

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS

LEB 472 – HIDRÁULICA

Prof. Fernando Campos Mendonça

**AULA 5 – ROTEIRO**

Tópicos da aula 4:

1) Recordar:

- Aplicações do Teorema de Bernoulli
  - Aula 4: Fluidos reais e Bombas
- Cálculo de custo de energia em sistemas de irrigação
- Aula 5: Turbinas

2) Exercício para entrega (Provinha)

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”  
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS

LEB 472 – HIDRÁULICA

Prof. Fernando Campos Mendonça

Aula 5 – Hidrodinâmica – Teorema de Bernoulli Aplicado a Turbinas  
 Conduitos Forçados (Parte 1)

**1. Teorema de Bernoulli – Aplicações**

Resumo:

a) Canalizações:

$$E_1 = E_2 + hf_{1-2} \qquad E = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + h$$

b) Bombas:

$H_B$  = Altura manométrica, ou Hm

$$E_1 + Hm = E_2 + hf_{1-2}$$

Potência útil:  $Pot_B = \gamma \cdot Q \cdot Hm$

a) SI:

$$\gamma = 9810 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3} \qquad Pot_{absB} \text{ em N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$$

Potência absorvida:  $Pot_{absB} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{\eta_B}$   $\eta_B$  = rendimento da bomba

Potência do motor:

$$Pot_{MB} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{\eta_B \cdot \eta_M} \qquad \eta_M = \text{rendimento do motor}$$

$$Pot_{MB} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{\eta_{MB}} \qquad \eta_{MB} = \text{rendimento do conjunto motobomba}$$

b) Sistema MK\*S - Cálculo prático:

$$\gamma = 1000 \text{ kgf} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$Pot_{absB} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{75 \cdot \eta_B}$$

$$Pot_{MB} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{75 \cdot \eta_B \cdot \eta_M}$$

$$Pot_{MB} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{75 \cdot \eta_{MB}}$$

### 1.1. Exemplos – Potência de bombas e custo de energia

a) Uma bomba succiona e recalca água segundo o esquema da figura abaixo:

Calcular a potência absorvida pela bomba (B), recalcando 1000 L/min, se o vacuômetro (V) na sucção mostra um vácuo (pressão < Patm) de 280 mm Hg e o manômetro no recalque mostra uma pressão de 2,8 kgf.cm<sup>-2</sup>. Considere o rendimento da bomba de 60%.

Solução:

Dados:

$$Q = 1000 \text{ L/min} = 1000/(1000 \times 60) = 0,0167 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_1 = - 300 \text{ mm Hg} = - 0,3 \text{ m Hg} \times 13600 \text{ kgf.m}^{-3} = - 4,08 \text{ mca}$$

$$P_2 = 2,8 \text{ kgf.cm}^{-2} = 2,8 \text{ kgf.cm}^{-2} \times 10 \text{ mca/kgf.cm}^{-2} = 28 \text{ mca}$$

$$V_1 = \frac{4 Q}{\pi D^2} = \frac{4 \times 0,0167}{\pi \times 0,15^2} = 0,95 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{4 Q}{\pi D^2} = \frac{4 \times 0,0167}{\pi \times 0,1^2} = 2,13 \text{ m/s}$$

$$h_1 = 0; h_2 = 0$$

$$\gamma = 1000 \text{ kgf.m}^{-3}$$

Distância 1-2 é muito pequena  $\Rightarrow hf_{1-2} \approx 0$

Cálculos:

Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 + H_m = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 + hf_{1-2}$$

$$- 4,08 + \frac{0,95^2}{19,62} + 0 + H_B = 28 + \frac{2,12^2}{19,62} + 0 + 0$$

$$H_m = 32,3 \text{ mca}$$

$$Pot_{abs} = \frac{\gamma Q H_m}{75 \eta_B} = \frac{1000 \times 0,0167 \times 32,3}{75 \times 0,6} = 11,99 \text{ cv}$$

b) Calcular o custo do consumo de energia elétrica de um pivô central, com os seguintes dados:

