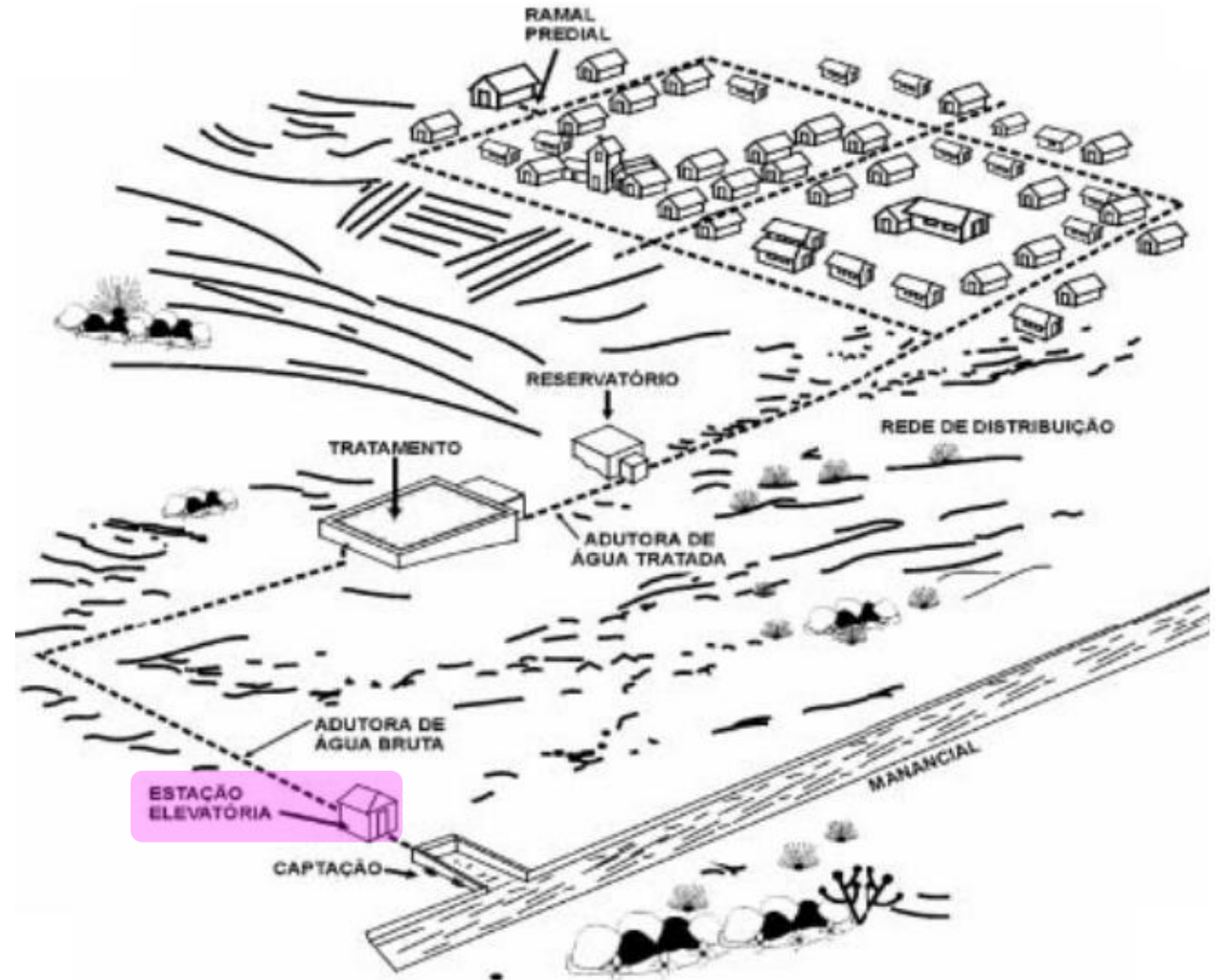


7 – Estações elevatórias (EE)

USO:

- Captação
- Adução
- Tratamento
- Distribuição



Principais componentes de uma EE

Equipamento eletromecânico:

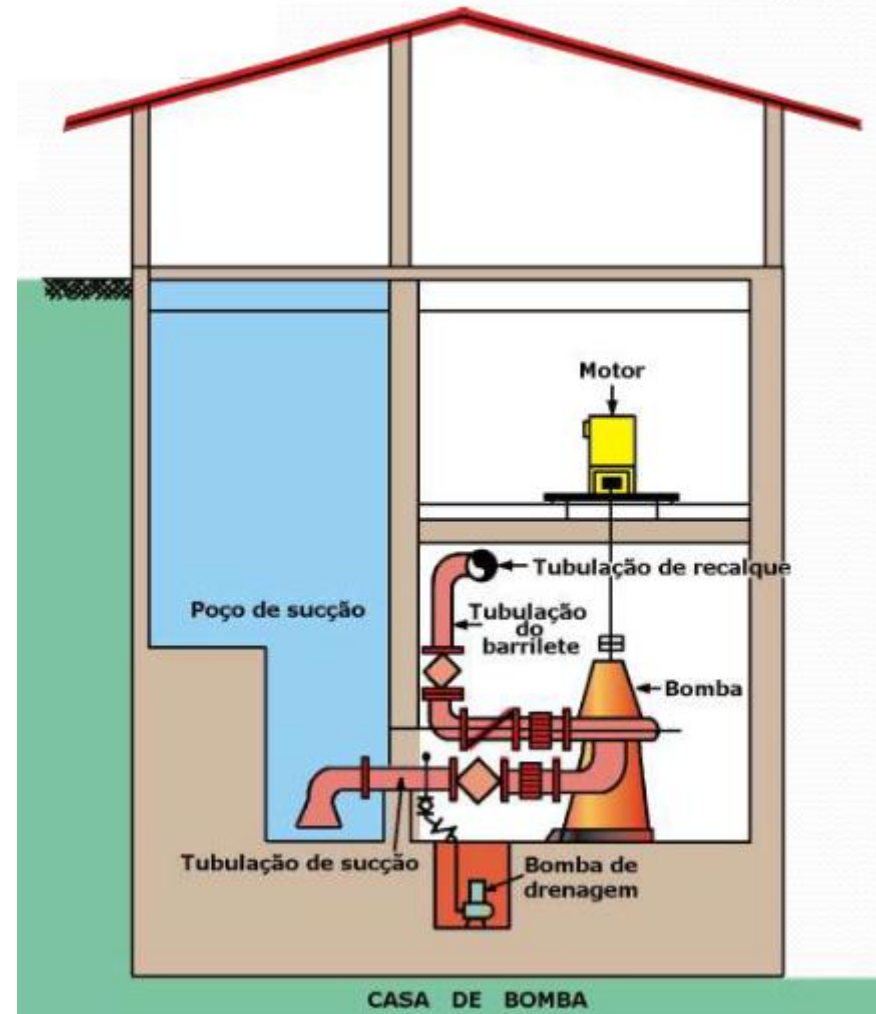
- Bomba
- Motor

Tubulações:

- Sucção
- Barrilete
- Recalque

Construção civil:

- Poço de sucção
- Casa de bombas



Fonte Figura: EPUSP – PHD2412

Bombas

BOMBAS CINÉTICAS

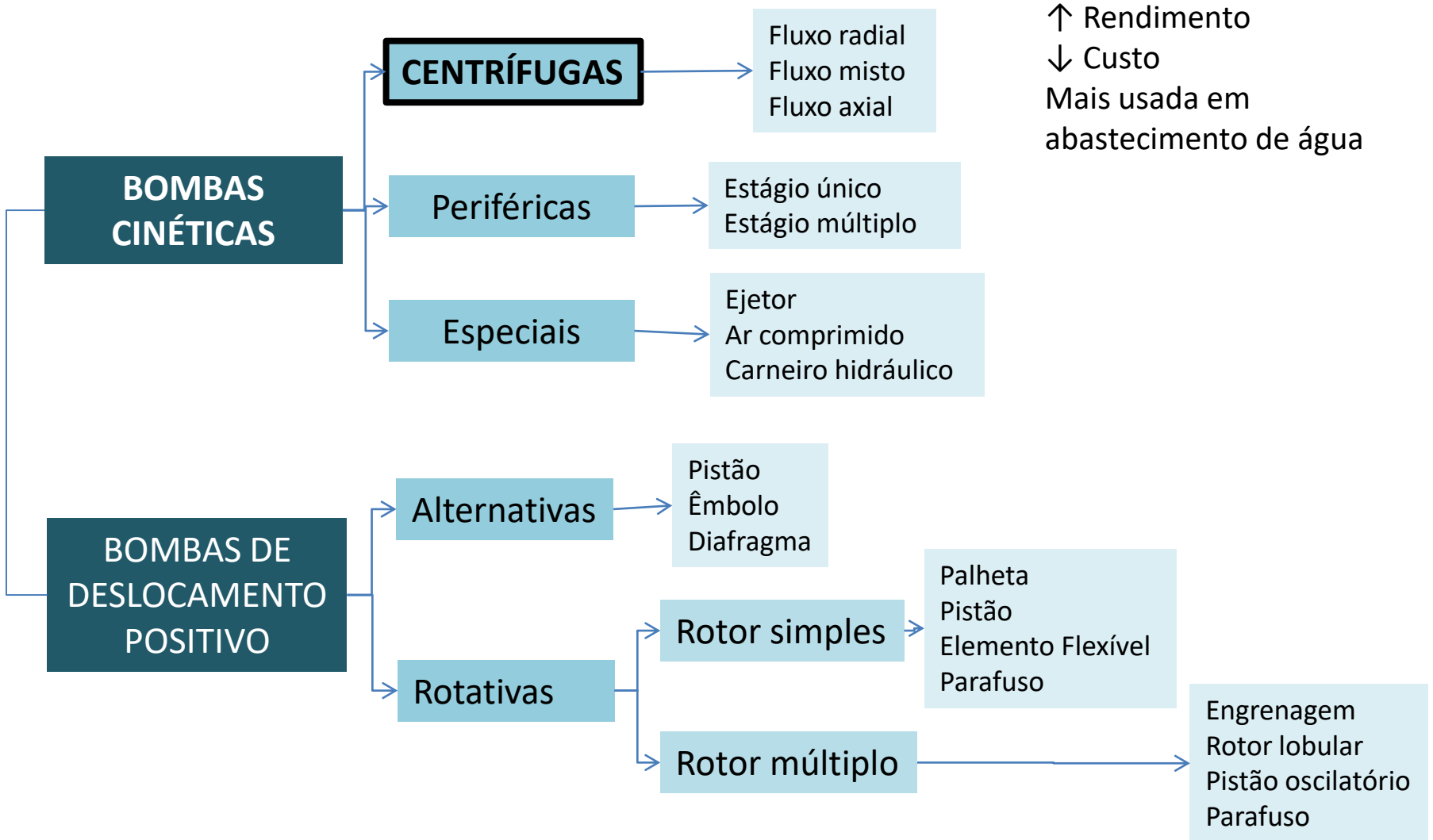


Fornecem energia à água, sob forma de energia de velocidade. Essa energia se converte dentro da bomba em energia de pressão, permitindo que a água atinja posições mais elevadas dentro de uma tubulação.

BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO

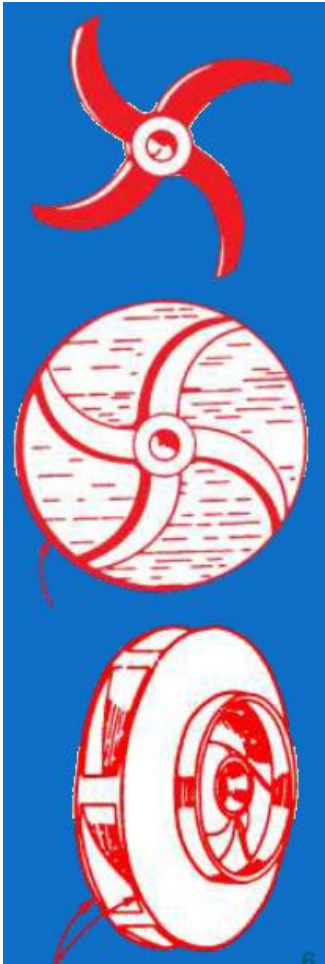


Não há troca de energia interna na massa líquida. O líquido confinado em um compartimento sofre um aumento da pressão e é deslocada de uma posição estática para outra posição estática mais elevada.



Bombas centrífugas

ROTORES

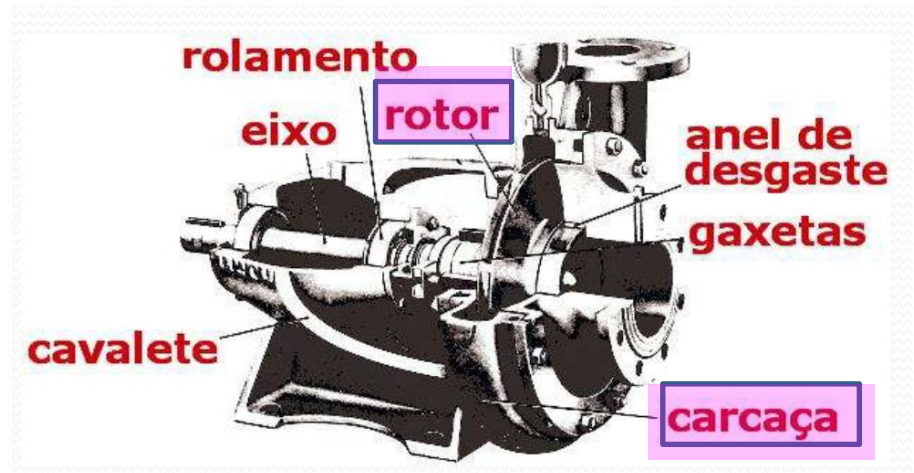
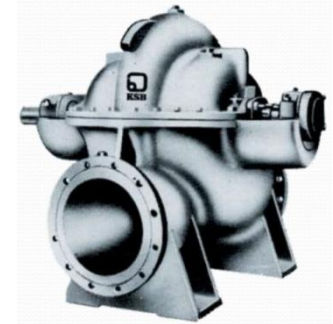


ABERTO

Mais usado em sistema de esgoto

SEMI-ABERTO

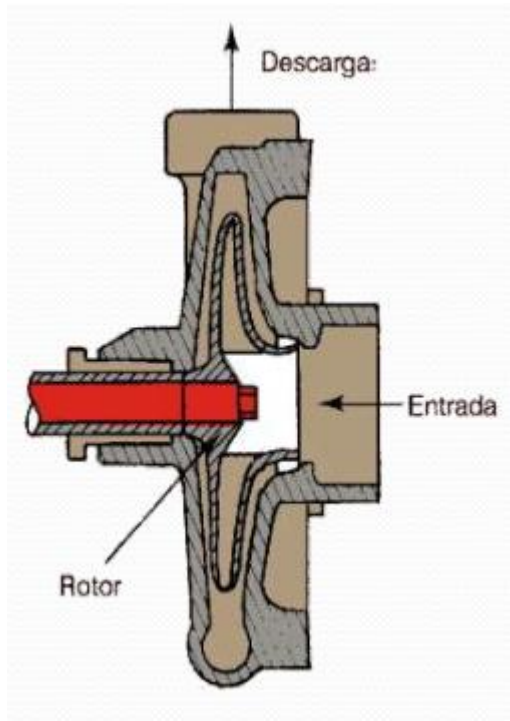
FECHADO



Corte de uma bomba centrífuga horizontal de simples estágio

Classificação segundo a trajetória do líquido no rotor

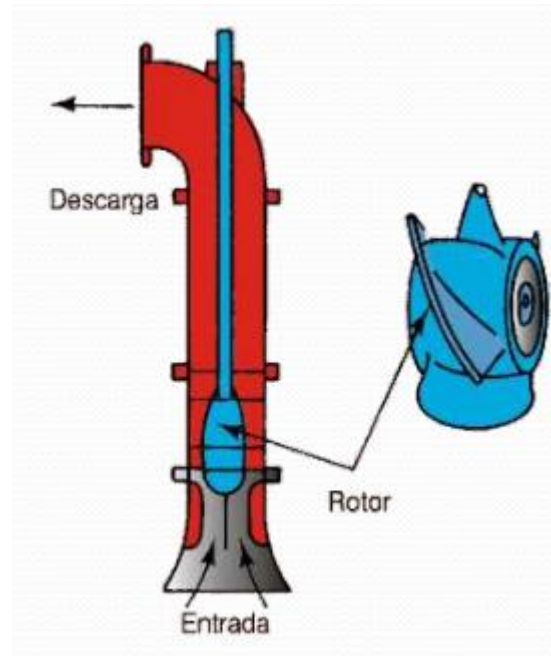
Fluxo Radial



- Sucção simples
- Sucção dupla*

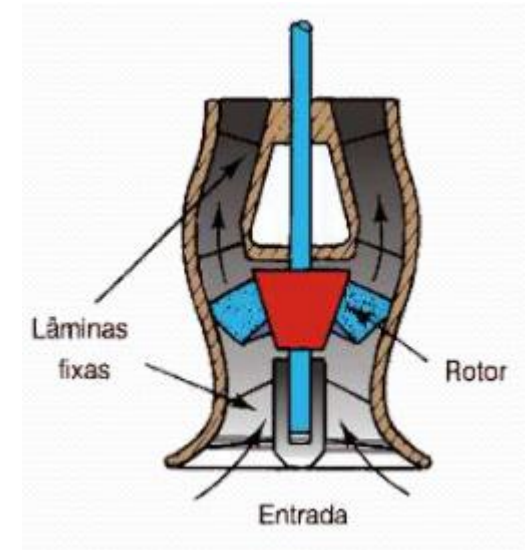
Grande altura de elevação
Vazão relativamente pequena

Fluxo misto



Altura de elevação relativ. pequena
Vazão grande

Fluxo axial



Pequena altura de elevação
Vazão elevada

Velocidade específica (N_q)

- Parâmetro importante na seleção do tipo de bomba
- Representa a velocidade de rotação da bomba modelo, trabalhando com vazão e altura manométrica iguais a unidade.

