



**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

CAPÍTULO V
TURBO MÁQUINAS HIDRÁULICAS
(BOMBAS)

**ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA CIVIL
NÚCLEO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE**

Eng. Teixeira da Costa

Eng. Davide Santos

Eng. Rui Lança

FARO, 28 de Fevereiro de 2001

ÍNDICE

5.0 - Turbomáquinas hidráulicas	1
5.1 - Aplicações dos sistemas de elevação.....	1
5.1.1 - Captação de água de rios	1
5.1.2 - Captação de água de lagos e barragens (albufeiras).....	1
5.1.3 - Extracção de água de poços.....	1
5.1.4 - Adução por bombagem.....	2
5.1.5 - Transferência de água tratada entre reservatórios	2
5.1.6 - Lavagem de filtros em estações de tratamento	2
5.1.7 - Aumento de pressão e de vazão através de bombas de reforço (BOOSTER).....	2
5.1.8 - Sistema de esgoto.....	2
5.2 - Instalações de bombagem.....	4
5.2.1 - Altura geométrica.....	4
5.3 - Altura manométrica.....	4
5.4 - Potência dos conjuntos de compressão (elevação)	6
5.5 - Diâmetros económicos.....	7
5.6 - Tipos de bombas	10
5.6.1 - Bombas volumétricas.....	10
5.6.2 - Turbobombas ou hidrodinâmicas.....	10
5.6.3 - Velocidade específica.....	11
5.6.4 - Tipos de propulsores.....	11
5.6.5 - Bombas de estágios simples ou de estágios múltiplos.....	12
5.6.6 - Bombas afogadas.....	12
5.6.7 - Bombas submersas e não submersas	12
5.6.8 - Conjunto de ar comprimido ou <i>air-lift</i>	12
5.7 - Cavitação - N.P.S.H (<i>Net Positive Suction Head</i>).....	12
5.7.1 - Ocorrência da cavitação.....	13
5.8 - Curvas características da tubagem	16
5.8.1 - Traçado das curvas	17
5.8.2 - Tubagem em série	18
5.8.3 - Tubagem em paralelo	18
5.8.4 - Reservatórios em cotas diferentes	19
5.8.5 - Sistema por gravidade.....	19
5.9 - Curvas características das bombas centrífugas.....	19
5.10 - Tipos de curvas características.....	20
5.11 - Variação das curvas características.....	21
5.12 - Ponto de trabalho.....	23
5.13 - Faixa de trabalho das bombas centrífugas.....	23
5.14 - Envelhecimento da tubagem.....	24
5.15 - Variações dos níveis de aspiração e de compressão.....	24
5.16 - Selecção das bombas.....	25
5.17 - Associação de bombas centrífugas	25
5.17.1 - Bombas em paralelo	26
5.18 - Bombas em série	27
5.19 - Associação de bombas (rendimentos)	28
5.19.1 - Bombas em paralelo	28
5.19.2 - Bombas em série	28
5.20 - BOOSTERS	29
5.20.1 - Associação de BOOSTERS	30

5.0 - Turbomáquinas hidráulicas

As condutas, por gravidade, são o ideal quando se pretende transferir água no espaço. Mas à medida que se vão esgotando os locais topograficamente propícios, mais vai sendo necessário aplicarem-se métodos mecânicos para a elevação da água.

Os sistemas que operam por gravidade apresentam desvantagens apesar de serem muito económicos. A reduzida flexibilidade é uma das grandes desvantagens. O sistema está limitado pelo desnível e pelo caudal. Qualquer aumento, num deles, não é fácil.

Já um bombeamento mecânico da água permite o aumento de ambos com relativa facilidade. Vão sendo cada vez maiores e melhores os aperfeiçoamentos técnicos quer no que diz respeito à tubagem quer no que diz respeito às bombas.

5.1 - Aplicações dos sistemas de elevação

5.1.1 - Captação de água de rios

É um dos maiores campos de aplicação das bombas. A escolha da bomba exige conhecimentos devidos a factores diversos como as variações no nível de água e a qualidade da água.

5.1.2 - Captação de água de lagos e barragens (albufeiras)

A grande oscilação que se verifica nas albufeiras obriga à instalação de equipamento apropriado para trabalhar a vários níveis. As bombas são instaladas em torres de tomada construídas nas margens dos lagos.