Dados:

Esquema:

Área irrigada: 80 ha (800.000 m<sup>2</sup>)

Lâmina d'água anual: 600 mm (0,6 m)

Custo da energia (kWh): R\$ 0,18

Perdas de carga: 1 mca (sucção)

10 mca (recalque)

Pressão:  $P_1 = 0$        $P_2 = 3,5 \text{ kgf/cm}^2$

Velocidade:  $V_1 = 0$        $V_2 = 2 \text{ m/s}$

Rend. do conj. motobomba:  $\eta_{MB} = 60\%$

Tarifa de energia convencional (consumo)

Solução:

a) Potência absorvida (motor, ou conj. motobomba)

$$\text{potência} = \text{energia/tempo} \quad \Rightarrow \quad \text{Energia} = \text{potência/tempo}$$

$$\text{cvh} = \text{cv} \times \text{hora}$$

$$1 \text{ cvh} = 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} \times 1 \text{ h}$$

$$1 \text{ kgf} = 9,81 \text{ N} \quad \Rightarrow \quad 1 \text{ cvh} = 75 \times 9,81 = 735,75 \text{ N.m/s (watt)} \times 1 \text{ h}$$

$$1 \text{ cvh} = 0,73575 \text{ kWh}$$

b) Consumo e custo da energia

Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 + H_m = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 + hf_{1-2}$$

$$0 + 0 + 0 + H_m = 35 + \frac{2^2}{19,62} + 25 + (1 + 10)$$

$$H_m = 71,2 \text{ mca}$$

Potência absorvida pelo conjunto motobomba:

$$\text{Pot}_{\text{abs B}} = \frac{\text{Energia}}{\text{tempo}} = \frac{1000 \cdot Q \cdot H_m}{75 \cdot \eta_B}$$

$$\text{Pot}_{\text{abs B}} = \frac{\text{Energia}}{\text{tempo}} = \frac{1000 \cdot \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} \cdot H_m}{75 \cdot \eta_B} \quad \frac{\text{Energia}}{\text{tempo}} = \frac{1000 \cdot \text{volume} \cdot H_m}{\text{tempo} \cdot 75 \cdot \eta_B \cdot 3600 \text{ (s/h)}}$$

$$\text{Energia} = \frac{1000 \cdot \text{volume} \cdot H_m}{75 \cdot \eta_B} = \frac{1000 \cdot (800000 \text{ m}^2 \cdot 0,6 \text{ m}) \cdot 71,2}{75 \cdot 0,6 \cdot 3600}$$

$$\text{Energia abs.} = 210962,96 \text{ cvh}$$

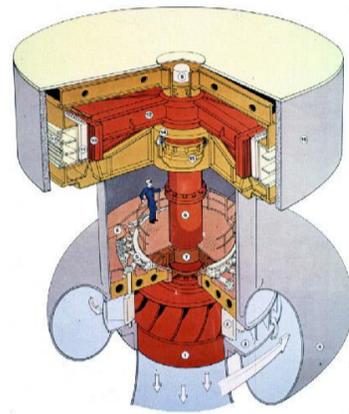
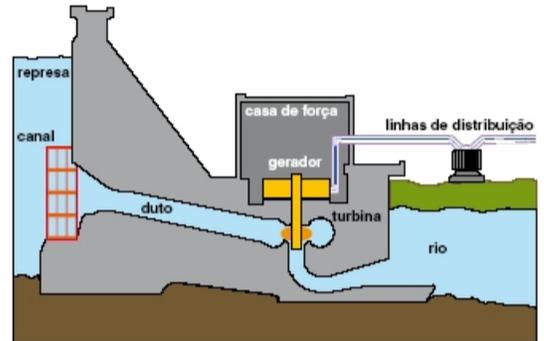
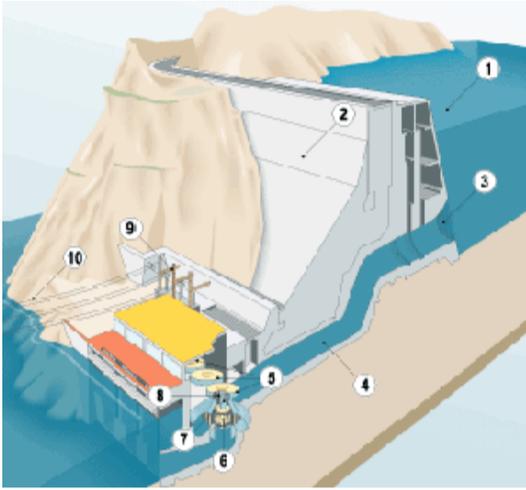
$$\text{ou } 210962,96 \text{ cvh} \times 0,73575 \text{ (kWh/cvh)} = 155216 \text{ kWh}$$