Com base na teoria da semelhança dinâmica, tem-se:

$$N_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

N: rotação da bomba (rpm)

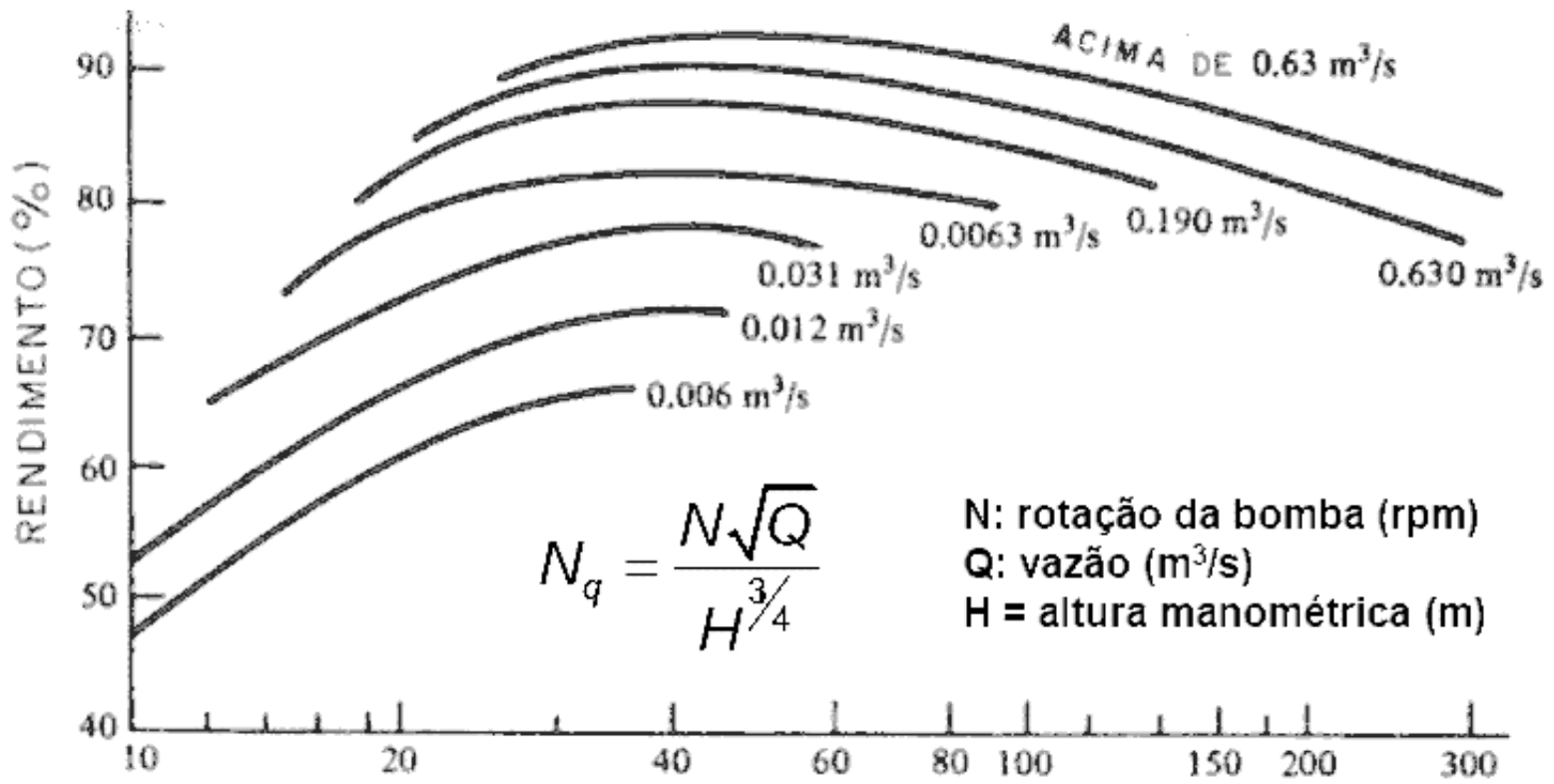
Q: vazão (m³/s)

H = altura manométrica (m)

Faixa de operação das turbobombas com relação a velocidade específica:

Tipo de bomba	Velocidade específica
Radial	10-90
Mista	40-160
Axial	150-420

Fonte: Heller



$$N_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

N: rotação da bomba (rpm)
 Q: vazão (m³/s)
 H = altura manométrica (m)

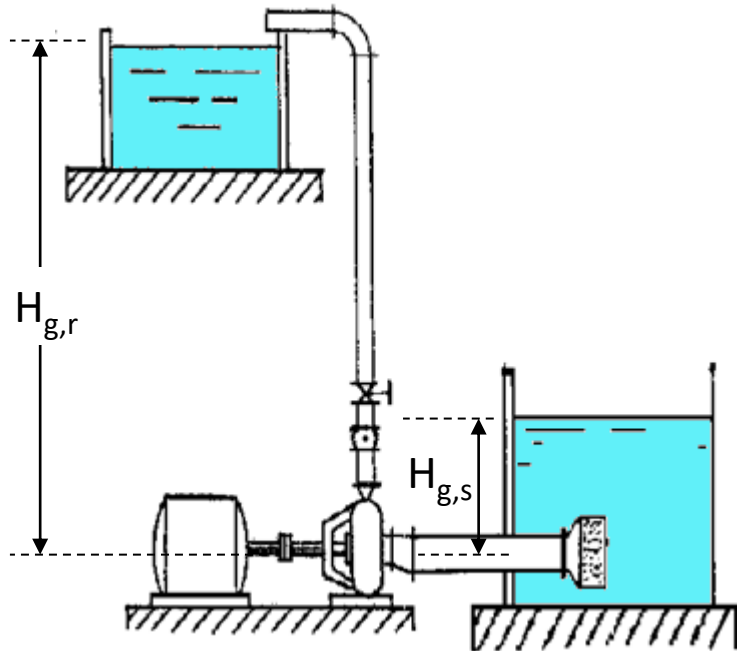
ROTAÇÃO ESPECÍFICA $N_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$



TIPOS DE ROTORES

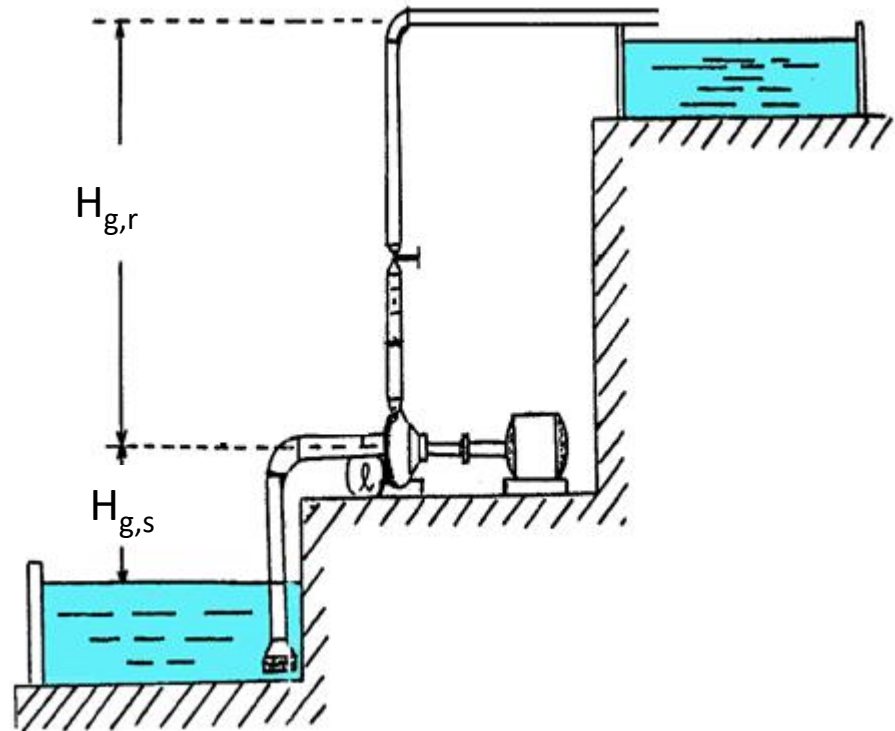
Classificação de acordo com a disposição do conjunto motor-bomba

Localização da bomba em relação ao nível de água



Bomba afogada

$$H_{g,s} < 0$$



Bomba não afogada

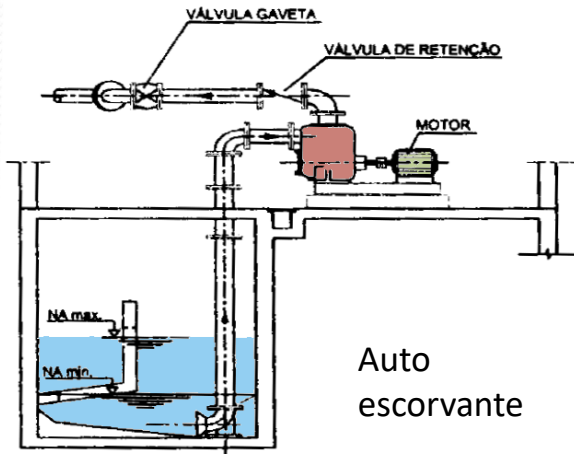
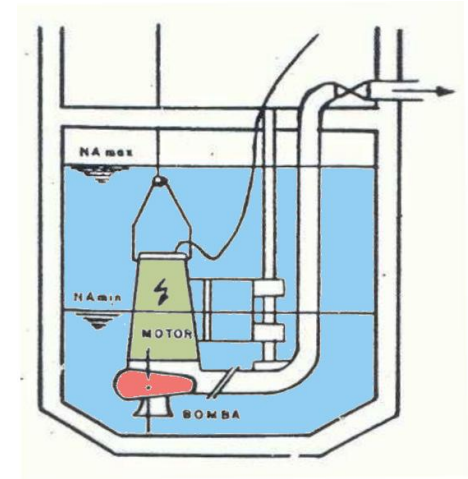
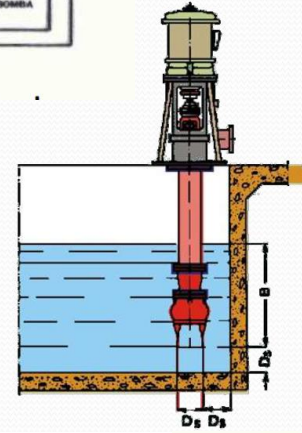
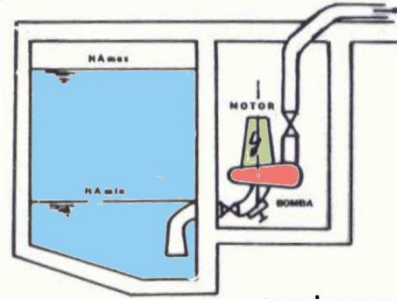
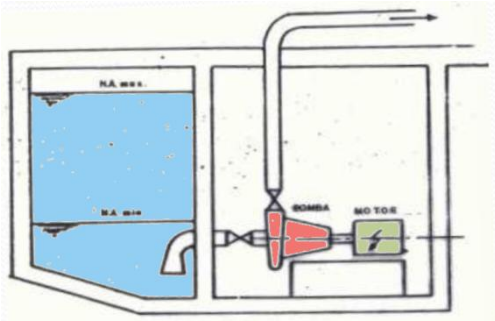
$$H_{g,s} > 0$$

