

5. HIDRODINÂMICA

5.1.10. TURBOMÁQUINAS. BOMBAS E TURBINAS

Unidade Curricular: Hidráulica,
Hidrologia & Recursos Hídricos
Docente: Prof. Dr. H. Mata-Lima
Universidade da Madeira, 2007

5.1.10. MÁQUINAS HIDRÁULICAS

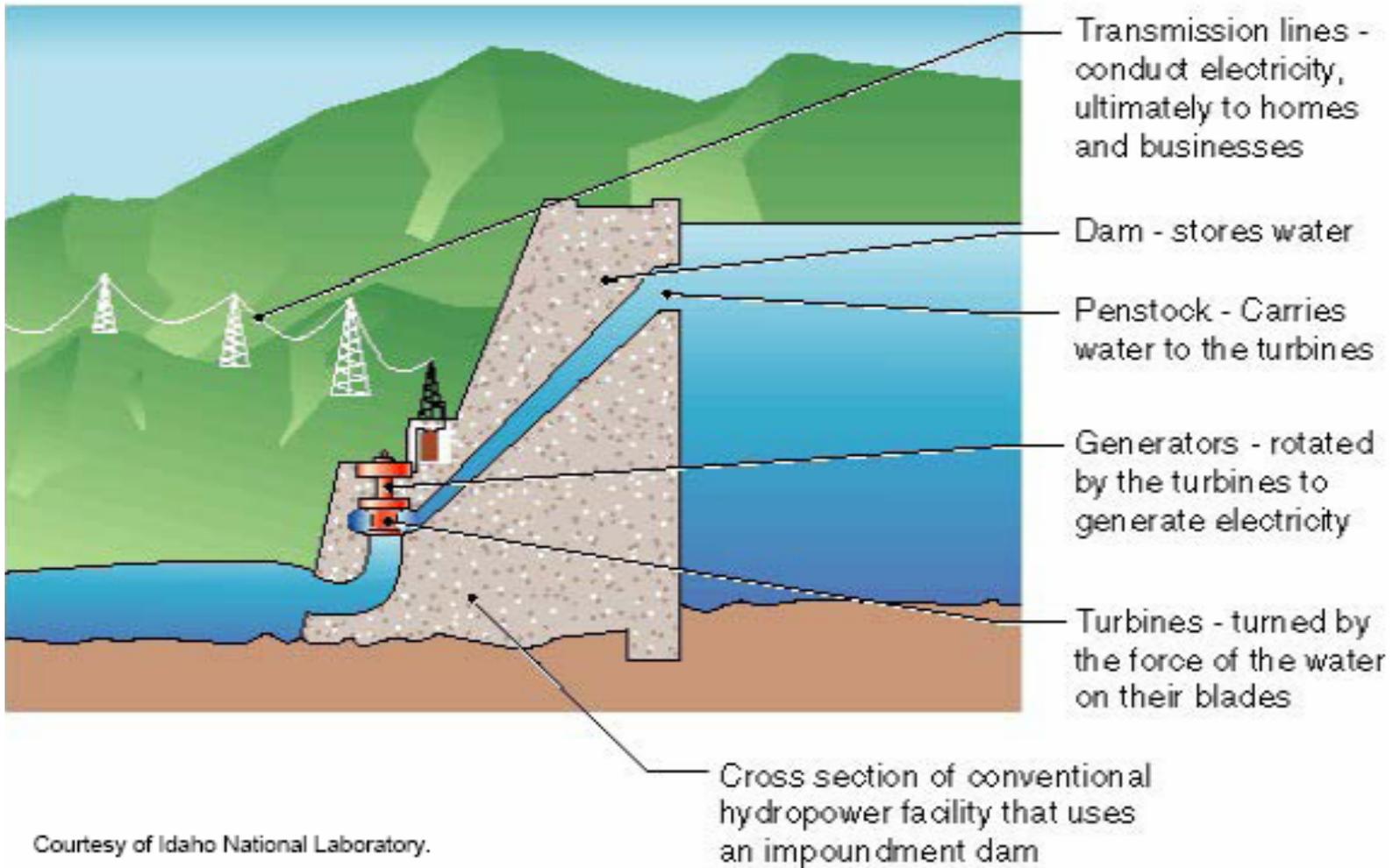
Nota de abertura:

“Convém precisar que não cabe aos projectistas de centrais hidroeléctricas ou de estações de bombagem projectar as máquinas a instalar, mas somente definir a sua disposição geral e especificar as características de funcionamento e de construção. Compete aos fabricantes das máquinas, por seu turno definir os condicionamentos de pormenor a ter em conta no projecto final da construção civil das centrais hidroeléctricas e, no caso de bombas não fabricadas em série, das estações de bombagem” ([QUINTELA, 2005: 393](#)).

Classificação de Turbomáquinas

Turbomáquinas	Classificação quanto ao escoamento na roda		Designação corrente
Turbinas	de acção (ou de impulsão)		Turbinas Pelton e Michell-Banki-Ossberger
	de reacção	Hélico-centrípetas (ou radiais-axiais)	Turbinas Francis Turbinas mistas (ou diagonais) e turbinas Dériaz
		Mistas (ou diagonais) Axiais	Turbinas de hélice (pás fixas), turbinas Kaplan, turbinas de grupos bolbo e Straflo
Bombas	Centrífugas (ou radiais) – grande H_t Mistas (ou diagonais) Axiais	Bombas centrífugas Bombas mistas (ou diagonais) Bombas axiais (hélice ou Kaplan)	

Características de uma Instalação Hidroelétrica



Courtesy of Idaho National Laboratory.

