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

LEB0472 – HIDRÁULICA

Prof. Fernando Campos Mendonça

AULA 4 – ROTEIRO

Tópicos da aula 4:

1) Recordar:

   - Equação da Continuidade
   - Teorema de Bernoulli aplicado ao fluido perfeito
   - Aplicações: bocais, turbina Pelton e roda d’água

2) Aplicação do Teorema de Bernoulli a fluidos reais

   - Conceito de perda de carga (hf)
   - Apresentação do teorema de Bernoulli com perdas de carga
   - Exemplos (exercícios)
   - Apresentação da fórmula de perda de carga de Hazen-Williams

     - Diferentes formas de apresentação (hf, D, Q e L)
     - Aplicações (exemplos)

3) Teorema de Bernoulli aplicado a bombas hidráulicas

   - Apresentação do teorema
   - Aplicações (exemplos)

4) Exercício para entrega (Provinha)

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSSISTEMAS

LEB 0472 – HIDRÁULICA

Prof. Fernando Campos Mendonça

Aula 4 –Hidrodinâmica – Teorema de Bernoulli e Aplicações práticas

1. Teorema de Bernoulli aplicado ao fluido perfeito

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

Cada termo do teorema representa energia por unidade de peso (Energia/peso).

Análise dimensional de Energia/Peso:

Geral: $\frac{Energia}{Peso} = \frac{F \cdot L}{F} = L$

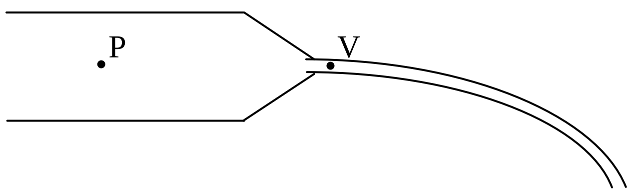
Energia de pressão: $\frac{P}{\gamma} = \frac{F \cdot L^{-2}}{F\ L^{-3}} = L$

Energia de velocidade: $\frac{V^2}{2g} = \frac{L^{-2}\ T^{-2}}{L\ \ T^{-2}} = L$

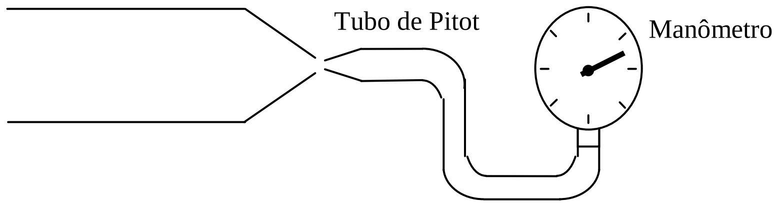
Energia potencial: h = L

1.1. Aplicações – Máquinas hidráulicas:

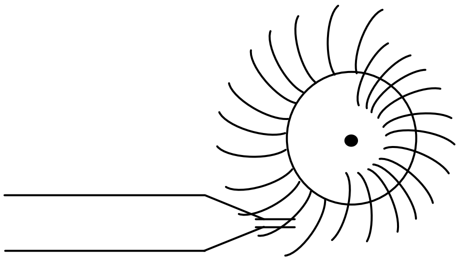
a) Bocal: transforma energia de pressão em energia de velocidade

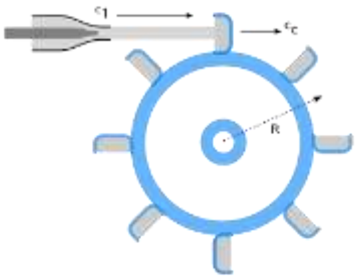


b) Tubo de Pitot: transforma energia de velocidade em energia de pressão
(Esquema de bocal, tubo de Pitot e manômetro)