Conjunto motor-bomba

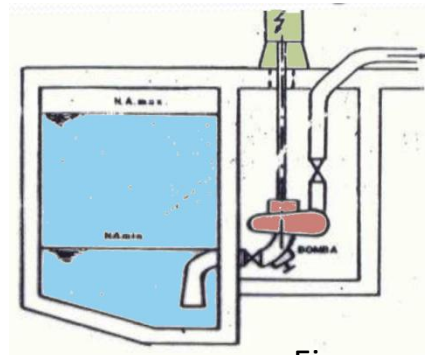
de eixo horizontal

de eixo vertical

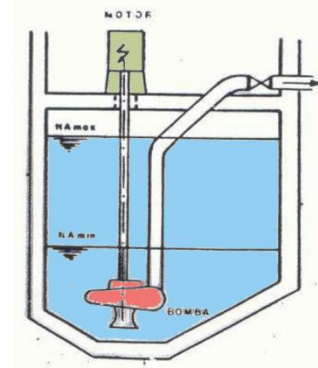
submerso



Auto
escorvante

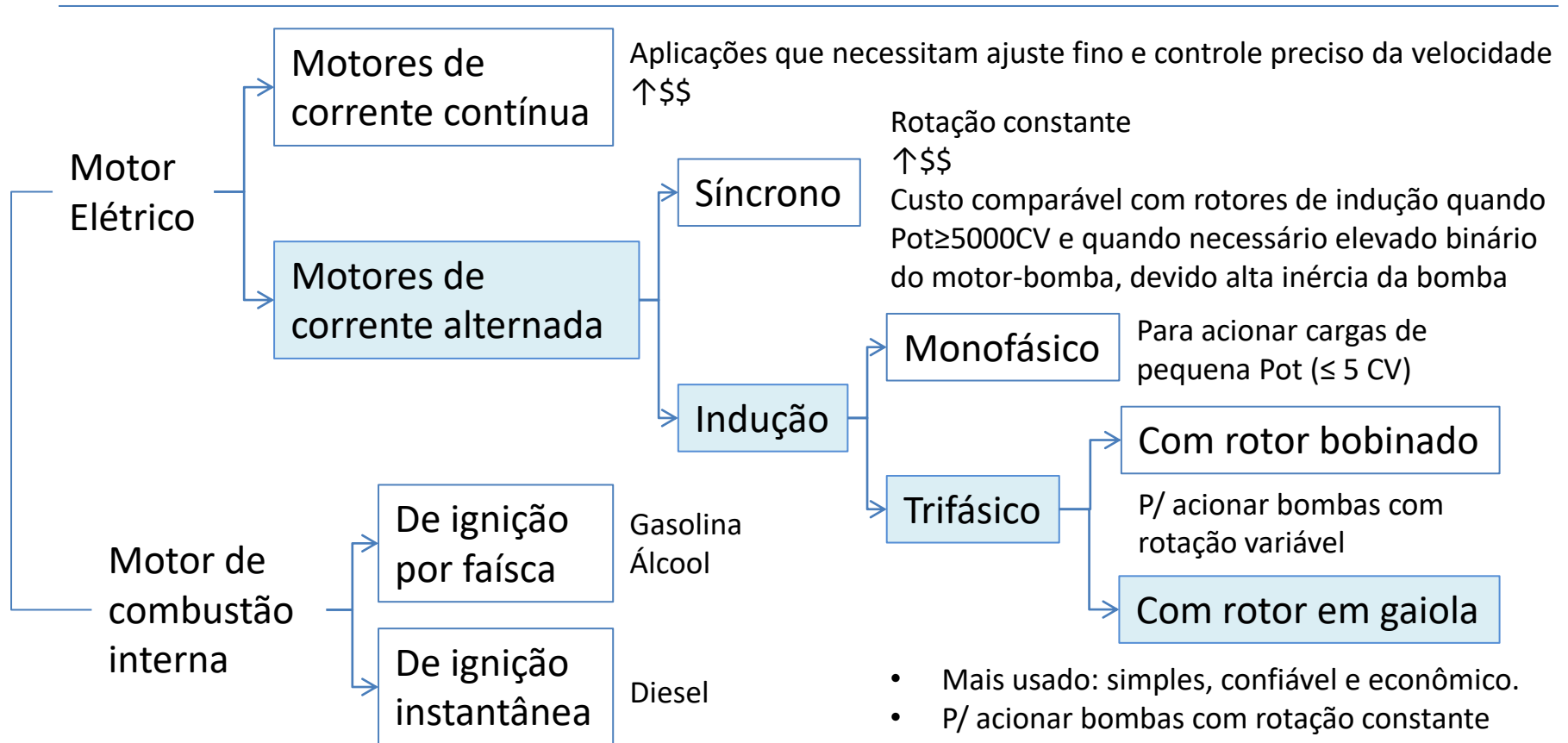


Eixo
prolongado



Bomba submersa

Motores

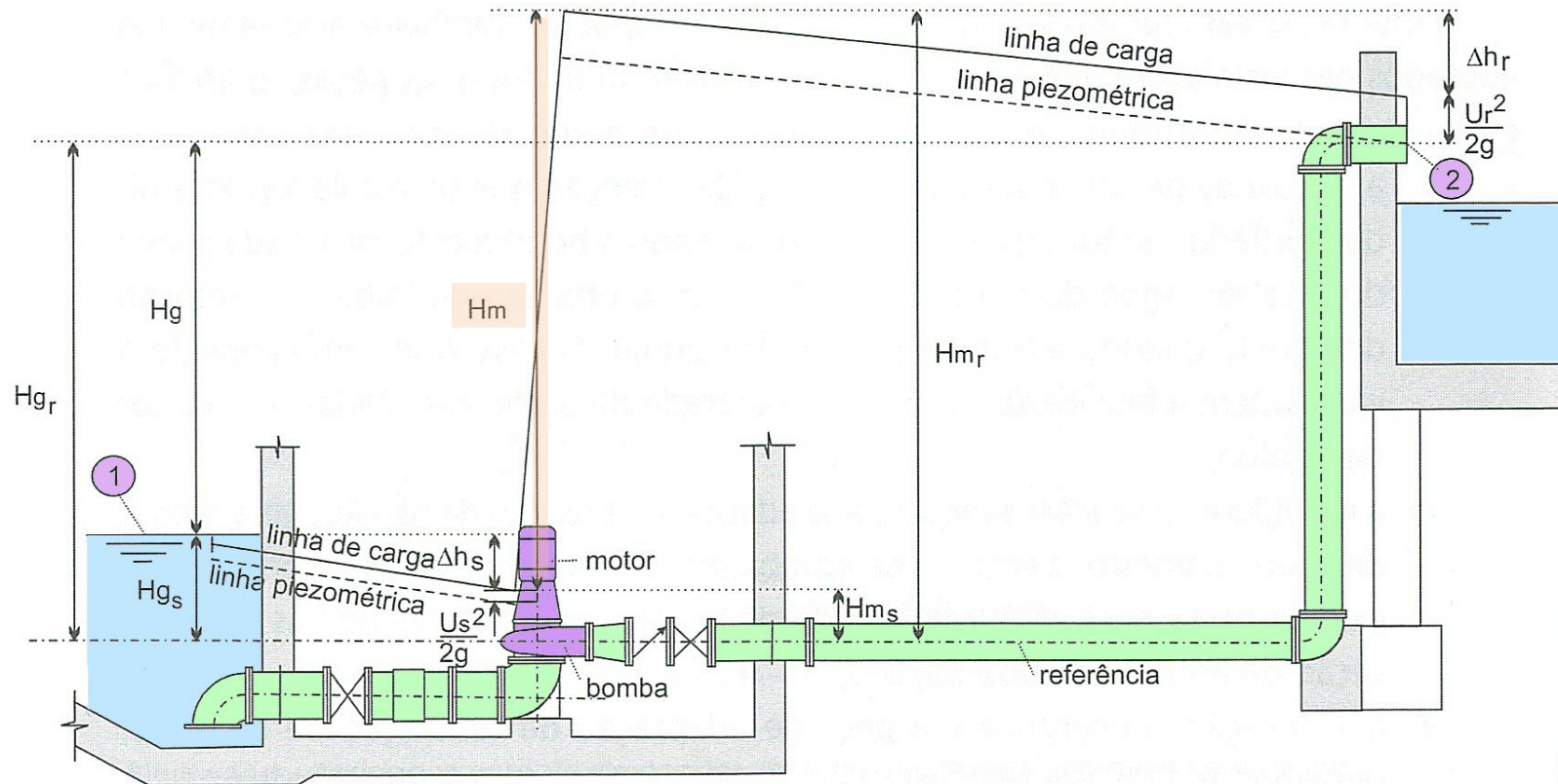


- Mais usado: simples, confiável e econômico.
- P/ acionar bombas com rotação constante (ajuste da Q afluyente e Q recalque depende do cuidado na seleção do conjunto elevatório e do bom dimensionamento do poço de sucção).
- Atualmente: uso conjunto com inversor de frequência para variar rotação.

Potência nominal dos motores de acionamento, ver NBR 5432

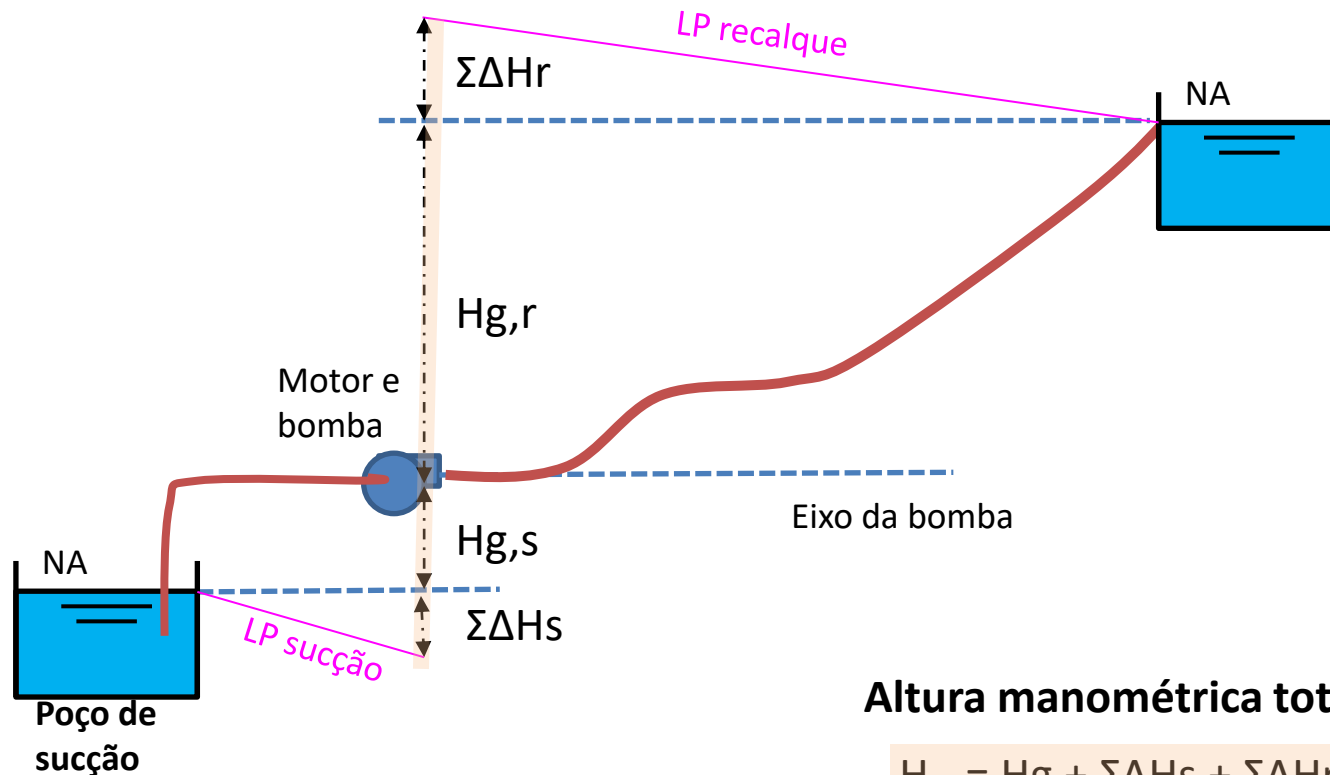
Altura manométrica

Altura manométrica representa a energia absorvida pelo líquido em escoamento por unidade de peso deste, ao atravessar a bomba



Aplicando Bernoulli para os pontos 1 e 2, tomando o eixo da tubulação horizontal como referência:
 $H_m = H_g + \text{perdas}$

Sistema de recalque com bomba **horizontal não afogada**



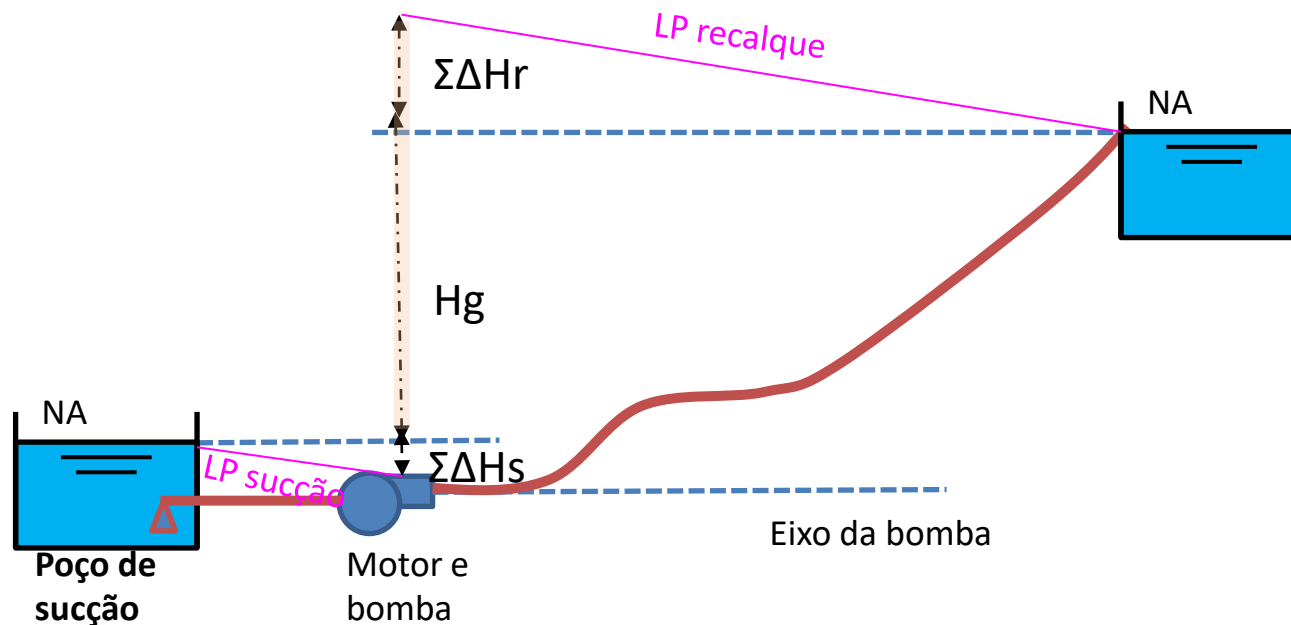
Altura manométrica total (H_m)

$$H_m = H_g + \Sigma\Delta H_s + \Sigma\Delta H_r$$

$$H_g = H_{g,s} + H_{g,r}$$

$$H_{g,s} > 0$$

Sistema de recalque com bomba **horizontal afogada**



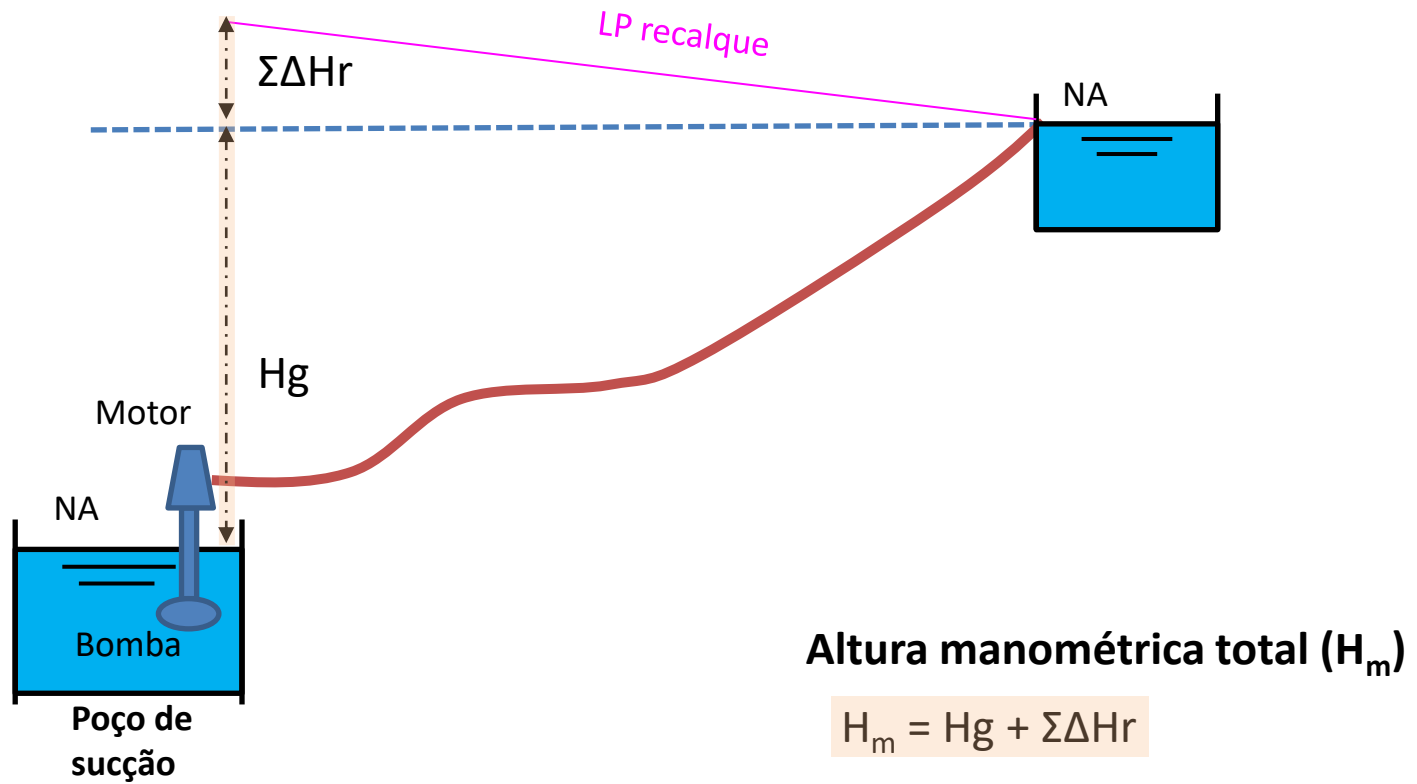
Altura manométrica total (H_m)