Número Específico de Rotações de Bombas

O número específico de rotação da bomba (n_s) é o produto da velocidade de rotação da bomba (n) e a razão entre o caudal e a altura total de elevação conforme se apresenta na equação seguinte:

$$n_s = n \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Para obter o n_s da bomba são considerados H (m) e Q (m³/s) correspondentes ao ponto de rendimento óptimo.

Há alguns fabricantes que definem o n^o específico de rotações da bomba como (n_{sp}):

$$n_{sp} = n \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

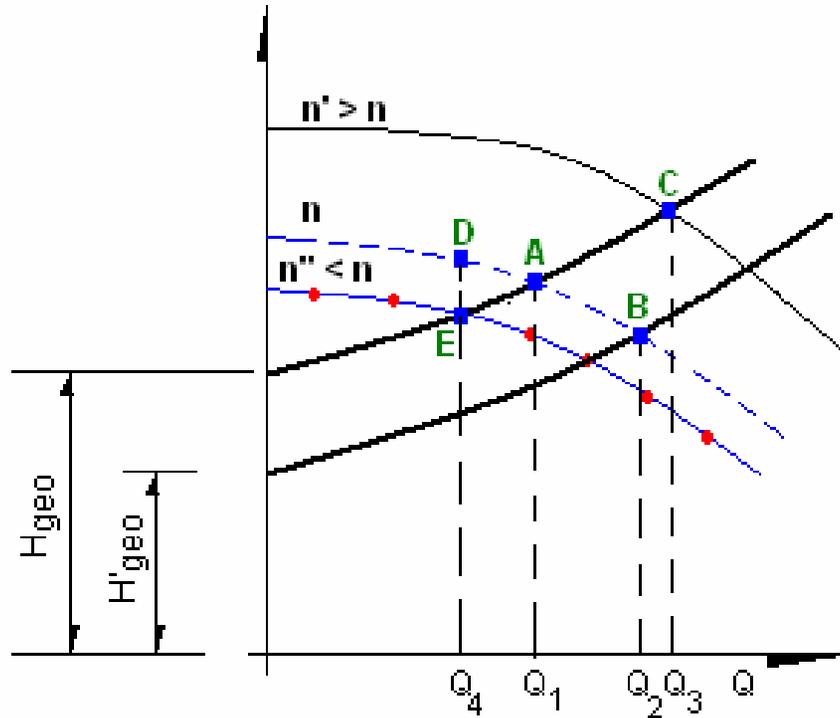
onde: P é a potência da bomba (cv).

O n_{sp} relaciona-se com o n_s através da seguinte expressão:

$$n_{sp} [m, cv] = 3,16 n_s [m, m^3 s^{-1}]$$

Nota: os alunos devem consultar (e.g. diagrama de colina, etc.) QUINTELA (2005: 454-484).

Condições de funcionamento, em regime permanente, de uma bomba de características conhecidas:



Nota Explicativa

O ponto de funcionamento **A** é à intersecção da curva característica da bomba $\{H = H(Q)\}$ para o n° de rotações (n) do motor da bomba com a curva que representa a altura total de elevação exigida pela instalação ($H_t = H_{geo} + \Delta H$).

Se H_{geo} diminui para H'_{geo} o ponto de funcionamento muda de **A** para **B** e o Q elevado pela bomba aumenta.

Aumentado o n° rotações da bomba (r.p.m.) e mantendo a H_{geo} é possível aumentar o caudal de Q_1 para Q_3 , conforme mostra o ponto **C**.

Fig.. Análise da influência do Q na variação de H_{geo} e do n .

Ponto **D** e **E** – ver [QUINTELA \(2005: 468\)](#)

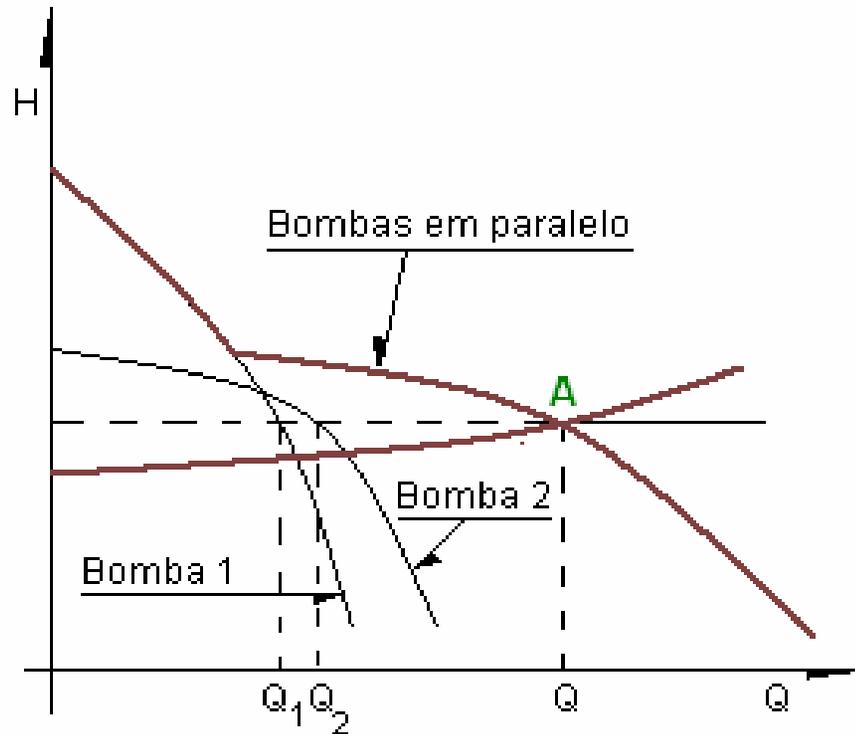
A curva característica de uma bomba é geralmente dada por uma equação do tipo:

$$H = b - aQ^n$$

onde a , b e n são constantes.

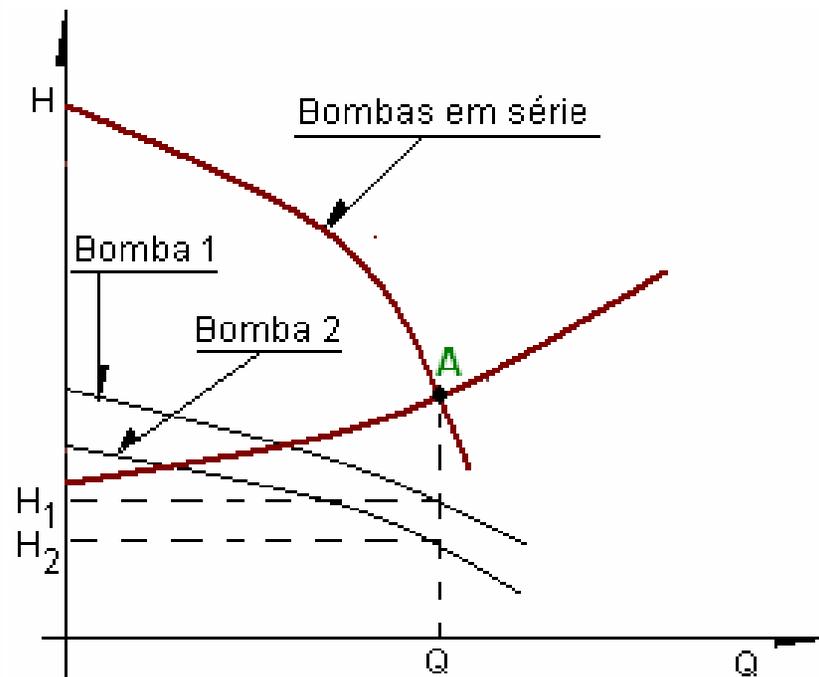
Bombas em Paralelo

Quando duas ou mais bombas funcionam em paralelo, a curva característica do conjunto corresponde à soma das abcissas das curvas características $H = H(Q)$ de cada bomba a uma mesma altura de elevação (H_t).



Bombas em Série

Quando duas ou mais bombas funcionam em série, a curva característica do conjunto corresponde à soma das ordenadas das curvas características $H = H(Q)$ de cada bomba a um mesmo caudal (Q).



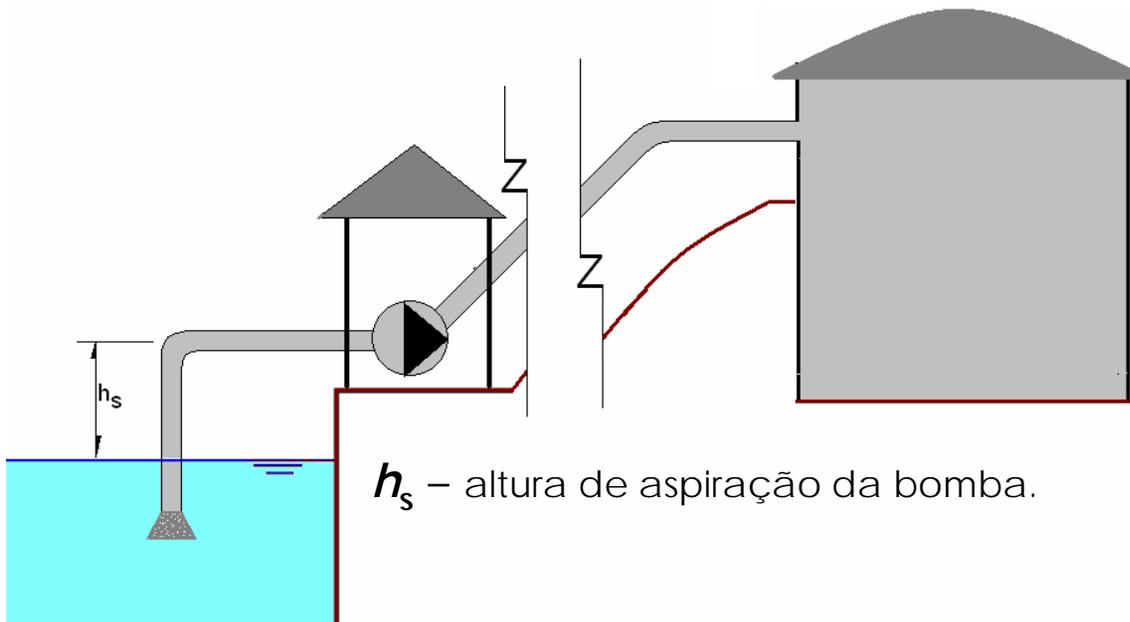
2007 **A** - Ponto de funcionamento

Copyright © by the H. Mata-Lima, PhD.
Univ. Madeira – <http://dme.uma.pt/hlima>

Escorvamento/Ferragem de Bombas

O **escorvamento** (ou **ferragem**) de bombagens corresponde à substituição do ar contido na bomba e no conduto de aspiração por líquido.

