

Bombas & Instalações de Bombeamento

1. Definições
2. Grandezas envolvidas no cálculo das bombas
3. Cálculos da altura manométrica e potência de acionamento das bombas
4. Curvas
5. Cavitação
6. Arranjo de bombas

Bombas & Instalações de Bombeamento

Definições : as máquinas hidráulicas são divididas em dois grupos :

1. Máquinas geratrizes : transformam a energia hidráulica em energia mecânica, quando o fluído é impelido contra as suas pás e produz um conjugado no eixo :

A. Turbinas Hidráulicas :

- a. Francis : de reação, radiais e de pás fixas
- b. Propeller : de reação, axiais e de pás fixas
- c. Kaplan : de reação, axiais, de pás orientáveis
- d. Pelton : de impulsão, jato tangenciais

B. Rodas d'água : o fluído vem por um canal, sendo impelido contra as pás, provocando um conjugado no motor, a água atua por peso ou por velocidade, em geral prevalecendo uma delas

Bombas & Instalações de Bombeamento



Turbina Francis



Turbina Kaplan



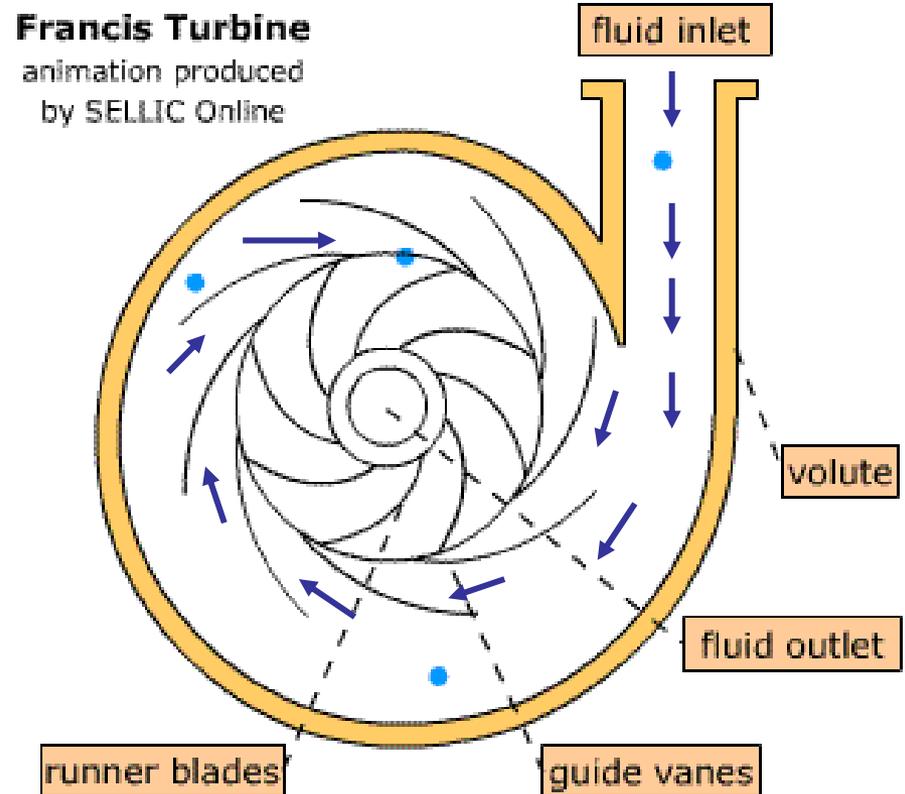
Turbina Pelton



Turbina Propeler

Bombas & Instalações de Bombeamento

Esquema de funcionamento de uma turbina hidráulica



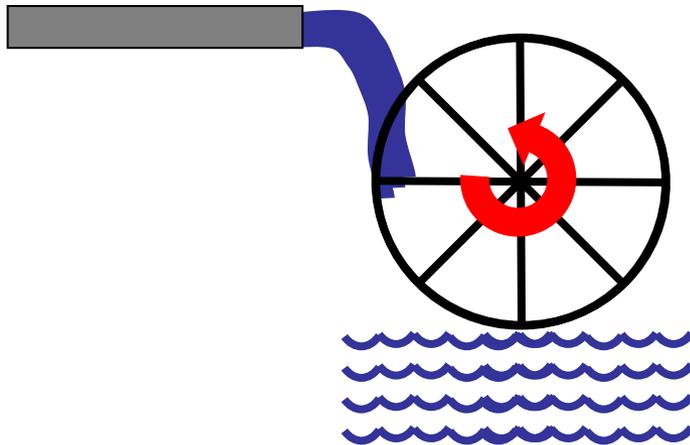
Bombas & Instalações de Bombeamento

Usina	Tipo	H (m)	Q (m ³ .s ⁻¹)	N (rpm)	N (CV)
Itaipú - Rio Paraná	Francis	120	660	94,2	971.500
Paulo Afonso IV - Rio São Francisco	Francis	135	385	120	577.600
Itumbiara - Rio Paranaíba	Francis	80	522	94,7	481.000
Água Vermelha - Rio Grande	Francis	139,9	500	95	312.712
São Simão - Rio Paranaíba	Francis	71,3	420	94,7	370.000
Foz de Areia - Rio Iguaçu	Francis	29,8	302	128,6	457.000
Tucuruí - Rio Tocantins	Francis	60,8	576	85	429.880
Estreito - Rio Grande	Francis	60,8	306,5	113,5	231.000
Furnas (Alpinópolis) - Rio Grande	Francis	88,9	190	150	210.000
Ilha Solteira - Rio Paraná	Francis	46	389	86	225.000
Marinbondo - Rio Grande	Francis	60,3	319	100	242.000
Salto Osório - Quedas Iguaçu	Francis	72	240	120	214.500
Passo Fundo - Rio Passo Fundo	Francis	253	48	300	150.000
Porto Colômbia - Rio Grande	Francis	19,3	464	86	111.000
Xavantes - Rio Paranapanema	Francis	73,7	141,5	129	144.000
Capivara - Rio Paranapanema	Francis	48,4	375	100	225.000
Promissão - Rio Tiête	Kaplan	25,0	380	90	120.000
Jupiaá - Rio Paraná	Kaplan	25,4	400	98	140.000
Porto Primavera - Rio Paraná	Kaplan	19,2	751	67	177.000
Sobradinho - Rio São Francisco	Kaplan	27,2	715	75	242.000
Moxotó - Rio São Francisco	Kaplan	21,0	550	80	150.057
Bernardo Mascarenhas (Três Marias) -	Kaplan	57,2	150	164	90.000
Volta Grande - Rio Grande	Kaplan(5pás)	26,2	430	85,7	140.038
Jupiaá - rio Paraná	Kaplan	23	462	78,4	107.060
Barra Bonita - Rio Tiête	Kaplan	24	148	129	47.400
Parigot de Souza - Rio Capivari	Pelton	714,3	10	514	87.200
Cubatão 1- Henry Borden	Pelton	719,5	12	360	92.274
Cubatão 2 - Fonte, (primitiva)	Pelton	684	12,7	150	89.232
Fontes antigas - Rio Pirai	Pelton	310	1,53	1094	19.264

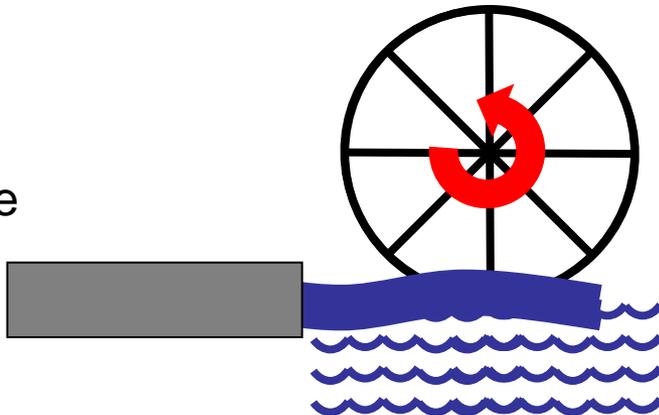
Bombas & Instalações de Bombeamento

Rodas d'água

Força



Velocidade

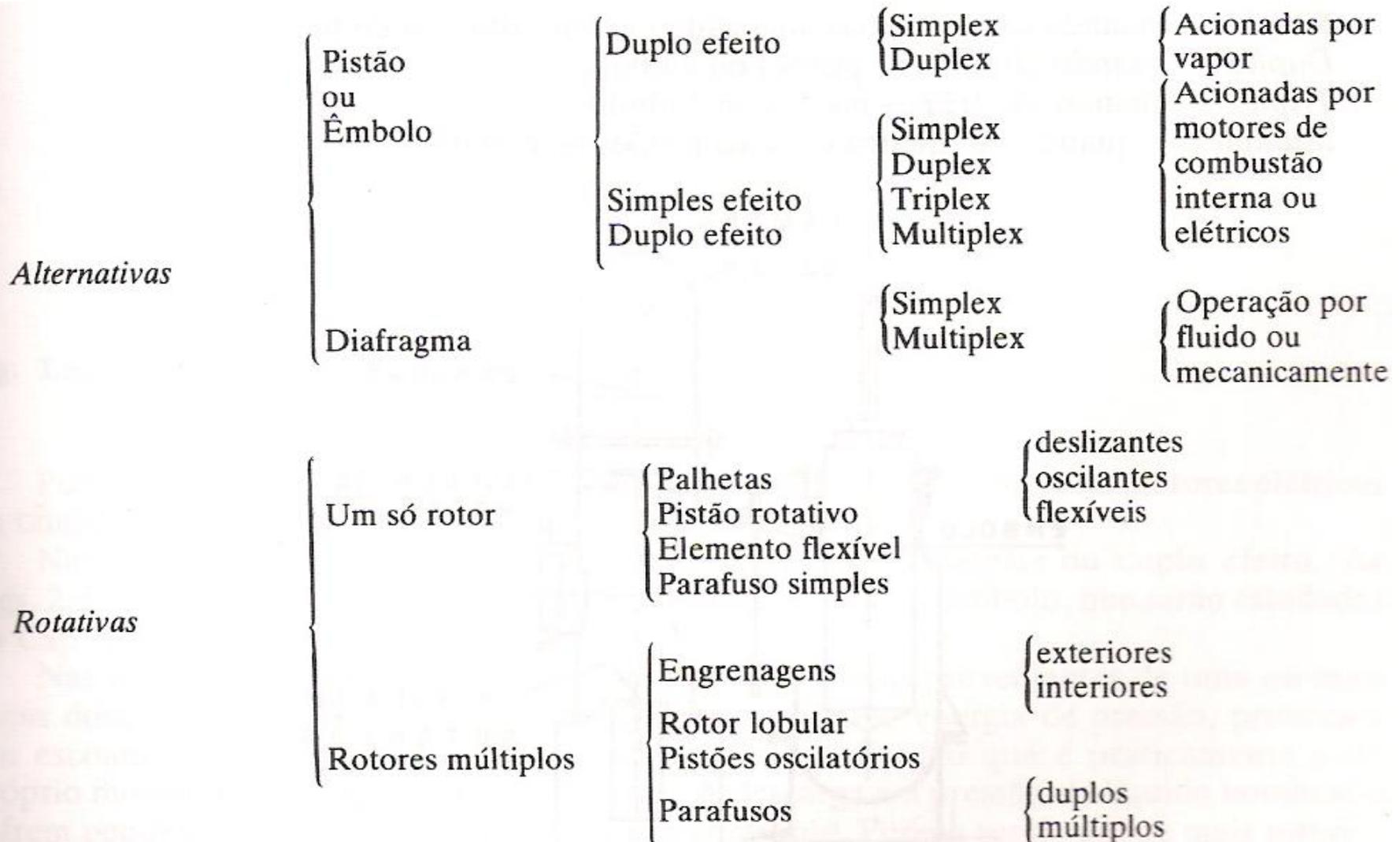


Bombas & Instalações de Bombeamento

2. **Máquinas Motrizes** : transformam o trabalho mecânico em energia hidráulica, comunicando ao líquido um acréscimo de energia na forma de energia potencial de pressão e cinética:

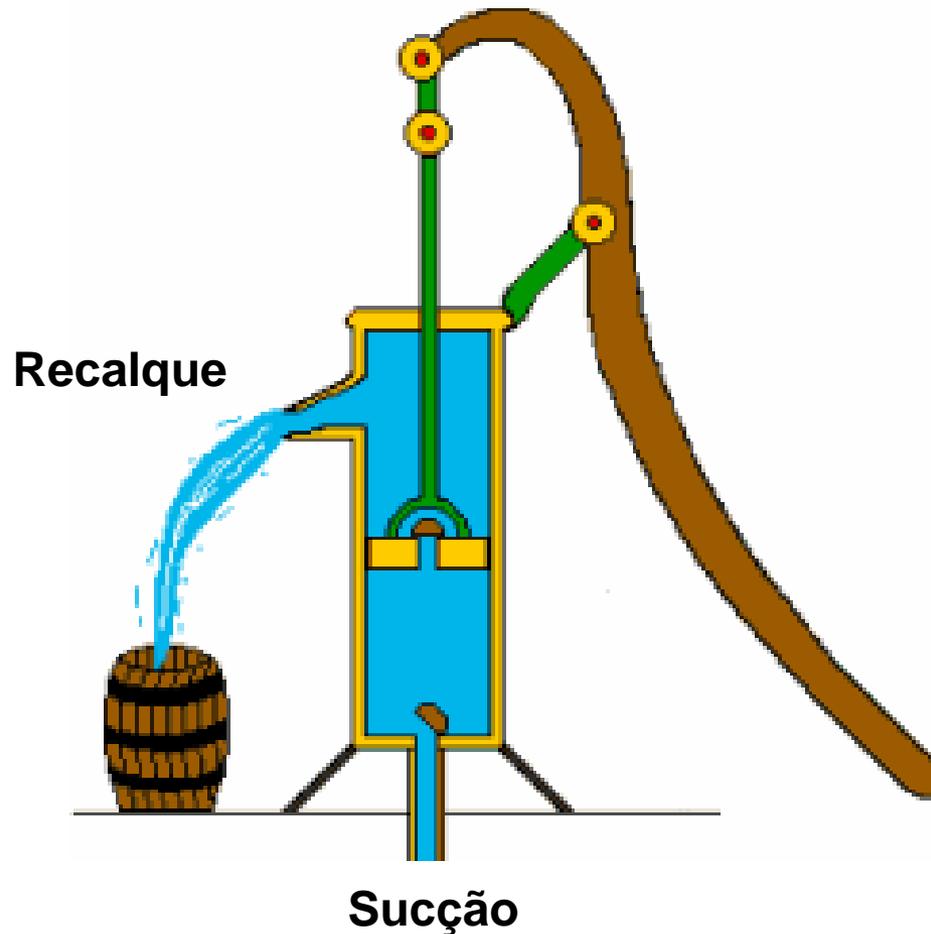
- Bombas :
 - a) Deslocamento positivo
 - b) Bombas centrífugas
 - c) Bombas especiais