$$H_m = H_g + \Sigma\Delta H_s + \Sigma\Delta H_r$$

$$H_g = H_{g,s} + H_{g,r}$$

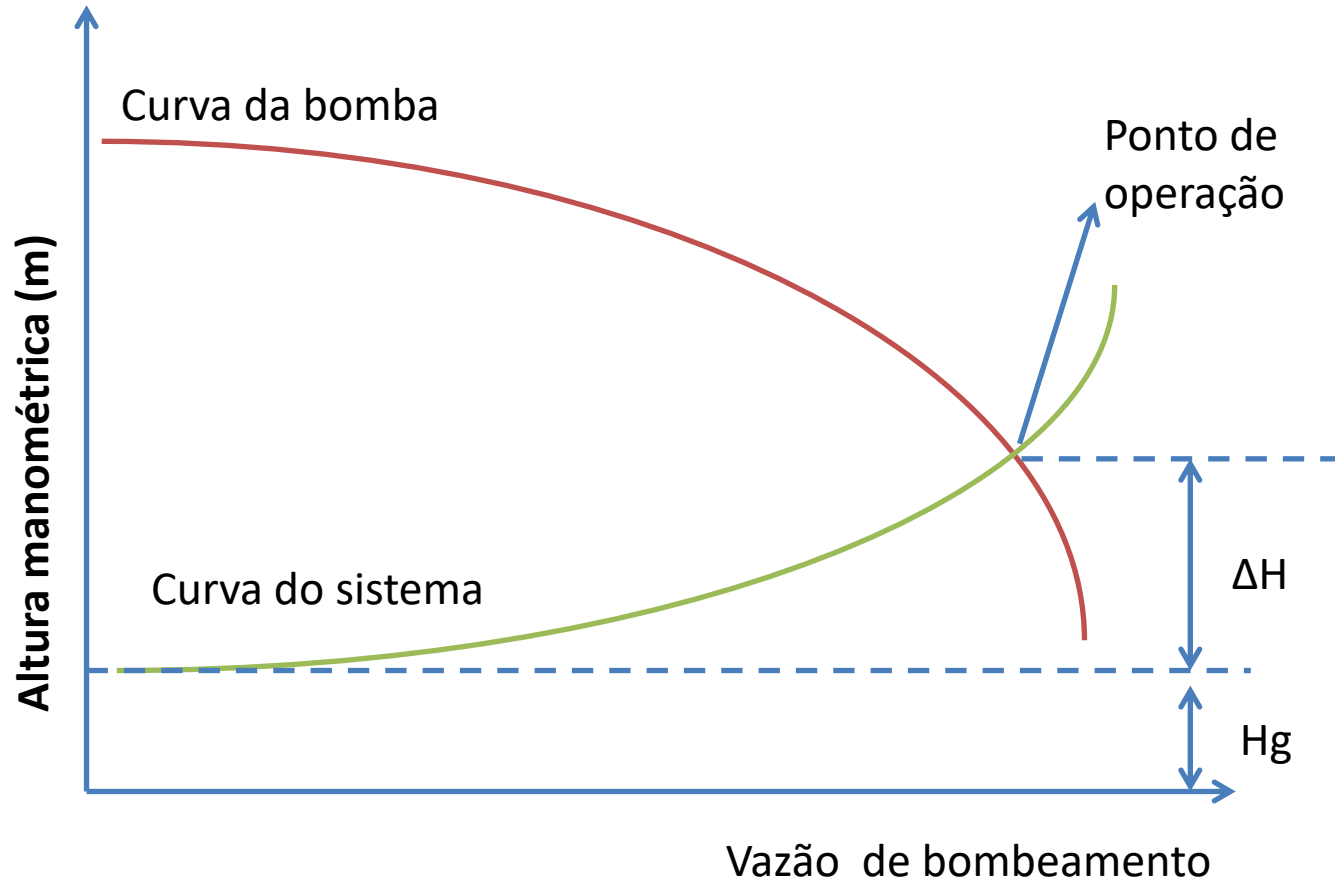
$$H_{g,s} < 0$$

Sistema de recalque com bomba **vertical afogada**



Curva característica do sistema elevatório

E ponto de funcionamento da bomba



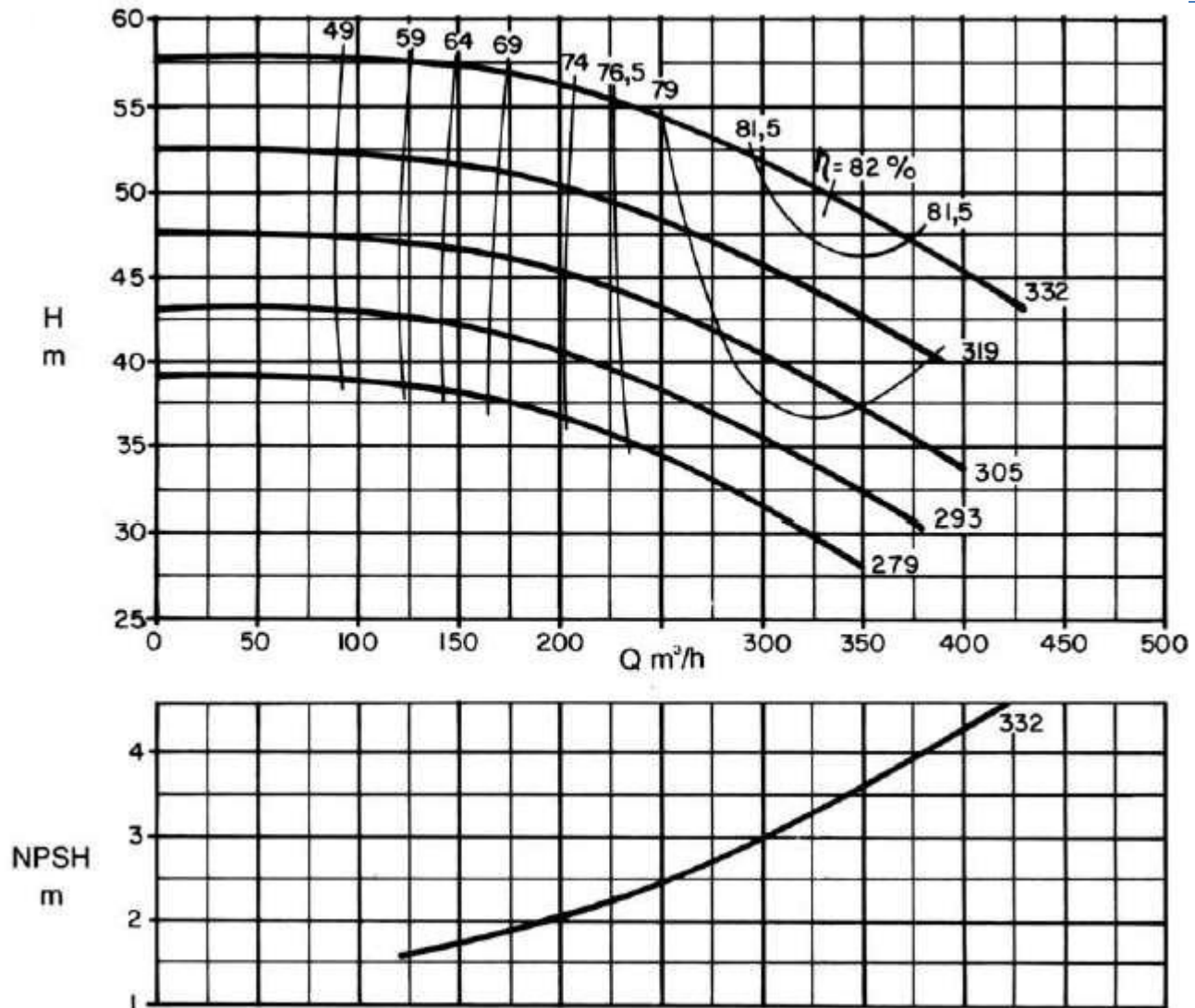
Exercício



Considere os dados abaixo de uma elevatória e adutora por recalque de água bruta:

- Cota do nível d'água no poço de sucção: 708 m
 - Cota do eixo da bomba: 711 m
 - Cota da tubulação com saída livre na chegada a ETA: 749 m
 - Adutora: 2100 m com tubulação PE80 \varnothing 355 mm PN 8 ($\varphi_i = 312,8$ mm, $k=0,06$ mm)
 - Sucção com tubulação FD \varnothing 300 mm com válvula de pé ($K=1,75$) com crivo ($K=0,75$) e curva de 90 graus ($K=0,40$). Desprezar as perdas sem dados indicados (barrilete, etc.)
 - Pressão de vapor no local igual a 0,43 mca e pressão atmosférica 9,47 mca
 - Instalação existente com uma bomba (e reserva) com rotor de 332 mm e 1750 rpm
 - Considerar rendimento do motor igual a 90% (e da bomba conforme catálogo do fabricante)
 - Existe espaço disponível para instalar uma segunda bomba de mesmo modelo
- a) Qual a vazão e a altura manométrica atendida atualmente com o funcionamento de uma bomba?
- b) O que aconteceria com a vazão e com a altura manométrica se a cota do nível d'água no poço de sucção fosse maior? E se fosse menor?

Catálogo do fabricante da bomba existente:



Cavitação - Descrição

Propriedade do fluido:

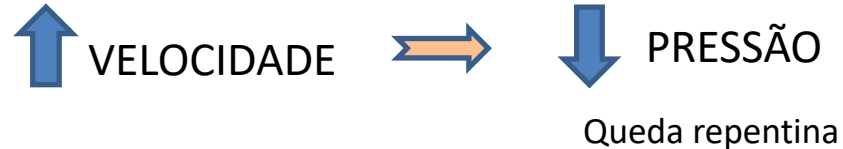
Vaporiza a uma determinada condição de temperatura e pressão.

Teorema de Bernoulli:

Fluido escoando, ao ser acelerado, tem uma redução de pressão para que sua energia mecânica se mantenha constante

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h$$

Em certos pontos:
**Vertedor, bomba hidráulica,
turbina, válvula, bocal**



Se pressão cai abaixo da
pressão de vapor

Origina

VAPOR

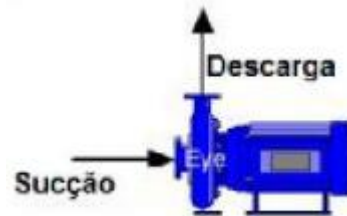
Quando atinge zonas de
alta pressão

IMPLOÇÃO

Brusca variação de pressão

Altas velocidades ao atingir superfície do rotor
(altas pressões em áreas reduzidas).

Se pressão for maior que resistência do material do rotor → Desgaste



Cavitação

PROBLEMAS:

- Causa dano ao rotor
- Provoca ruído e vibração na bomba
- Reduz capacidade e eficiência da bomba

Causas:

- altura inadequada da sucção (problema geométrico)
- velocidade de escoamento excessiva (problema hidráulico)
- escorva incorreta (problema operacional)



Potência

Potência hidráulica

Trabalho realizado sobre o líquido ao passar pela bomba em um segundo.

$$P_H = \gamma Q H_m$$

P_H – Potência hidráulica (kW; N.m/s)

γ – Peso específico da água (N/m³)

Q – Vazão (m³/s)

H_m – Altura manométrica total (m)

Para que o líquido receba a potência requerida P_H , a bomba deve receber uma potência superior à potência hidráulica, pois há perdas no interior da bomba.

Eficiência ou Rendimento da bomba

$$\eta_B = \frac{P_H}{P_B}$$

Potência da bomba

P_B – Potência consumida pela bomba (kW; N.m/s)

Potência requerida pela bomba ao motor

Potência nominal do motor

$$P_B = \frac{P_H}{\eta_B}$$

Eficiência ou Rendimento do motor

$$\eta_M = \frac{P_B}{P}$$

P_B – Potência que o motor transmite

P – Potência que o motor recebe da fonte de energia

Potência do conjunto motobomba

$$P = \frac{P_B}{\eta_M} = \frac{P_H}{\eta_B \eta_M} = \frac{\gamma Q H_m}{\eta_B \eta_M}$$

Potência

Potência motriz (potência do conjunto motor-bomba) - potência fornecida pelo motor para que a bomba eleve uma vazão Q a uma altura H.

$$P = (\gamma \cdot Q \cdot H) / \eta$$

P = potência do conjunto motor-bomba em Kgf.m/s,
 γ = peso específico do líquido.
 Q = vazão em m³/s,
 H = altura manométrica em m,
 η = rendimento total (= $\eta_b \cdot \eta_m$).

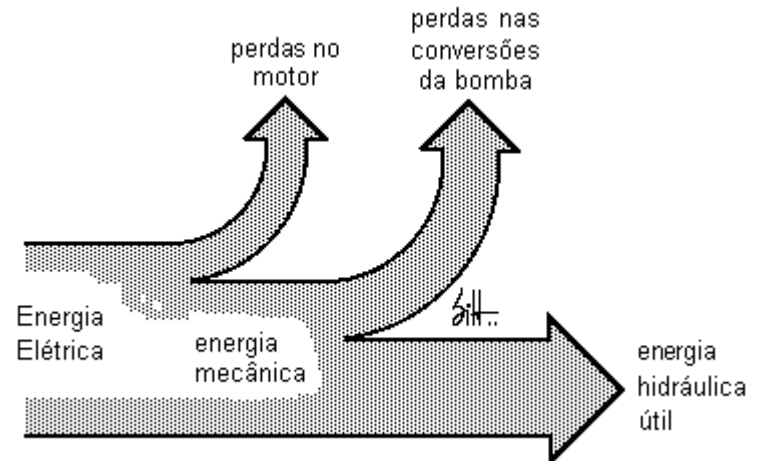


Tabela VI.1 - Rendimentos hidráulicos aproximados das bombas centrífugas

Q (l/s)	5,0	7,5	10	15	20	25	30	40	50	80	100	200
h_b (%)	55	61	64	68	72	76	80	83	85	86	87	88

Tabela VI.2 - Rendimentos mecânicos médios

CV	1	2	3	5	6	7,5	10	15
%	72	75	77	81	82	83	84	85
CV	20	30	40	60	80	100	150	250
%	86	87	88	89	89	90	91	92

Fonte:

Curvas características das bombas centrífugas

As bombas centrífugas podem trabalhar à mesma rotação, sob diferentes condições de vazão e de altura manométrica.

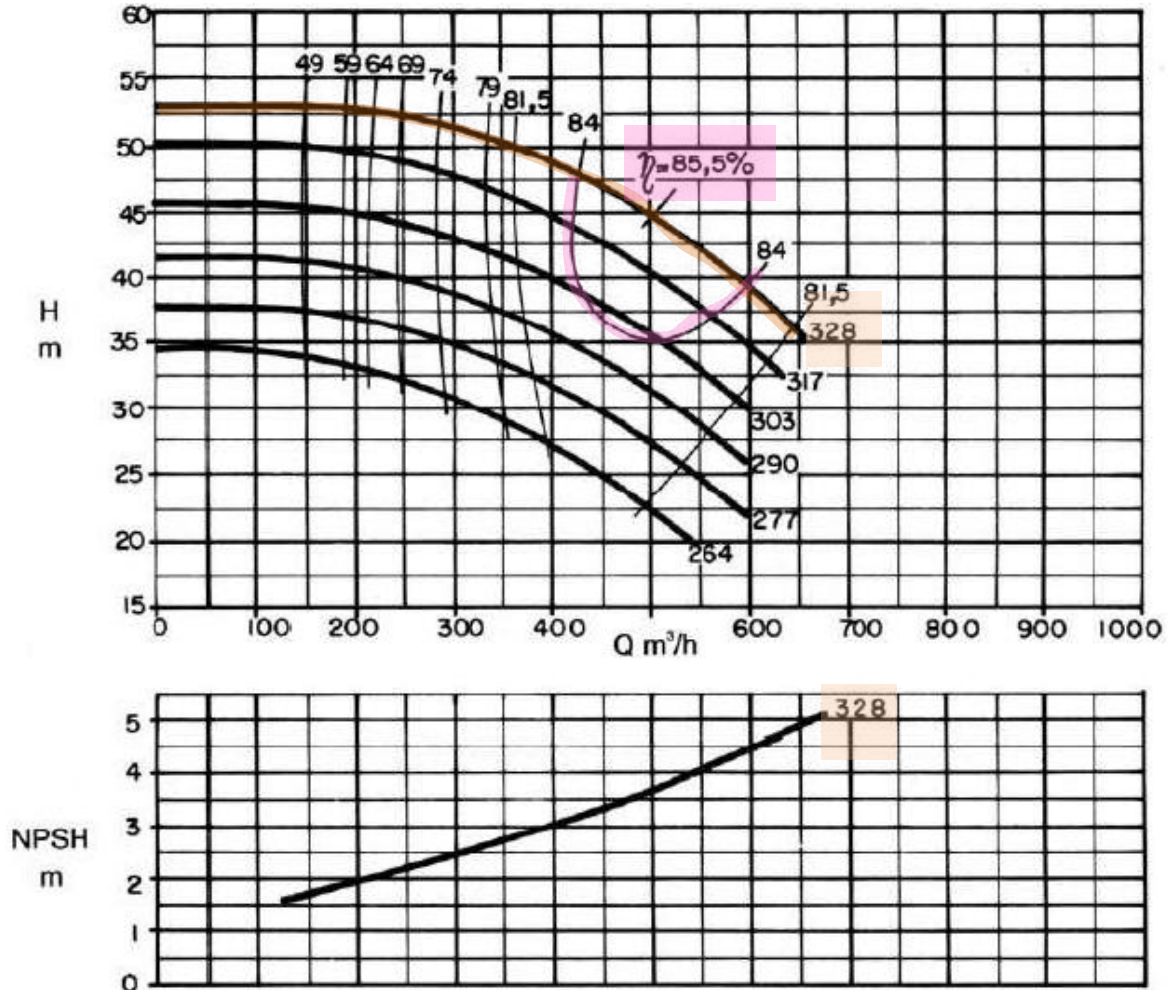
Para diversos ϕ do rotor:

- Q x Altura manométrica
- Q x Potência consumida
- Q x Eficiência da bomba
- Q x NPSH

Cada bomba: Par [Q,H] – máximo rendimento

À medida que se afasta do par ótimo Q,H → rendimento cai

Curvas fornecidas pelo fabricante

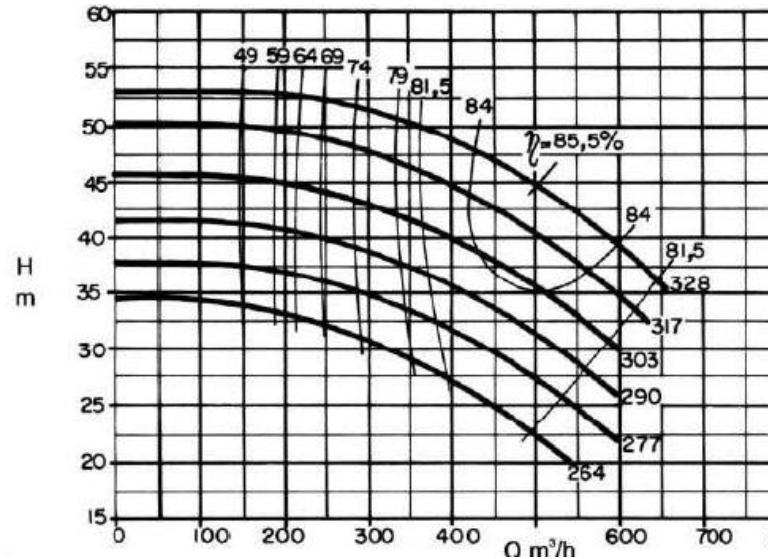


Característica do sistema elevatório

Bomba centrífuga

PONTO ÓTIMO DE OPERAÇÃO

Eficiência máxima



- As cargas radiais sobre os mancais estão a um mínimo no ponto ótimo
- $Q_{\text{bombamento}} > Q_{\text{ponto ótimo}} \rightarrow$ **Pressão absoluta disponível** necessária para se evitar a cavitação **aumenta**, conseqüentemente, a cavitação pode tornar-se um problema.
- $Q_{\text{bombamento}} \ll Q_{\text{ponto ótimo}} \rightarrow$ recirculação do líquido bombeado dentro do rotor \rightarrow vibração e perdas hidráulicas na bomba \rightarrow cavitação
- Para minimizar ou evitar problemas citados:
Vazão entre 60% a 120% da $Q_{\text{ponto ótimo}}$

Cont. exercício



c) Verificar Q de funcionamento da bomba com relação a Q ponto ótimo

NPSH – Carga de sucção positiva (*Net Positive Suction Head*)

NPSH_d: É uma característica da instalação em que a bomba opera, e da pressão disponível do líquido no lado da sucção.