$$\text{Custo da energia} = 155216 \text{ kWh} \times \text{R\$/kWh } 0,18 = \text{R\$ } 27.938,88$$

## 2. Turbinas

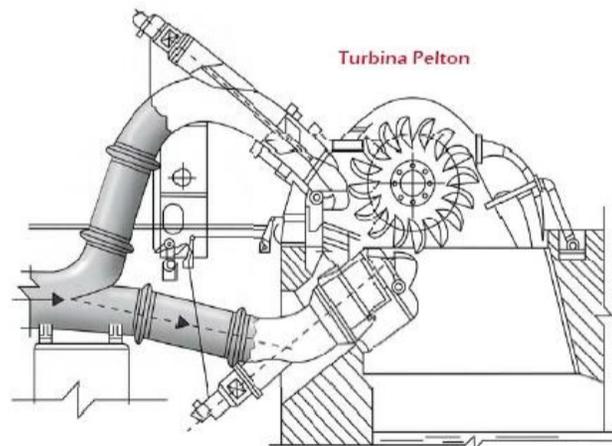
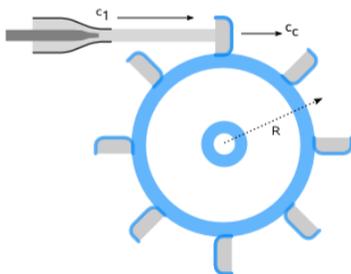
- Turbinas transformam energia de velocidade em trabalho (Ex.: energia elétrica)

### 2.1. Turbina hidrelétrica



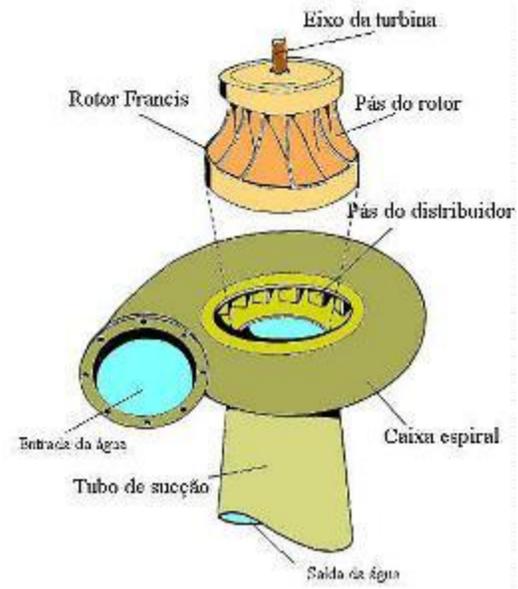
### 2.2. Turbina Pelton:

- Um ou mais bocais de acionamento
- Câmara fechada ou semifechada para aumentar a eficiência
- Quedas d'água maiores: 350 a 1100 m
- Rotor na posição vertical
- Ex.:



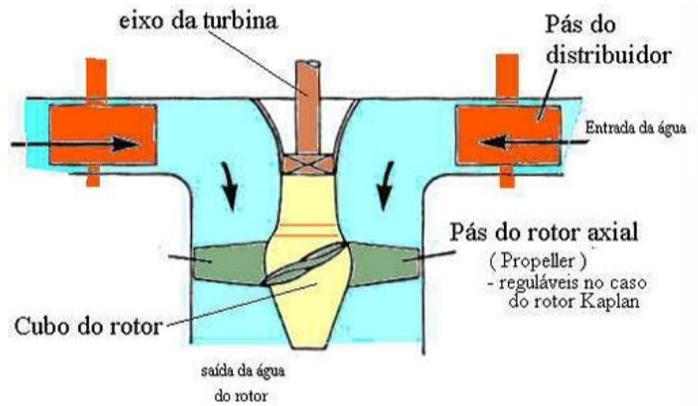
### 2.3. Turbina Francis

- Câmara fechada aumenta a eficiência
- Rotor na posição horizontal
- Quedas d'água de 40 a 400 m
- Ex.: Itaipu, Tucuruí e Furnas



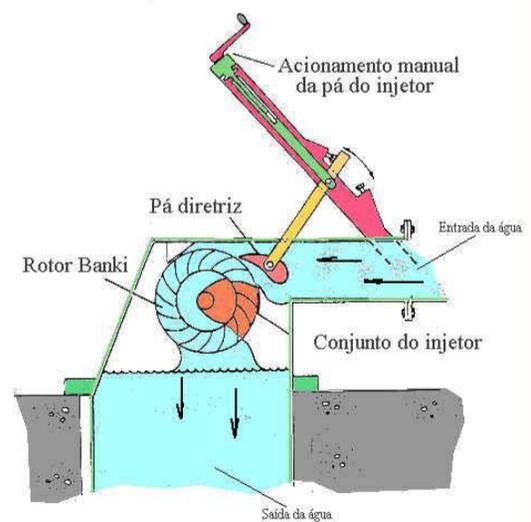
### 2.4. Turbina Kaplan

- Rotor na posição horizontal
- Fluxo axial de água (sentido do eixo)
- Quedas d'água de 60 m
- Ex.: Três Marias e Yacireta (Paraguai)



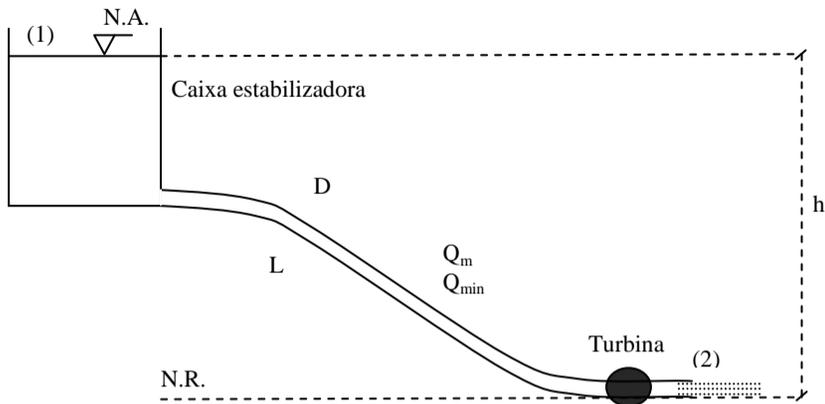
### 2.5. Turbina de fluxo cruzado

- Aplicações: Geração de energia e bombeamento de água (turbobomba)



### 3. Teorema de Bernoulli aplicado a turbinas

Esquema de turbina



- Funcionamento oposto ao da bomba

$$E_1 = E_2 + E_T + hf_{1-2}$$

$E_T$  = energia absorvida pela turbina (energia/peso)