Uma bomba instalada acima de superfície livre do líquido no reservatório está escorvada/ferrada quando o seu interior está cheio de líquido susceptível de ser bombado.

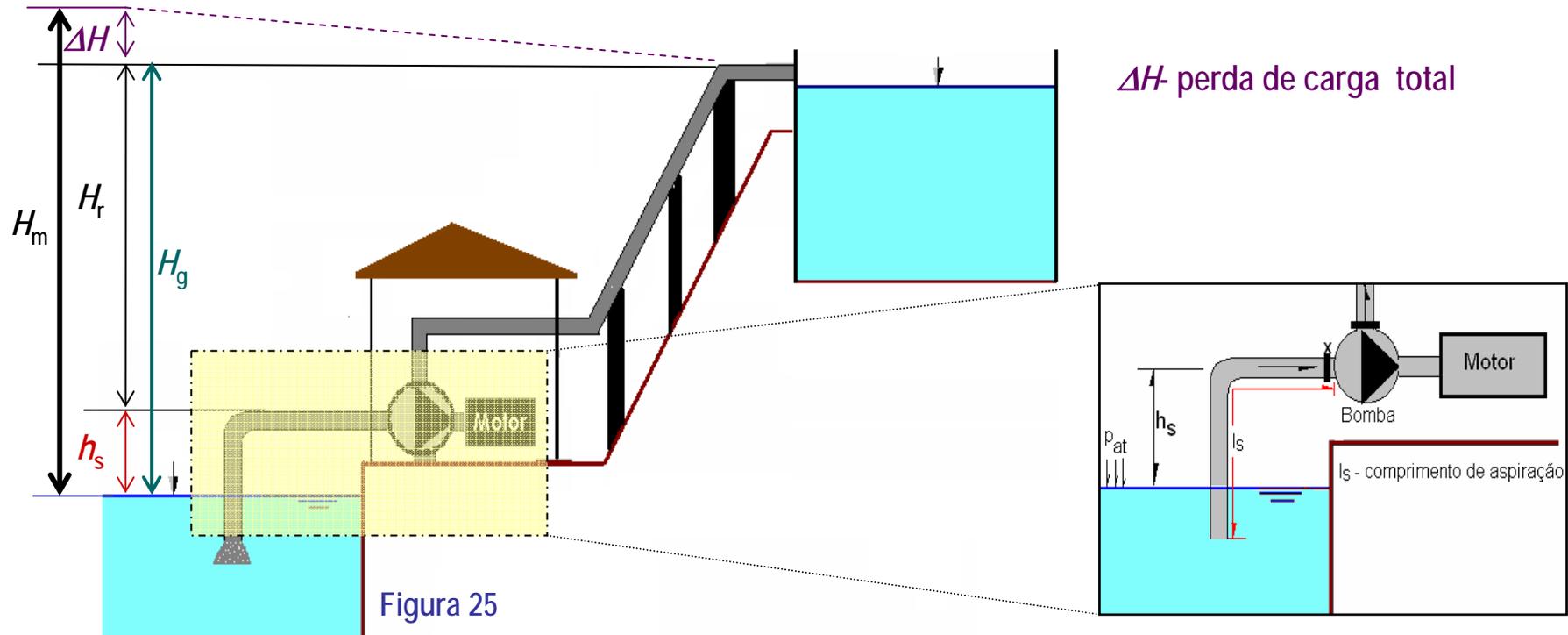


Nota:

Quando a bomba é instalada acima da superfície livre do líquido deve-se: **i)** colocar uma válvula de pé na extremidade do conduto de aspiração; **ii)** escorvar com bomba de vácuo ou um escorvador manual.

Definição de termos:

(Ver também Azevedo Netto et al. 1998: 271)



H_g – altura geométrica (diferença de nível)

H_r – altura de recalque (altura do nível superior em relação ao eixo da bomba)

H_m – altura manométrica (altura total de elevação)

$$H_m = H_g + \Delta H$$

h_s – altura de aspiração (altura do eixo da bomba sobre o nível inferior da água)

As bombas devem ser instaladas de acordo com critérios que evitem a cavitação e/ou os seus efeitos danosos.