No caso de bombas, o ponto mais crítico da cavitação ocorre na sucção.

Disponível no sistema

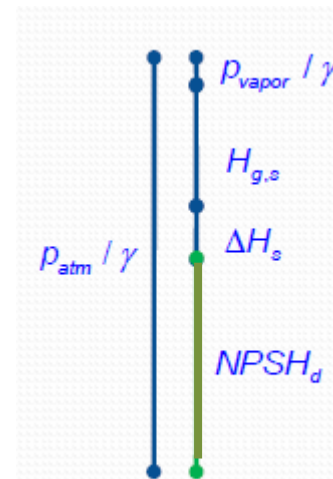
$$NPSH_d = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{vapor}}{\gamma} - H_{g,s} - \Sigma\Delta H_s$$

↳ Pressão de vapor no local

- “NPSH” representa a energia em altura absoluta do líquido no flange de sucção da bomba acima da pressão de vapor deste líquido na temperatura de bombeamento, referenciada à linha de centro da bomba.
- NPSH é calculado para impor limitações às condições de sucção, de modo a manter a pressão na entrada do rotor da bomba acima da pressão de vapor do líquido bombeado.

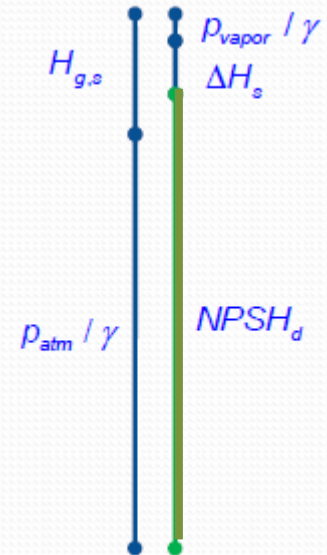
Bomba não afogada

$$H_{g,s} > 0$$



Bomba afogada

$$H_{g,s} < 0$$



Requerida pela bomba

$NPSH_r$

- Fornecida pelo fabricante
- Depende de elementos de projeto da bomba
- Depende da vazão
- Há casos que se desconhece a curva NPSH

Gráfico

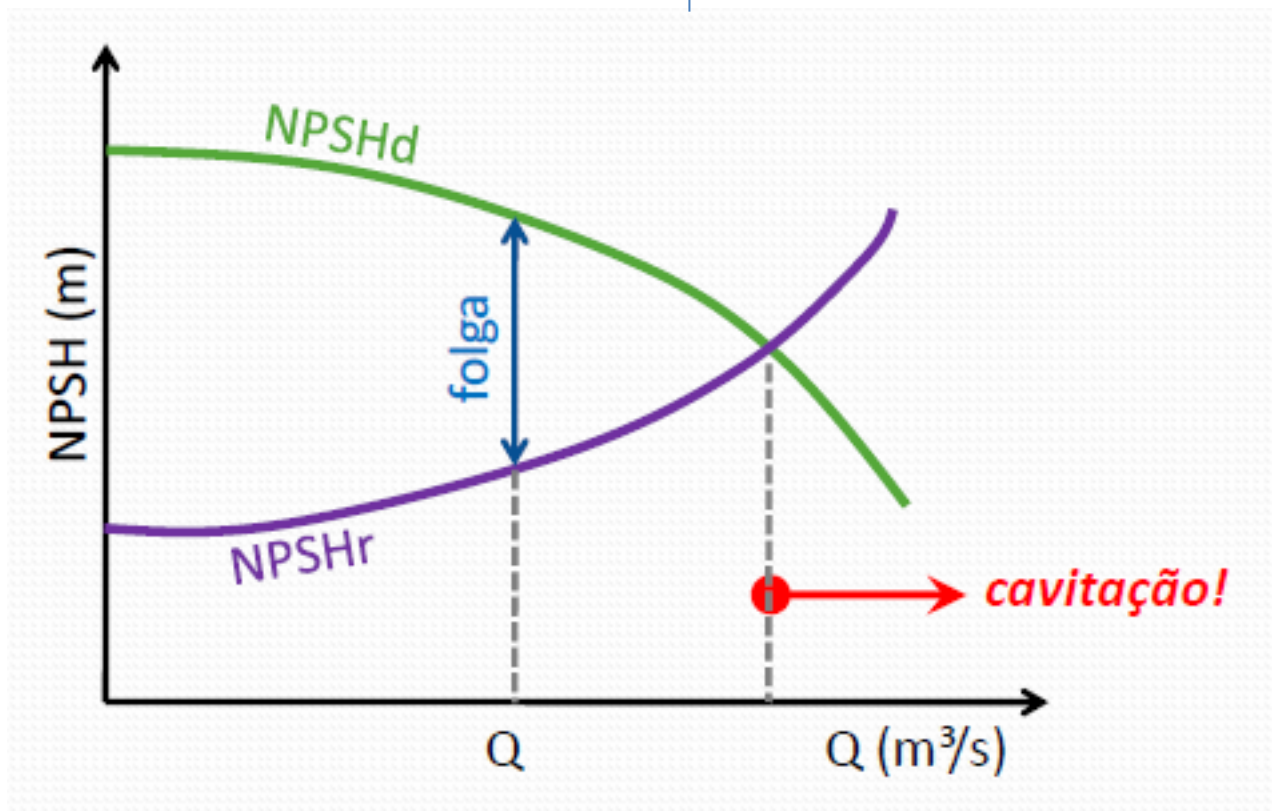
Coefficiente de cavitação
(Coefficiente de Thoma)

Funcionamento da bomba sem cavitação

$$\text{NPSH}_d > \text{NPSH}_r$$

Requerido pela bomba

Disponível no sistema



Folga mínima:
20% e 0,5m
[NBR 12214/92]

Para $Q_{\text{máx}}$ em cada
bomba do sistema:
1m ou 30%

Melhor:
1,5m ou 35%

Propriedades físicas da água

NBR 12215/92

Temperatura (°C)	Pressão de vapor (Pa)	Massa específica (kg/m ³)	Viscosidade cinemática (10 ⁻⁶ m ² /s)
0	611	999,8	1,793
5	872	999,9	1,519
10	1228	999,6	1,309
15	1704	999,0	1,141
20	2337	998,2	1,010
25	3166	997,0	0,896
30	4241	995,6	0,802
35	5622	993,9	0,727
40	7375	992,2	0,661
45	9584	990,2	0,604
50	12335	998,0	0,556

$1 \text{ kgf/cm}^2 = 98066,52 \text{ Pa} = 0,98 \text{ Bar} = 735,56 \text{ mmHg}$

Cont. Exercício

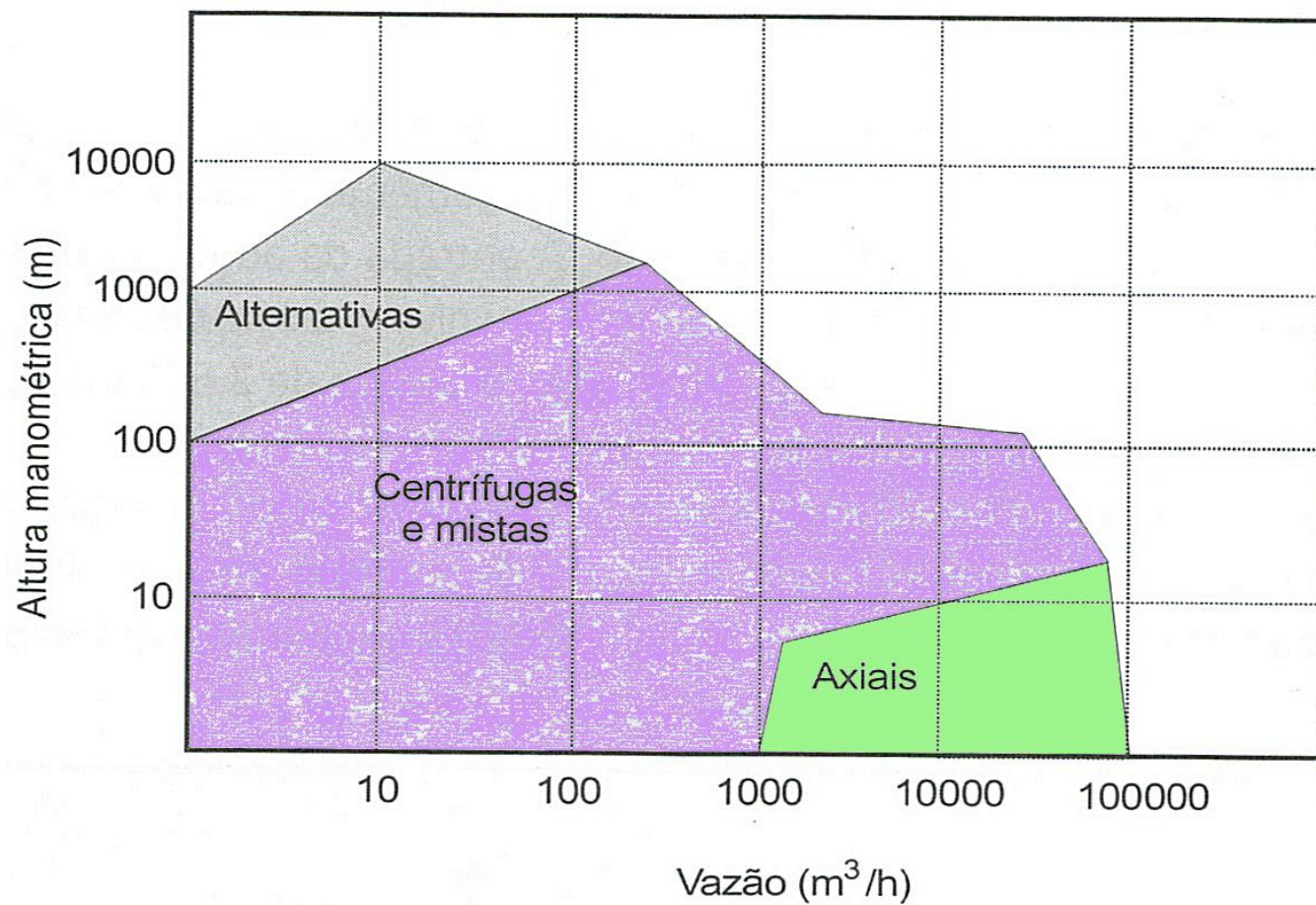


d) O NPSH está adequado? Caso contrário, o que poderia ocorrer na instalação e que medidas corretivas poderiam ser adotadas?

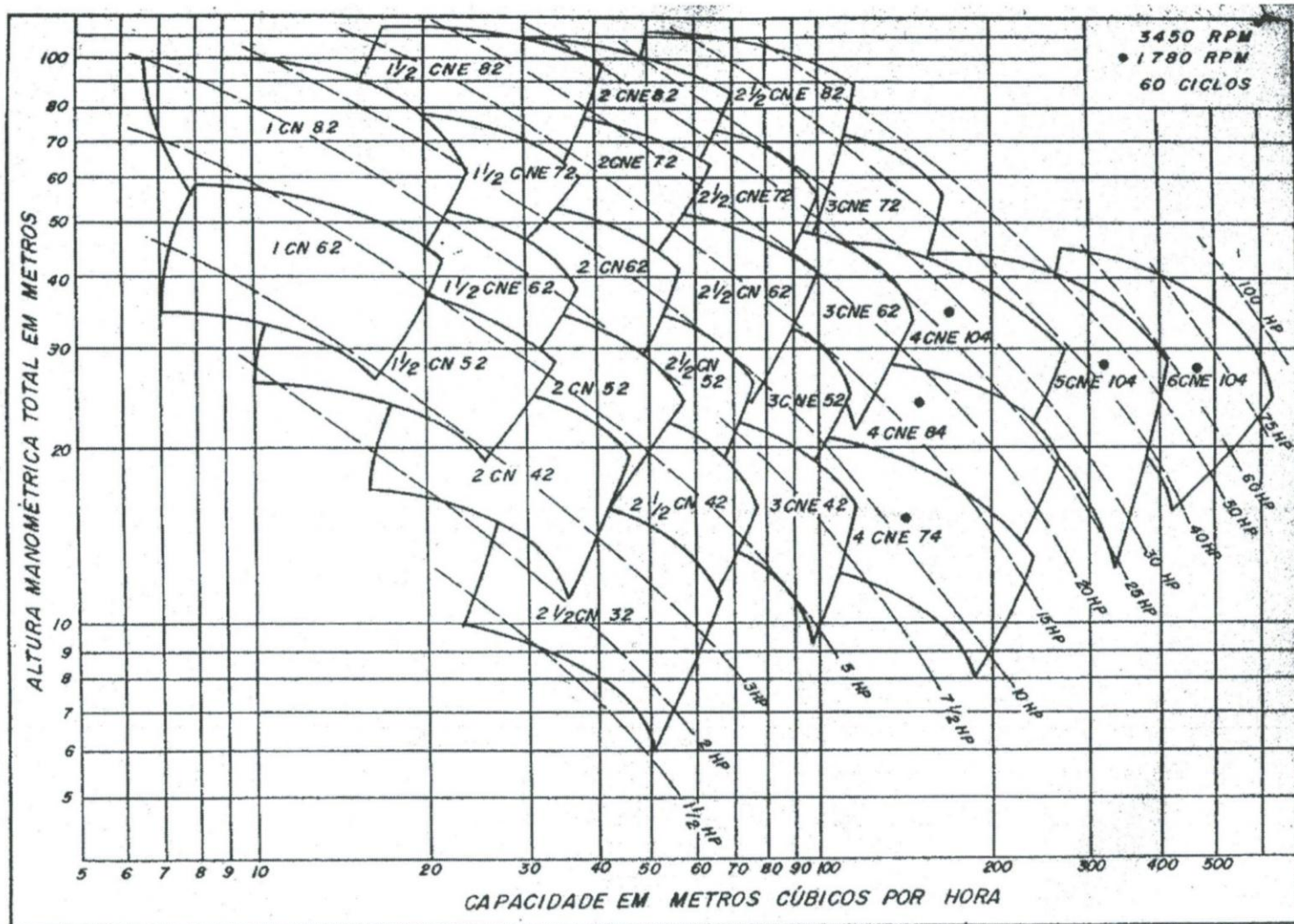
Escolha da bomba

- Ponto de operação: intersecção das curvas características do sistema com da bomba
- Escolha da bomba: pesquisar nas curvas características das bombas disponíveis no mercado aquela que eleva a vazão de projeto à sua respectiva altura manométrica, operando o mais próximo possível de seu ponto de melhor eficiência, ou seja, máximo rendimento.
 - Q_{bomba} não saia dos limites de 60% e 120% da vazão correspondente ao ponto de maior rendimento
- Família de curvas:
 - Deve-se considerar: Variação do nível do poço de sucção, variação da perda de carga pelo envelhecimento da tubulação

Orientação:



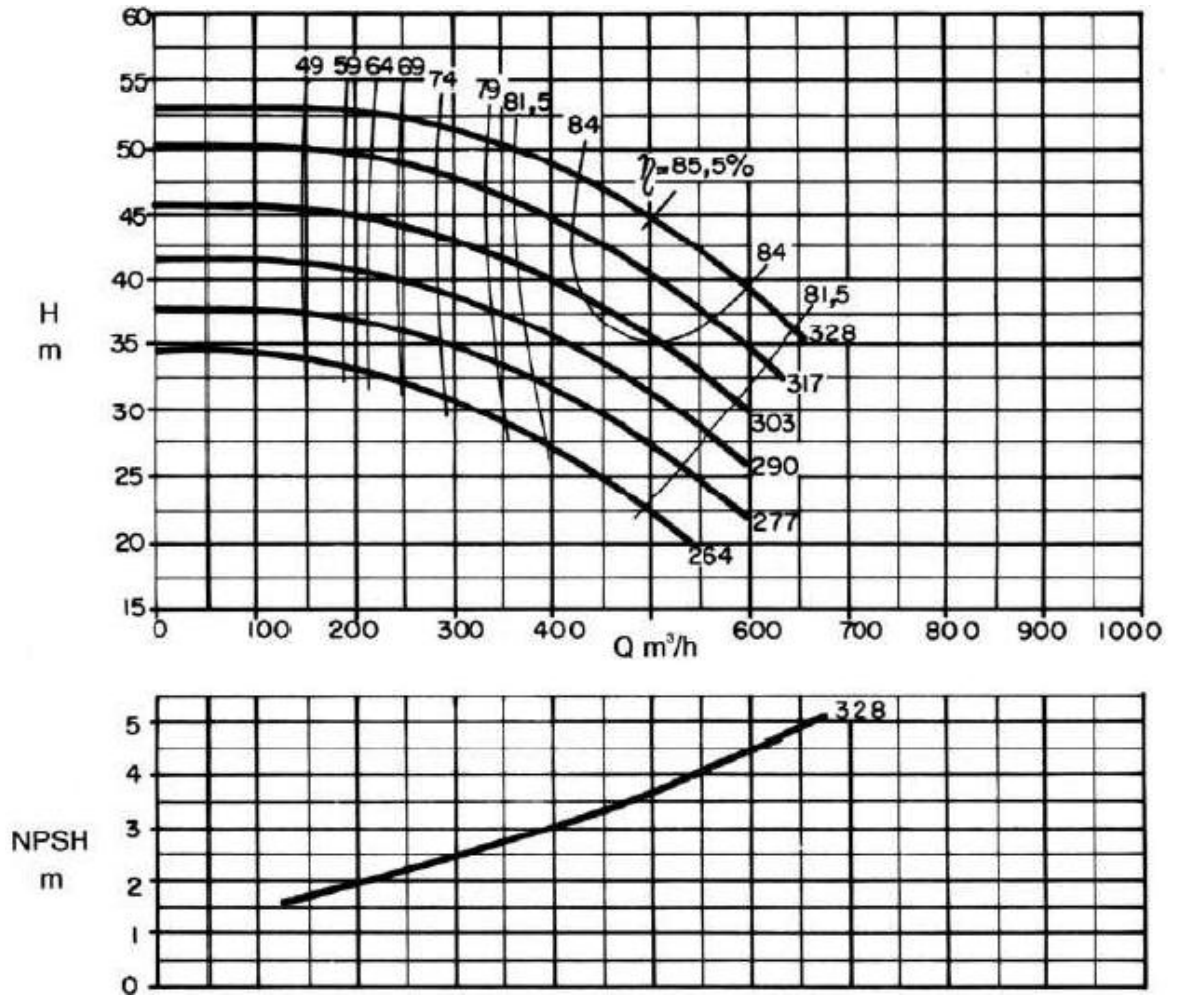
Catálogo do fabricante



Curvas fornecidas pelo fabricante para cada modelo

Cada bomba: Par [Q,H]
– máximo rendimento

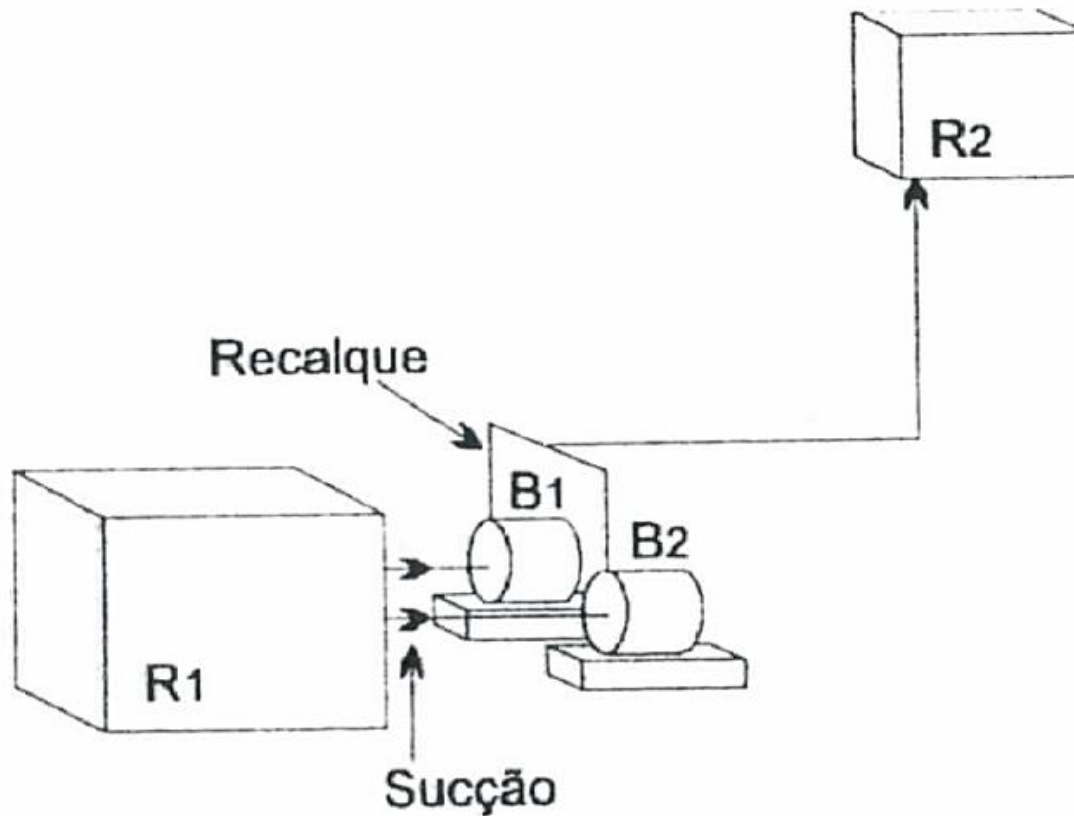
À medida que se
afasta do par
ótimo Q,H →
rendimento cai



Operação do sistema elevatório

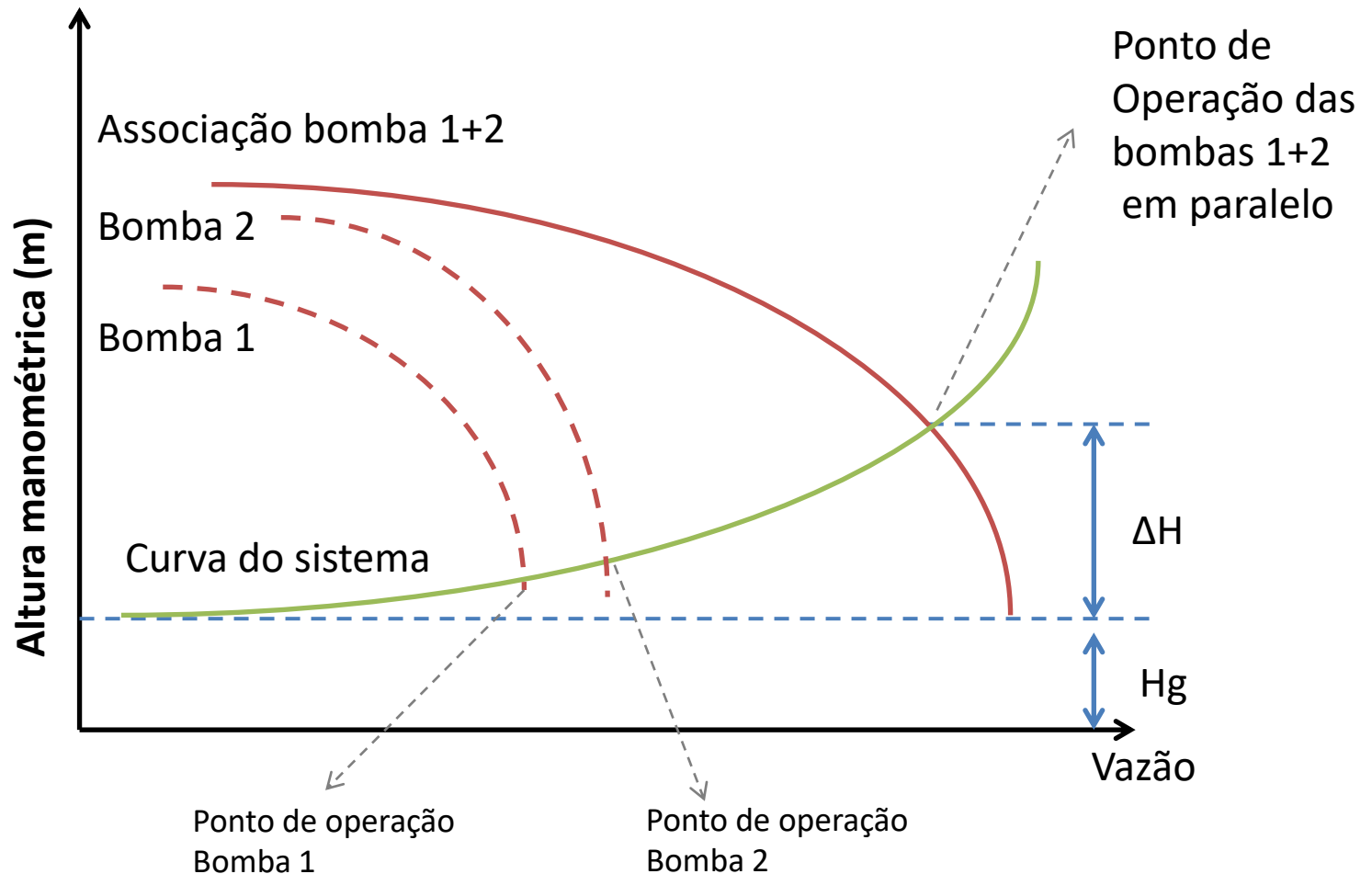
- Bombas em paralelo
- Bombas em série

Bombas em paralelo

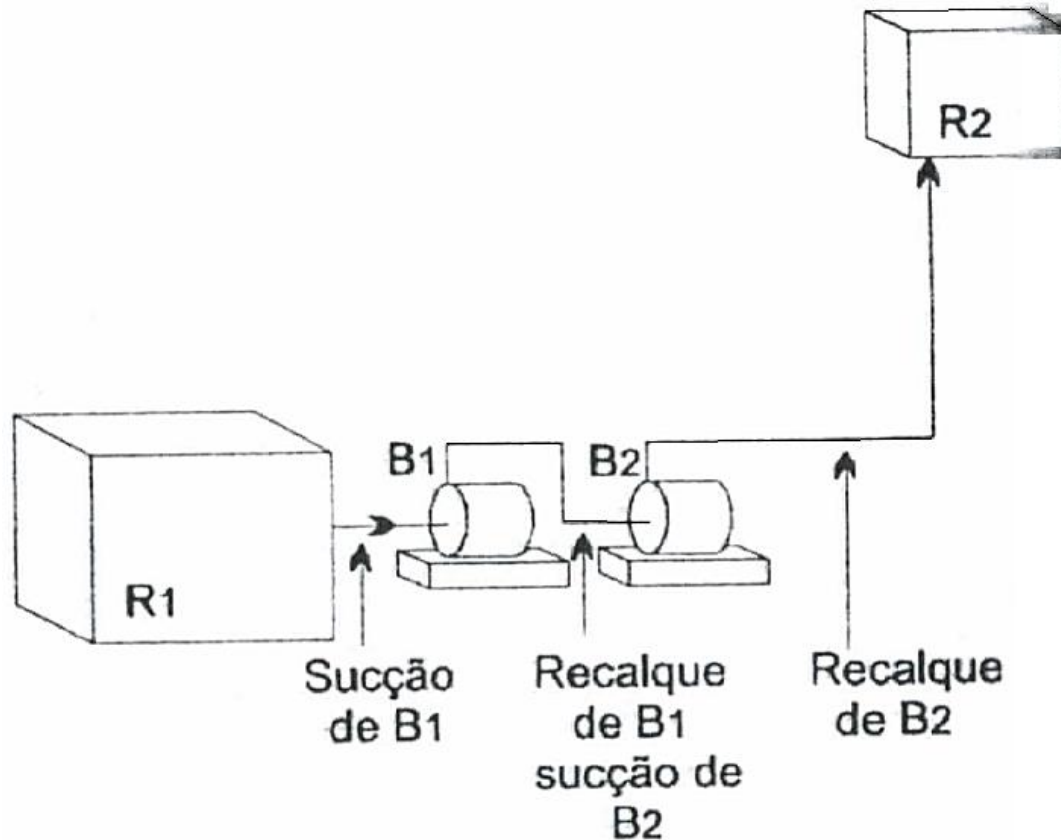


Bombas em paralelo

As vazões são somadas

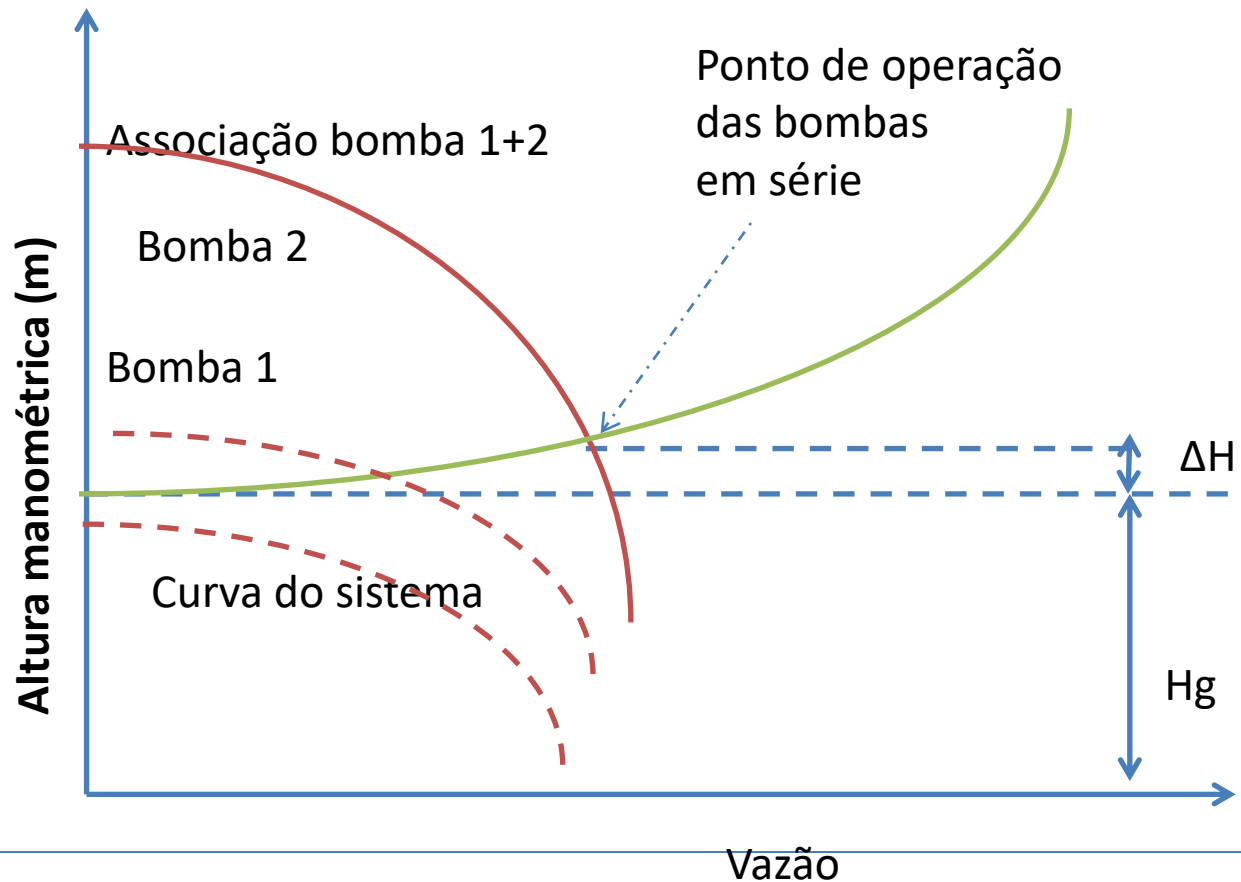


Bombas em série



Bombas em série

As alturas manométricas são somadas



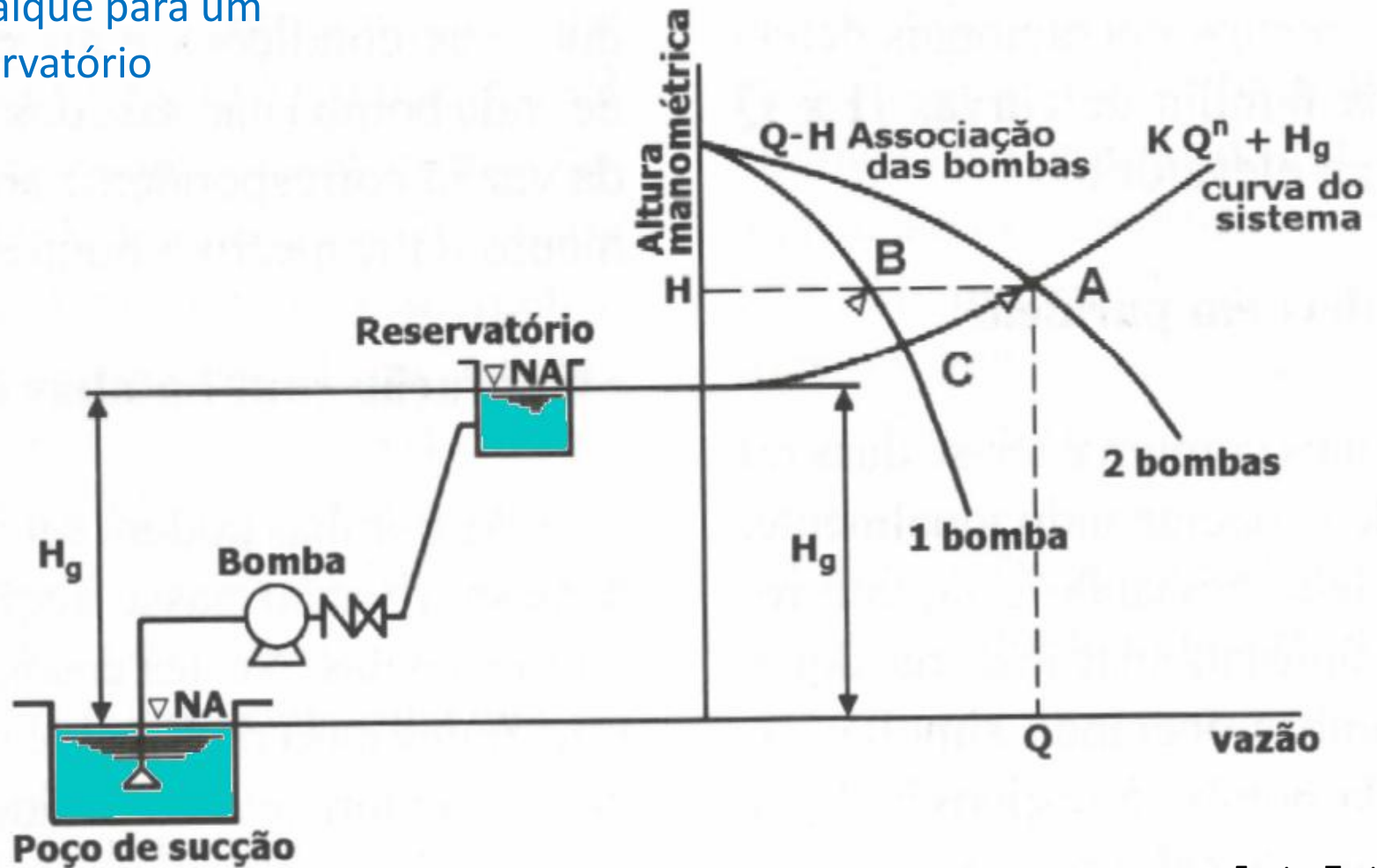
Cont. Exercício



- e) E com a instalação de uma segunda bomba igual em paralelo?
- f) Verificar para os dois casos qual seria o gasto médio anual de energia considerando a adução 20 h/dia e uma tarifa de 250 R\$/MWh.
- g) Comente os resultados obtidos.