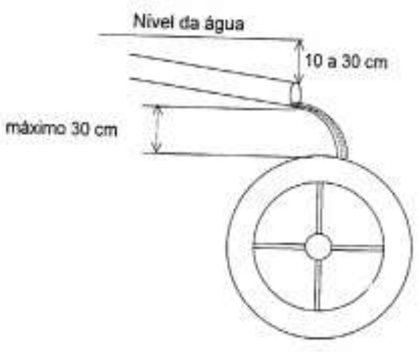


c) Turbina Pelton: transforma energia de velocidade em trabalho (Ex.: energia elétrica)
(Esquema de bocal e turbina Pelton)





d) Roda d'água: transforma energia potencial em trabalho mecânico



2. Aplicação do Teorema de Bernoulli a fluidos reais

- Teorema original desenvolvido para um fluido perfeito
  - Não há perda de energia
- Teorema aplicado a fluidos reais:
  - Há perda de energia (perda de carga)

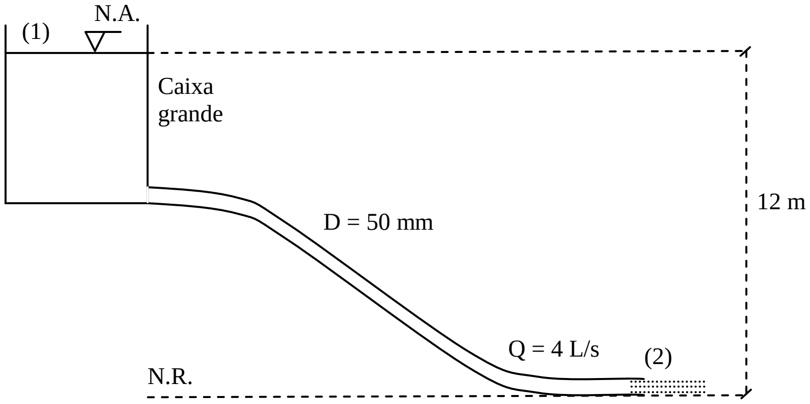
- Teorema com perda de carga (hf)

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

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

2.1. Exemplos:

a) Calcular a perda de carga que ocorre entre os pontos 1 e 2 do esquema a seguir:



N.R. = Nível de referência (ponto 2)

<u>Ponto 1</u>

$P_1 = 0$
$V_1 = 0$
$h_1 = 12$ m

<u>Ponto 2</u>

$P_2 = 0$
$V_2 = \frac{Q}{S_2} = \frac{4\,Q}{\pi\, D_2^2} = \frac{4\ \times 0{,}004}{\pi \times 0{,}05^2}$ = 2,04 m/s
$h_2 = 0$

Teorema de Bernoulli:

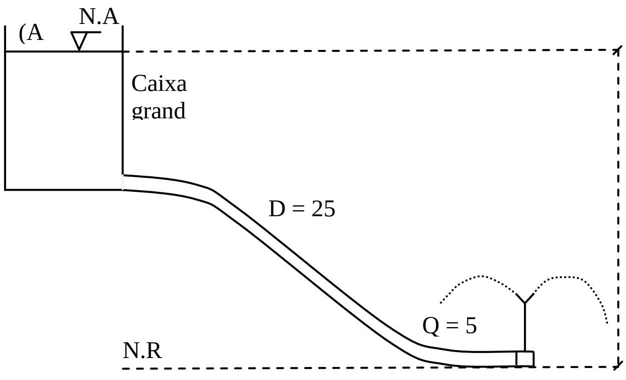
$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 + hf_{1-2}$$

$$0 + 0 + 12 = 0 + \frac{2{,}04^2}{2\ \times 9{,}81} + 0 + hf_{1-2}$$

$$hf_{1-2} = 12 - 0{,}2 = 11{,}8\ mca$$

---

b) No esquema a seguir, a água flui de um reservatório (A) para um aspersor (B) sob pressão de 3,0 kgf/cm^2 e vazão de 5 m^3/h. A tubulação tem diâmetro de 25 mm. Calcule a perda de carga do ponto (A) ao ponto (B).