5.1.3 - Extracção de água de poços

Quando se pretende captar água de poços surgem as seguintes dificuldades:

- a) - Espaço reduzido para a montagem do equipamento;
- b) - Nível dinâmico de água situado a grande profundidade;
- c) - Imperfeição do poço, podendo suceder que esteja desalinhado ou fora da vertical;
- d) - Presença de areia.

Por causa destas dificuldades a escolha da bomba só deve ser feita depois dos testes de rendimento e de caudal.

5.1.4 - Adução por bombagem

Também denominada “transmissão” consiste na bombagem para condutas que vão conduzir a água bruta ou tratada até aos reservatórios de distribuição.

Quando a adução é de água tratada não há necessidade de bombas especiais que poderão ser necessárias caso a água esteja *in natura*.

5.1.5 - Transferência de água tratada entre reservatórios

É o caso da bombagem de um reservatório baixo para uma torre de distribuição. Regra geral o bombeamento é regular e não exige técnicas especiais.

5.1.6 - Lavagem de filtros em estações de tratamento

Actualmente a lavagem de filtros é feita por reversão de corrente, por meio de bombas. Este sistema evita a construção de reservatórios elevados incorporados ou não ao edifício da E.T.A. .

Esta bombagem dá maior flexibilidade ao sistema uma vez que não há necessidade de aguardar o enchimento do reservatório para se fazer a operação de lavagem.

5.1.7 - Aumento de pressão e de vazão através de bombas de reforço (BOOSTER)

Quando há necessidade de se aumentar a pressão de uma tubagem costuma intercalar-se um sistema de bombagem.

No caso de uma adutora por gravidade a colocação de um BOOSTER faz elevar o N.A. no ponto final resultando num aumento de caudal na adutora.

No caso de uma rede distribuidora, com várias ramificações de tubos, a colocação de um BOOSTER proporciona aumento generalizado de pressão, para as mesmas condições de consumo, e melhora o abastecimento dos prédios.

5.1.8 - Sistema de esgoto

Compreende várias elevatórias :

- a) - Bombagem para recuperação de cota em tubagem de esgoto;

- b) - Bombagens de sector;
- c) - Bombagens de estações depuradoras;
- d) - Bombagens finais.

a) - Bombagem para recuperação de cota em tubagem de esgoto

As condutas de esgoto precisam de certa declividade para permitir o escoamento, por gravidade em regime livre. Em terrenos muito planos e em extensões longas de esgoto as tubagens atingem profundidades grandes, incompatíveis com a construção e depois com os trabalhos de operação e manutenção. Uma estação de bombagem permite trazer os esgotos para posições mais próximas da superfície onde terá início um novo trecho de escoamento.

As bombas, neste caso e como veremos adiante, são especiais e permitem a passagem de corpos sólidos com até 5 cm de dimensões médias.

b) - Bombagens de sector

Utilizam-se quando as águas de esgoto, provenientes de uma bacia, bairro ou sector, se encontram num ponto baixo, sem saída. Neste caso utiliza-se uma estação de bombagem que encaminha os esgotos para pontos de fácil saída. sendo o caudal de chegada variável com as horas do dia os esgotos acumulam-se em poços de tomada e são bombeados quando o nível atingido assim o exigir.

c) - Bombagens de estações depuradoras

Muito semelhantes à alínea anterior só que em grandes dimensões. Em estações de grande porte instalam-se bombas de capacidades diferentes que, isoladas ou em conjunto, bombeiam os esgotos para as primeiras unidades de tratamento, sem interrupção e aproximadamente com o mesmo caudal de chegada.

d) - Bombagens finais

São bombagens efectuadas nas estações de tratamento de esgotos. A água, depois de receber um tratamento adequado de modo a atenuar ou eliminar a carga poluidora, é restituída ao sistema hidrográfico da região. A altura a ser vencida é quase sempre reduzida (< 10m) mas a tubagem poderá ser não longa.

5.2 - Instalações de bombagem

O conjunto constituído pela tubagem e pelos meios mecânicos de elevação denomina-se sistema de elevação.

Um sistema de elevação compõe-se de:

- a) - Tubagem de sucção ou aspiração;
- b) - Conjunto moto-bomba;
- c) - Tubagem de elevação ou compressão.

A aspiração e a compressão trabalham em regime permanente uniforme, isto é com um caudal constante e velocidade média constante e por isso os problemas são resolvidos pela aplicação das equações de Bernoulli e da continuidade.

A tubagem de aspiração mergulha no poço de aspiração e vai até à boca de entrada da bomba.