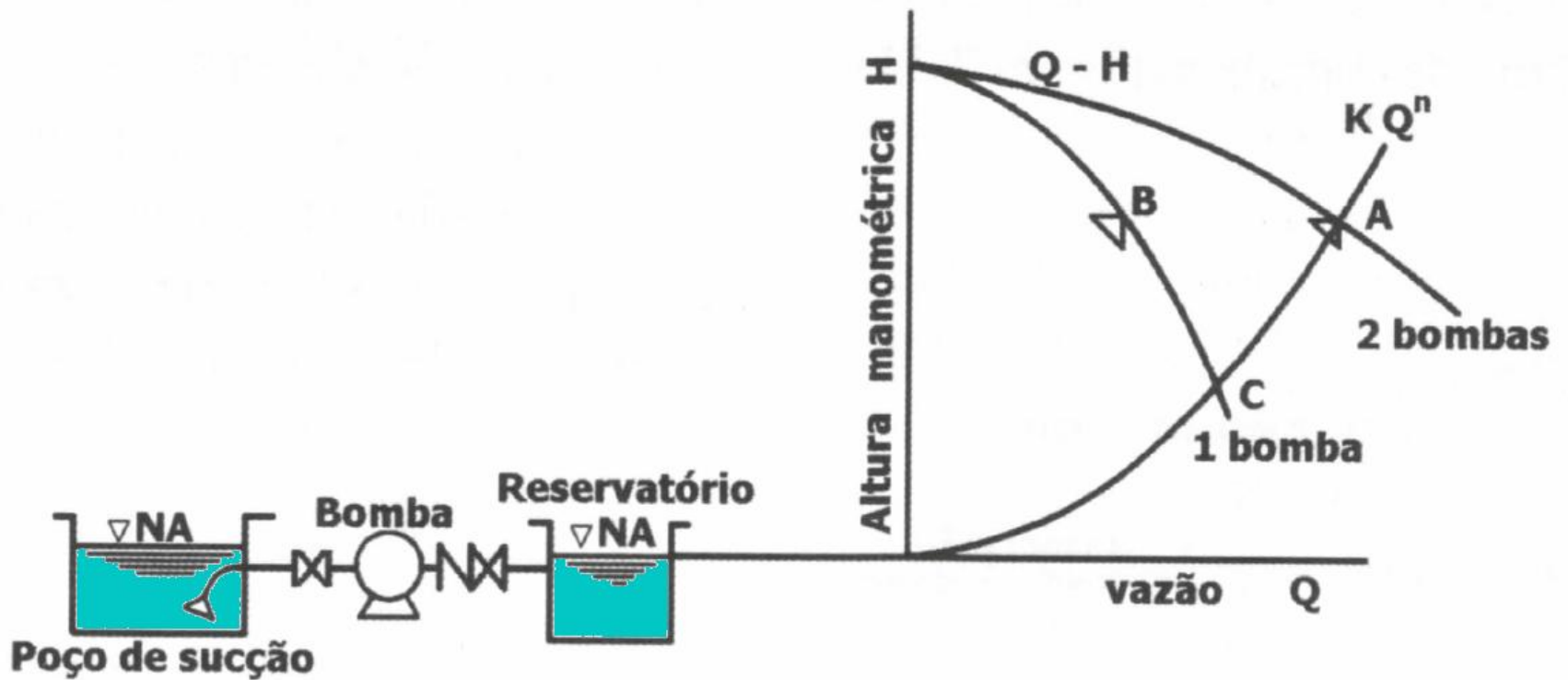
Recalques e suas respectivas curvas

Recalque para um reservatório



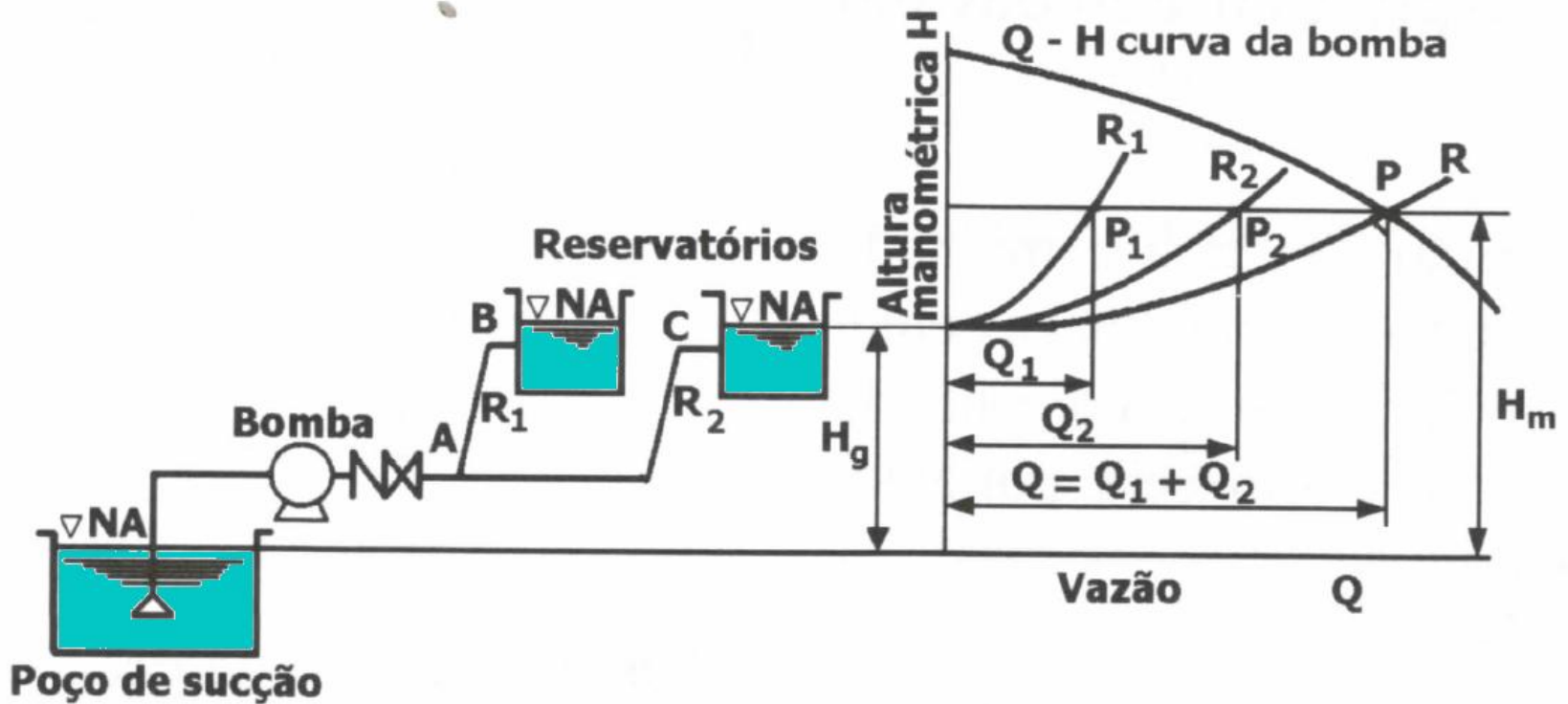
Fonte: Tsutiya

Recalque para um reservatório no mesmo nível da sucção



Fonte: Tsutiya

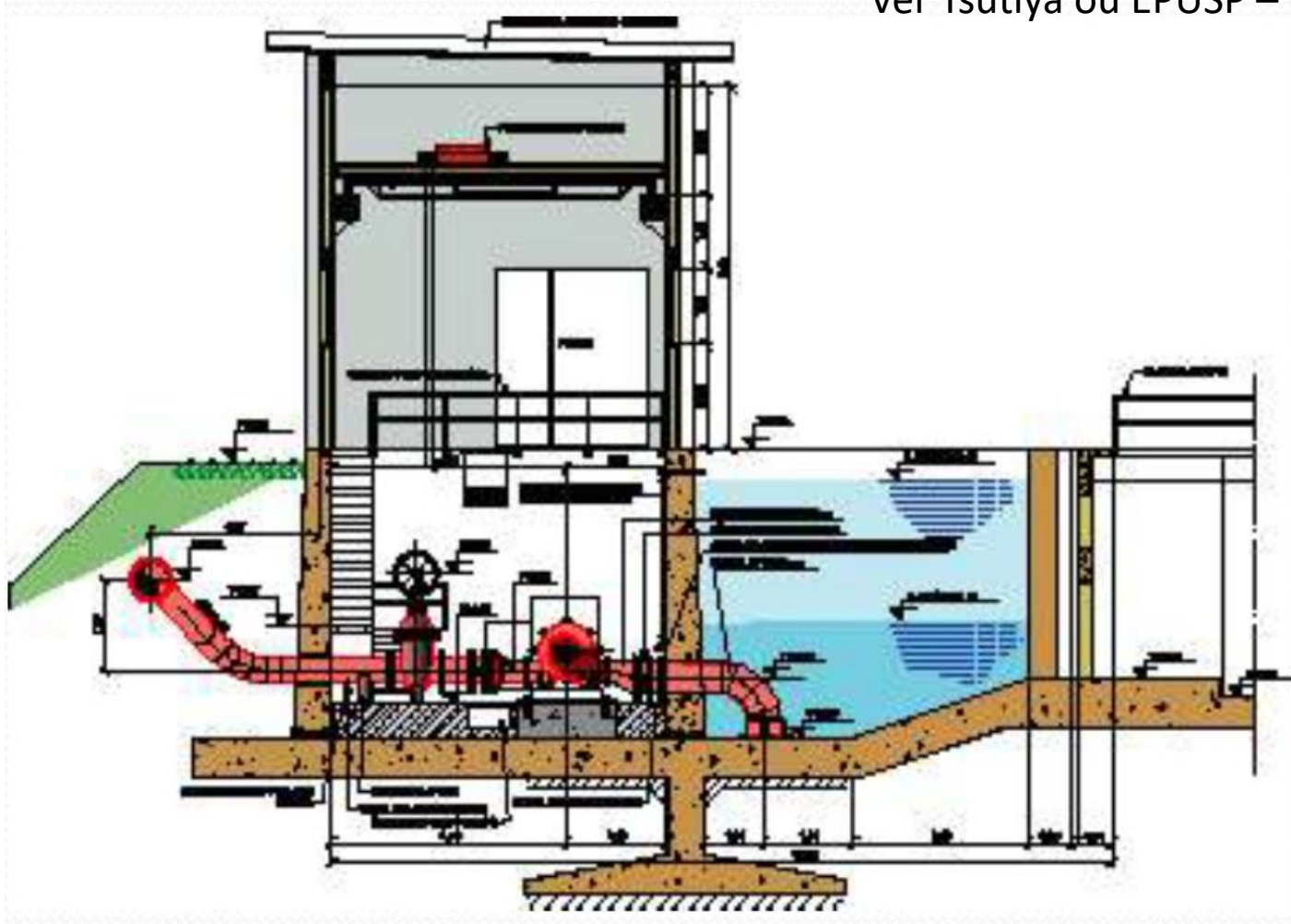
Recalque para dois reservatórios situados em cotas iguais



Fonte: Tsutiya

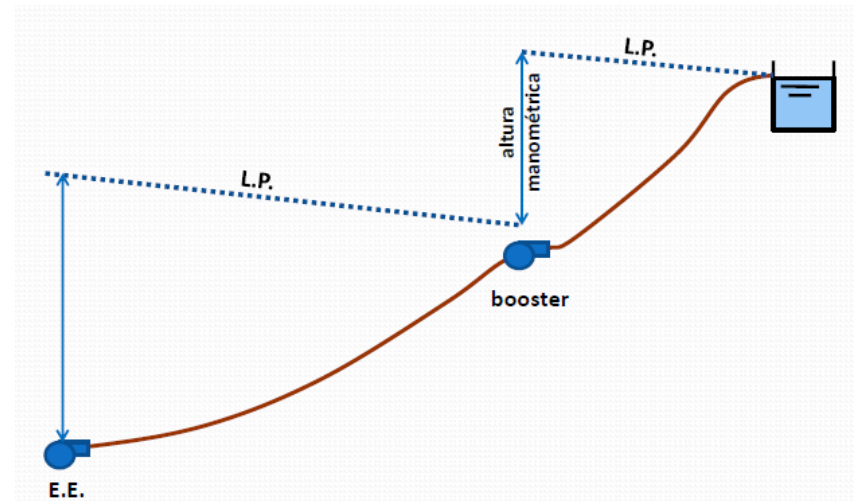
Projeto

Ver Tsutiya ou EPUSP – PHD2412

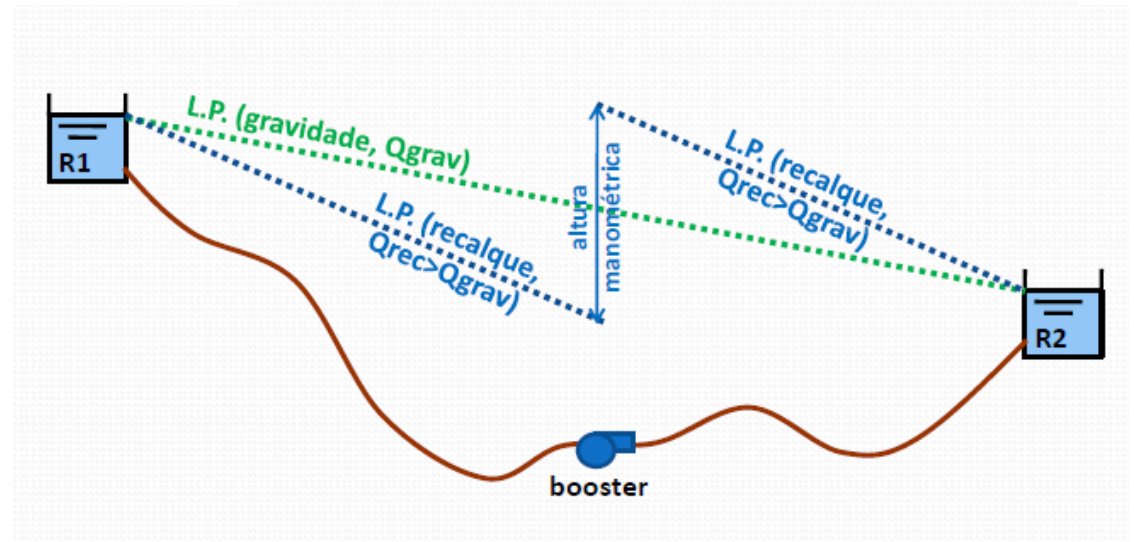


Booster

Para reforço no bombeamento (em série)



Para aumentar a vazão de bombeamento

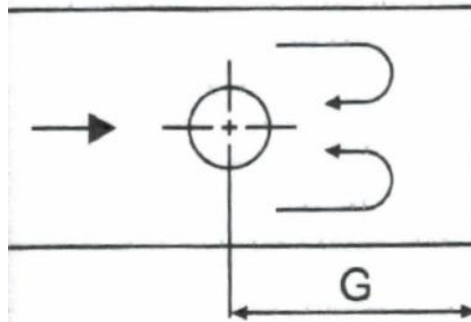


Poço de sucção

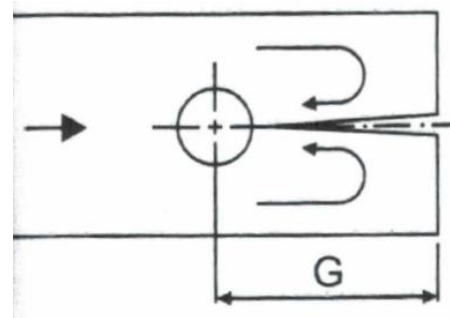
Estrutura de transição que recebe água afluyente e as coloca à disposição para recalque

NÃO RECOMENDADO

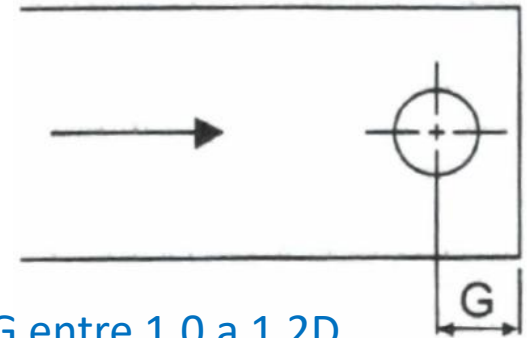
Turbulência no escoamento atrás do tubo de sucção. Se distância entre a parede e o tubo é grande, pode haver formação de **vórtice**.