Dados:

$P_A = 0$ $\quad$ $P_B = 3{,}0$ kgf/cm^2 (30 mca)

$V_A = 0$ $\quad$ $V_B = \frac{4 \times 0{,}001389}{\pi \times 0{,}025^2}$

$V_B = 2{,}83$ m/s

$h_A = 50$m $\quad$ $h_B = 0$

Teorema de Bernoulli:

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + h_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + h_B + hf_{A-B} \qquad 0 + 0 + 50 = 30 + \frac{2{,}83^2}{2g} + 0 + hf_{A-B}$$

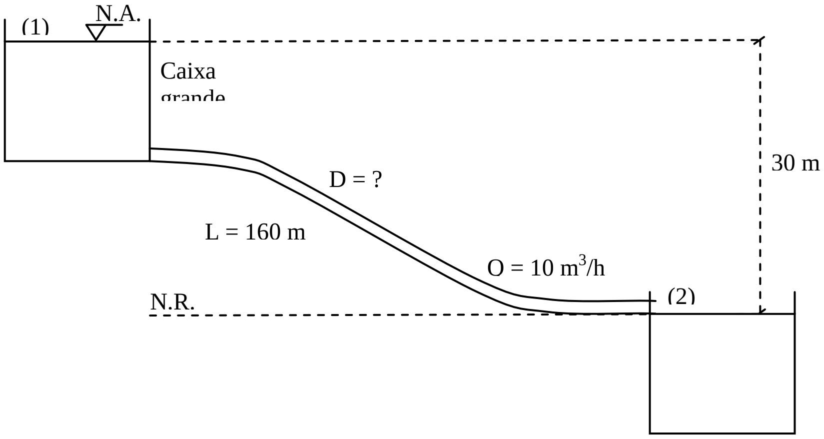
$$hf_{A-B} = 50 - 30 - 0{,}41$$

$hf_{A-B} = 19{,}6$ mca

c) A perda de carga em qualquer escoamento de fluidos em tubulações está relacionada com a vazão e com o diâmetro do tubo, conforme a equação a seguir:

$$hf = 10{,}65 \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1{,}852} \times \frac{L}{D^{4{,}87}}$$

Calcule o diâmetro que uma tubulação deverá ter para transportar água, com uma vazão de 10 m^3/h, conforme o esquema a seguir:



Dados:

$P_1 = 0$	$P_2 = 0$	Cálculos:
$V_1 = 0$	$V_2 = 0$	Teorema de Bernoulli
$h_1 = 30$ m	$h_2 = 0$	$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 + hf_{1-2}$
Q = 10 m^3/h (0,00278 m^3/s)		$0 + 0 + 30 = 0 + 0 + 0 + hf_{1-2}$
L = 160 m		$hf_{1-2} = 30$ mca
Coeficiente de atrito: C = 150		

Equação de perda de carga:

$$30 = 10{,}65 \times \left(\frac{0{,}00278}{150}\right)^{1{,}852} \times \frac{160}{D^{4{,}87}} = \frac{0{,}00000333}{D^{4{,}87}}$$

