$\vec{r} = r\vec{e}_r + z\vec{e}_z$$

$$\vec{V} = V_r\vec{e}_r + V_t\vec{e}_\theta + V_a\vec{e}_z$$

$$\vec{M}_{vc} = \vec{r} \times \vec{F}$$

$$= \frac{\partial}{\partial t}\int \left(\vec{r} \times \vec{V}\right)\rho d\forall + \oint \left(\vec{r} \times \vec{V}\right)\rho \vec{V}_r \cdot \overrightarrow{dA}$$




$$T = \rho Q(r_2 V_{t2} - r_1 V_{t1})$$

# Rotor bomba centrífuga: potência

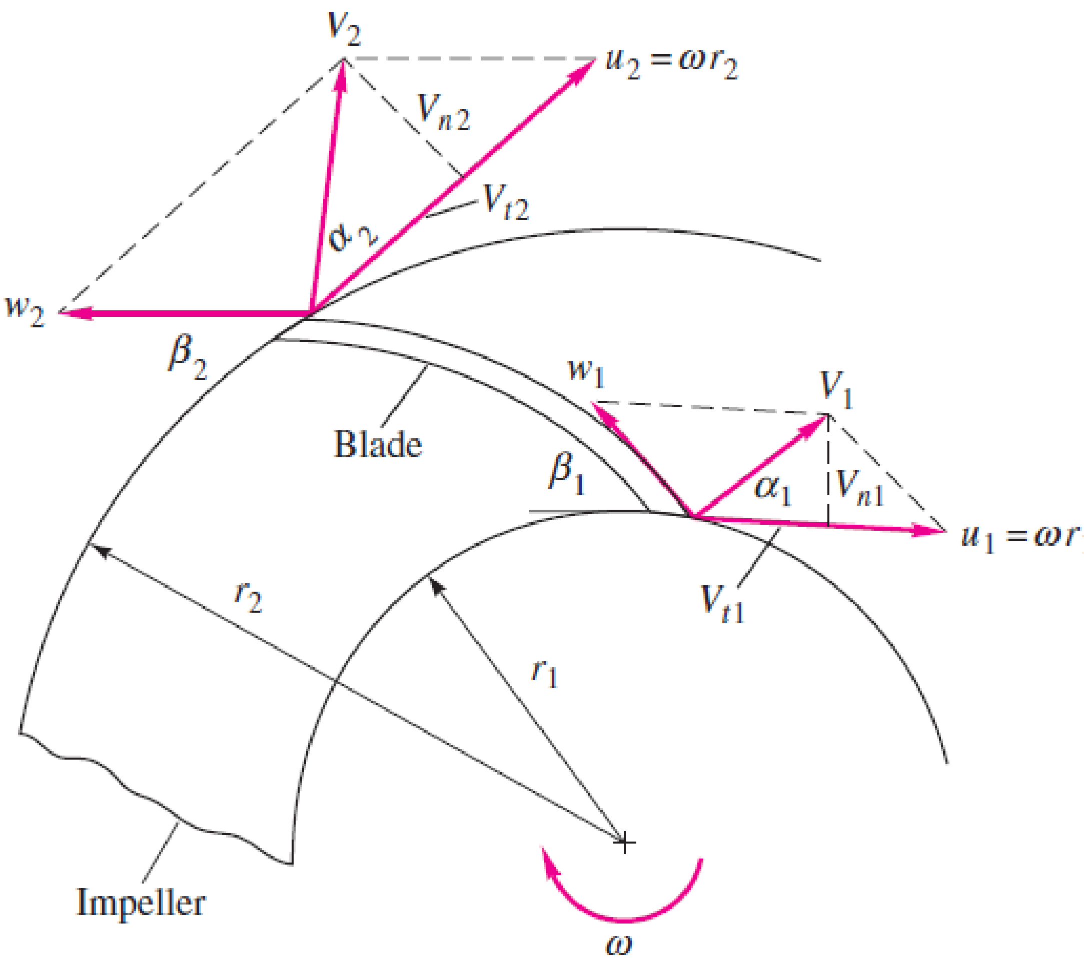
- Considere:
  - RP, PUF
  - Torque devido a forças de massa e superfície desprezíveis
  - Eixo z = eixo axial da bomba
- Então: para $\vec{r} = r\vec{e}_r + z\vec{e}_z$