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 + E_T + hf_{1-2}$$

$hf_{1-2}$  = perda de carga que ocorre entre os pontos 1 e 2

Potência e rendimentos:

$$Pot_{abs\ T-água} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{75}$$

$$\text{Rend. turbina} \quad \eta_T = \frac{Pot_{abs\ G}}{Pot_{abs\ T}}$$

$$\text{Rend. gerador} \quad \eta_G = \frac{Pot_{abs\ Rede}}{Pot_{abs\ G}}$$

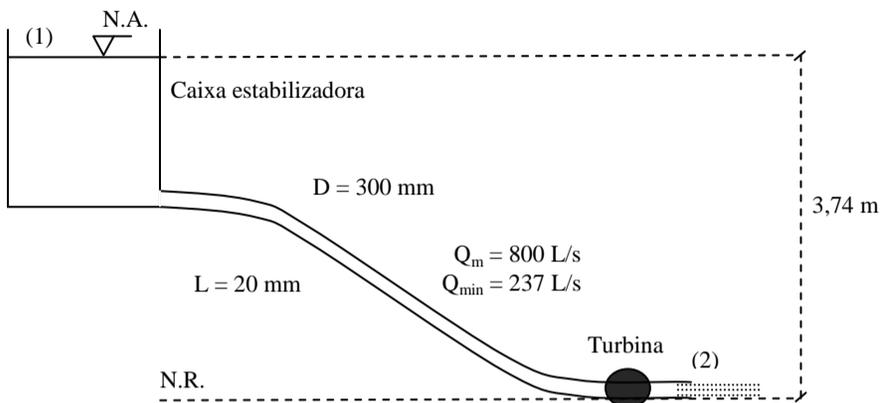
$$\text{Rend. turbina+gerador} \quad \eta_{(T+G)} = \eta_T \times \eta_G$$

$$\text{Pot. absorvida rede} \quad Pot_{abs\ Rede} = \eta_G \times Pot_{abs\ G}$$

$$\text{Pot. abs. turbina} \quad Pot_{abs\ T} = \eta_{(T+G)} \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{75}$$

### 3.1. Exemplos:

a) Uma turbina está gerando energia segundo o esquema abaixo:



N.R. = Nível de referência (ponto 2)

Dados:

Ponto 1

$$P_1 = 0$$

$$V_1 = 0$$

$$h_1 = 3,5 \text{ m}$$

$$hf_{1-2} = 0,12 \text{ mca}$$

$$Q_m = 800 \text{ L/s}$$

$$Q_{\min} = 237 \text{ L/s}$$

Consumo médio de uma casa rural: 200 kWh/mês

Ponto 2

$$P_2 = 0$$

$$V_2 = \frac{Q}{S_2} = \frac{4Q}{\pi D_2^2} = \frac{4 \times 0,03}{\pi \times 0,3^2} = 0,42 \text{ m/s}$$

$$h_2 = 0$$

$$\eta_{(T+G)} = 70\%$$

Pede-se:

- As potências mínima e média fornecida pela turbina à rede elétrica da fazenda.
- Considerando a vazão útil média (800 L/s), calcular a receita bruta anual obtida derivada à turbina (R\$/kWh 0,18).
- O número mínimo e médio de casas que podem ser abastecidas pela energia da turbina.
- O número de chuveiros que podem ser ligados ao mesmo tempo, considerando as potências média e mínima gerada pela turbina.

Solução:

a) Potência mínima e média

Teorema de Bernoulli – Cálculo da carga d'água disponível à turbina (energia/peso):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 + E_T + hf_{1-2}$$

$$0 + 0 + 3,5 = 0 + \frac{0,42^2}{2 \times 9,81} + 0 + E_T + 0,12 \quad \Rightarrow \quad E_T = 3,37 \text{ mca}$$

$$\text{Potência mínima:} \quad \text{Pot}_{\min T} = \eta_{(T+G)} \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{75} = 0,7 \times \frac{1000 \cdot 0,237 \cdot 3,37}{75} = 7,5 \text{ cv} \\ (5,5 \text{ kW})$$

$$\text{Potência média:} \quad \text{Pot}_{m T} = \eta_{(T+G)} \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{75} = 0,7 \times \frac{1000 \cdot 0,800 \cdot 3,37}{75} = 25,2 \text{ cv} \\ (18,5 \text{ kW})$$

b) Receita bruta anual obtida com a turbina ( $Q = 800 \text{ L/s}$ )