$$D^{4{,}87} = \frac{0{,}00000333}{0{,}00030}$$

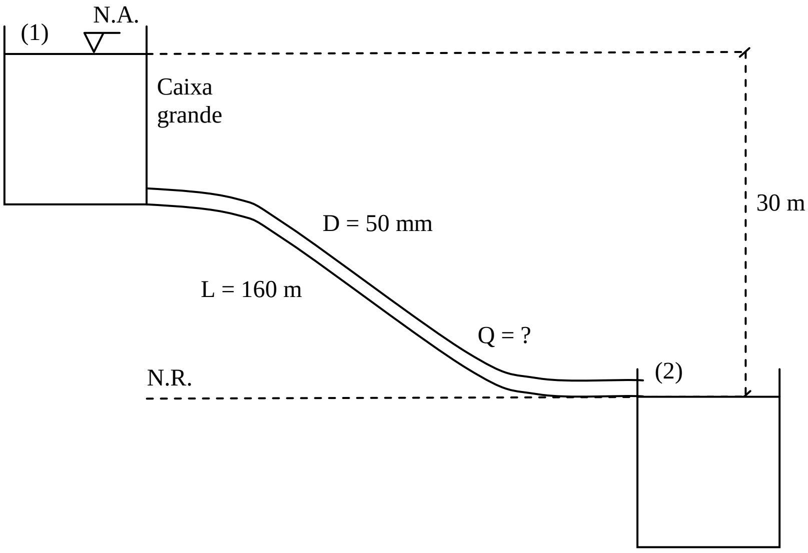
$$D = \left(\frac{0{,}00000333}{0{,}00030}\right)^{\frac{1}{4{,}87}}$$

$D = 0{,}0373$ ou 37,3 mm

Obs.: Transformação algébrica da equação de perda de carga para cálculo do diâmetro.

$$D = 1{,}625 \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{0{,}38} \times \left(\frac{L}{hf}\right)^{0{,}205}$$

d) No mesmo esquema do exercício anterior, calcule a vazão se a tubulação tiver um diâmetro de 50 mm.



Obs.: Isolar a vazão na equação de Hazen-Williams.

Dados:

$P_1 = 0$ $\quad$ $P_2 = 0$

$V_1 = 0$ $\quad$ $V_2 = 0$

$h_1 = 30$ m $\quad$ $h_2 = 0$

Q = 10 m^3/h (0,00278 m^3/s)

L = 160 m

$hf_{1\text{-}2} = 30$ mca

Coeficiente de atrito: C = 150

D = 50 mm

Cálculos:

$$hf = 10{,}65 \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1{,}852} \times \frac{L}{D^{4{,}87}}$$

$$Q = 0{,}2788 \times C \times D^{2{,}63} \times \left(\frac{hf}{L}\right)^{0{,}54}$$

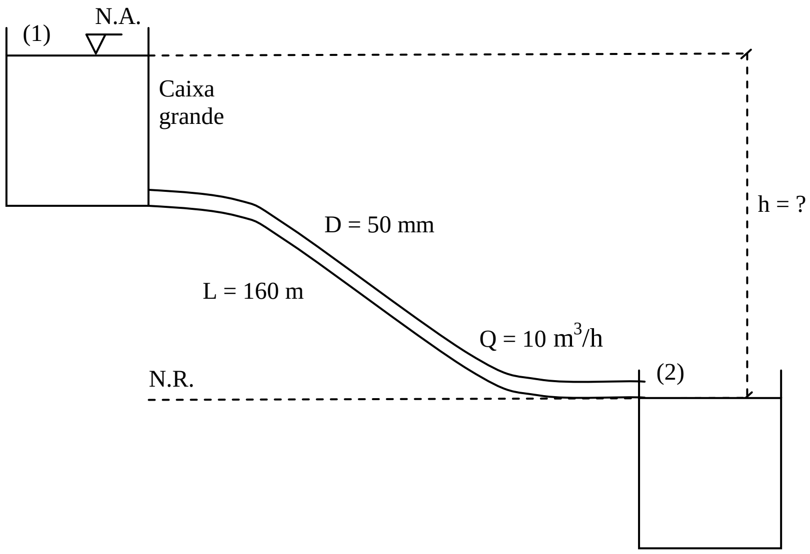
$$Q = 0{,}2788 \times 150 \times 0{,}05^{2{,}63} \times \left(\frac{30}{160}\right)^{0{,}54}$$

Q = 0,00641 m^3/s

6,41 L/s

23,1 m^3/h

e) Um produtor rural requisitou um projeto de condução de água por gravidade com dois reservatórios, para o abastecimento de bebedouros, e já tem à disposição uma tubulação de polietileno (PE, C=150) com diâmetro de 50 mm. Sabendo que a vazão mínima desejada é de 10 m^3/h e que a distância entre os dois reservatórios é de 160 m, responda as questões a seguir:



e.1) Qual o máximo desnível (h) entre os dois reservatórios para garantir a vazão desejada?

e.2) Se o desnível entre os reservartórios for de 5 metros, qual será a vazão do sistema?