Bombas & Instalações de Bombeamento



Bombas & Instalações de Bombeamento

Esquema básico de uma bomba de deslocamento positivo

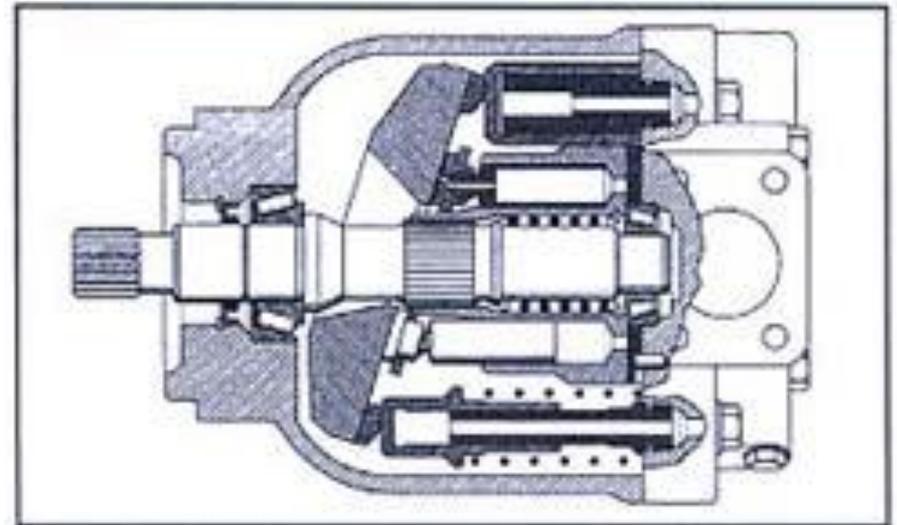


Bombas & Instalações de Bombeamento

Algumas bombas de deslocamento positivo



Bomba de pistões



Bombas & Instalações de Bombeamento

Bomba de palhetas

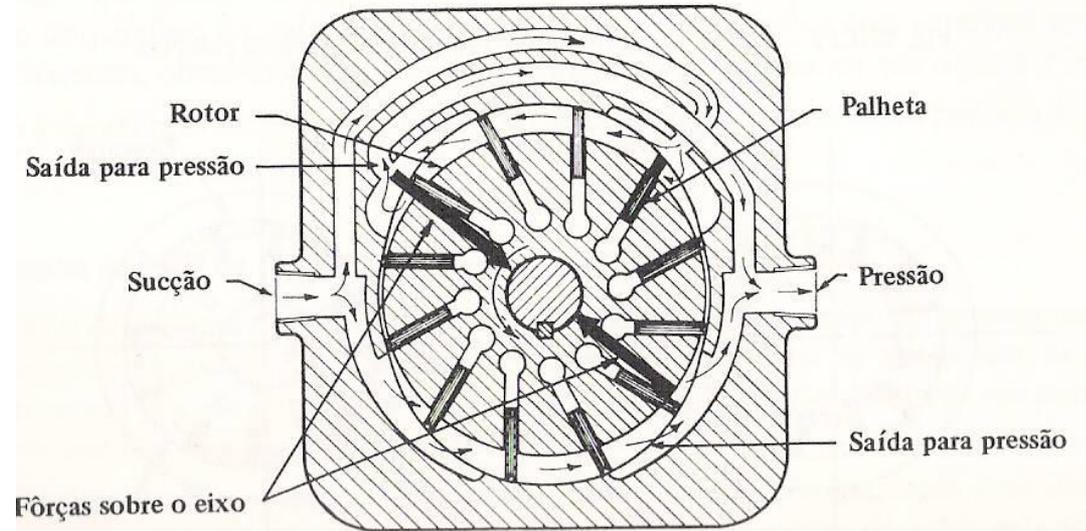
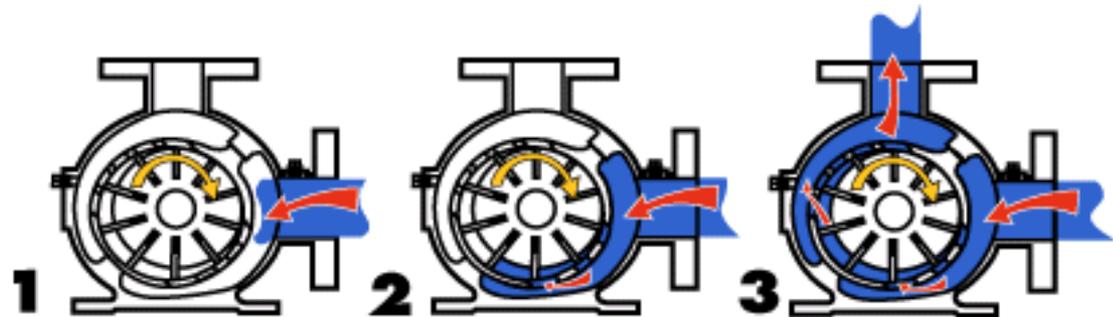
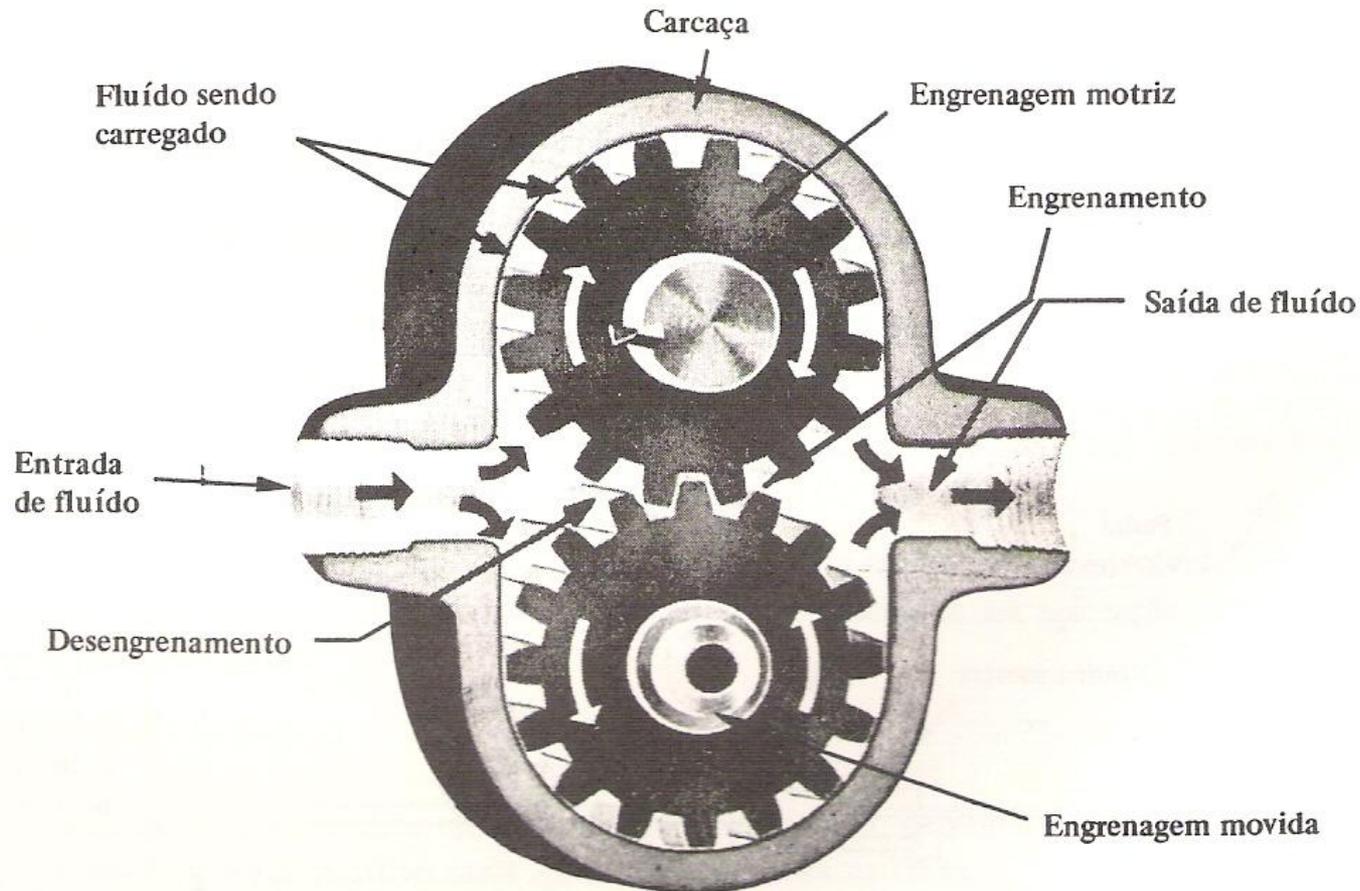


Fig. VIII.15 – Bomba de palhetas balanceada.



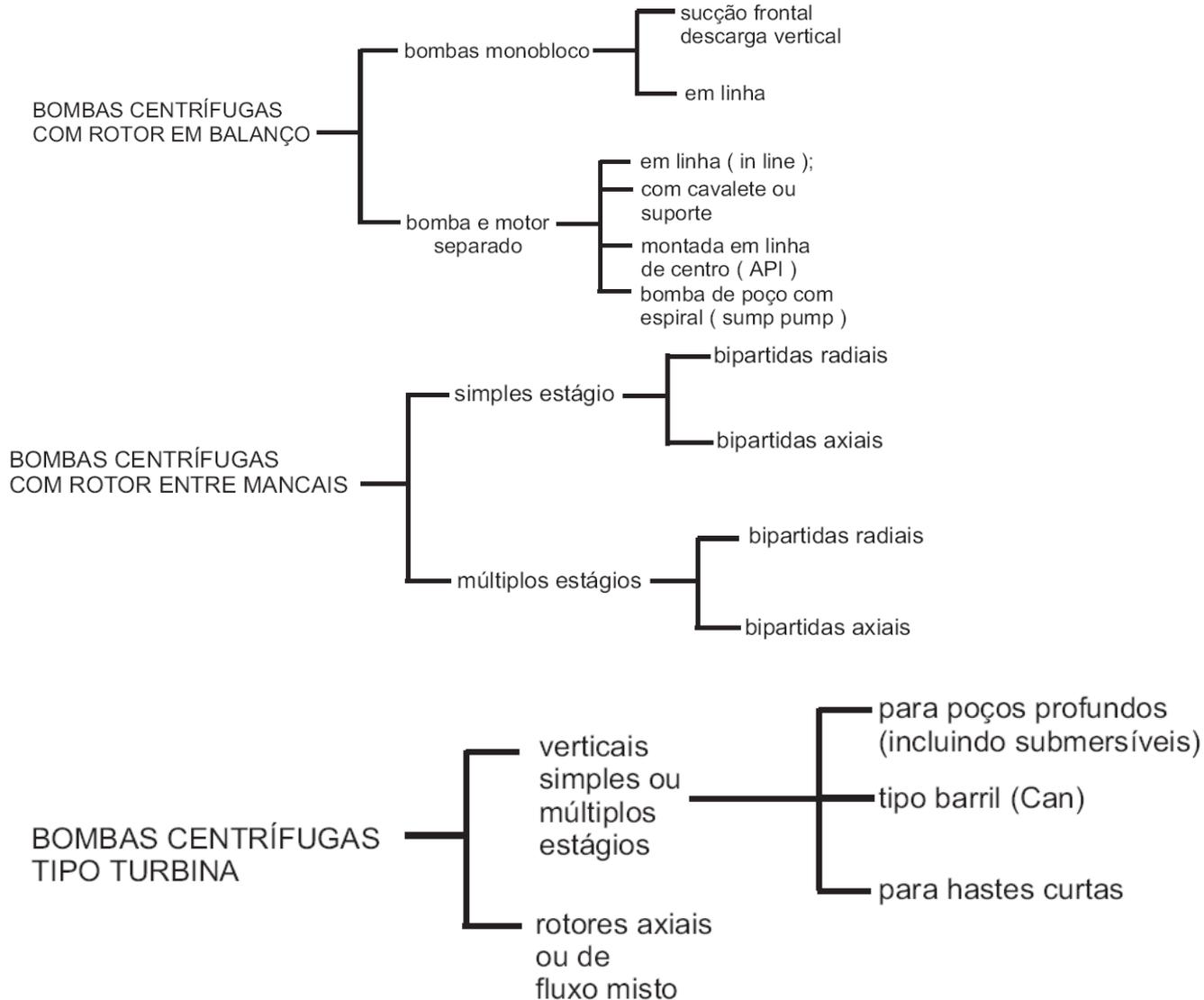
Bombas & Instalações de Bombeamento

A bomba de engrenagens é uma bomba que cria uma determinada vazão devido ao constante engrenamento e desengrenamento de duas ou mais rodas dentadas.