O valor máximo da altura de aspiração que não dá azo a cavitação (h_{smax}) ocorre quando a pressão mínima iguala a tensão de saturação de vapor do líquido:

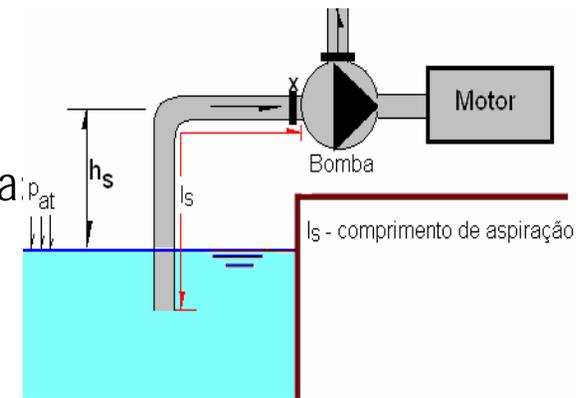
$$NPSH = \frac{p_a}{\gamma} - (h_{smax} + \Delta H_s) - \frac{e_v}{\gamma}$$

Portanto, a bomba deve ser instalada de modo a que $h_s < h_{smax}$, ou seja:

$$NPSH \leq \frac{p_a}{\gamma} - (h_s + \Delta H_s) - \frac{e_v}{\gamma}$$

$$\frac{p_a}{\gamma} = 10,33 - 0,00108 Z$$

Z - altitude (m)



NPSH – carga absoluta útil na aspiração (Net Positive Suction Head, NPSH) $\frac{p_x}{\gamma} = \frac{p_a}{\gamma} - \frac{U_x^2}{2g} - h_s - \Delta H$

p_a – pressão absoluta na superfície do líquido do reservatório de alimentação (e.g. no caso de reservatório aberto é a pressão atmosférica local) (p_a ou N/m^2)

e_v – tensão de saturação de vapor do líquido (p_a). Nota: $e_v = 2330 N/m^2$.

ΔH_s – perda de carga desde o reservatório até a secção de entrada da bomba (m).

$$NPSH \text{ exigido pela bomba} \leq NPSH \text{ disponível na instalação}$$

A pressão atmosférica (p_a), ao nível do mar, é de 100 kPa (i.e. 10,33 mc.a.). Portanto, quando se pretende bombear a água de um reservatório cuja superfície livre se encontra ao nível do mar assume-se que $p_a = 100$ kPa.

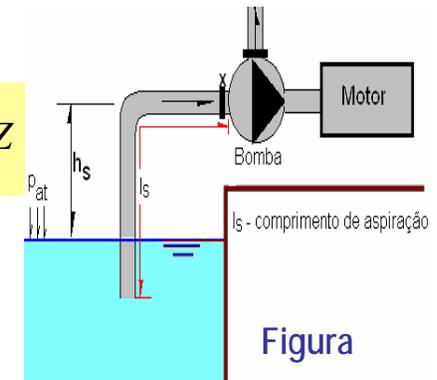
Visto que a pressão atmosférica decresce com a altitude, a água ascende menos de 10,33 m em altitudes elevadas (ver [Quadro](#)).

Altitude (m)	P_a/γ (mc.a.)	Limite prático de aspiração (m)
0*	10,33	7,60
300	10,00	7,40
600	9,64	7,10
900	9,30	6,80
1200	8,96	6,50
1500	8,62	6,25
1800	8,27	6,0

* Nível médio do mar (referência)

$$\frac{p_a}{\gamma} = 10,33 - 0,00108 Z$$

Z - altitude (m)



$$NPSH_d = \frac{p_a}{\gamma} - (h_{s_{max}} + \Delta H_s) - \frac{e_v}{\gamma}$$

$$NPSH_E \leq NPSH_D$$

Quando esta condição não se verifica deve-se baixar o nível da bomba (h_s) ou aumentar o diâmetro do tubo de aspiração.

Unidades de Bombas a Serem Instaladas

- Na instalação “não se pode” considerar menos de duas bombas (uma é de reserva) funcionando alternadamente;
- Pode-se, em alternativa, optar por três bombas iguais desde que cada uma tenha a capacidade para bombear $\frac{1}{2}$ do caudal nominal do sistema;
- Se optar por instalar a bomba num nível superior ao da *cota da superfície livre da água (CSLA)* no reservatório, deverá considerar válvula de pé ou dispositivo de escorva (automático ou manual) – **Figura a**;
- Se optar por instalar a bomba num nível inferior a **CSLA**, a bomba fica afogada e nesse caso deverá colocar válvula de seccionamento na canalização de admissão - **Figura b**.

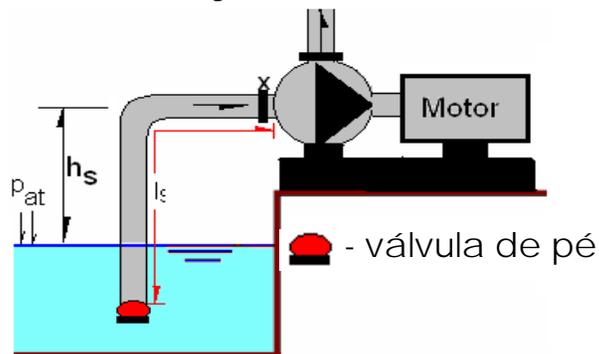


Figura a

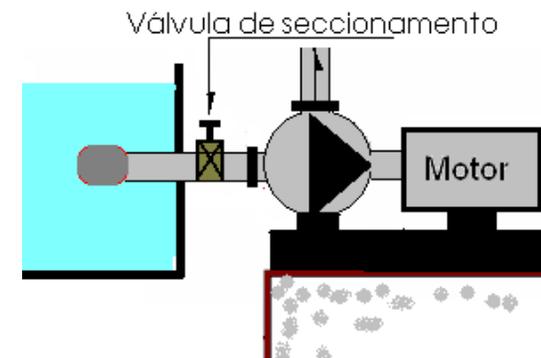


Figura b

A selecção de bomba adequada para uma dada instalação deve considerar os seguintes aspectos:

- Os domínios de aplicação de bombas **centrífugas, mistas e axiais** (ver [QUINTELA, 2005: 459](#))
- Número específico de rotações de bombas (ver [QUINTELA, 2005: 460-462](#))
- Diagrama de funcionamento de bombas – diagrama de colina (ver [QUINTELA, 2005: 463](#))
- Mosaicos de utilização de bombas (ver [QUINTELA, 2005: 478](#)). Após a definição do caudal, altura total de elevação e velocidade de rotação pode-se recorrer ao mosaico de utilização para fazer a pré-selecção de bombas.
- Refira-se que a decisão final referente à selecção da bomba e a determinação do diâmetro da roda fazem-se com base no **diagrama em colina** da bomba pré-seleccionada.

Os aspectos supracitados são, actualmente, fornecidos através dos catálogos das bombas. Em caso de dúvidas, deverá contactar o fabricante da bomba para obter mais informações.

Exercícios sobre Instalação e Seleção de Bombas

Exercício 1 (modificado de QUINTELA, 2005: 480)

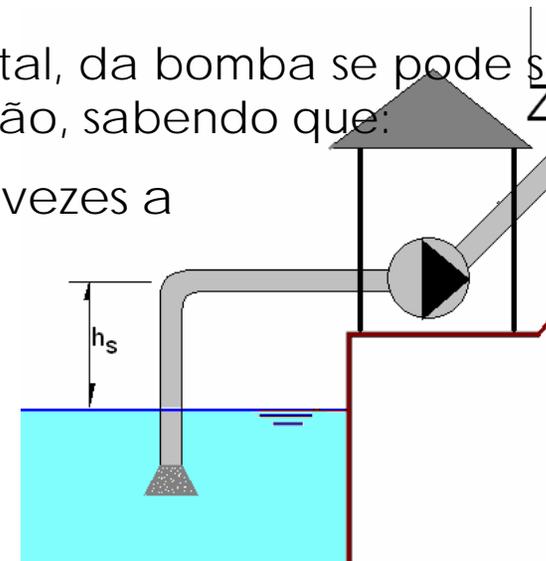
Ao funcionamento de uma bomba com caudal máximo de 100 l/s para $n = 1450$ r.p.m corresponde (NPSH) de 3.0 m.

O conduto de aspiração, de ferro fundido, de 38 m de comprimento, tem diâmetro de 200 mm, apresenta uma curva a 90° com a relação $r/D = 2$ e é munida de ralo e válvula de pé.

Os coeficientes de perda de carga para o conjunto ralo-válvula de pé e para a curva são cerca de 2.8 e 0.26.

Determinar a altura máxima a que o eixo, horizontal, da bomba se pode situar sobre o nível mínimo no reservatório de alimentação, sabendo que:

- A pressão local mínima a considerar é de 0,90 vezes a pressão atmosférica normal;
- A temperatura máxima da água é de 30° C.



Exercícios sobre Instalação e Seleção de Bombas

Exercício 2 (adaptado de [QUINTELA, 2005: 481](#))

Pretende-se elevar diariamente ao longo do ano um volume de 550 m³ de água de um reservatório com a superfície livre à cota 10,0 m para um outro com a superfície livre à cota 16,0 m bombando durante cerca de 10 h por dia. A perda de carga total no conduto de aspiração e no conduto elevatório é:

$$\Delta H = 8000 Q^2 \quad (\Delta H \text{ m}; Q \text{ m}^3 \text{ s}^{-1})$$

Escolha a bomba ($n = 1450$ r.p.m), através do mosaico de bombas centrífugas, e determine o caudal elevado e o número de horas de bombagem.

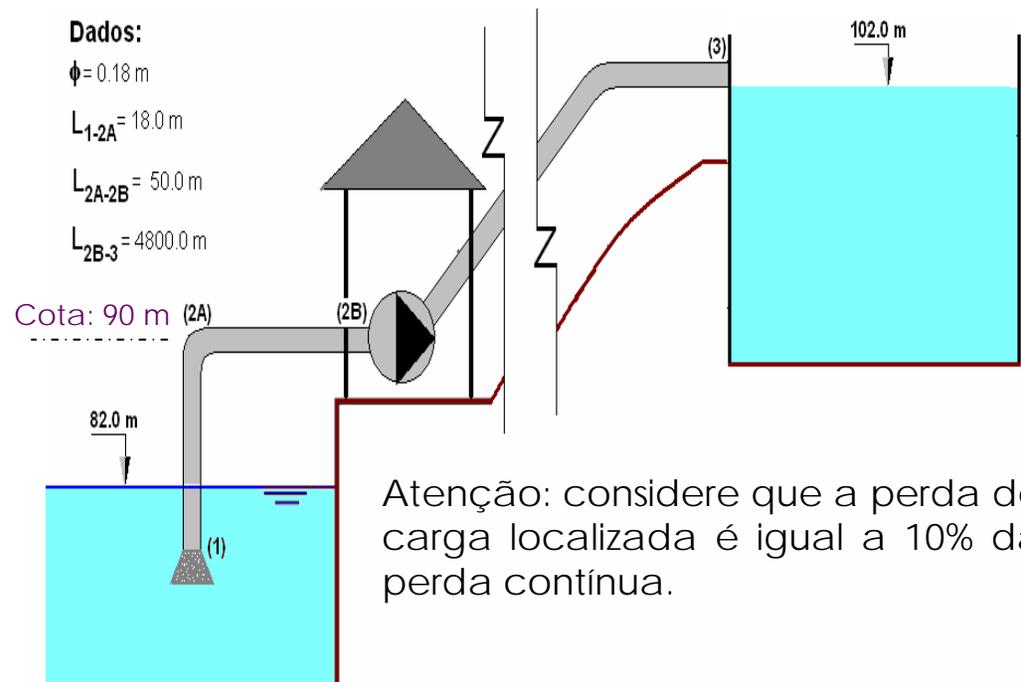
Exercícios sobre Instalação e Selecção de Bombas