Obs.: utilizar a fórmula original, sabendo que h = hf.

Dica: em escoamentos entre dois reservatórios abertos, h = hf

Dados:

D = 50 mm

Q = 10 m^3/h (0,00278 m^3/s)

L = 160 m

Coeficiente de atrito: C = 150

h = ?

Cálculos:

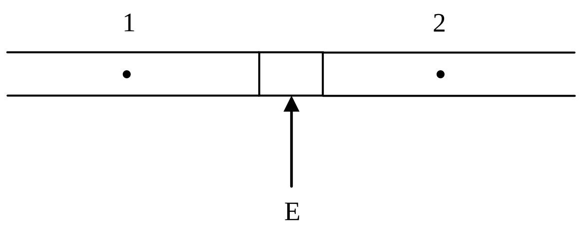
$$hf = 10{,}65 \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1{,}852} \times \frac{L}{D^{4{,}87}}$$

$$hf = 10{,}65 \times \left(\frac{0{,}002785}{150}\right)^{1{,}852} \times \frac{160}{0{,}05^{4{,}87}}$$

hf = 6,35 mca

Então: h = 6,35 m

3. Teorema de Bernoulli aplicado a bombas hidráulicas

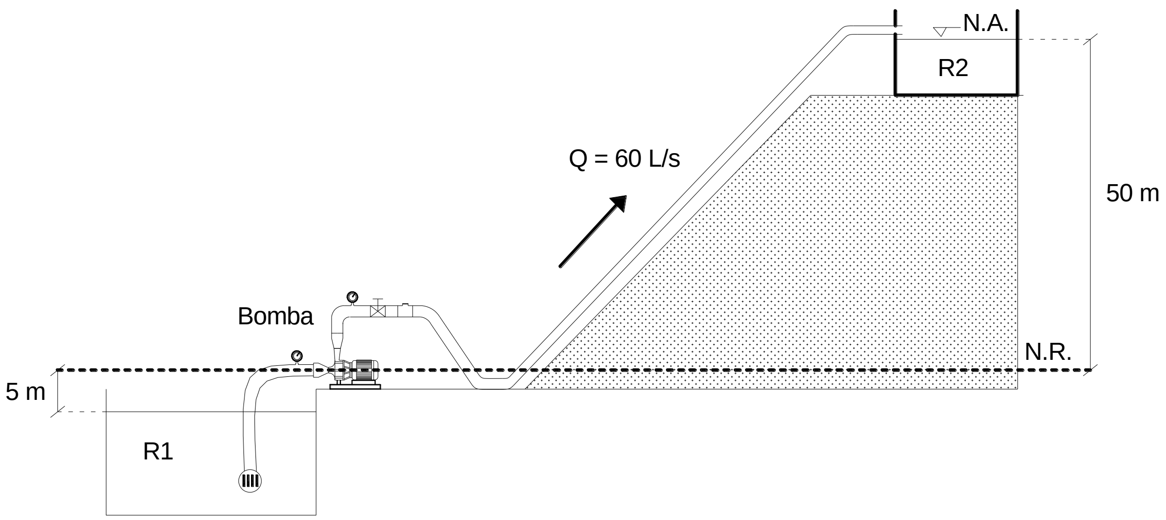


$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 + hf_{1-2}$$

H_B = energia fornecida pela bomba

3.1. Exemplos

a) O esquema a seguir mostra uma bomba hidráulica que recalca (eleva) água de um reservatório (R_1) a outro (R_2).