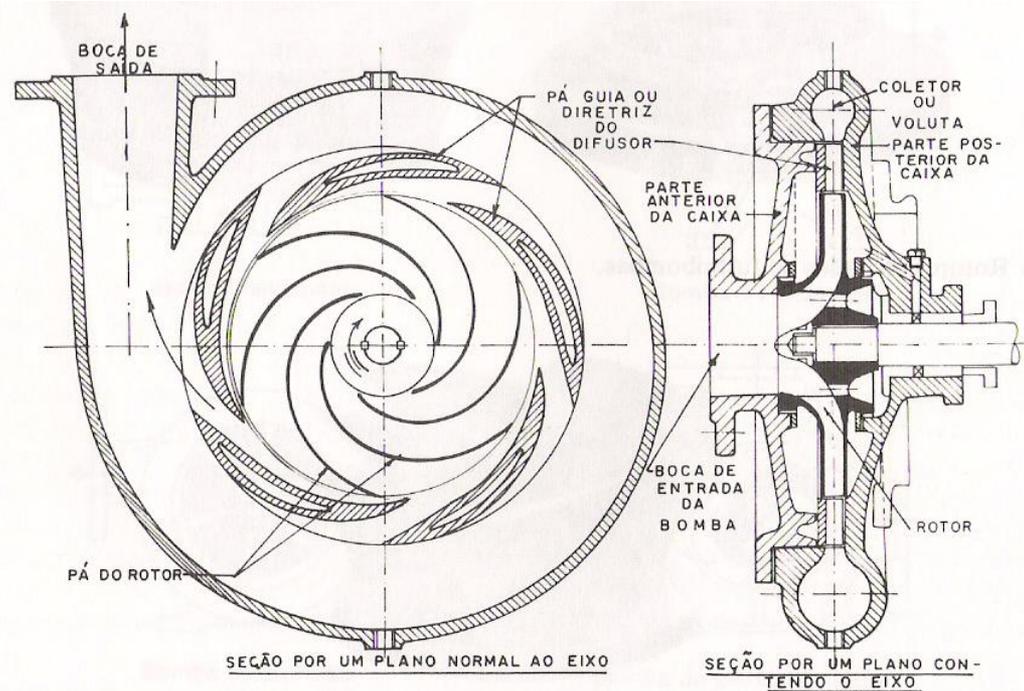


Bombas & Instalações de Bombeamento

B- Bombas Centrífugas : também conhecidas como bombas rotodinâmicas possuem um rotor com pás que imprimem uma aceleração ao líquido

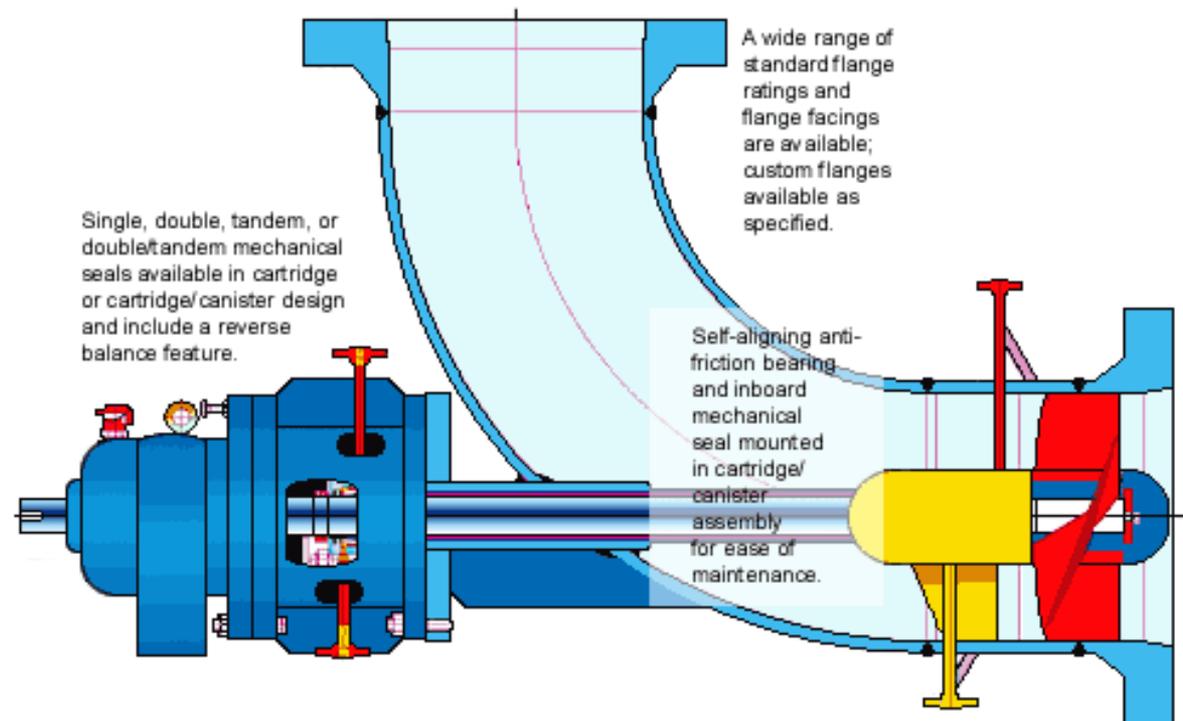


Bombas & Instalações de Bombeamento



Bombas & Instalações de Bombeamento

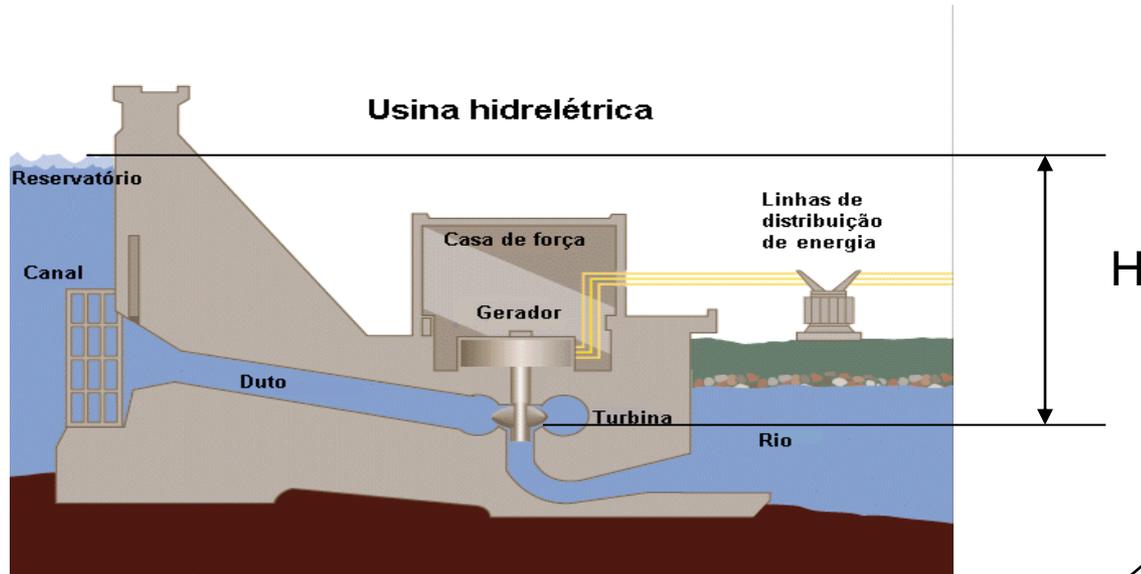
Bomba centrífuga axial



Bombas & Instalações de Bombeamento

Grandezas envolvidas no funcionamento das turbobombas

1. Trabalho exercido sobre ou pelo fluxo do líquido



W = F.d

$$W = \gamma \cdot Q \cdot t \left[\left(h_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} \right) - \left(h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) \right] = P' \cdot H$$

Peso da coluna líquida escoando por H

Onde : $H = \left(h_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} \right) - \left(h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right)$

Bombas & Instalações de Bombeamento

Teorema de Bernoulli :

Se o líquido, ao escoar, não sofrer trocas de energia com o exterior, o trabalho T será nulo e, portanto, $H = 0$, ou seja,

$$\left(h_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} \right) - \left(h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) = 0$$

Em vista de não havermos feito qualquer exigência quanto aos índices ao deduzirmos a equação, podemos escrever

$$h + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = E = \text{constante}$$

Bombas & Instalações de Bombeamento

Alturas : as energias envolvidas na operação das turbobombas são expressas em alturas

1. Alturas estáticas ou desníveis

- a) Altura estática de aspiração h_a : é a diferença de cota entre o centro da bomba e a altura de aspiração
- b) Altura estática de recalque h_r : é a diferença de cota entre o centro da bomba e o nível onde o líquido é abandonado pela tubulação
- c) Altura total de elevação : $h_e = h_a + h_r$

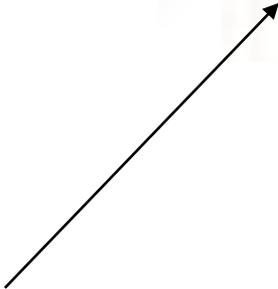
Bombas & Instalações de Bombeamento

2. Alturas totais ou dinâmicas :

a)-Altura total de aspiração (H_a) : é a diferença entre as alturas representativas da pressão atmosférica local mais a perda de carga na aspiração (J_a).

$$H_a = h_a + \frac{V_0^2}{2g} + J_a$$

Perda de carga
na aspiração



Bombas & Instalações de Bombeamento

b)-Altura total de recalque (H_r) : é a diferença entre as alturas representativas da pressão atmosférica local mais a perda de carga na aspiração (J_r).

$$J'_r = \left(\frac{p_3}{\gamma} + i + \frac{V_3^2}{2g} \right) - \left(h_r + H_b \right)$$

$$H_r = h_r + J'_r - \frac{V_3^2}{2g}$$

Bombas & Instalações de Bombeamento

3. Alturas manométrica total :

É a soma das alturas totais de aspiração e recalque :

$$H = H_a + H_r$$

ou ainda

$$H = h_a + h_r + J_a + J_r + \frac{V_0^2}{2g}$$

Bombas & Instalações de Bombeamento

Cálculo da Potência Motriz :

$$N_{(c.v.)} = \frac{1.000 \cdot Q \cdot H}{75 \cdot \eta}$$

Onde :

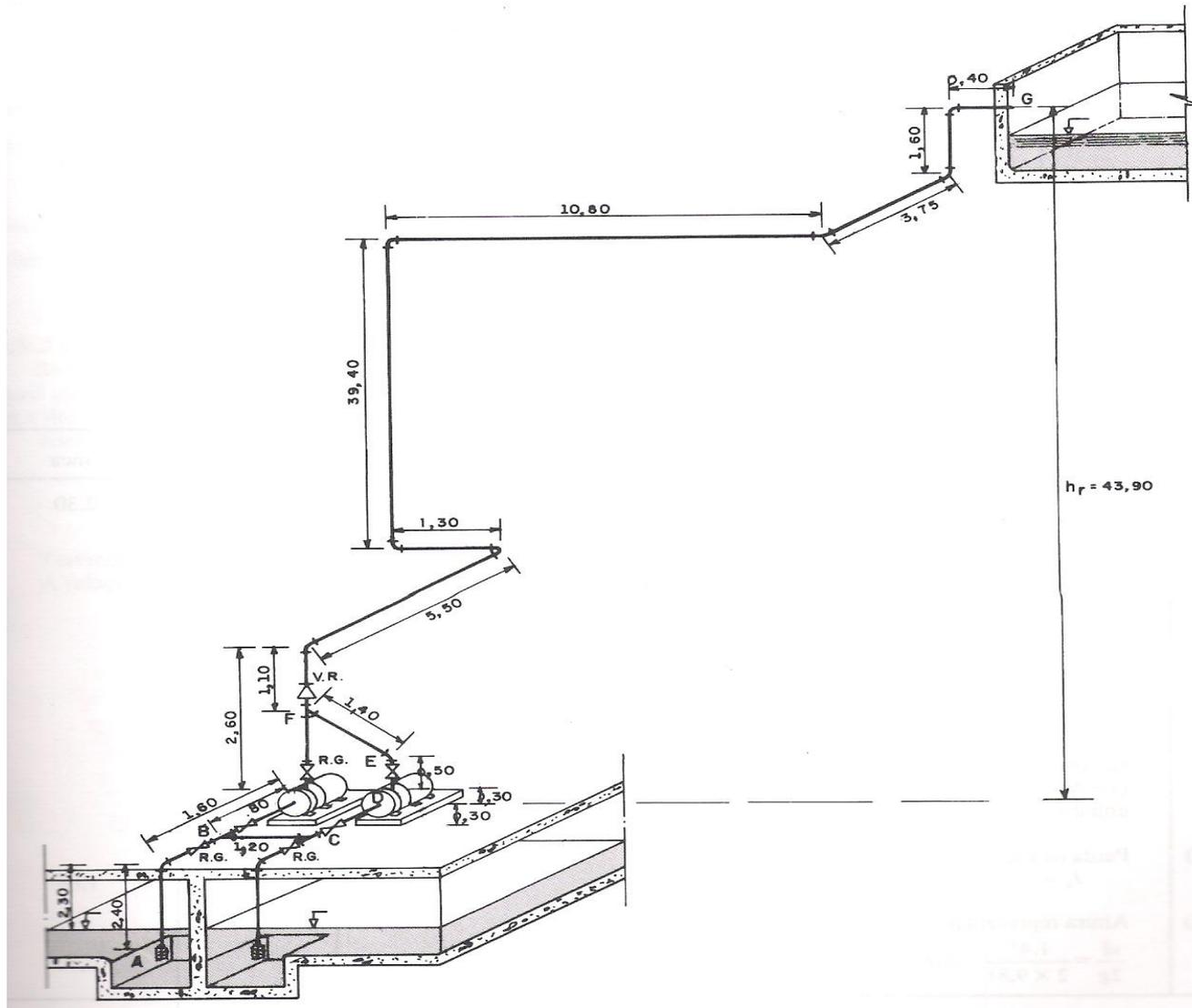
Q : vazão em m³/s

H : altura manométrica em m

η : rendimento (85 % para grandes bombas, 75 % para bombas médias e 60% para bombas pequenas)