A tubagem de elevação sai da boca da bomba e termina no reservatório.

5.2.1 - Altura geométrica

Quando se deseja elevar um caudal Q de um reservatório R_i para outro reservatório R_s é necessário vencer o desnível H_g denominado altura geométrica ou estática que pode ser dividida em duas parcelas:

Altura estática de aspiração ou sucção h_a que é a distância vertical do N.A. do reservatório R_i ao eixo da bomba. Conforme a posição do eixo da bomba, em relação ao N.A. de R_i a altura estática de aspiração pode ser positiva ou negativa. É positiva quando o N.A. estiver abaixo do eixo da bomba e negativa em caso contrário.

A altura estática de compressão é a distância vertical do eixo da bomba ao eixo do tubo de descarga no R_s . Se o tubo entrar em nível inferior ao N.A. (tubo afogado) toma-se como referência o N.A.

5.3 - Altura manométrica

Quando uma bomba está em funcionamento verificam-se perdas de carga contínuas e acidentais na tubagem.

As perdas de carga na aspiração são :

$$J_a = j_a \cdot L_a + \sum K \cdot \frac{U_a^2}{2 \times g}$$

ou:

$$J_a = j_a \cdot L'_a$$

em que:

- J_a Perda de carga total;
 j_a Perda de carga unitária na linha de aspiração;
 L'_a Comprimento virtual da tubagem de aspiração. As perdas acidentais (crivo, curva de 90°, reduções, válvula, etc.) são reduzidas a comprimentos virtuais em função da velocidade de acordo com a 2ª expressão:

$$\sum K \cdot \frac{U_a^2}{2 \times g}$$

A altura dinâmica de aspiração é:

$$H_a = h_a + j_a$$

Para a compressão temos, semelhantemente:

$$J_c = j_c \cdot L_c + \sum K \cdot \frac{U_c^2}{2 \times g}$$

ou:

$$J_c = j_c \cdot L'_c$$

em que J_c é a perda total verificada na compressão onde L'_c é o comprimento virtual

soma de L_c e de $\sum K \cdot \frac{U_c^2}{2 \cdot g}$.

A altura dinâmica de compressão é:

$$H_c = h_c + J_c$$

e a altura manométrica de elevação é:

$$H_m = H_a + H_c$$

5.4 - Potência dos conjuntos de compressão (elevação)

A altura manométrica é a distância vertical que a bomba tem de vencer para elevar o caudal Q do reservatório inferior a R_i para o reservatório superior R_s , incluindo todas as perdas de carga.

P_u é a potência útil que corresponde ao trabalho realizado pela bomba.

$$P_u = \mathbf{g} \cdot Q \cdot H_m$$

γ peso volúmico da água ($\text{N/m}^3 \Rightarrow 9810 \text{ N/m}^3 \approx 10000 \text{ N/m}^3$)

Q caudal (m^3/s)

H_m altura manométrica (m)

P_u potência útil (W - Watt)

$$P_u = \frac{\mathbf{g} \cdot Q \cdot H_m}{736} \quad \text{potência útil (CV - cavalos-vapor)}$$

$$P_u = \frac{\mathbf{g} \cdot Q \cdot H_m}{1000} \quad \text{potência útil (kW - kiloWatt)}$$

$$9810 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}^3}{1000} = 9,8 \text{ kN/m}^3$$

Mas como há uma potência fornecida ao eixo da bomba P_a aparece-nos o

rendimento da bomba $\mathbf{h} = \frac{P_u}{P_a}$ e então será,

$$P_a = \frac{\mathbf{g} \cdot Q \cdot H_m}{\mathbf{h} \cdot 736} \quad (\text{CV})$$

$$P_a = \frac{\gamma \times Q \times H_m}{\eta \times 1000} \quad (\text{kW})$$

O rendimento \mathbf{h} aumenta com o tamanho da bomba (grandes caudais) e com a pressão.

Segundo Lencastre citam-se alguns valores de η .