Dados:

Q = 60 L/s
hf_{1-2} = 20 mca
P_1 =0 P_2 = 0
V_1 =0 V_2 = 0
h_1= -5 m h_2 = 50 m
hf_{1-2} = 20 mca

Pede-se:

a.1) A energia por unidade de peso fornecida à água pela bomba.
a.2) A potência cedida à água pela bomba (potência hidráulica).

Solução:

a.1) Energia por unidade de peso fornecida pela bomba

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

$$0 + 0 - 5 + H_B = 0 + 0 + 50 + 20$$

H_B = 75 mca

a.2) Potência hidráulica da bomba (Pot_B)

Energia fornecida pela bomba: H_B (Energia/peso)

$$H_B = \frac{\text{energia}}{\text{peso}}$$

Potência da bomba:

$$P_B = \gamma \quad x \quad Q \quad x \quad H_B$$

$$P_B = \frac{\cancel{\text{peso}}}{\cancel{\text{volume}}} \cdot \frac{\cancel{\text{volume}}}{\text{tempo}} \cdot \frac{\text{energia}}{\cancel{\text{peso}}} = \frac{\text{energia}}{\text{tempo}}$$

SI: γ_{H2O} = 9810 N / m³

Q = 0,06 m³/s

H_B = 75 mca

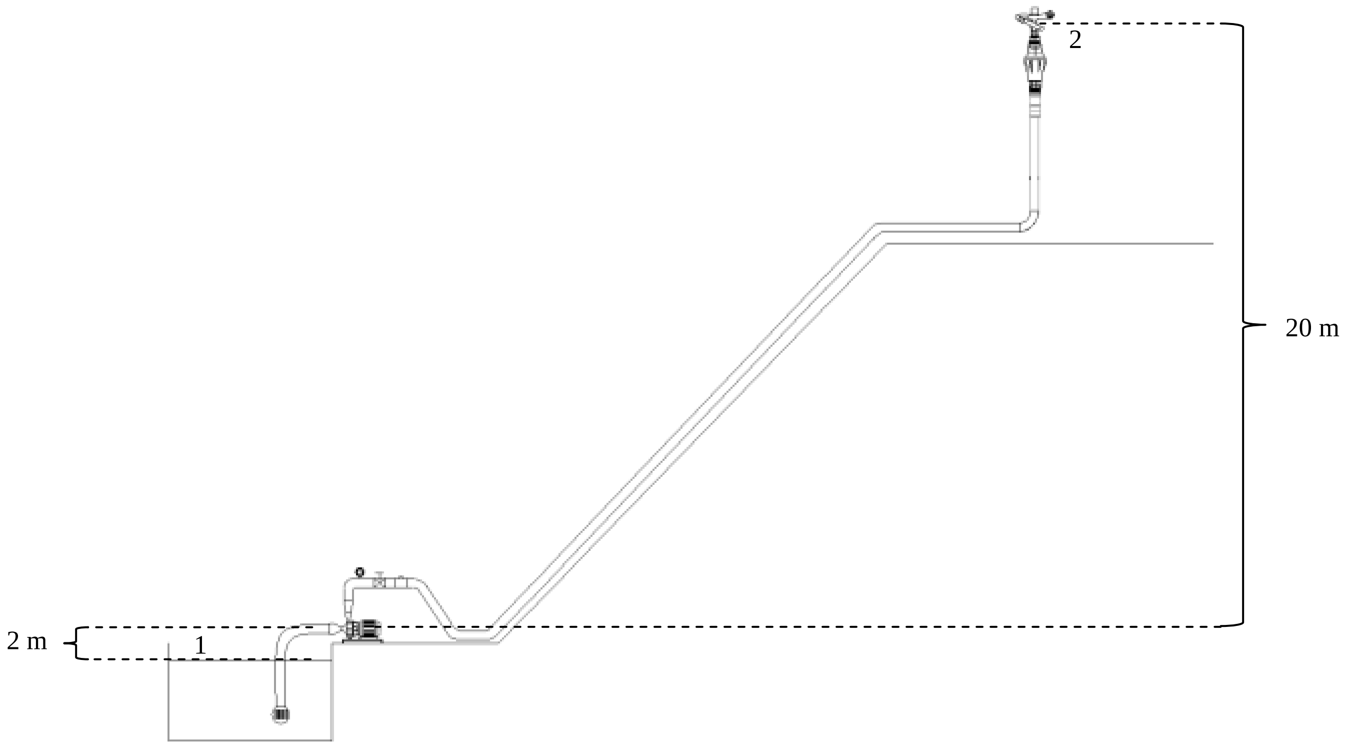
$$P_B = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \cdot 0{,}06 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 75 \text{ m} = 44145 \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{s}}$$