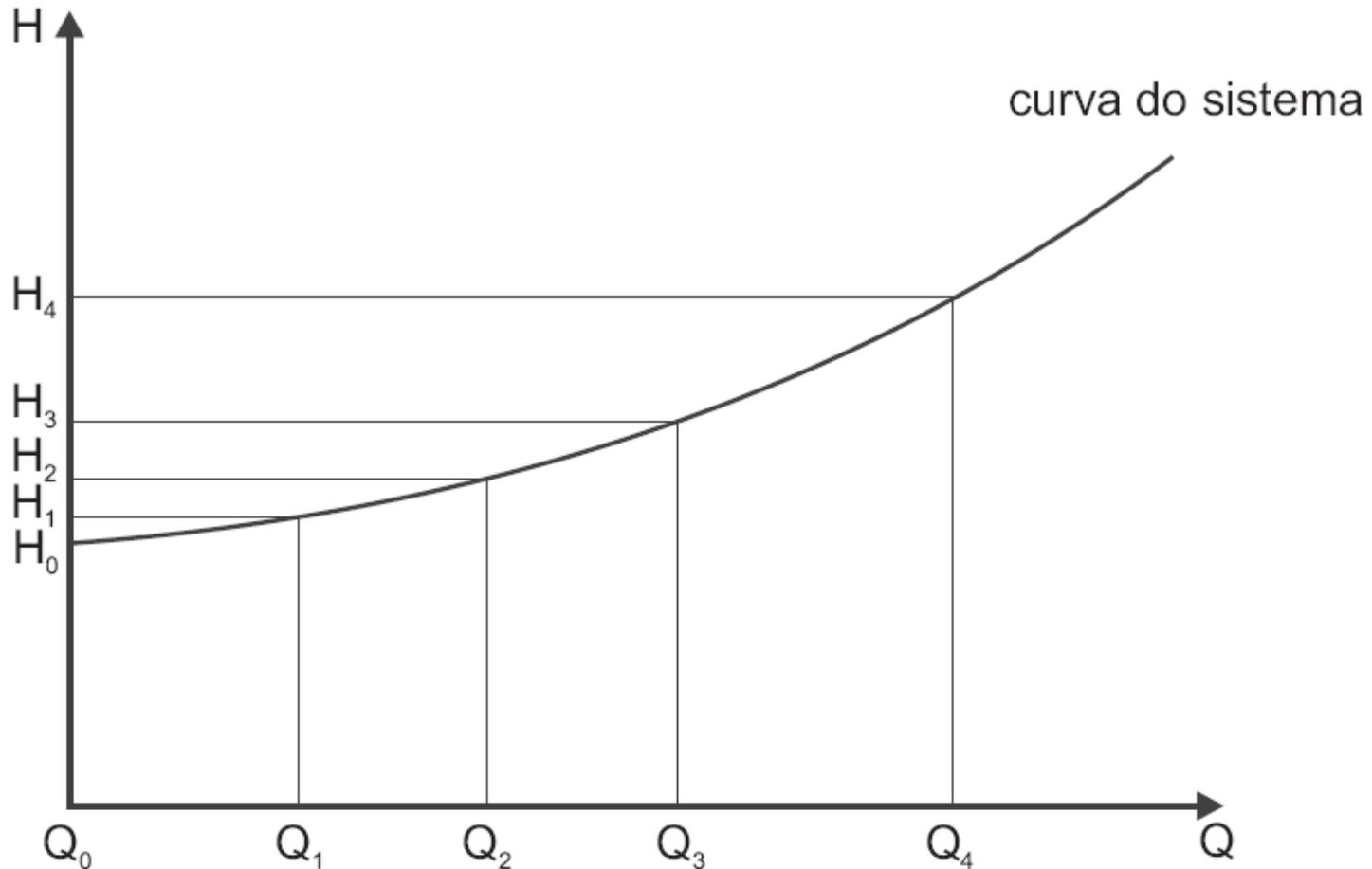
Bombas & Instalações de Bombeamento

Exercício : Calcule a potência mínima necessária à bomba para acionar o sistema de bombeamento d'água mostrado



Bombas & Instalações de Bombeamento

Curva do sistema : é uma curva onde são mostradas várias combinações de vazão e altura manométrica, indicando o comportamento do sistema a medida que estas grandezas variam



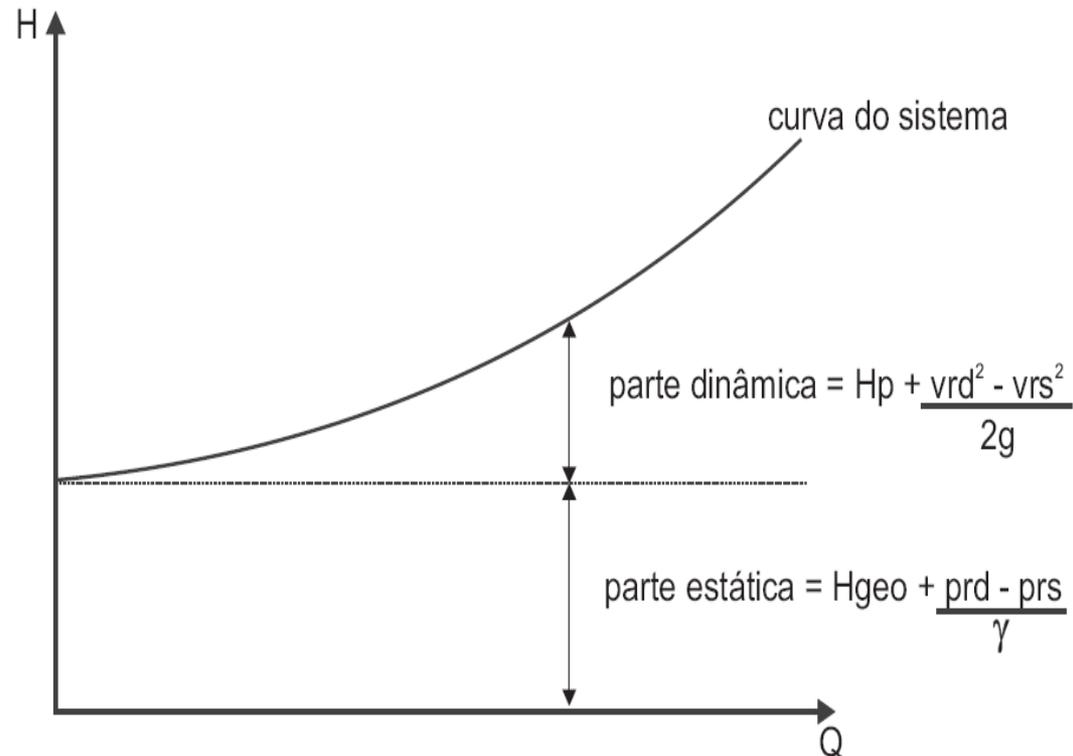
Bombas & Instalações de Bombeamento

Curva do sistema : é dividida em duas partes, dinâmica e estática

Onde :

Parte estática : corresponde a altura estática e independe da vazão do sistema, ou seja, a carga de pressão nos reservatórios de descarga e sucção e a altura geométrica.

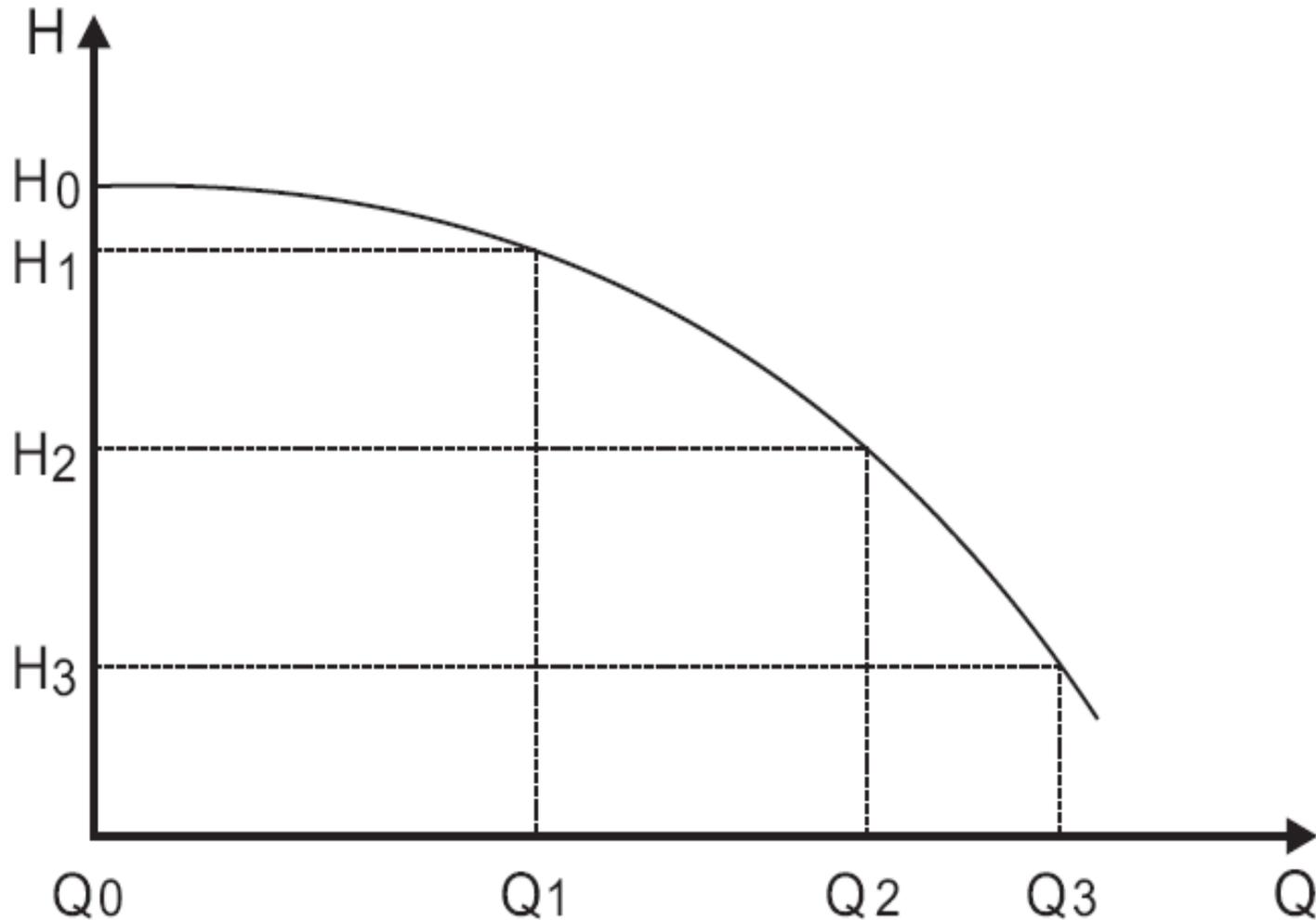
Parte dinâmica : corresponde a altura dinâmica, ou seja, com o fluido em movimento, gerando carga de velocidade nos reservatórios de descarga e sucção e as perdas de carga, que aumenta com o quadrado da vazão do sistema.



Bombas & Instalações de Bombeamento

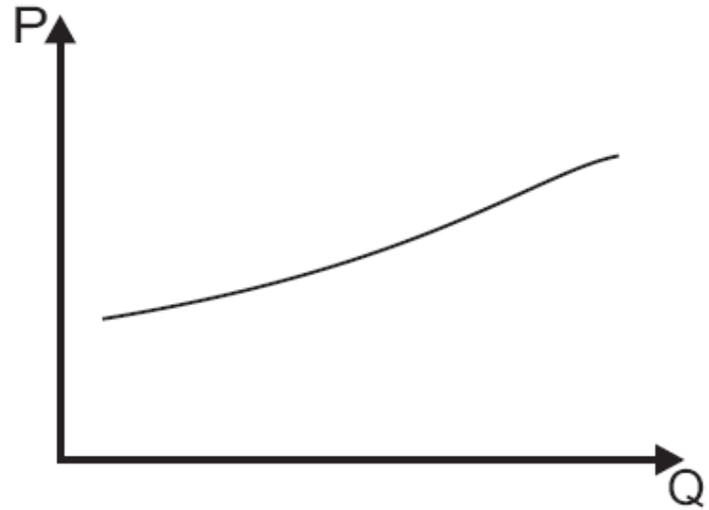
Curva da bomba : semelhante à curva da instalação, refere-se à combinação de várias vazões e alturas manométricas mostradas de forma gráfica