Exercício 3

Considere uma bomba **LP 100 – 200** com uma roda de **220 mm**. A bomba eleva a água de um reservatório de alimentação para outro (ambos reservatórios são de grandes dimensões) cujas cotas de superfície livre e outros dados relevantes estão indicados na **Figura**. O conduto é em ferro fundido ($K = 80 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$). O diâmetro do conduto é constante e igual a **180 mm**.

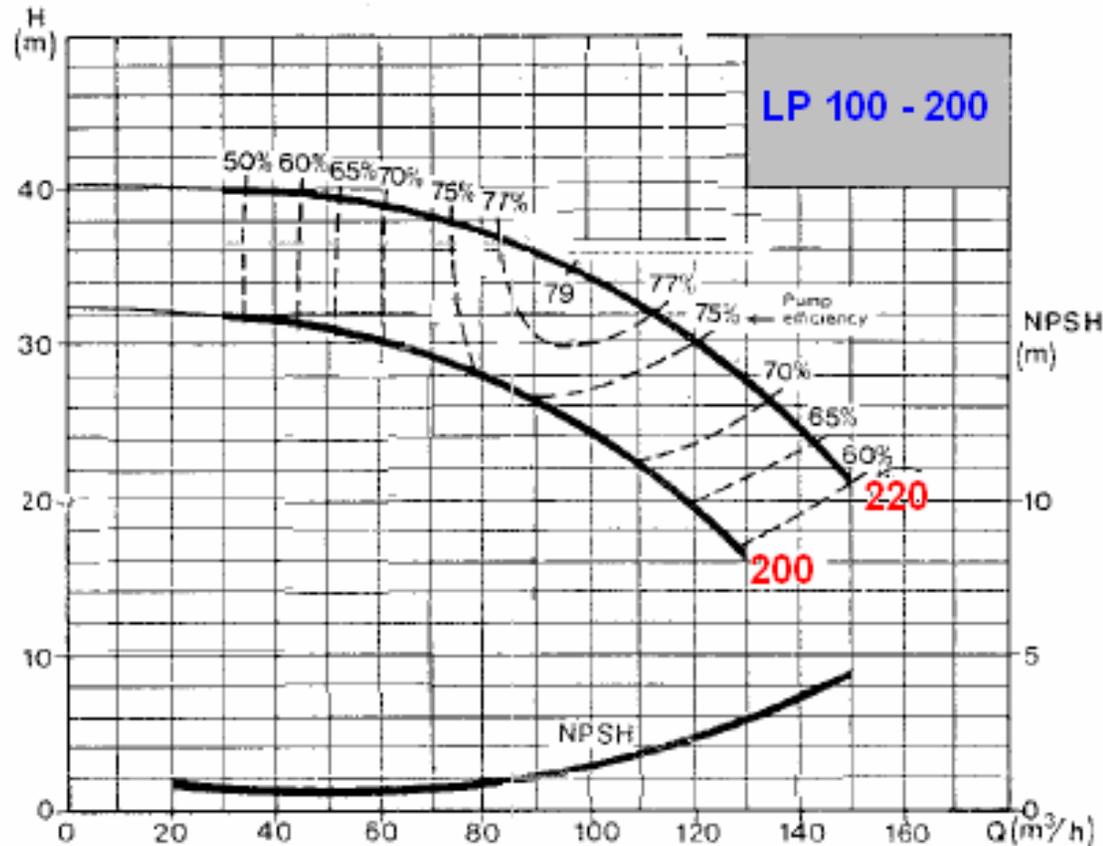
Pretende-se determinar o seguinte:

- O caudal elevado (ou bombado) pela bomba e a respectiva potência. Na resolução verifique também as condições de funcionamento da bomba)
- O consumo semestral de energia para um volume de elevação diária de **800 m³**. Admita que o rendimento do motor da bomba é de **85%**
- A condição da não cavitação dada pelo comprimento máximo do tubo de aspiração.



Exercícios sobre Instalação e Seleção de Bombas

Exercício 3 (continuação)



Colina de rendimentos, curvas características para dois diâmetros da roda e NPSH de uma bomba LP 100-200 para $n = 1450$ r.p.m.