Caudal	Baixa Pressão		Alta Pressão			Grandes caudais		
Q (l/s)	3	25	2	25	100	150	1000	2000
η	0.56	0.78	0.53	0.81	0.84	0.86	0.90	0.91

Quadro 5.4.1 - Rendimentos de bombas

Peça	Nº de diâmetros
Ampliação gradual	12
Cotovelo de 90°	45
Curva de 90°	30
Cotovelo de 45°	20
Curva de 45°	15
Entrada normal	17
Entrada de Borda	35
Junção	30
Redução gradual	6
Válvula de adufa aberta	8
Válvula de globo aberta	350
Válvula de borboleta (ângulo) aberta	170
Saída de tubulação	35
Tê, passagem directa	20
Tê, saída bilateral	65
Válvula de pé com crivo	250
Válvula de retenção	100
Junta elástica	10

Quadro 5.4.2 - Perdas de cargas localizadas (método dos comprimentos virtuais)

Fórmula de HAZEN-WILLIAMS - perda de carga unitária

$$j = \frac{10,641}{C^{1.85}} \cdot \frac{Q^{1.85}}{D^{4.87}} \quad (\text{m/m})$$

Valores correntes de C :

Ferro Fundido C = 120

Plástico C = 130

Cimento amianto C = 130

valor médio usado C = 100

$$j = 0.00212 \cdot \frac{Q^{1.85}}{D^{4.87}} \quad (\text{m/m})$$

5.5 - Diâmetros económicos

Pela análise da fórmula $P_u = \frac{g \cdot Q \cdot H_m}{h}$, verifica-se que o dimensionamento de um

sistema de elevação é um problema hidráulico indeterminado.

Os diâmetros são grandes ao fazer-se uma bombagem com velocidades de escoamento muito baixas, o que implica custos elevados com tubagem e menores custos com as bombas e energia, uma vez que se diminui a altura manométrica.

Velocidades altas originam diâmetros menores, de custos mais baixos mas provocam grandes perdas de energia.

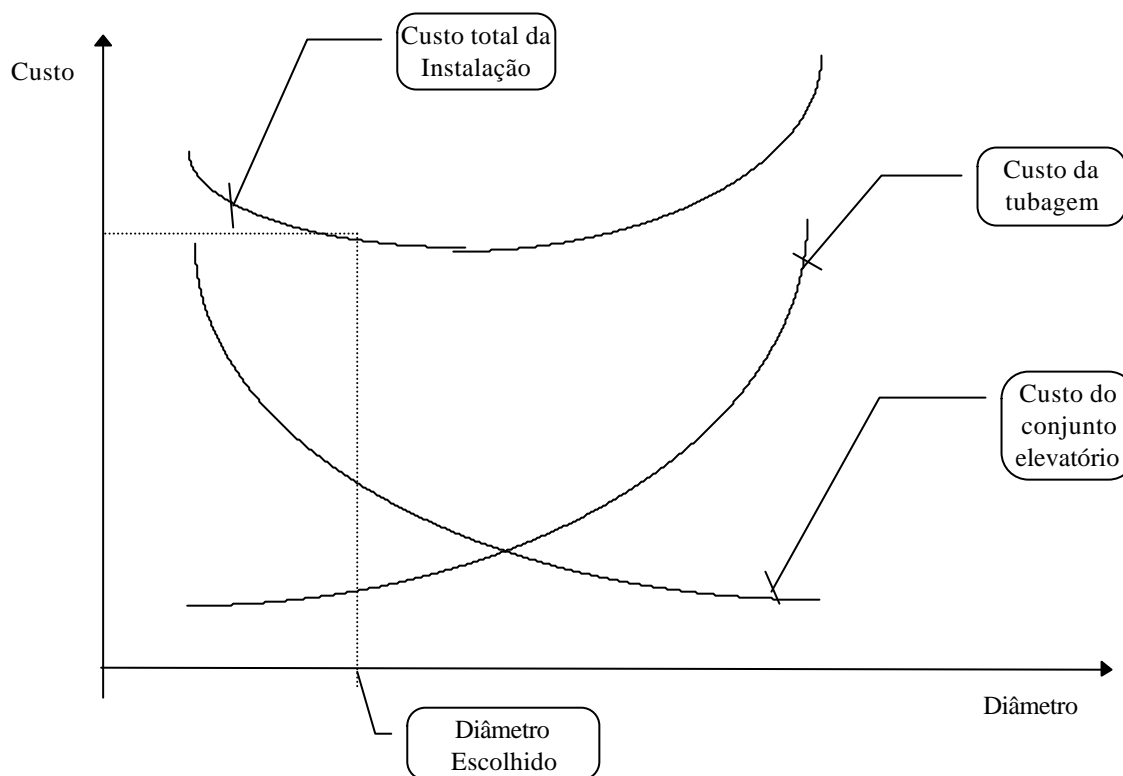


Figura 5.5.1 - evolução dos custos em instalações de bombagem

A curva I diz respeito à variação dos custos com a tubagem. Quanto maior o diâmetro, maior é o custo dos tubos. Nos custos incluem-se as amortizações e os juros do capital aplicado na aquisição.