vazão (Q)	altura (H)
Q_0	H_0
Q_1	H_1
Q_2	H_2
Q_3	H_3

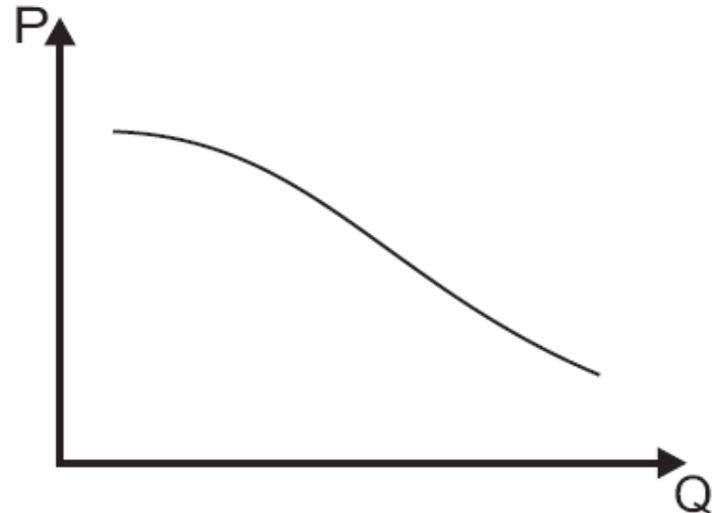


Bombas & Instalações de Bombeamento

Curva de potência
para bombas radiais

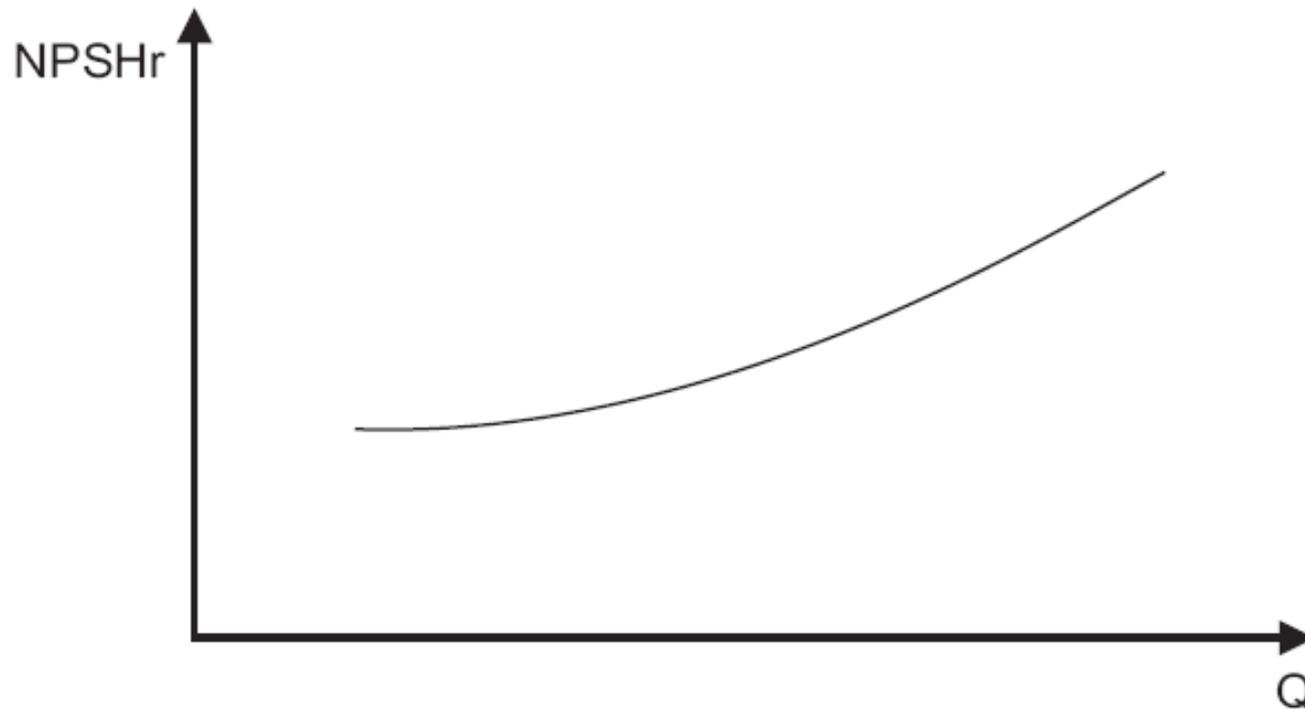


Curva de potência
para bombas axiais



Bombas & Instalações de Bombeamento

Curva de NPSH (Net Positive Suction Head) : representa a energia mínima necessária que o líquido deve ter, e unidades absolutas, no flange de sucção da bomba, para garantir seu perfeito funcionamento



Bombas & Instalações de Bombeamento

Rendimento : é a relação entre a potência hidráulica e a potência consumida

$$\eta = \frac{\text{Potência hidráulica}}{\text{Potência consumida}}$$

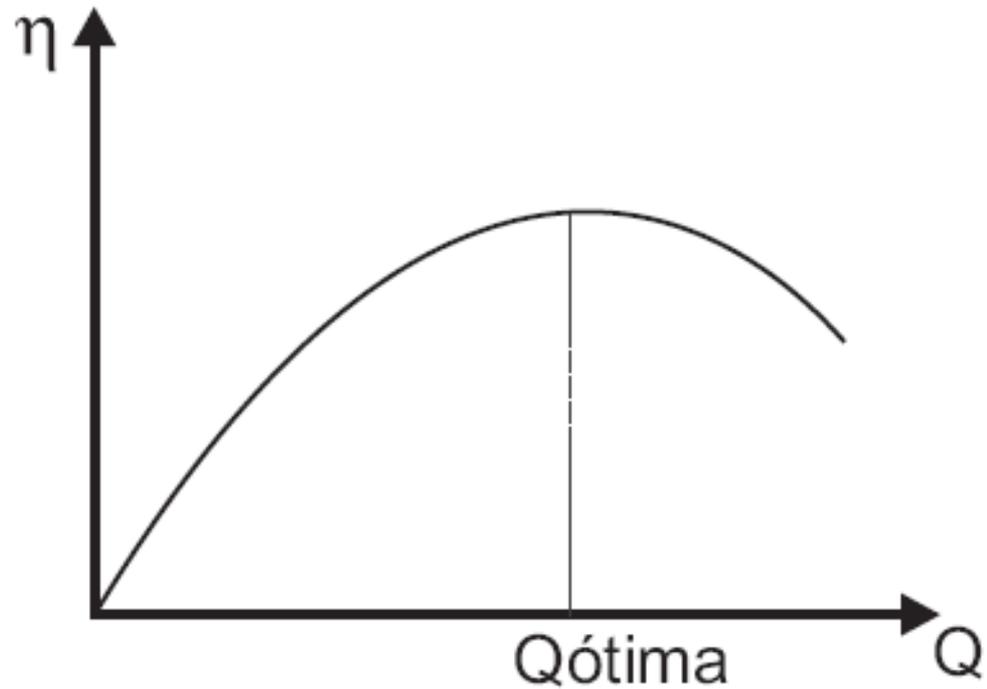
Onde :

Potência Hidráulica	=	$\frac{1.000 \cdot Q \cdot H}{75}$
----------------------------	---	------------------------------------

Potência consumida	=	$\frac{1.000 \cdot Q \cdot H}{75 \cdot \eta}$
---------------------------	---	---

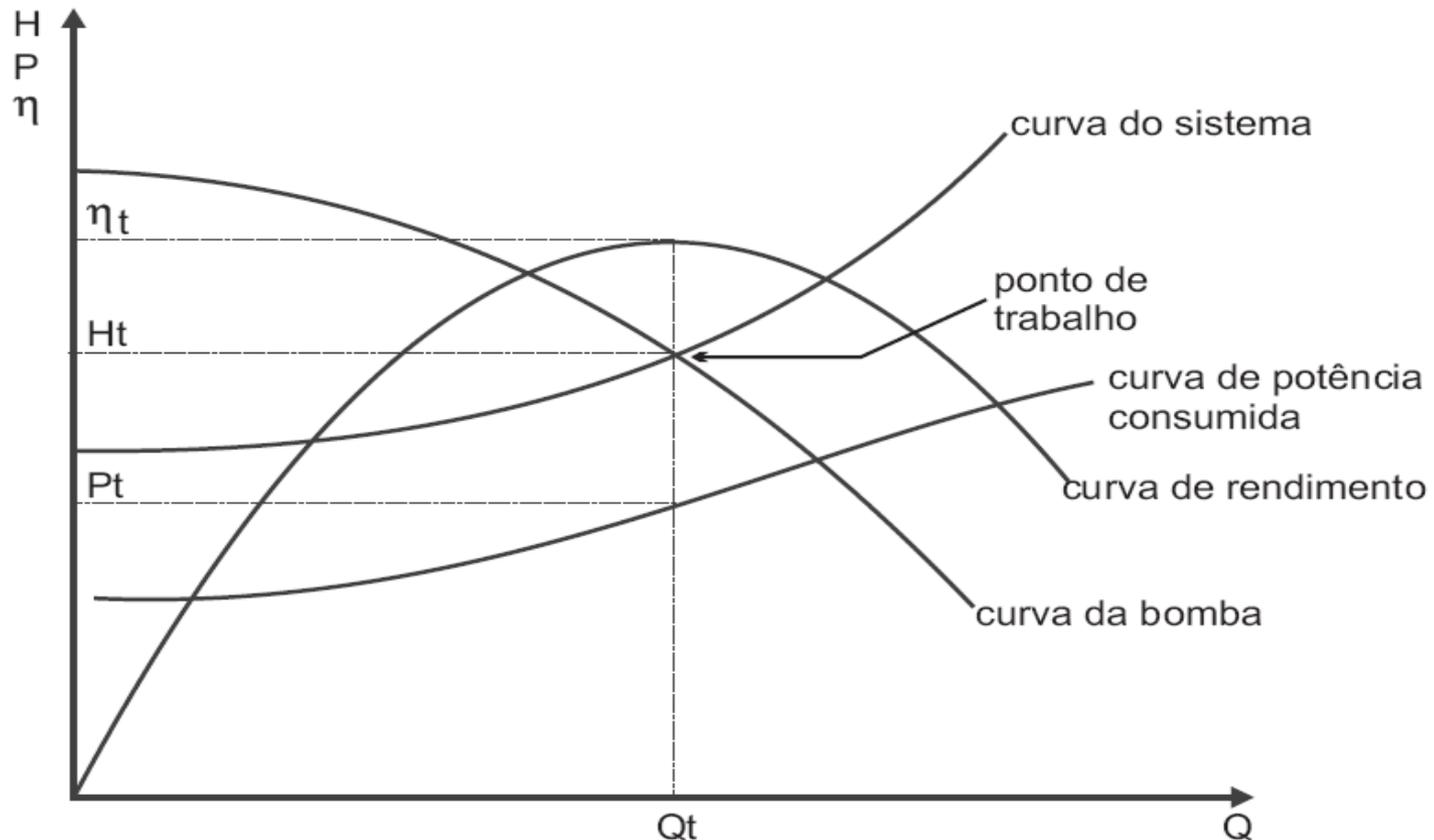
Bombas & Instalações de Bombeamento

Curva de rendimento :



Bombas & Instalações de Bombeamento

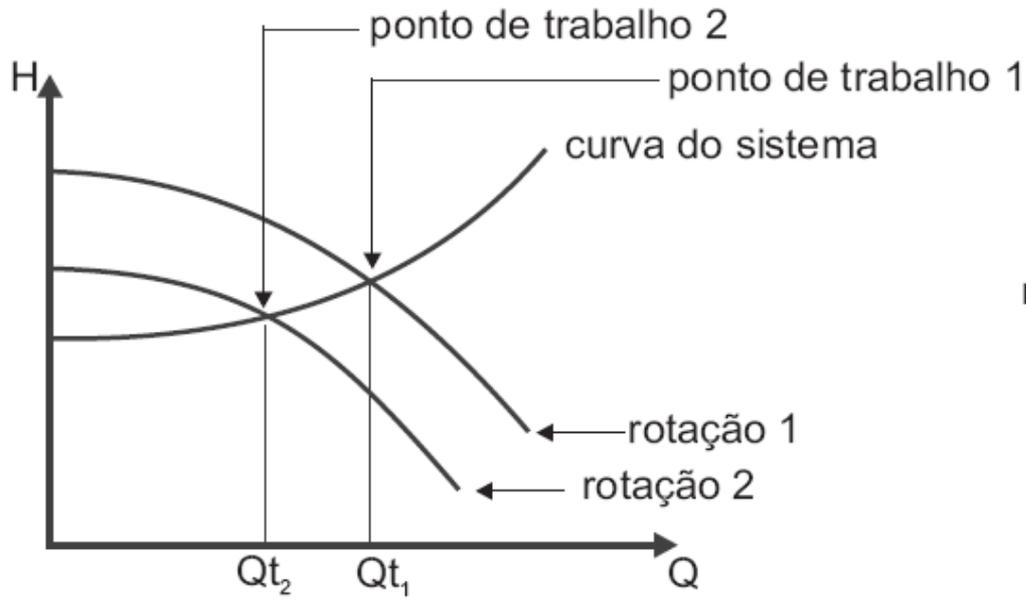
Ponto de operação : quando colocamos no mesmo gráfico as curvas da instalação, da bomba, e do rendimento, obtemos o ponto ótimo de operação do sistema



Bombas & Instalações de Bombeamento

Alteração do ponto de trabalho de uma bomba :

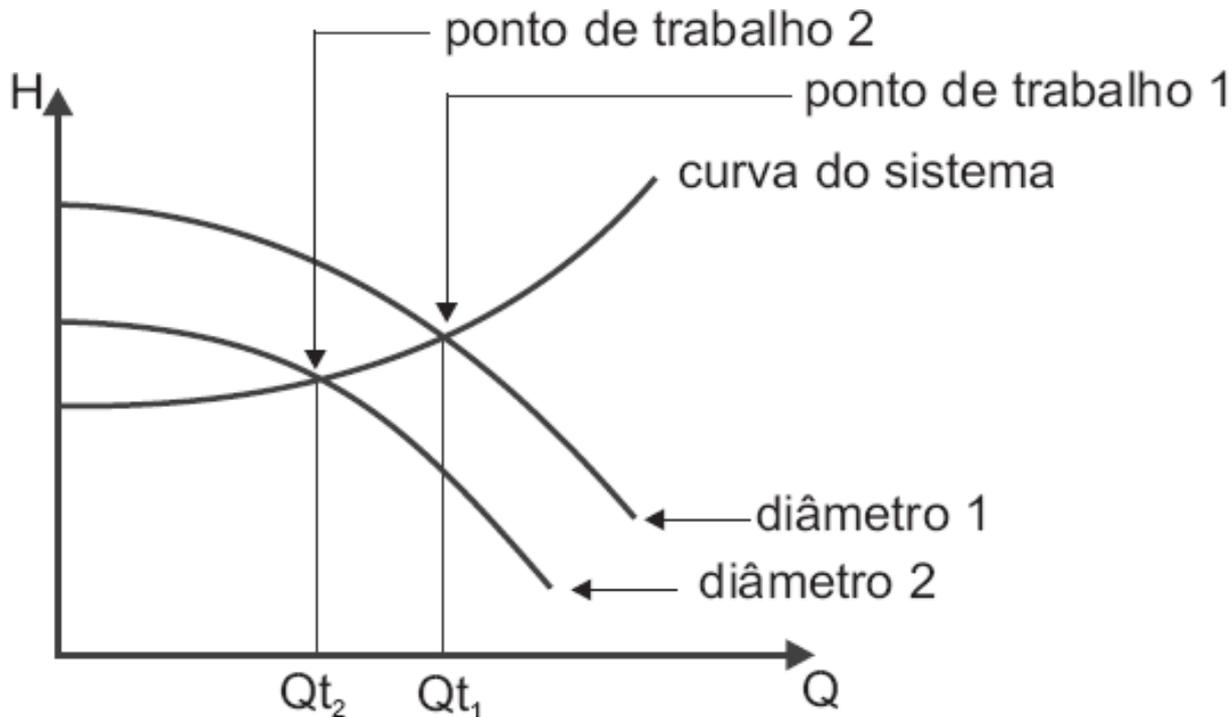
- variação da rotação da bomba



rotação 1 > rotação 2

Bombas & Instalações de Bombeamento

- variação do diâmetro do rotor da bomba



diâmetro 1 > diâmetro 2

Bombas & Instalações de Bombeamento

Efeitos da variação da rotação :

1 - A vazão é proporcional à rotação.