$$M_{z,vc} = \oint rV_u d\dot{m} = \dot{m}(r_2V_{2t} - r_1V_{1t})$$

  - Devemos fornecer ao fluido:

$$\dot{W}_w = P_w = \omega M_{z,vc} = \dot{m}(U_2V_{2t} - U_1V_{1t})$$

$$\frac{P_w}{\dot{m}} = (U_2V_{2t} - U_1V_{1t})$$




Lei dos cossenos

$$V^2 = u^2 + w^2 - 2uw \cos \beta$$

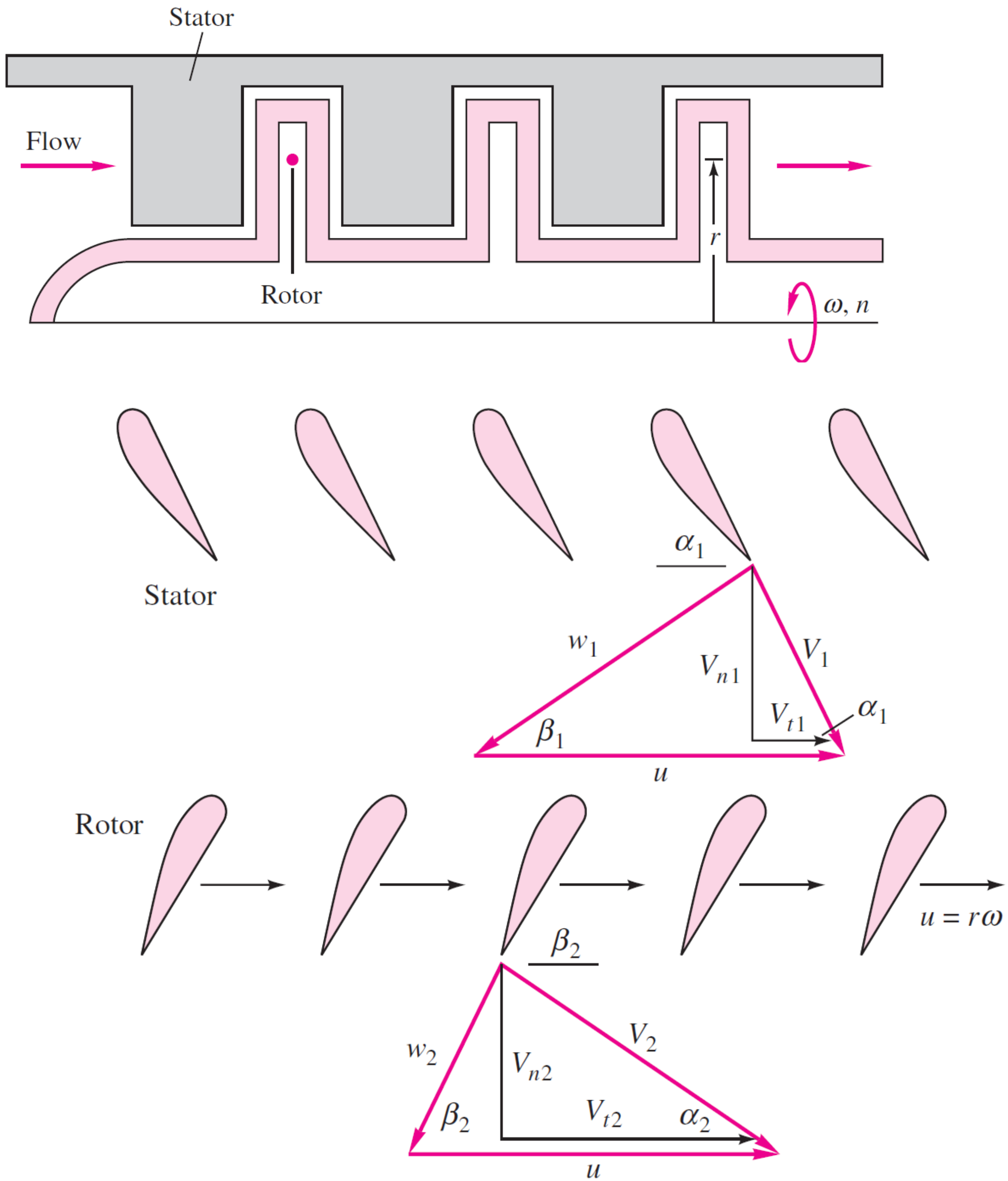
Componente de w

$$w \cos \beta = u - V_t$$

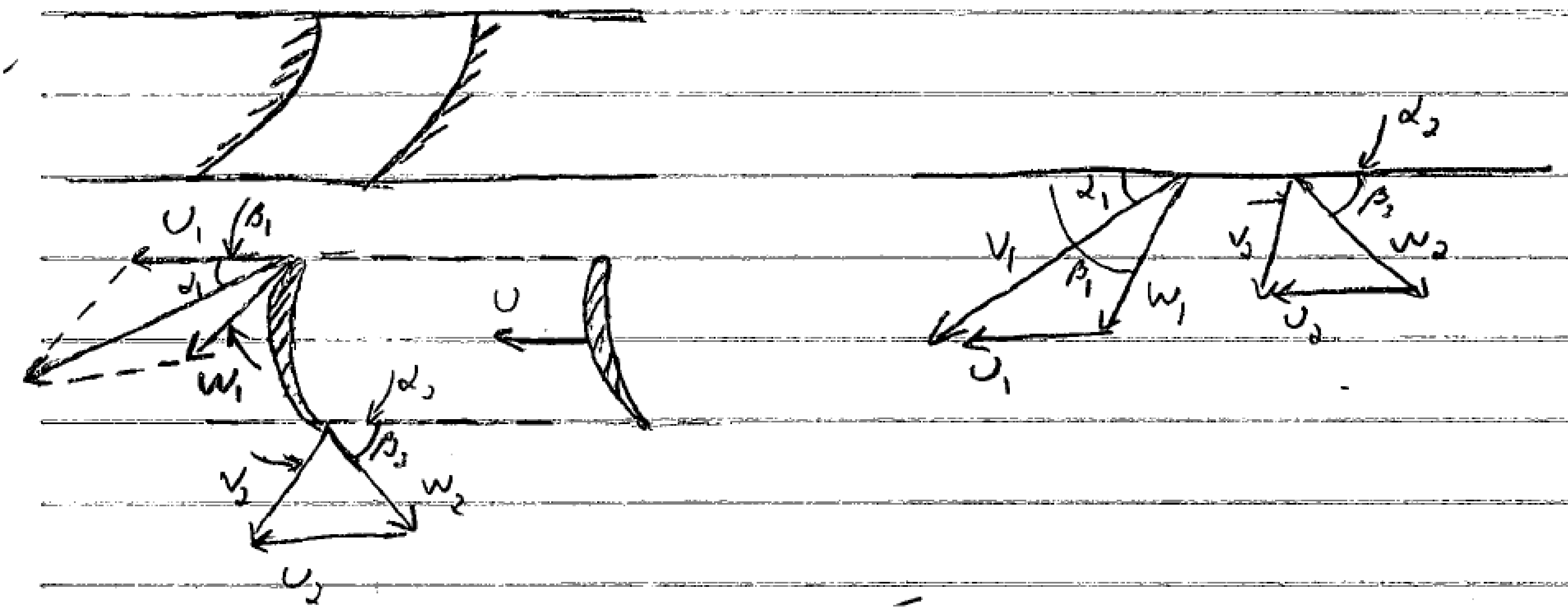
Combinando as duas equações:

$$uV_t = \tfrac{1}{2}(V^2 + u^2 - w^2)$$

# Compressor Axial



# Triângulo de velocidades: bomba axial



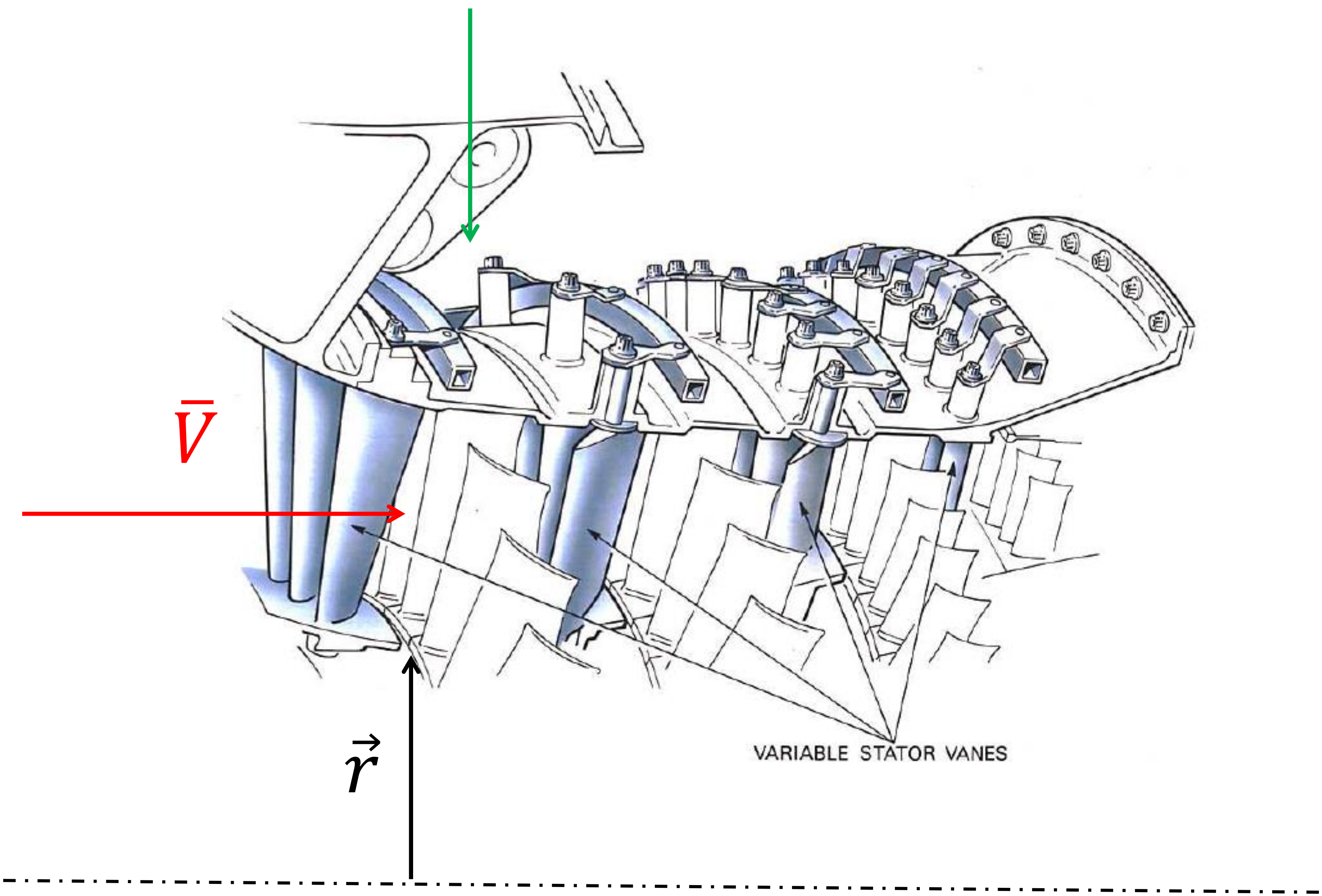

$$\sin \beta_1 = \frac{V_1}{W_1} \sin \alpha_1$$

$$W_1 = \sqrt{{V_1}^2 + {U_1}^2 - 2V_1 U_1 \cos \alpha_1}$$

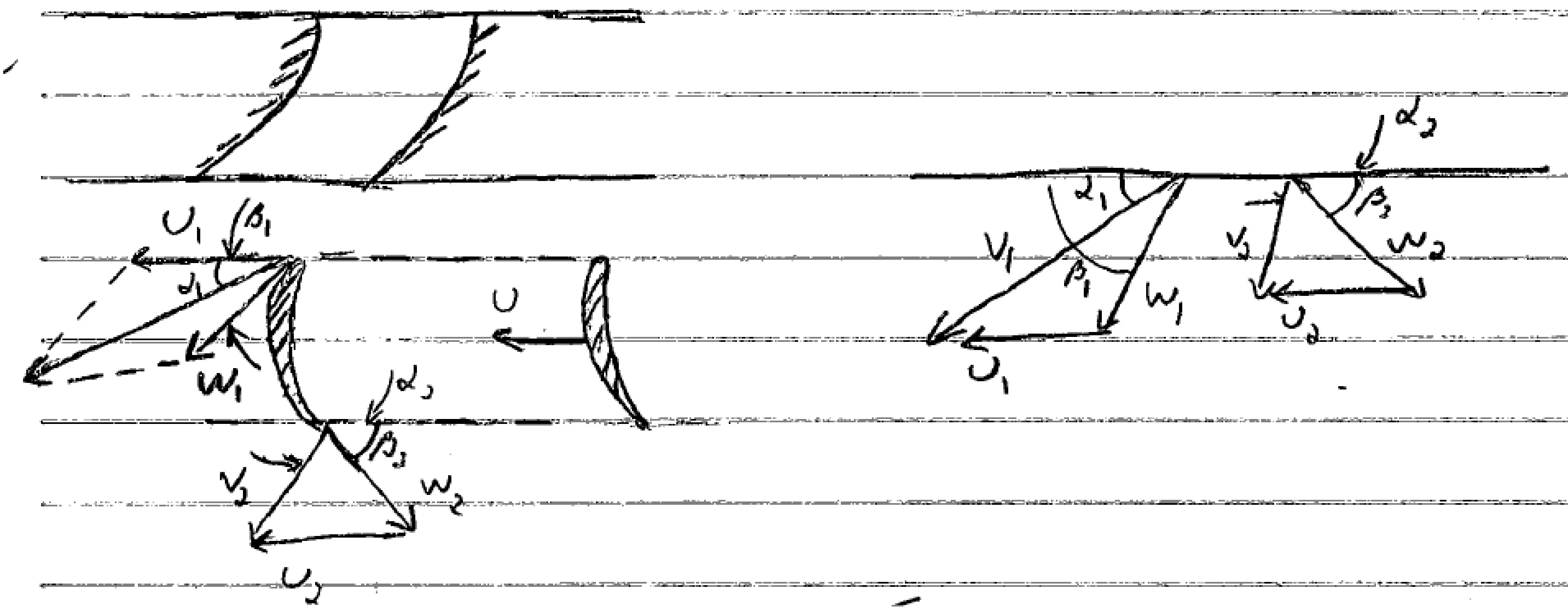
$$\sin \beta_2 = \frac{V_2}{W_2} \sin \alpha_2$$

$$V_2 = \sqrt{{W_2}^2 + {U_2}^2 - 2W_2 U_2 \cos \beta_2}$$

Vista superior (diagrama
slide precedente)



# Triângulo de velocidades: bomba axial




$$\vec{V} = V_r\vec{e}_r + V_t\vec{e}_\theta + V_a\vec{e}_z$$

$$\vec{M}_{vc} = \vec{r} \times \vec{F}$$
$$= \frac{\partial}{\partial t}\int \left(\vec{r} \times \vec{V}\right)\rho d\forall + \oint \left(\vec{r} \times \vec{V}\right)\rho \vec{V}_r \cdot \overrightarrow{dA}$$