A curva II indica a variação de preços dos conjuntos elevatórios.

A curva III é a soma de I e II e dá-nos o diâmetro de custo mínimo procurado.

Da combinação da fórmula de DARCY-WEISBACH

$$J = 0,0827 \cdot f \cdot \frac{Q^2}{D^5} \cdot L \quad (\text{m.c.a. - metro de coluna de água})$$

$$J = \frac{f}{D} \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \cdot L \quad (\text{m.c.a. - metro de coluna de água})$$

$$j = \frac{f}{D} \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \quad (\text{m/m})$$

$$j = \frac{8 \cdot f}{\rho^2 \cdot g} \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad (\text{m/m})$$

$$j = 0,0827 \cdot f \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad (\text{m/m})$$

Tipo de Tubo	Rugosidade (mm)	f
Ferro Fundido		
Incrustado	2.40 a 1.20	0.02 a 1.50
Revestido com asfalto	0.30 a 0.90	0.014 a 0.10
Revestido com cimento	0.05 a 0.15	0.012 a 0.06
Aço galvanizado		
Novo com costura	0.15 a 0.20	0.012 a 0.06
Novo sem costura	0.06 a 0.15	0.009 a 0.012
Betão		
Moldado em madeira	0.20 a 0.40	0.012 a 0.08
Moldado em ferro	0.06 a 0.20	0.009 a 0.06
Centrifugado	0.15 a 0.50	0.012 a 0.085
Amianto		
Usado	0.60	0.10 a 0.15
Novo	0.05 a 0.10	0.009 a 0.058
P.V.C.		
P.V.C.	0.015	0.009 a 0.050

Quadro 5.5.1 - Fórmula de DARCY-WEISBACH¹

com a fórmula de P_u , $P_u = \mathbf{g} \cdot Q \cdot H_m$ obtêm-se a fórmula de BRESSE, de grande utilidade prática para o dimensionamento do diâmetro económico.

$$D = K \cdot \sqrt{Q}$$

com:

$$K = \left[\sqrt[6]{\frac{C_1}{C_2}} \cdot \sqrt[6]{\frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{g}}{15 \cdot \mathbf{h}}} \right]$$

¹ Os valores mais baixos aplicam-se a diâmetros grandes (> 400mm)

sendo:

C_1 Custo do sistema elevatório;

C_2 Custo médio do tubo;

D diâmetro (m);

Q caudal (m³/s)

O valor K encontra-se tabelado em função da velocidade na tubagem

U (m/s)	2,26	1,99	1,76	1,57	1,27	1,05	0,88	0,75	0,65
K	0,75	0,80	0,85	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40

Quadro 5.5.2 - Valores de K (fórmula de BRESSE)

Geralmente a velocidade média situa-se entre 0,60 e 2,40m/s.

Velocidades maiores devem ser evitadas mas, se tal não for possível convém que os conjuntos elevatórios funcionem apenas algumas horas por dia.

Como a fórmula de BRESSE não dá valores comerciais deve arredondar-se o valor calculado para um diâmetro comercial imediatamente superior.

5.6 - Tipos de bombas

As bombas podem classificar-se em dois grandes grupos:

5.6.1 - Bombas volumétricas

Estas bombas dependem das pressões e das forças estáticas e não das velocidades relativas entre o escoamento e as partes móveis.

Quando o escoamento é intermitente dizem-se alternativas como por exemplo as bombas de pistão e as de diafragma.

Quando o escoamento é contínuo denominam-se rotativas como por exemplo as bombas de engrenagens, de palhetas, as helicoidais (parafuso de Arquimedes) as de vortex, etc

5.6.2 - Turbobombas ou hidrodinâmicas

O intercâmbio de energia depende das forças dinâmicas originadas pelas diferenças de velocidades entre o fluido que escoar e as partes móveis da máquina.

Conforme o escoamento do fluido pelo propulsor assim as turbobombas podem ser classificadas em radiais, axiais e mistas.

Se o deslocamento do fluido, através do propulsor for na direcção do respectivo propulsor a bomba é radial; se a direcção do fluxo acompanhar a direcção do eixo a bomba é axial. Entre as duas posições situam-se as mistas.

5.6.3 - Velocidade específica

$$n_s = \frac{n \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{H_m^{\frac{3}{4}}}$$

sendo:

n rotação da bomba (r.p.m.)