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{N}{N_1}$$

Q = vazão na rotação conhecida
Q₁ = vazão na nova rotação
N = rotação conhecida
N₁ = nova rotação

2 - A altura manométrica varia com o quadrado da rotação.

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{N}{N_1} \right)^2$$

H = altura na rotação conhecida
H₁ = altura na nova rotação
N = rotação conhecida
N₁ = nova rotação

3 - A potência absorvida varia com o cubo da rotação.

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{N}{N_1} \right)^3$$

P = potência na rotação conhecida
P₁ = potência na nova rotação
N = rotação conhecida
N₁ = nova rotação

Bombas & Instalações de Bombeamento

Efeitos da variação da rotação :

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{D}{D_1}$$

Q = vazão no diâmetro conhecido
Q₁ = vazão no novo diâmetro
D = diâmetro conhecido
D₁ = novo diâmetro

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{D}{D_1} \right)^2$$

H = altura no diâmetro conhecido
H₁ = altura no novo diâmetro
D = diâmetro conhecido
D₁ = novo diâmetro

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{D}{D_1} \right)^3$$

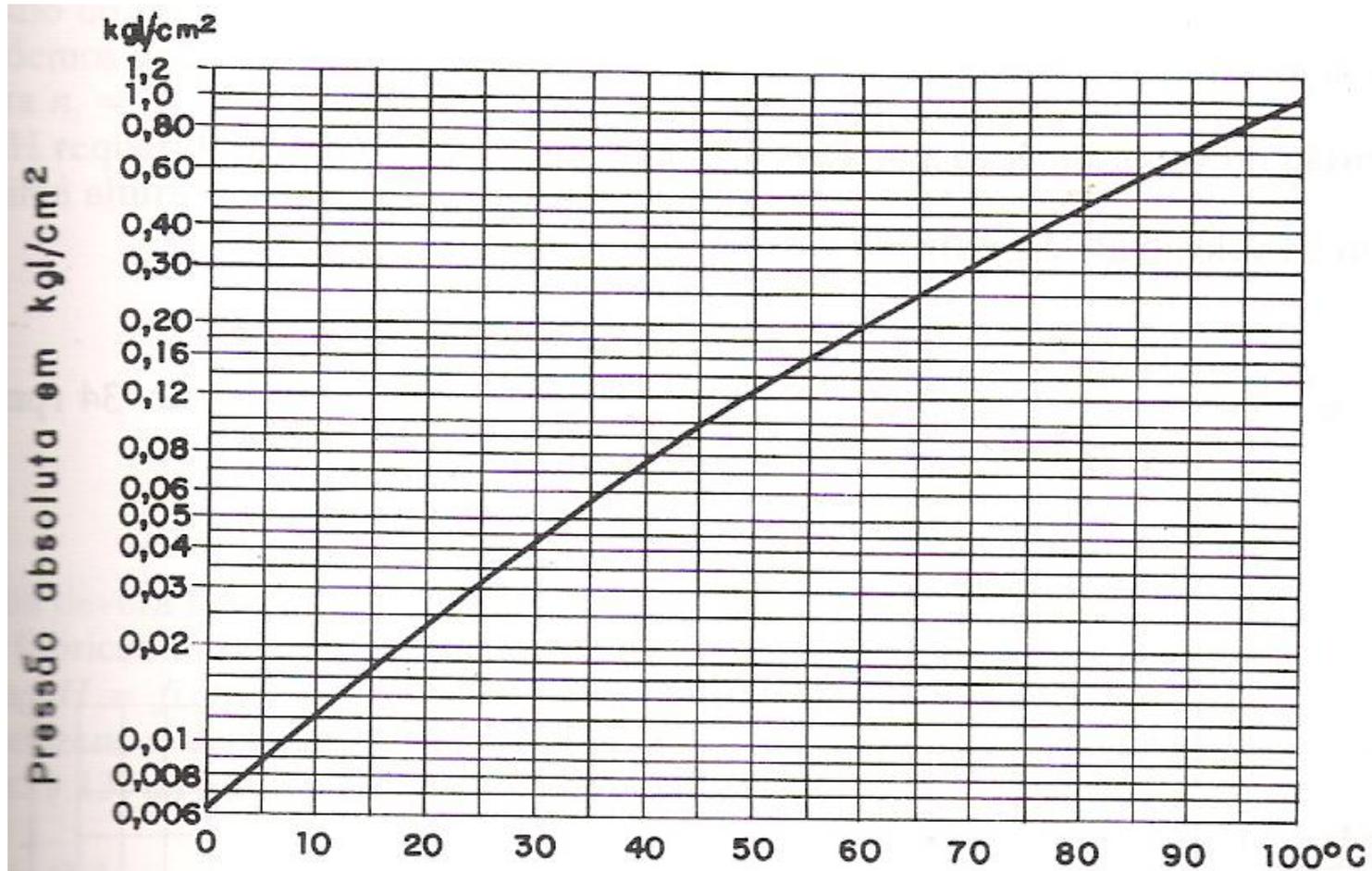
P = potência no diâmetro conhecido
P₁ = potência no novo diâmetro
D = diâmetro conhecido
D₁ = novo diâmetro

Bombas & Instalações de Bombeamento

Exercício :

Bombas & Instalações de Bombeamento

Pressão de vapor : é a pressão a qual coexistem as fases líquido e vapor, a mesma cresce à medida que a temperatura é elevada



Bombas & Instalações de Bombeamento

Pressão de vapor : Tabela indicando a variação pressão de vapor em função da temperatura

Temperatura °C	Pressão de vapor		Peso específico (kgf/dm ³)
	mm Hg	kgf/cm ²	
15	12,7	0,0174	0,999
20	17,4	0,0238	0,998
25	23,6	0,0322	0,997
30	31,5	0,0429	0,996
35	41,8	0,0572	0,994
40	54,9	0,0750	0,992
45	71,4	0,0974	0,990
50	92,0	0,1255	0,988
55	117,5	0,1602	0,986
60	148,8	0,2028	0,983
65	186,9	0,2547	0,981
70	233,1	0,3175	0,978
75	288,5	0,3929	0,975
80	354,6	0,4828	0,972
85	433,0	0,5894	0,969
90	525,4	0,7149	0,965
95	633,7	0,8620	0,962
100	760,0	1,0333	0,958
105	906,0	1,2320	0,955
110	1075,0	1,4609	0,951
115	1269,0	1,7260	0,947
120	1491,0	2,0270	0,943

Bombas & Instalações de Bombeamento

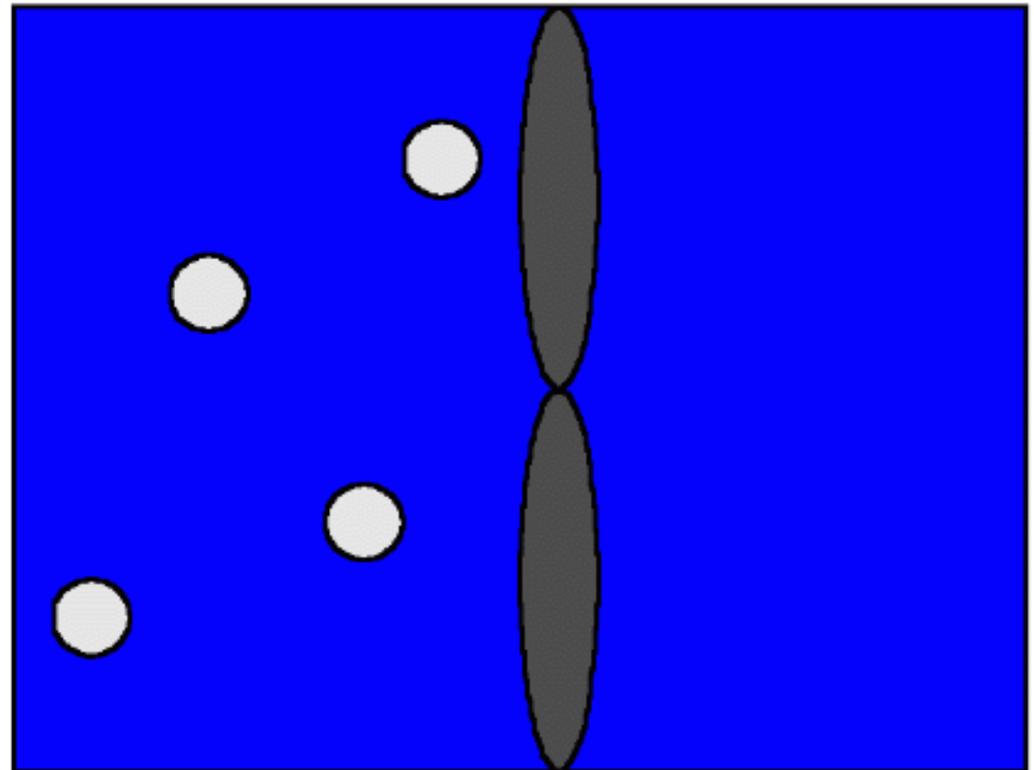
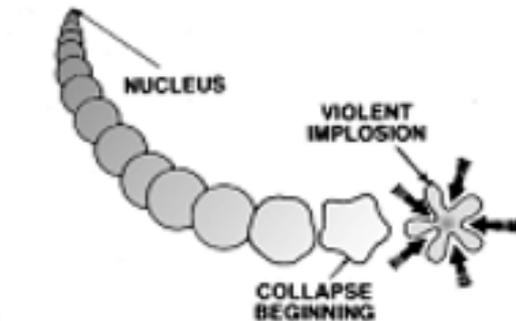
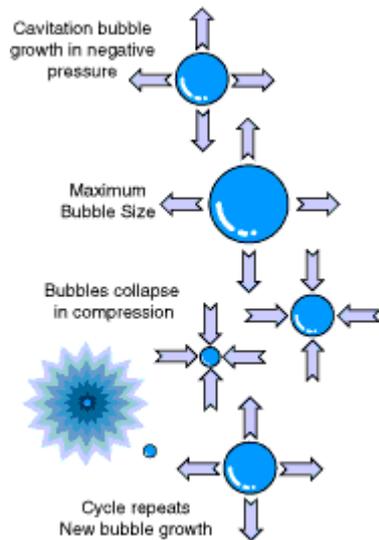
Cavitação :

Definição : é a erosão dos componentes de um sistema hidráulico (rotores, tubulação de sucção), causados pelo colapso de pequenas bolhas de vapor do fluido, formadas nas zonas de baixa pressão contra a superfície destes componentes.

Nota : Apesar de ter efeitos parecidos, os fenômenos de corrosão eletrolítica e corrosão por abrasão são diferentes entre si e da cavitação, sendo o primeiro causado por afinidade química entre o líquido transportado e o material da bomba, e o segundo á causado pela abrasão dos sólidos transportados junto do líquido. Esta observação é pertinente pois mesmo que estes efeitos coexistam, as medidas para combatê-los são diferentes

Bombas & Instalações de Bombeamento

Mecanismo da cavitação :

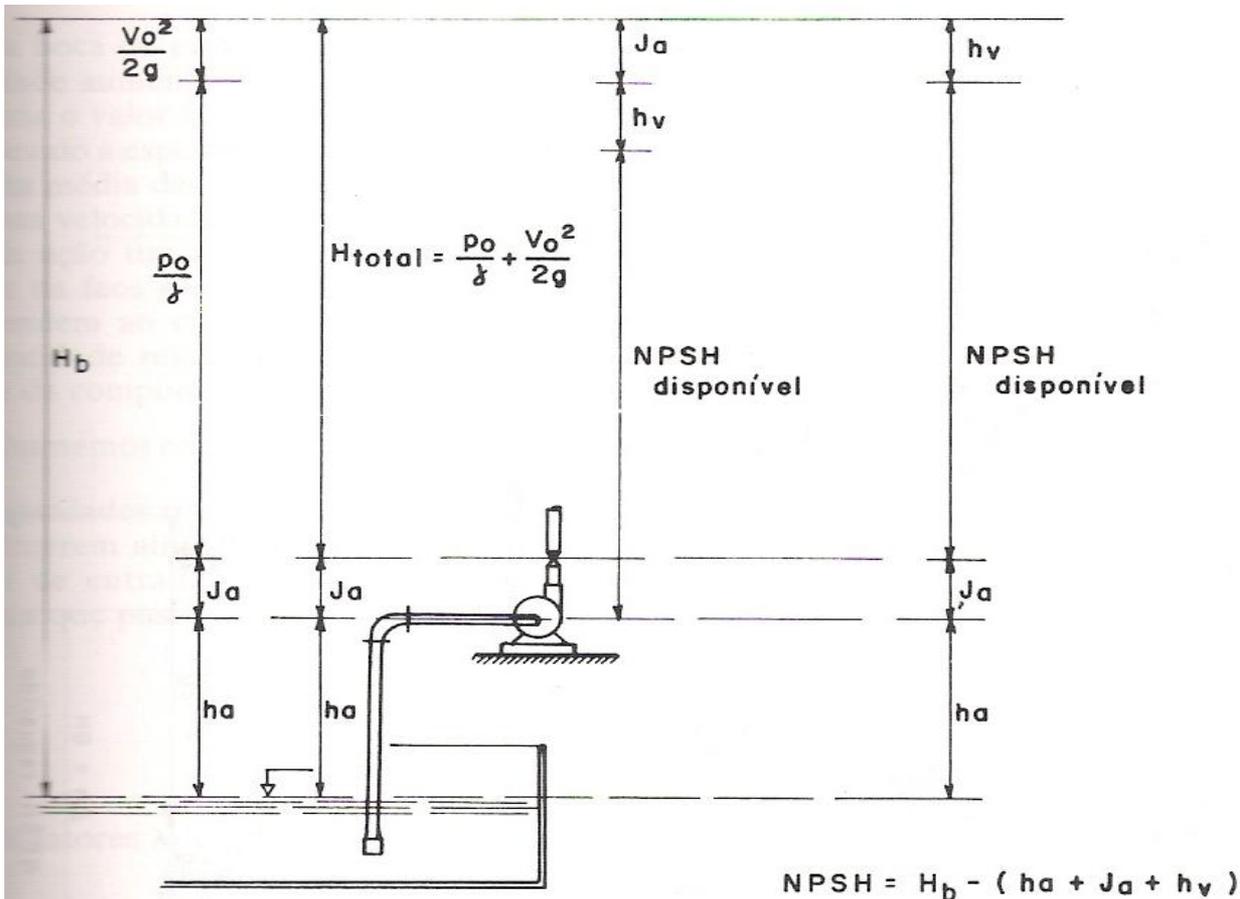


Growth and collapse of a cavitation bubble

Bombas & Instalações de Bombeamento

NPSH : é altura positiva líquida de sucção (**N**et **P**ositive **S**uction **H**ead), é a altura diretamente ligada ao estudo da cavitação. A determinação das condições de cavitação de uma instalação de bombeamento dependem de dois fatores, o NPSH disponível (que depende da instalação) e o NPSH requerido (característico da bomba)