# Bomba axial: potência

- Considere:
  - RP, PUF
  - Torque devido a forças de massa e superfície desprezíveis
  - Eixo z = eixo axial da bomba
- Então: para $\vec{r} = r\vec{e}_r + z\vec{e}_z$

$$M_{z,vc} = \oint rV_u d\dot{m} = \dot{m}(r_2V_{2t} - r_1V_{1t})$$

  - Devemos fornecer ao fluido:

$$\dot{W}_w = P_w = \omega M_z = \dot{m}(U_2V_{2t} - U_1V_{1t})$$

  - OBS: para bombas axiais, $U_2 = U_1 = U$

$$\frac{P_w}{\dot{m}} = U(V_{2t} - V_{1t})$$

# Equações Energia e QDMA

- Temos então para a potência a ser fornecida à bomba:

- Bomba centrífuga

$$P_w = \rho g Q H = \dot{m}(U_2 V_{2t} - U_1 V_{1t})$$

- Bomba axial

$$P_w = \rho g Q H = \dot{m} U (V_{2t} - V_{1t})$$

Estas equações são conhecidas como Equações de Euler

# Bomba centrífuga

- Vimos que:

$$\frac{P_w}{\rho g Q} = H = \frac{1}{g}(U_2 V_{2t} - U_1 V_{1t})$$

- E que:

$$uV_t = \tfrac{1}{2}(V^2 + u^2 - w^2)$$

- Logo:

$$H = \frac{1}{2g}[(V_2^2 - V_1^2) + (u_2^2 - u_1^2) - (w_2^2 - w_1^2)]$$

- A carga ideal da bomba relaciona as variações de energia cinética das velocidades absoluta, ponta das pás e relativa.

# Bomba centrífuga

- Substituindo a expressão de H, obtemos:

$$\frac{p}{\rho g} + z + \frac{w^2}{2g} - \frac{r^2\omega^2}{2g} = \text{const}$$

- OBS: podemos relacionar $V_t$ e $V_n$

$$V_n = V_t \tan \alpha$$

- De forma que

$$P_w = \rho Q(u_2 V_{n2} \cot \alpha_2 - u_1 V_{n1} \cot \alpha_1)$$

- Onde

$$V_{n2} = \frac{Q}{2\pi r_2 b_2} \qquad V_{n1} = \frac{Q}{2\pi r_1 b_1}$$

# Bomba centrífuga

- Também, é comum utilizar inicialmente em projetos:

$$\alpha_1 = 90^\circ \qquad V_{n1} = V_1$$

Given are the following data for a commercial centrifugal water pump: $r_1 = 4$ in, $r_2 = 7$ in, $\beta_1 = 30°$, $\beta_2 = 20°$, speed = 1440 r/min. Estimate (*a*) the design point discharge, (*b*) the water horsepower, and (*c*) the head if $b_1 = b_2 = 1.75$ in.

$$\omega = 2\pi \text{ r/s} = 2\pi(1440/60) = 150.8 \text{ rad/s}$$

$$u_1 = \omega r_1 = 150.8(4/12) = 50.3 \text{ ft/s}$$

$$u_2 = \omega r_2 = 150.8(7/12) = 88.0 \text{ ft/s}$$

$\alpha_1 = 90°$ e $V_{t1} = 0$ (design point)

$$V_{n1} = u_1 \tan 30° = 29.0 \text{ ft/s}$$

$$Q = 2\pi r_1 b_1 V_{n1} = 3980 \text{ gal/min}$$

(The actual pump produces about 3500 gal/min.)

$$V_{n2} = \frac{Q}{2\pi r_2 b_2} = 16.6 \text{ ft/s}$$

$$V_{t2} = u_2 - V_{n2} \cot \beta_2 = 42.4 \text{ ft/s}$$

$$V_n = V_t \tan \alpha \longrightarrow \alpha_2 = \tan^{-1} \frac{16.6}{42.4} = 21.4°$$

$$V_{t1} = 0 \longrightarrow P_w = \rho Q u_2 V_{t2} = 117 \text{ hp}$$

(The actual pump delivers about 125 water horsepower, requiring 147 bhp at 85 percent efficiency.)

$$H \approx \frac{P_w}{\rho g Q} = 116 \text{ ft}$$

(The actual pump develops about 140-ft head.)