$1 \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{s}} = 1$ W $\Rightarrow$ P_B = 44145 W ou 44,145 kW

1 cv = 735,5 W $\Rightarrow$ $P_B = \frac{44145 \text{ W}}{735{,}5 \frac{\text{W}}{\text{cv}}} = 60$ cv

1 HP = 1,014 cv = 746 W $\Rightarrow$ $P_B = \frac{60 \text{ cv}}{1{,}014 \frac{\text{cv}}{\text{HP}}} = 59{,}2$ HP

b) O esquema a seguir mostra uma motobomba fornecendo água a um aspersor por meio de uma tubulação.



Dados:

Vazão do aspersor: q = 18 m^3/h

Perda de carga do sistema: hf = 15 mca

Pressão de operação (serviço) do aspersor: PS = 40 mca

Diâmetro da tubulação: D = 50 mm

Pede-se:

b.1) A energia a ser fornecida pela bomba (energia/peso).

b.2) A potência hidráulica a ser fornecida pela bomba.

b.3) A potência absorvida pela bomba, considerando-se um rendimento de 60% (η_b = 0,60).

b.4) A potência absorvida pelo conjunto motobomba (motor + bomba), considerando-se um rendimento do motor igual a 90% (η_m = 0,90).

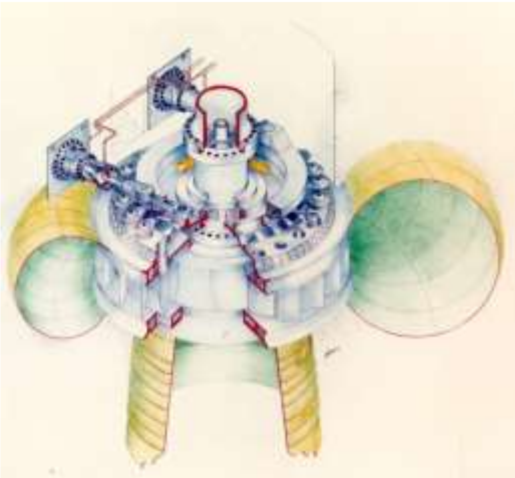
Exercícios para prática

1) O rio Piracicaba tem vazão média aproximada de 70 m^3/s e a queda do salto situado atrás do Museu da Água tem 20 m.

a) Calcule a potência bruta possível de ser aproveitada por uma turbina neste trecho do rio.
b) Considerando-se que uma turbina possui um rendimento de 75%, qual a potência líquida possível de ser aproveitada?
c) Qual a energia possível de ser gerada durante um ano (365 dias)?

2) Considerando uma barragem com queda d'água de 100 m e com uma turbina instalada, calcule a vazão necessária para manter as lâmpadas fluorescentes (P_{Lamp} = 60 W) da sala de aula acesas (Considerar η_T = 0,75).

3) A usina hidrelétrica de Itaipu foi projetada para operar com 20 turbinas tipo Francis, com queda nominal de 118,4 m, vazão média de 645 m^3/s por turbina e rendimento de 92%.