Q caudal (m³/s)

H_m altura manométrica (m)

Define-se como a rotação de uma bomba, posta a funcionar com um caudal de 1,00 m³/s, afim de elevar a água a 1,00m de altura.

Os três tipos de bombas - radiais, axiais e mistas distinguem-se pelas respectivas velocidades específicas, não havendo uma clara separação entre elas.

Os propulsores destinados a grandes alturas manométricas têm baixa velocidade específica em oposição aos propulsores para pequenas alturas de elevação que têm grandes velocidades específicas.

5.6.4 - Tipos de propulsores

Nas bombas centrifugas os propulsores podem ser fechados, abertos ou semiabertos. Os abertos são constituídos por um cubo ao qual se fixam as pás. Os fechados têm duas placas paralelas entre os quais são fixadas as pás. Quando existe só uma placa de fixação o propulsor é semiaberto.

5.6.5 - Bombas de estágios simples ou de estágios múltiplos

As bombas com um só propulsor denominam-se de andar ou estágio simples ou de um estágio. Quando a altura manométrica é muito grande é costume usar-se bombas de vários estágios. Cada propulsor eleva o fluido até uma determinada altura.

Em poços profundos são usadas bombas de vários estágios, colocadas em série dentro de um tubo que é posto dentro do poço.

5.6.6 - Bombas afogadas

De acordo com a sua posição, em relação ao N.A., uma bomba pode ser ou não afogada.

Diz-se afogada quando o seu eixo está em nível inferior ao do N.A.. As bombas afogadas não necessitam de ser ferradas (ferrar uma bomba - colocação manual de água dentro do propulsor a fim de que este não trabalhe em seco na hora da partida). O tubo de aspiração deve também ficar cheio de água.

5.6.7 - Bombas submersas e não submersas

Geralmente as bombas de eixo vertical trabalham submersas, isto é ficam dentro da água e são comandadas por um motor cujo eixo é prolongado e fica fora de água. O motor fica fora de água, em nível elevado, sem estar sujeito a inundações.

5.6.8 - Conjunto de ar comprimido ou *air-lift*

Muito usados em poços, constam de um tubo, por onde se injecta ar comprimido que obriga a água a subir por outro tubo.

5.7 - Cavitação - N.P.S.H (*Net Positive Suction Head*)

Numa tubagem de aspiração as pressões que se verificam são inferiores à pressão atmosférica.

Se se verificaram pressões inferiores às do vapor do líquido, à entrada da bomba, originam-se bolhas de vapor capazes de interromper a entrada da bomba, além de provocarem danos prejudiciais ao sistema de elevação. Quando as bolhas atingem o propulsor atingem implosões violentas, cujos ruídos são semelhantes a um martelamento,

além de aparecerem também vibrações. É a cavitação cujo nome deriva de aparecerem buracos ou covas no fluido escoante que, por isso, deixa de ser contínuo.

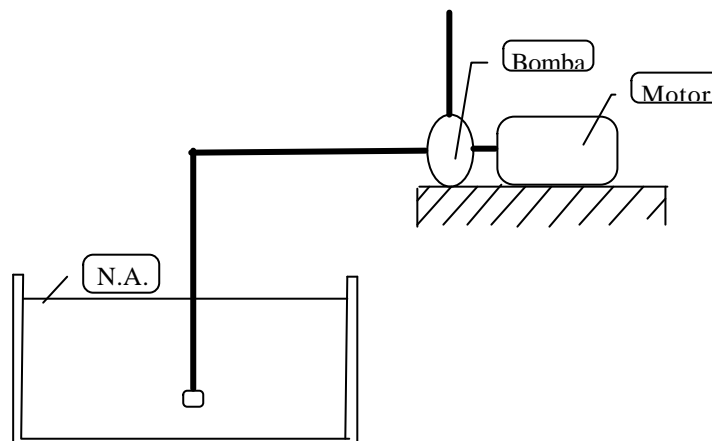
O martelamento provoca a destruição das paredes da carcaça da bomba e das pás do propulsor e deve-se a dois efeitos.

Mecânico - O choque das bolhas provoca sobrepressões (golpe de aríete) que destroem e ampliam todos os poros ou ranhuras existentes no metal.

Químico - As bolhas libertam iões de oxigénio que atacam todas as superfícies metálicas.