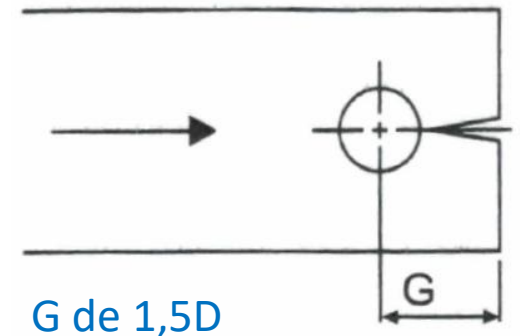
X



RECOMENDADO



G entre 1,0 a 1,2D

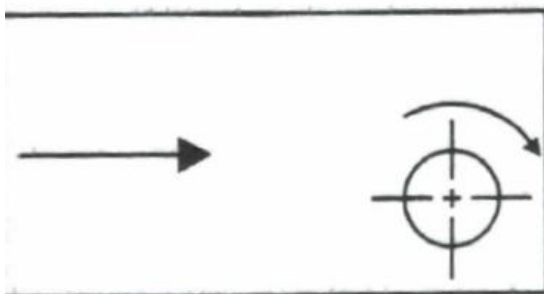


G de 1,5D

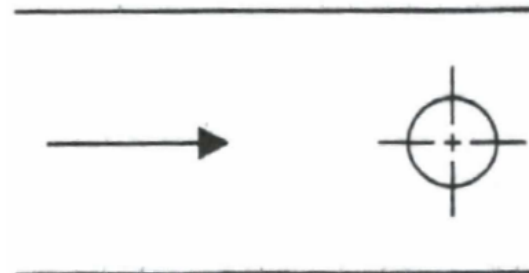
NÃO RECOMENDADO

RECOMENDADO

X

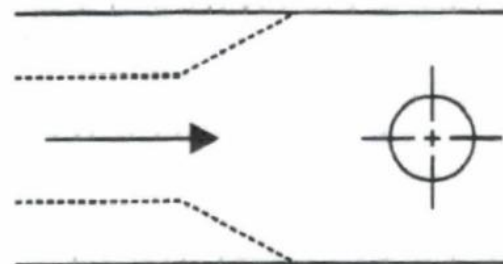
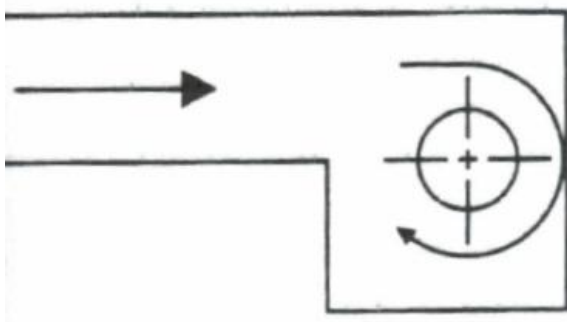


Desenvolvimento de escoamento rotacional.



O tubo deve ser deslocado para o centro do poço de sucção.

X

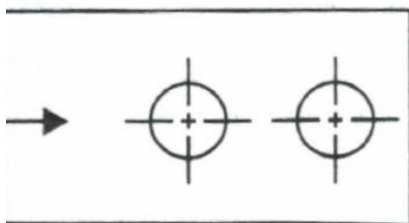


O centro da entrada do canal deve ser alinhada com o centro do poço de sucção.

NÃO RECOMENDADO

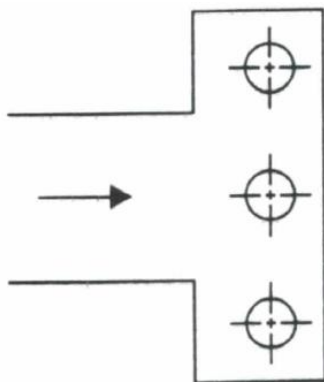
O primeiro tubo de sucção causa turbulência no segundo tubo.

X



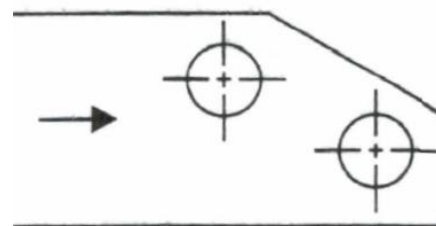
- escoamento turbulento

X

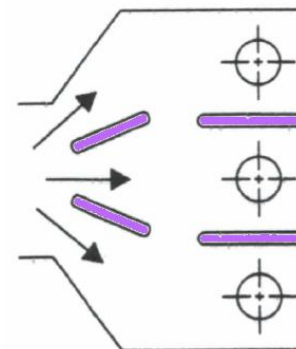


RECOMENDADO

Mudança de direção nos tubos de sucção

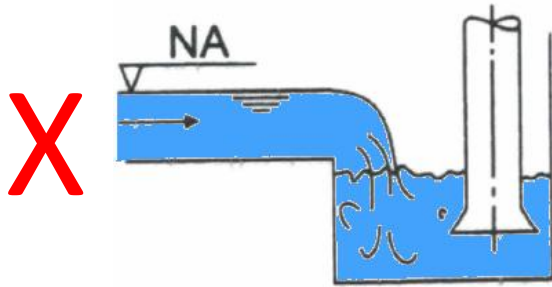


Divisórias na entrada e entre os tubos

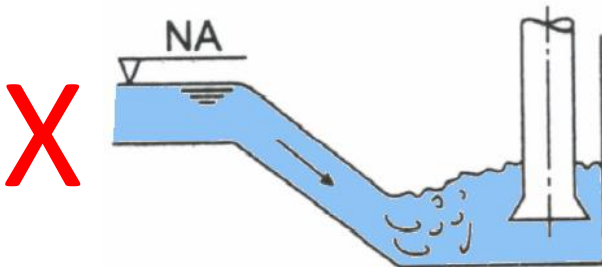


NÃO RECOMENDADO

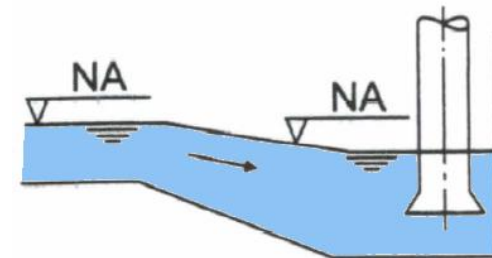
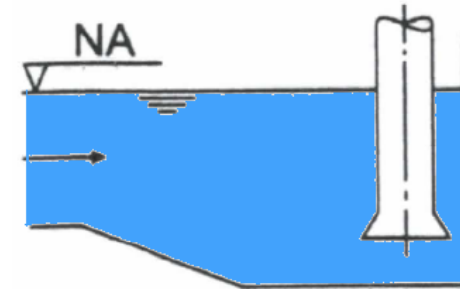
- Escoamento **X** turbulento
- Entrada de ar



- Escoamento supercrítico



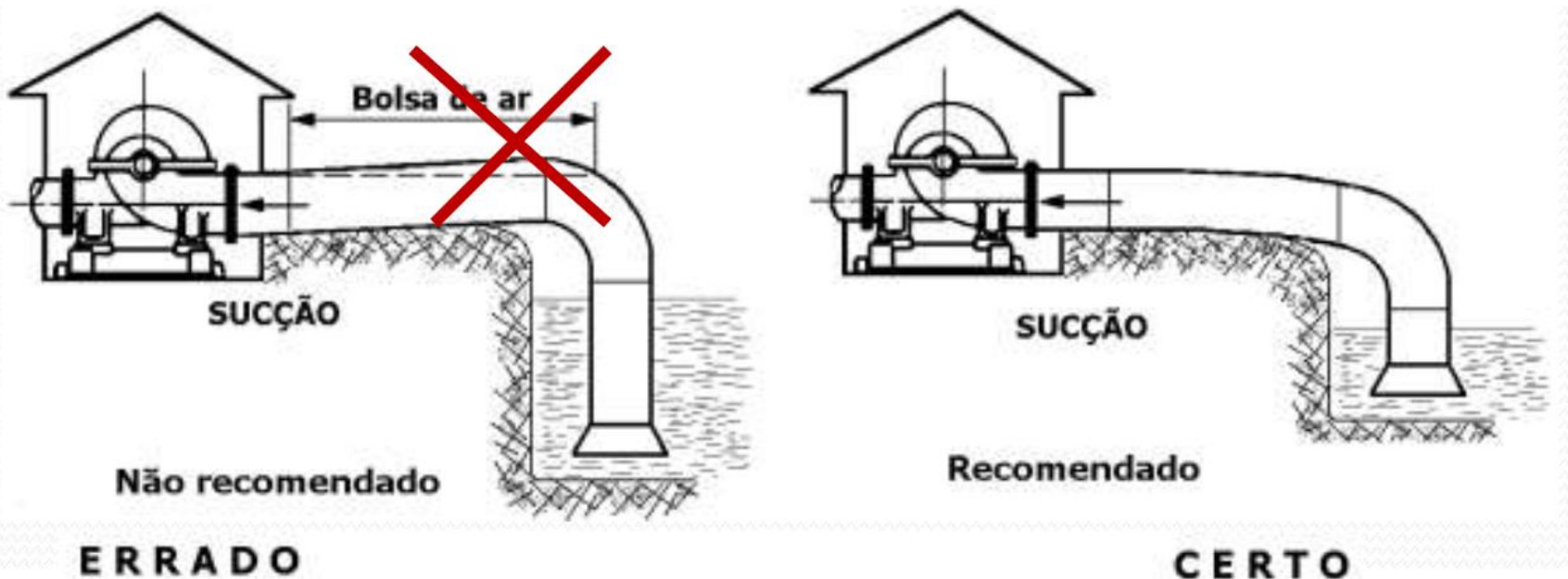
RECOMENDADO



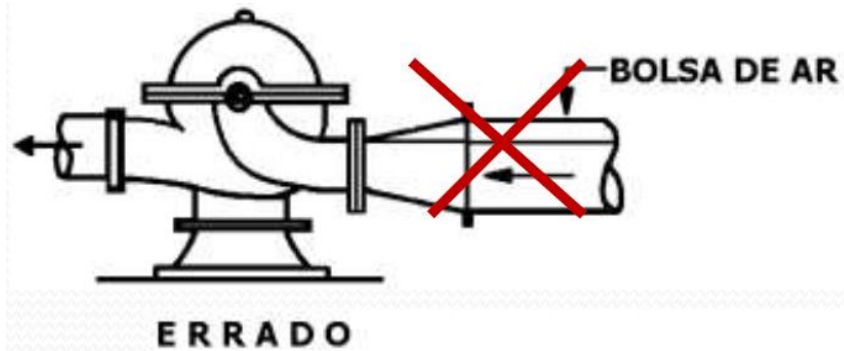
Tubulação de sucção

- Deve ser a mais curta possível e sempre ascendente ou horizontal.
- Evitar peças especiais.
- Norma ABNT NBR 12214/92: Estabelece velocidades mínimas e máximas (alguns autores e entidades recomendam valores diferentes)

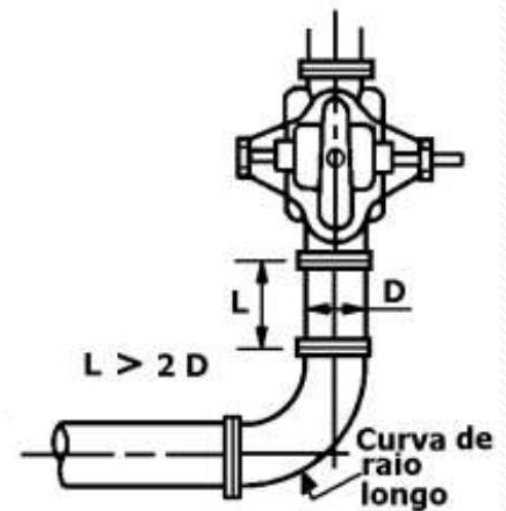
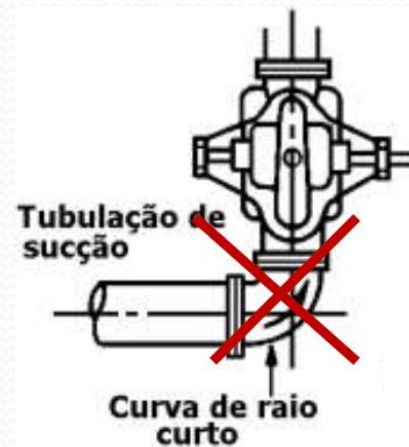
Inclinação ascendente



Redução excêntrica



Curva de raio longo



NBR 12214/92

Tubulação de sucção

DN	$V_{\text{máx}}$ (m/s)
50	0,70
75	0,80
100	0,90
150	1,00
200	1,10
250	1,20
300	1,40
400	1,50

Tipo de material transportado

Tipo de material transportado	$V_{\text{mín}}$ (m/s)
Matéria orgânica	0,30
Suspensões siltosas	0,30
Suspensões arenosas	0,45

Barrilete

Tubulação de aço ou ferro fundido:

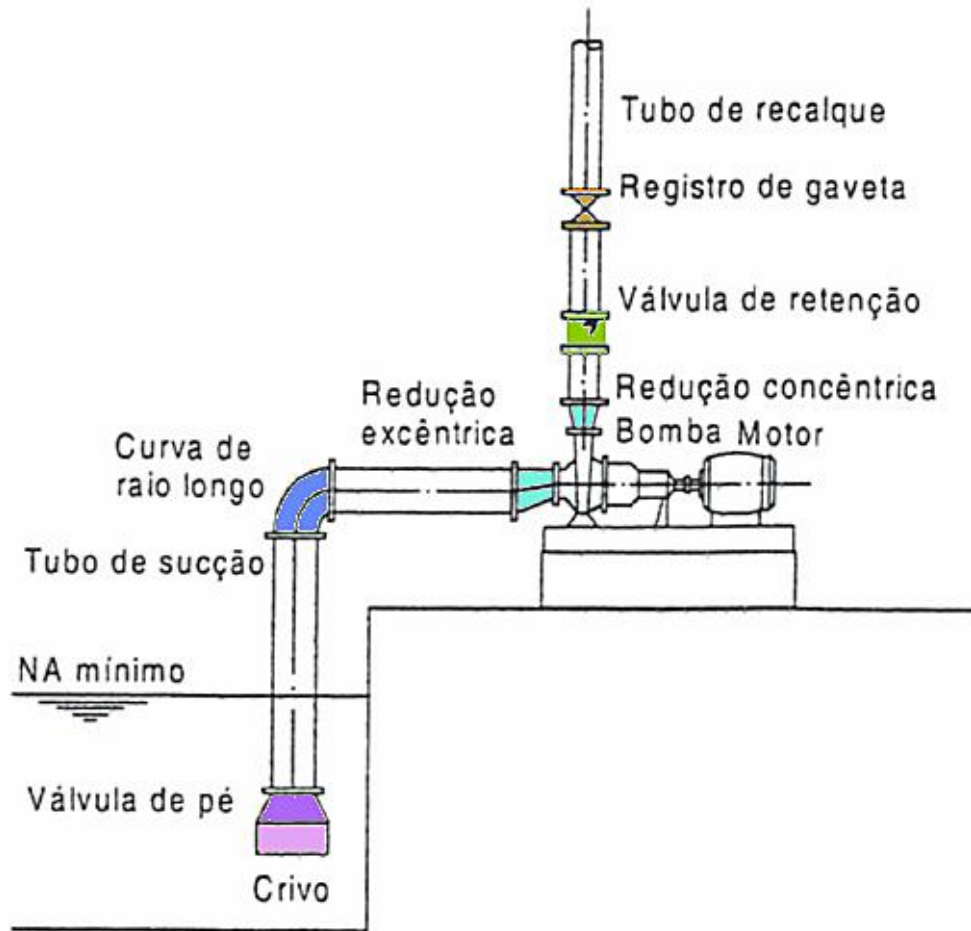
$$V_{\text{máx}} = 3,00 \text{ m/s}$$

Para outros materiais:
ver recomendação do fabricante

$$V_{\text{mín}} = 0,60 \text{ m/s}$$

Para bombas afogadas, as velocidades podem ser maiores, desde que justificado.

Órgãos acessórios



Literatura

- Tsutiya, Milton Tomoyuki. 2006. Abastecimento de Água. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 643p. 4ª. Edição
- Figuras: EPUSP – PHD2412
- Cirilo, José Almir et al. (Org.) Hidráulica Aplicada. 2ª. edição rev. e ampl. – Porto Alegre: ABRH, 2003
- Heller, Léo & Pádua, V.L. 2010. Abastecimento de água para consumo humano. Ed. UFMG. 2ª.Ed.
- NBR 12214/92 Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público