Quantidade	20
Tipo	Francis
Potência nominal unitária	715 MW
Velocidade de projeto - 50/60 Hz	90,9/92,3 rpm
Queda líquida de projeto	118,4 m
Vazão nominal unitária	645 m^3/s
Peça indivisível mais pesada - rotor	296 t
Peso de cada unidade	3.360 t

Figura 1 - Turbina de Itaipu (tipo Francis) – Esquema e características técnicas.

a) Qual a potência bruta da queda d'água (por turbina)?
b) Qual a potência líquida gerada por cada turbina?
c) Qual a potência líquida total da usina?

4) Na Fazenda Areão (ESALQ/USP – Piracicaba, SP) ocorreu uma precipitação pluvial (chuva) de 30 mm, que foi totalmente infiltrada e armazenada no solo da área irrigada, o que gerou uma economia de energia na irrigação. Sendo assim, pede-se:

a) Calcular a energia elétrica (em joules) economizada pelo sistema de irrigação pivô central instalado na Fazenda Areão, sabendo que o sistema tem um raio molhado de 200 m e altura manométrica total H_{mT} = 30 mca.

b) Considerando o custo de R$/kWh 0,20 e que o rendimento energético do sistema é igual a 80% (η_{mb} = 0,80), calcule a redução na conta de energia devido a essa precipitação pluvial.

5) A vazão outorgada pelo DAEE-SP para captação pelo SEMAE (Piracicaba, SP) é de 2,0 m^3/s, a ser captada no rio Corumbataí. A altura total de elevação do rio à estação de tratamento de água (ETA) é de 55 m, aproximadamente (desnível + perdas de carga). Considerando que os conjuntos de motor e bomba têm rendimento de 75% e que a potência de cada bomba é de 250 cv, qual o máximo número de bombas que o SEMAE opera na estação de captação?

6) Deseja-se captar água de um rio e elevá-la a um reservatório, sob as seguintes condições:
- Cota do rio: 53 m
- Cota do reservatório de recalque: 89,5 m
- Distância do rio ao reservatório: 158 m
- Vazão necessária: Q = 15 L/s
- Material do tubo: PVC (C = 150)

Pede-se:

a) O diâmetro teórico da tubulação para uma velocidade de escoamento de 1,5 m/s.

b) O diâmetro comercial mais próximo

Diâmetros disponíveis (internos):

Diâmetro		***Diâmetro***	
Nominal (DN, mm)	Interno (DI, mm)	Nominal (DN, mm)	Interno (DI, mm)
50	47,3	125	120,0
65	62,0	150	143,0
75	70,0	200	192,8
100	94,6	250	237,2

c) A velocidade de escoamento para o diâmetro comercial escolhido.

d) Estimar a perda de carga (hf) para o diâmetro comercial escolhido, considerando a equação:

$$hf = 10{,}65 \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1{,}852} \cdot \frac{L}{D^{4{,}87}} \qquad \text{PVC} \rightarrow C = 150$$

e) A energia por unidade de peso que deve ser cedida ao líquido pela bomba (H_b).

f) A potência cedida ao líquido pela bomba (P_b, em W e em cv).

g) A energia cedida ao líquido para transportar 100 m^3 (E, em J e em kWh).

4. Exercício (Provinha 4)

Deseja-se captar água de um rio e elevar a um reservatório com o auxílio de uma bomba.

Dados:

Cota dos níveis da água:

Rio: 100 m

Reservatório: 135 m

Distância: 165 m

Vazão desejada: 10 m^3/h

Diâmetro da tubulação: 50 mm

Coeficiente de atrito do tubo: C = 150

Equação da perda de carga: $hf = 10{,}65 \left(\frac{Q}{C}\right)^{1{,}852} \frac{L}{D^{4{,}87}}$

Pede-se:

a) A energia a ser fornecida pela bomba (energia/peso)

b) A potência hidráulica útil da bomba

c) A potência hidráulica total da bomba, considerando um rendimento de 60% (η_b = 0,60).

d) A potência do motor elétrico, considerando um rendimento de 90% (η_m = 0,90).