5.7.1 - Ocorrência da cavitação

Não há cavitação desde que em todos os pontos do percurso do fluido a pressão seja superior à pressão do vapor do respectivo fluido à temperatura ambiente.



Vamos considerar dois pontos, um situado no N.A. do R₁, P₀ e o outro P₁ situado no eixo, à entrada da bomba.

Aplicando o teorema de BERNOULLI,

$$\frac{P_0}{\rho g} + \frac{U_0^2}{2g} = h_a + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} + J_a$$

e vem:

$$h_a = \frac{P_0 - P_1}{\rho g} - \frac{U_0^2 + U_1^2}{2g} - J_a$$

Dispensando as perdas de carga e a diferença entre as energias cinéticas temos,

$$h_a = \frac{P_0 - P_1}{g}$$

e se for $P_1=0$, caso limite $\Rightarrow P_0 = P_{at}$

$$h_a = \frac{P_0}{g} = \frac{101300(N/m^2)}{9810(N/m^2)} = 10.33(m)$$

que é o valor teórico máximo da altura estática de aspiração, ao nível do mar e à temperatura de 4°C.

Na prática adopta-se um valor em torno de 6 (m) porque P_1 terá que ser sempre maior do que zero, não se devendo desprezar as perdas de carga e a diferença entre as energias cinéticas.

A cavitação limita a altura estática de aspiração, cujo valor máximo ocorre quando $P_1=P_v$ sendo P_v a pressão do vapor do líquido à temperatura da bombagem.

$$h_{a(max)} \leq \frac{P_0}{g} - \left(\frac{P_v}{g} + \frac{U_1^2 - U_0^2}{2 \cdot g} + J_a + J^* \right)$$

J^* está ligada à geometria e tipo de propulsor e sua determinação é muito difícil. Tem o nome de coeficiente de cavitação.

Na prática $J^* = s \cdot H_m$, sendo que $s = 0,0012 \times n_s^{\frac{4}{3}}$, correspondendo n_s à velocidade específica da bomba.

$$\frac{P_0}{g} - \left(ha + \frac{P_v}{g} + J_a \right) > \frac{U_1^2 - U_0^2}{2 \cdot g} + J^*$$

onde, no primeiro membro, estão as grandezas que dependem das condições locais de instalações. É o *N.P.S.H.* disponível. No segundo membro estão as condições da bomba. É o *N.P.S.H.* requerido.

O $(N.P.S.H)_d$ é a carga residual disponível.

O $(N.P.S.H)_r$ é a carga exigida pela bomba.

$$\frac{P_0}{g} - \left(ha + \frac{P_v}{g} + J_a \right) > J^* \quad (N.P.S.H)_d > (N.P.S.H)_r$$

Quando a altura de aspiração é positiva e o N.A. está sob a pressão atmosférica o $(N.P.S.H)_d$ é dado pela seguinte expressão,

$$(N.P.S.H)_d = h_{at} - (h_a + h_v + J_a)$$

sendo :

P_{at} pressão atmosférica local em (m)

h_a altura de aspiração em (m)

P_v pressão do vapor circulante à temperatura do fluido em (m)

J_a Perdas de carga na aspiração em (m)

O $(N.P.S.H.)_r$ é dado pelos fabricantes.

Se a bomba estiver afogada (com o N.A. sujeito à P_{at}), vem:

$$(N.P.S.H.)_d = (h_{at} + h_a) - (h_v + J_a)$$

Todas as grandezas são expressas em alturas de coluna de líquido bombeado.

Temperatura (°C)	h_v (m.c.a.)	ρ_a (t/m ³)
15	0.17	0.999
20	0.24	0.998
25	0.32	0.997
30	0.43	0.996
35	0.57	0.994
40	0.75	0.992
45	0.97	0.990
50	1.25	0.988
55	1.60	0.986
60	2.03	0.983
65	2.55	0.981
70	3.17	0.978
75	3.93	0.975
80	4.83	0.972
85	5.89	0.969
90	7.15	0.965
95	8.62	0.962
100	10.33	0.958

Quadro 5.7.1.1 - Tensão de vapor e massa volúmica da água

Altitude (m)	h_{at} (m.c.a.)
0	10.33
300	9.96
600	9.59
900	9.22
1200	8.88
1500	8.54
1800	8.20
2100	7.89
2400	7.58
2700	7.31
3000	7.03

Quadro 5.7.1.2 - Pressão atmosférica em função da altitude ($t = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$)

5.8 - Curvas características da tubagem

A maioria dos problemas de bombagem é resolvida com o auxílio das curvas características das tubagens.