Renda bruta média:

$$RB_m = 18,5 \text{ kW} \times 24 \text{ h/dia} \times 365 \text{ dias/ano} \times 0,18 \text{ R\$/kWh}$$

$$RB_m = \text{R\$/ano } 29.170,80$$

c) N° médio e mínimo de casas abastecidas pela turbina

$$N_{\text{mín}} = \frac{5,5 \text{ kW} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \times 30 \frac{\text{dias}}{\text{mês}}}{200 \frac{\text{kWh}}{\text{casa.mês}}} = 19,8 \approx 19 \text{ casas}$$

$$N_m = \frac{18,5 \text{ kW} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \times 30 \frac{\text{dias}}{\text{mês}}}{200 \frac{\text{kWh}}{\text{casa.mês}}} = 66,6 \approx 66 \text{ casas}$$

d) N° de chuveiros ligados ao mesmo tempo

N° médio:

$$N_{mc} = \frac{Pot_{mT}}{Pot_{chuv}} = \frac{18,5 \text{ kW}}{2,5 \text{ kW}} \approx 7 \text{ chuveiros}$$

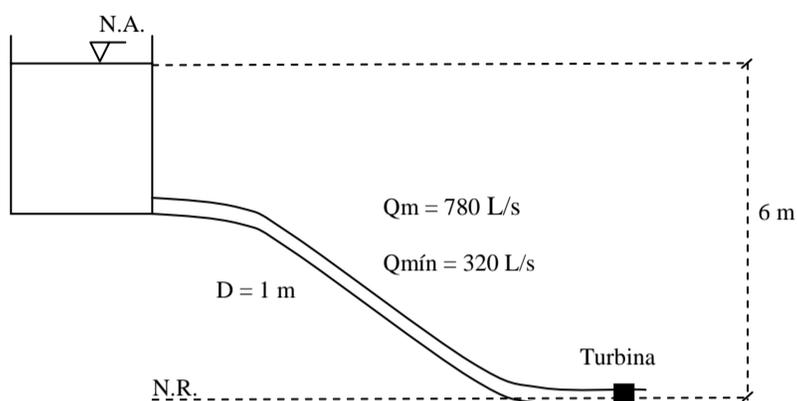
N° mínimo:

$$N_{\text{min}_c} = \frac{Pot_{\text{min}T}}{Pot_{chuv}} = \frac{5,5 \text{ kW}}{2,5 \text{ kW}} \approx 2 \text{ chuveiros}$$

Obs.: a potência da turbina é pequena e, portanto, não oferece muito conforto doméstico aos usuários, mas pode ser útil para o uso com equipamentos de menor potência e uso programado.

#### 4. Exercício (Provinha 5)

O esquema a seguir mostra uma turbina hidráulica que recalca (eleva) água de um reservatório (R<sub>1</sub>) a outro (R<sub>2</sub>).



Dados:

$Q_m = 780 \text{ L/s}$   
 $Q_{mín} = 320 \text{ L/s}$   
 $D = 1 \text{ m}$   
 $h = 6 \text{ m}$   
 $h_f = 0,6 \text{ mca}$

Pede-se:

- As potências mínima e média fornecidas pela turbina.
- Considerando-se a vazão média, calcular a receita bruta obtida com a turbina (R\$/kWh 0,18).
- O número de casas (média anual) que podem ser abastecidas com a energia da turbina.
- O número de resfriadores de leite que poder ser abastecidos simultaneamente pela turbina.