Para que não ocorra cavitação deveremos ter : $\text{NPSH}_{\text{disponível}} \geq \text{NPSH}_{\text{requerido}}$



Bombas & Instalações de Bombeamento

Cálculo do NPSH disponível :

$$\text{NPSH}_{\text{disp.}} = H_b - h_a - J_a - h_v$$

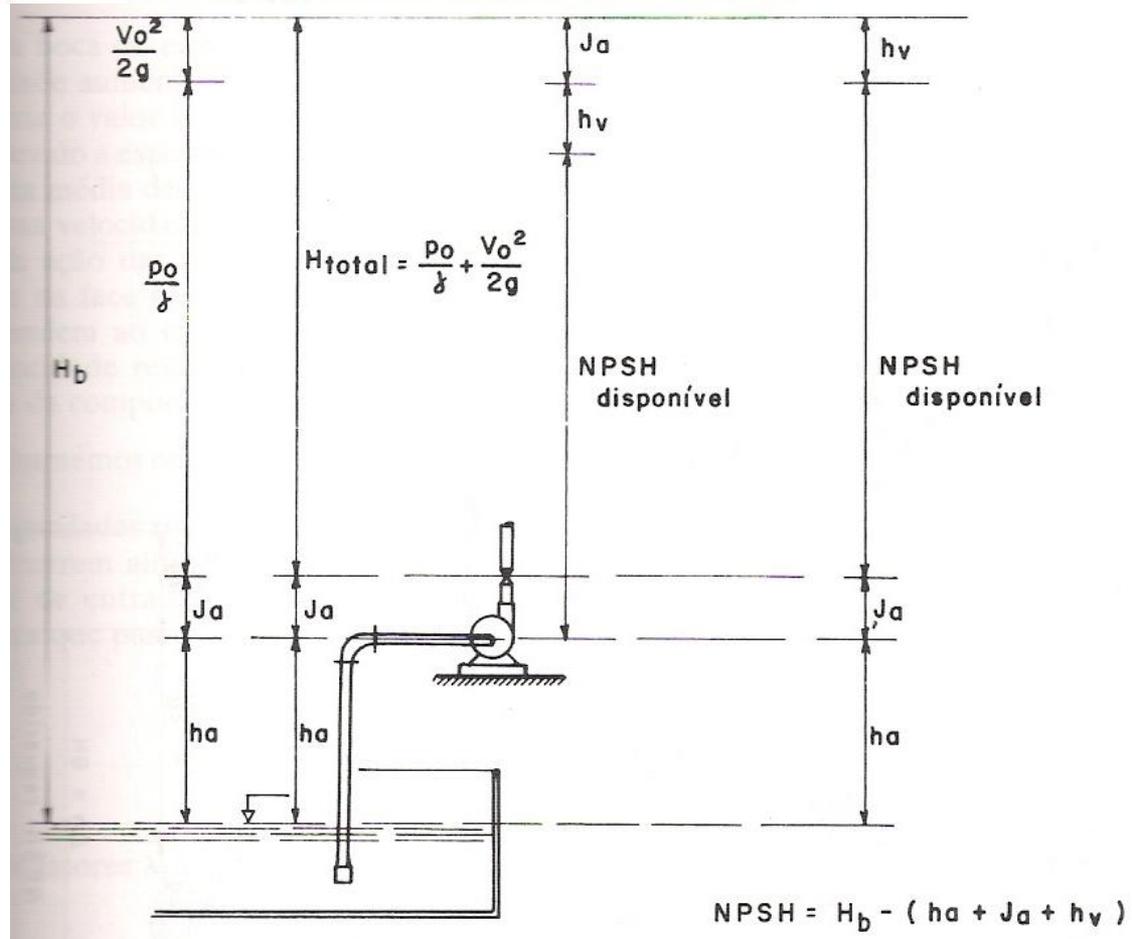
Onde :

H_b : pressão atmosférica absoluta

h_a : altura estática de sucção

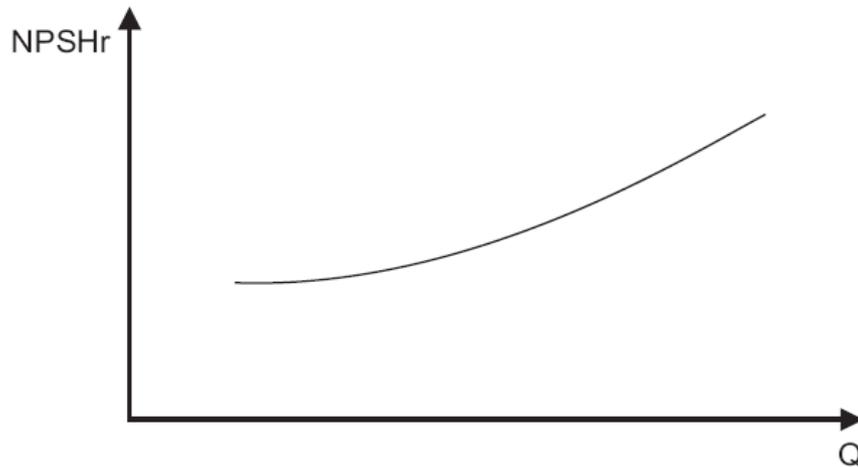
J_a : perda de carga na sucção

h_v : pressão de vapor do líquido à temperatura de operação da instalação



Bombas & Instalações de Bombeamento

NPSH requerido : o NPSH requerido é fornecido pelos fabricantes de bombas, pois a rigor o mesmo deve ser determinado empiricamente em Bancadas



$$NPSH_{req} = \left(\Delta h + \frac{v_0^2}{2g} \right)$$

Δh = altura diferencial de pressão.
Energia que deve ser fornecida à bomba.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Máxima altura de aspiração : é a máxima diferença de cota admissível entre a bomba e o nível do líquido na sucção, de modo a não haver cavitação

$$h_a \leq H_b - \left(J_a + h_v + \frac{v_0^2}{2g} + \sigma H \right)$$

Onde :

H_b : pressão atmosférica absoluta

h_a : altura estática de sucção

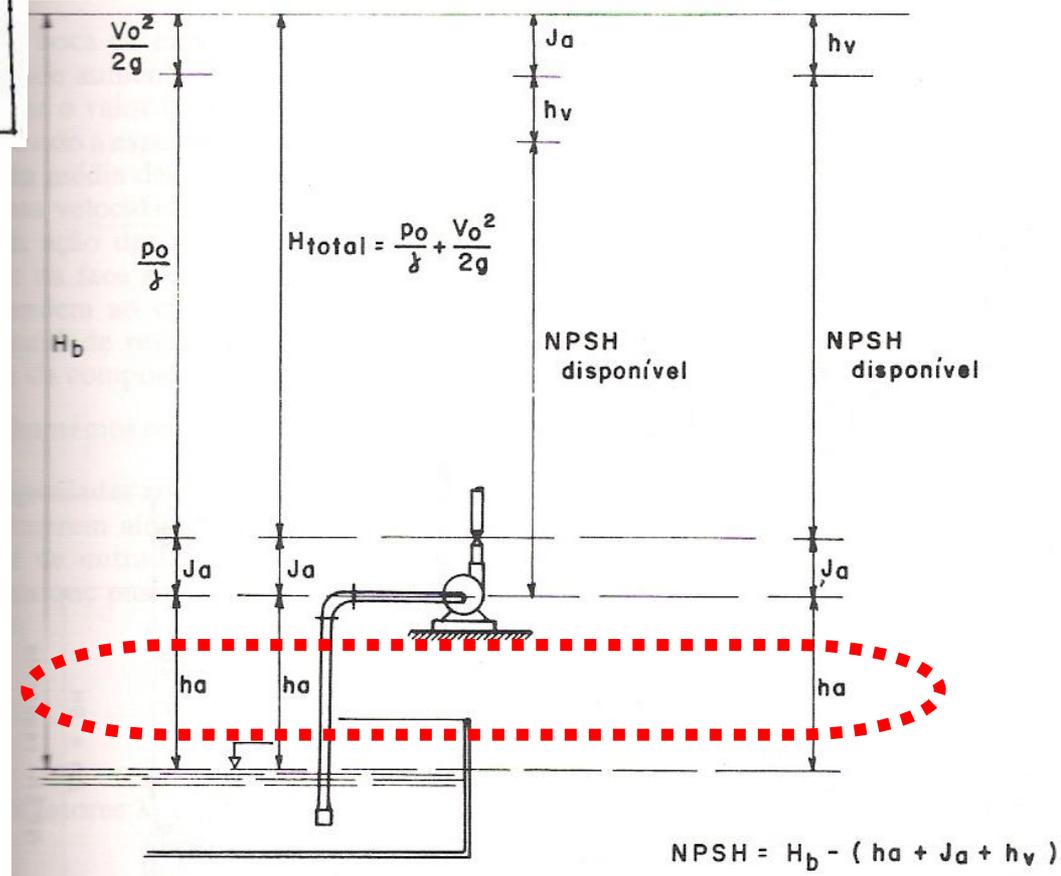
J_a : perda de carga na sucção

h_v : pressão de vapor do líquido à temperatura de operação da instalação

V_0 : velocidade no flange de sucção

H : altura manométrica

σ : fator de cavitação de Thoma



Bombas & Instalações de Bombeamento

Fator de Thoma (σ) : em homenagem ao pesquisador Dieter Thoma, também conhecido como fator de cavitação, depende da grandeza conhecida como velocidade específica n_s

$$\sigma = \varphi \cdot n_q^{4/3}$$

Onde φ é um fator que depende da própria rotação específica n_q . Assim

- $\varphi = 0,0011$, para bombas centrífugas radiais, lentas e normais.
- $\varphi = 0,0013$, para bombas helicoidais e hélico-axiais.
- $\varphi = 0,00145$, para bombas axiais.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Rotação específica : é o número de rotações de uma bomba geometricamente semelhante capaz de elevar 1 m³ de água por segundo à altura de 1 m

$$n_q = \frac{n\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_u^3}} \quad (\text{rpm})$$

Onde :

H_u : altura útil de elevação (substituída por H nos problemas práticos) (m)

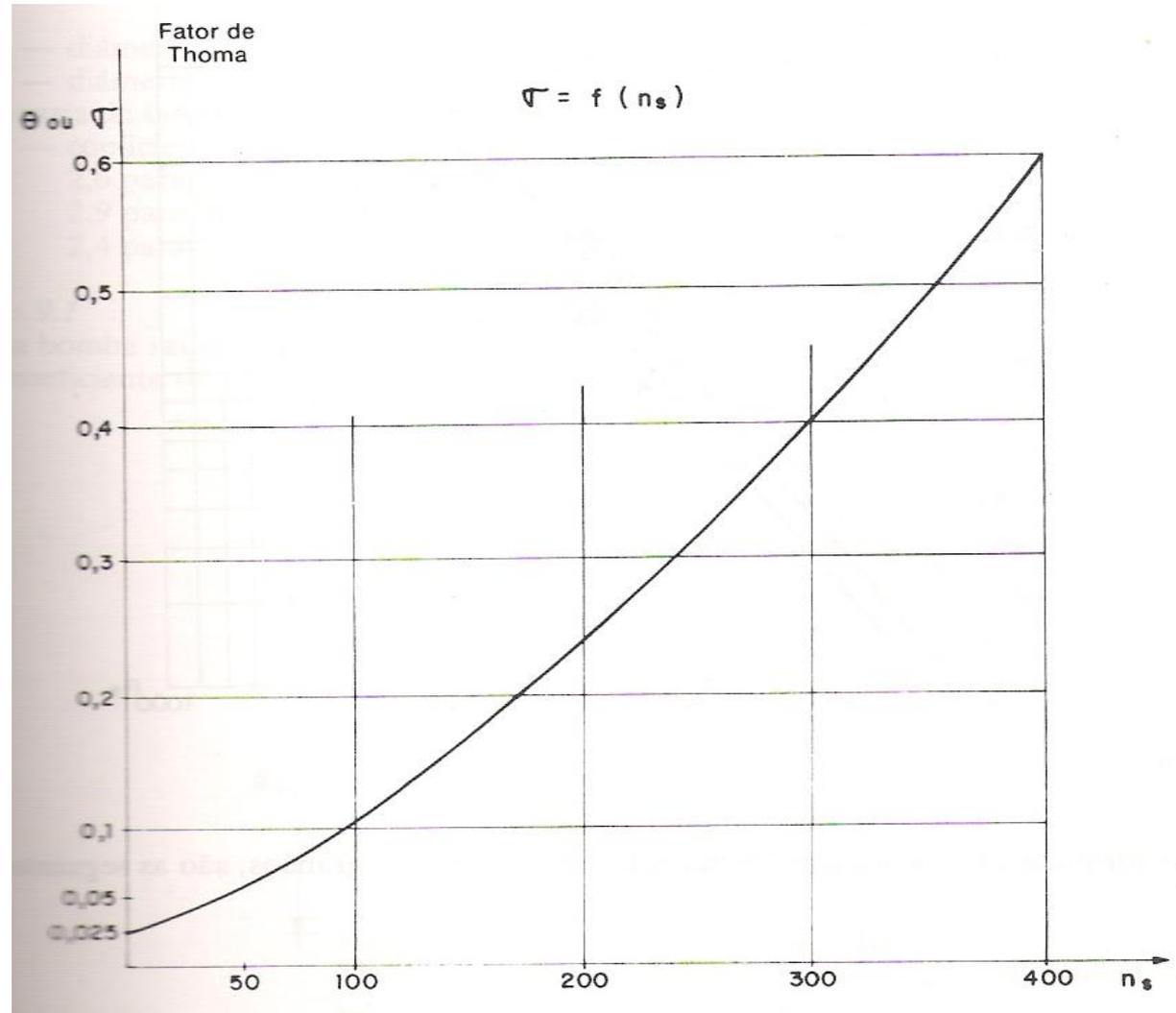
n_q : rotação específica (rpm)

n : rotação da bomba (rpm)