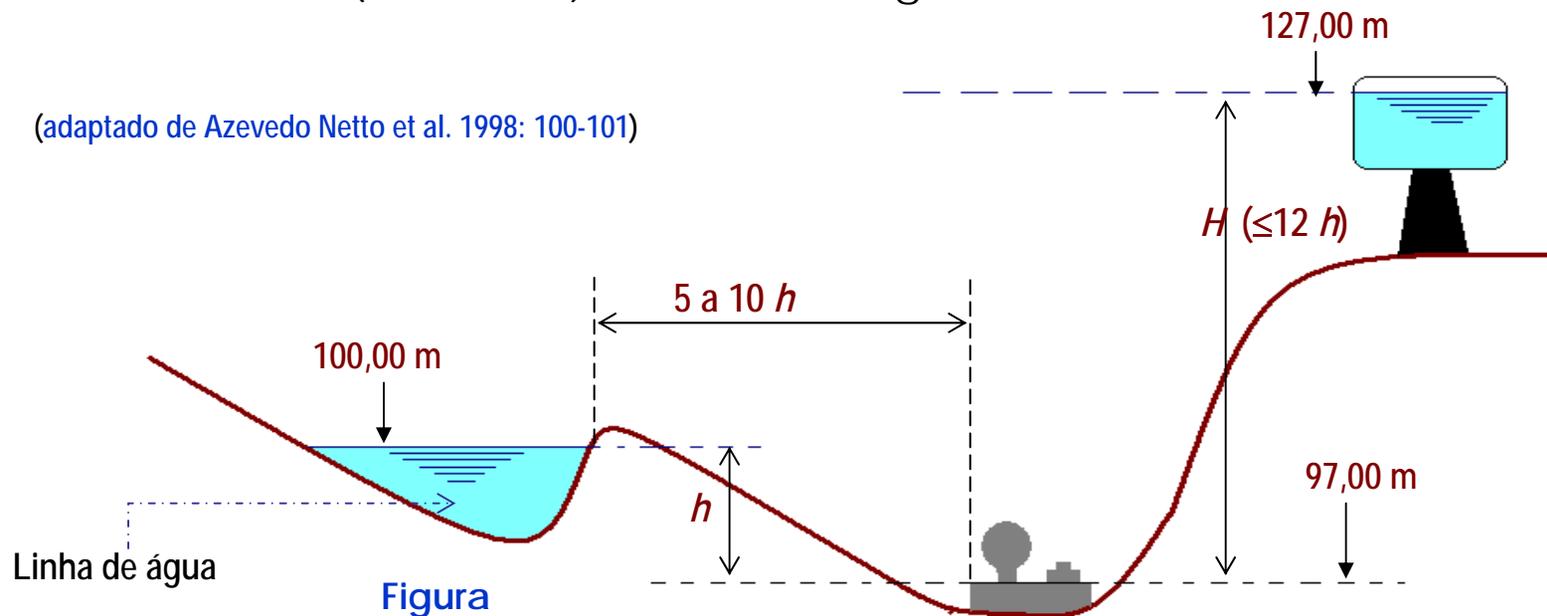
Elevação de água em pequenos desníveis.

Exercício 4

o caso do **Carneiro Hidráulico**

Considere uma situação de abastecimento de água para uma pequena unidade agropecuária que conta com 10 pessoas, 5 cavalos, 15 vacas e 200 galinhas.

Nas imediações existe uma linha de água de qualidade adequada ao uso. Pelo facto da linha de água se encontrar a um nível inferior (ver **Figura**), pretende-se instalar um carneiro hidráulico (também conhecido como ariete hidráulico) para elevar a água. A eficiência admitida para o aparelho é de **60%**. O caudal (ou vazão) da linha de água é de $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.



Elevação de água em pequenos desníveis: o caso do Carneiro Hidráulico

Exercício 4 (continuação)

a) Necessidades de consumo (N_c)

Unidade	Capitação (ℓ/dia)	Consumo diário (ℓ)
10 pessoas	100	1000
5 cavalos	40	200
15 vacas	40	600
200 galinhas	10/100*	20
		1820 ℓ/dia

* 1/10 da capitação das pessoas. $N_c = 1820 \text{ ℓ/dia} = 75,9 \text{ ℓ/h}$.

b) Caudal necessário para funcionamento do aparelho

$$Q = N_c \frac{H}{h} \frac{1}{\eta}$$

$$Q = 75,9 \text{ (ℓ/h)} \frac{127(m) - 97(m)}{100(m) - 97(m)} \frac{1}{0,60} = 1265 \text{ ℓ/h}$$

O caso do Carneiro Hidráulico

Exercício 4 (continuação)

c) Seleção do carneiro hidráulico

Consultar de catálogo de aparelhos. Por exemplo, através de um catálogo de aparelhos brasileiros da Cia. Lidgerwood (Tab. 11.2) obtém-se para

$$\frac{H}{h} = \frac{127 - 97}{100 - 97} = \frac{30}{3}, \text{ a proporção de } 10 : 1$$

Recomenda-se: aparelho nº 5, canos de carga – 50 mm, canos de descarga – 25 mm, água necessária por minuto – 35 litros, água elevada por hora – 88 litros. O rendimento será expresso por:

$$\eta = \frac{qH}{Qh} = \frac{88(l/h)30(m)}{35 \times 60(l/h)3(m)} = 42\%$$

d) Verificação da quantidade disponível de água

Como a linha de água tem um caudal de $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ($1 \text{ l/s} = 60 \text{ l/min}$), conclui-se que existe água mais do que suficiente para satisfazer as necessidades.