Q : vazão da bomba em m³/s

Bombas & Instalações de Bombeamento

$$\sigma = \varphi \cdot \left(\frac{n \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \right)^{4/3}$$



Bombas & Instalações de Bombeamento

Exercício : Encontre a altura mínima a qual a bomba deve ser montada em relação ao tanque de alimentação, de modo que não haja cavitação

Dados :

$$Q=50 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H=62,5 \text{ m}$$

$$H_b = 9,3 \text{ mca}$$

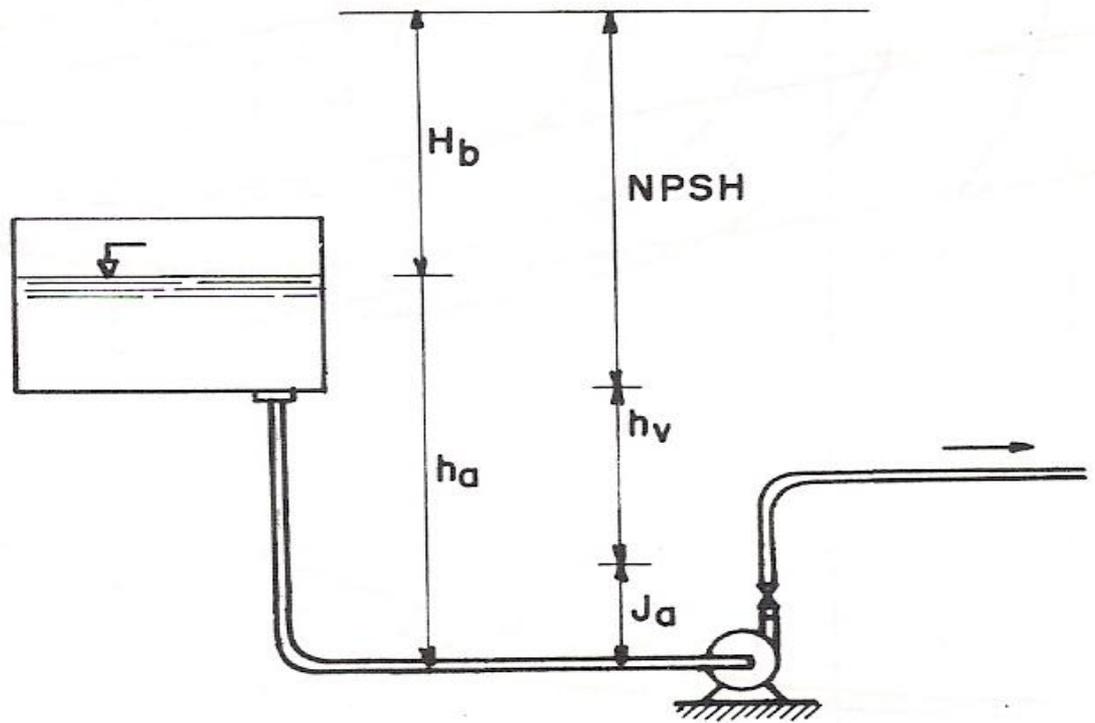
$$J_a = 0,80 \text{ mca}$$

$$n= 1750 \text{ rpm}$$

$$T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_v= 7,2 \text{ mca}$$

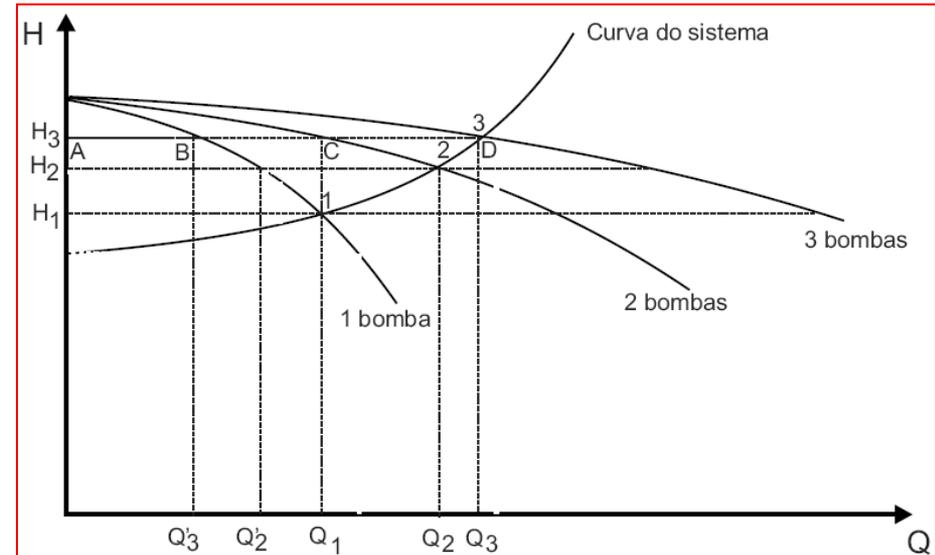
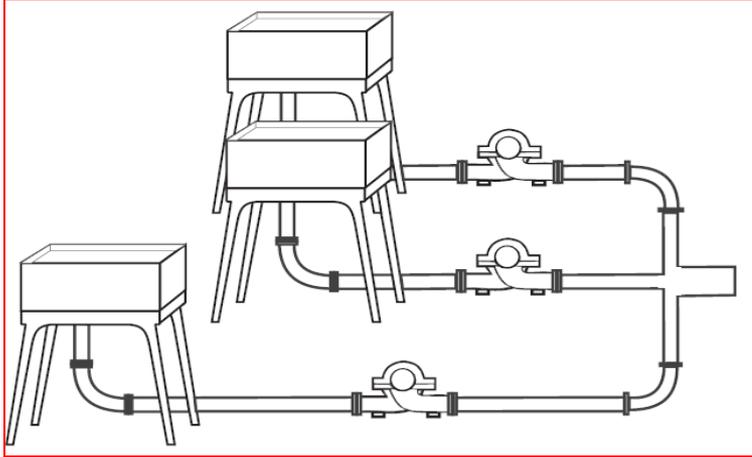
$$\frac{v_0^2}{2g} = 0,10 \text{ mca}$$



Bombas & Instalações de Bombeamento

Associação de bombas :

1. Bombas em paralelo :



Podemos tirar algumas conclusões dessa associação:

- 1) $AB = BC = CD = Q_3 / 3$
- 2) $Q_1 =$ vazão de uma só bomba operando no sistema;
- 3) $Q'_2 =$ vazão de cada bomba com duas operando no sistema;
- 4) $Q'_3 =$ vazão de cada bomba com as três operando no sistema;
- 5) $Q_1 > Q'_2 > Q'_3$

$$Q_{\text{bomba}} = \frac{Q_{\text{tda}}}{n} \quad \text{e} \quad H_{\text{bomba}} = H_{\text{manométrica tda}}$$

Observamos que quanto mais bombas operam em paralelo, mais a esquerda do ponto de melhor rendimento (ponto de projeto) a bomba irá operar. Assim: $Q > Q' > Q''$.

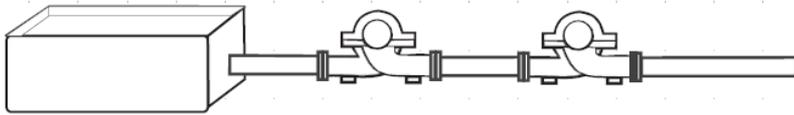
A operação em um ponto muito a esquerda do ponto de projeto traz sérios inconvenientes, como por exemplo:

- vibração;
- recirculação hidráulica;
- aquecimento;
- esforços elevados nos mancais;
- etc.

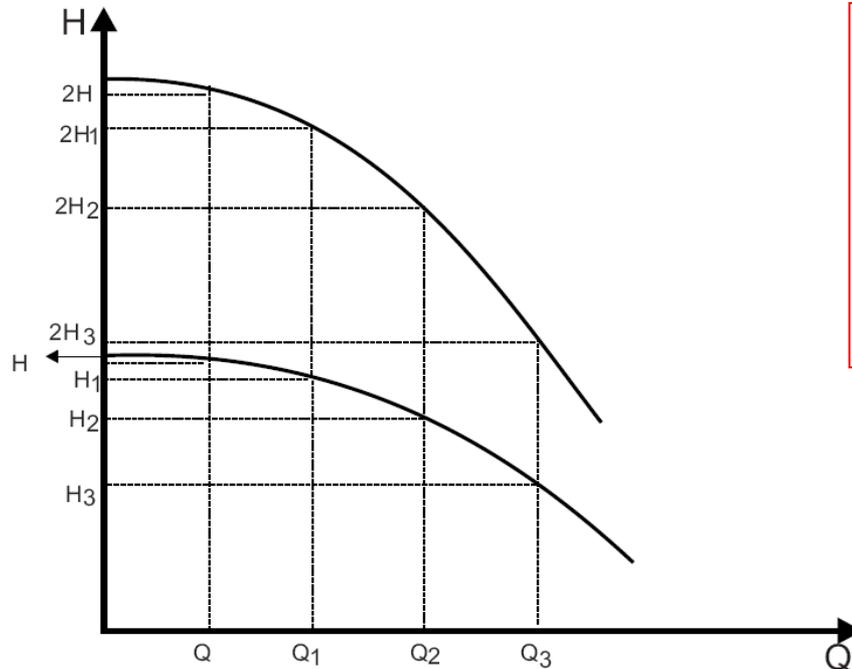
Bombas & Instalações de Bombeamento

Associação de bombas :

1. Bombas em série :



1- Quando associamos duas ou mais bombas em série, para uma mesma vazão, a pressão total (altura manométrica) será a soma das pressões (altura) fornecida por cada bomba.

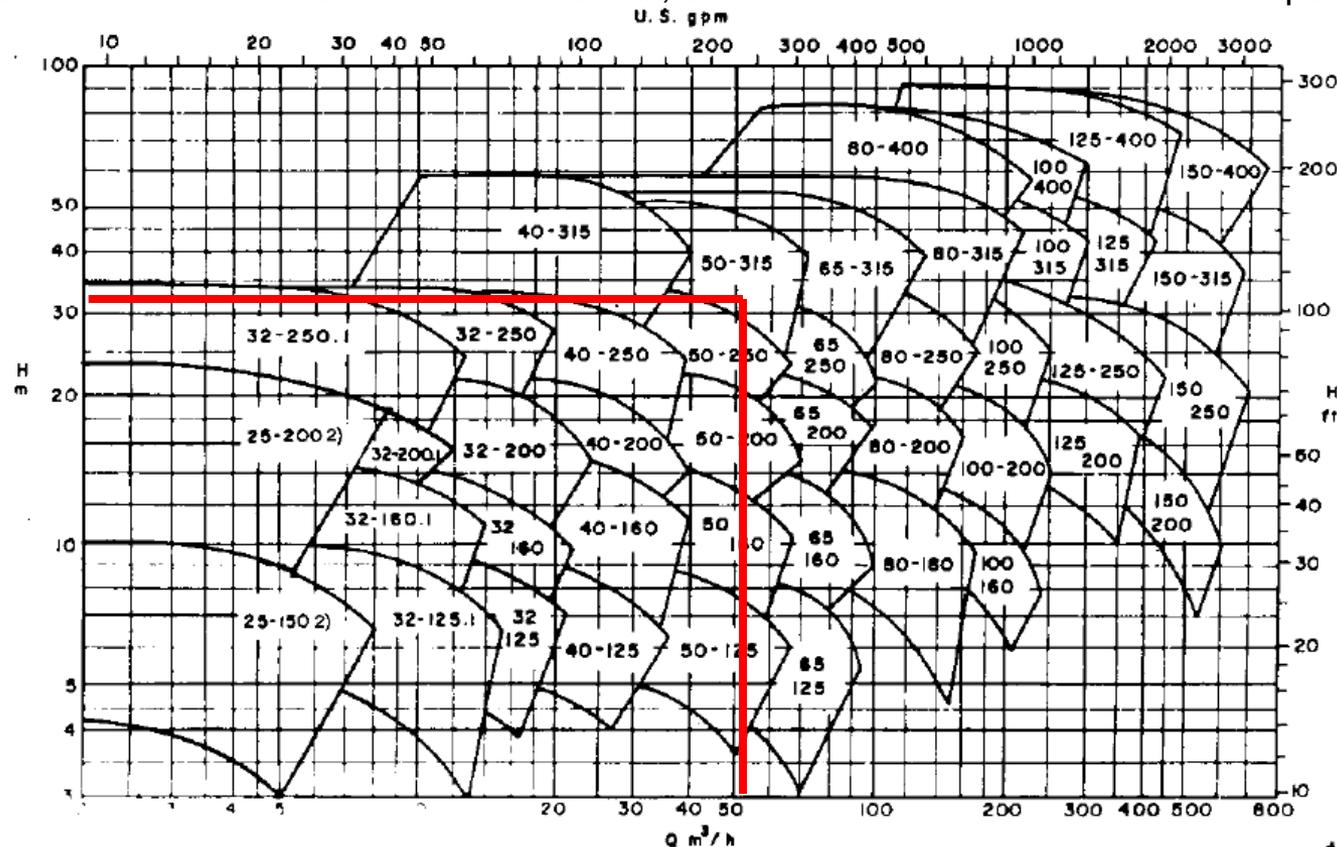


2- Para se obter a curva característica resultante de duas bombas em série, iguais ou diferentes, basta somar as alturas manométricas totais, correspondentes aos mesmos valores de vazão, em cada bomba.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Seleção de bombas a partir dos catálogos dos fabricante

- 1- Determinar a altura requerida (linha Horizontal)
- 2- Determinar a vazão requerida (linha vertical)
- 3- Se o cruzamento acontecer na linha da curva, escolher a bomba imediatamente superior



2) Somente para KSB Megarorm.

1750 rpr