As curvas características são obtidas recorrendo à equação da altura manométrica onde, para diversos valores de caudal, se calculam as respectivas perdas de carga.

Considerando a seguinte fórmula,

$$H_m = H_g + \Delta h$$

em que a H_m é a altura manométrica, H_g a altura geométrica e Δh o somatório de todas as perdas de carga, podemos escrever:

$$H_m = H_g - \mathbf{b} \cdot \frac{Q^n}{D^m} \cdot L_v$$

em que $\mathbf{b} \cdot \frac{Q^n}{D^m}$ é a forma genérica da perda de carga da tubagem e se forem conhecidos o diâmetro e o comprimento virtual temos,

$$H_m = H_g - r \times Q^n$$

adoptando a fórmula de DARCY-WEISBACH:

$$\Delta h = \frac{8 \cdot f}{\rho^2 \cdot g} \cdot \frac{Q^2}{D^5} \cdot L_v$$

$$H_m = H_g + r \cdot Q^2$$

com,

$$r = \frac{8 \cdot f}{\rho^2 \cdot g} \cdot \frac{L_v}{D^5}$$

Se empregarmos a fórmula de Hazen-Williams:

$$r = (0,278531)^{-1.85} \cdot C^{-1.85} \cdot D^{-4.87} \cdot L_v$$

será:

$$H_m = H_g + r \cdot Q^{1.85}$$

5.8.1 - Traçado das curvas

Por meio de fórmulas:

$$H_m = H_g + r \cdot Q^2$$

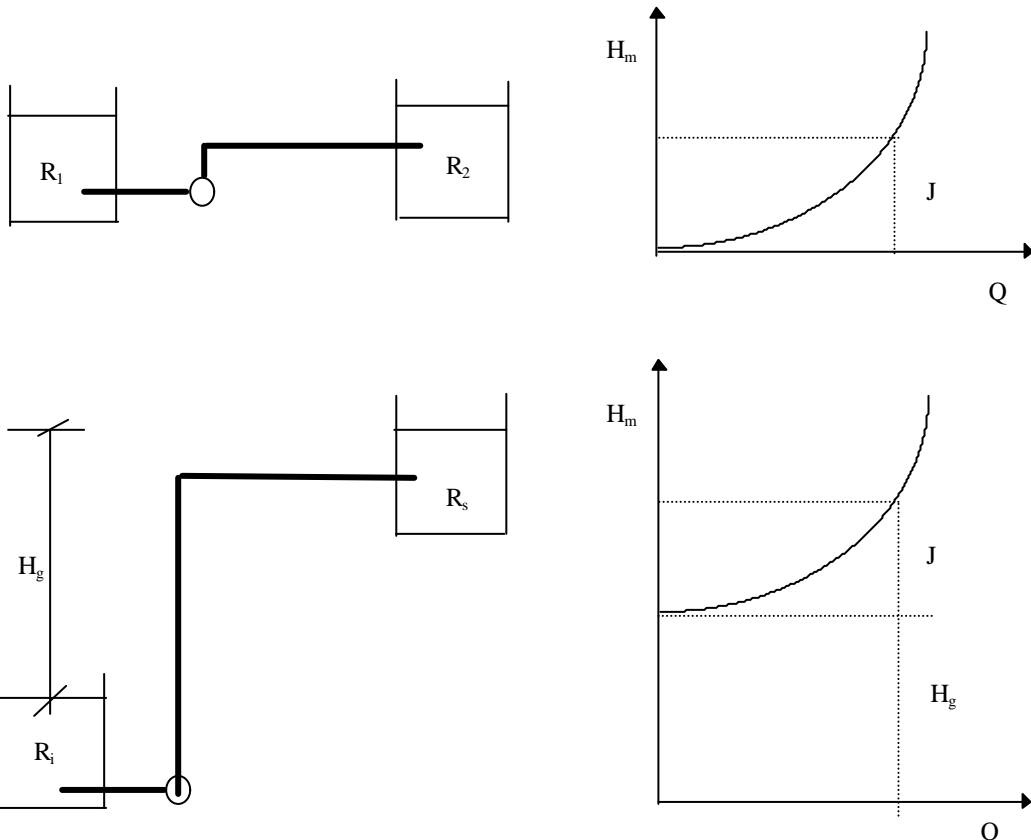
ou:

$$H_m = H_g + r \cdot Q^{1.85}$$

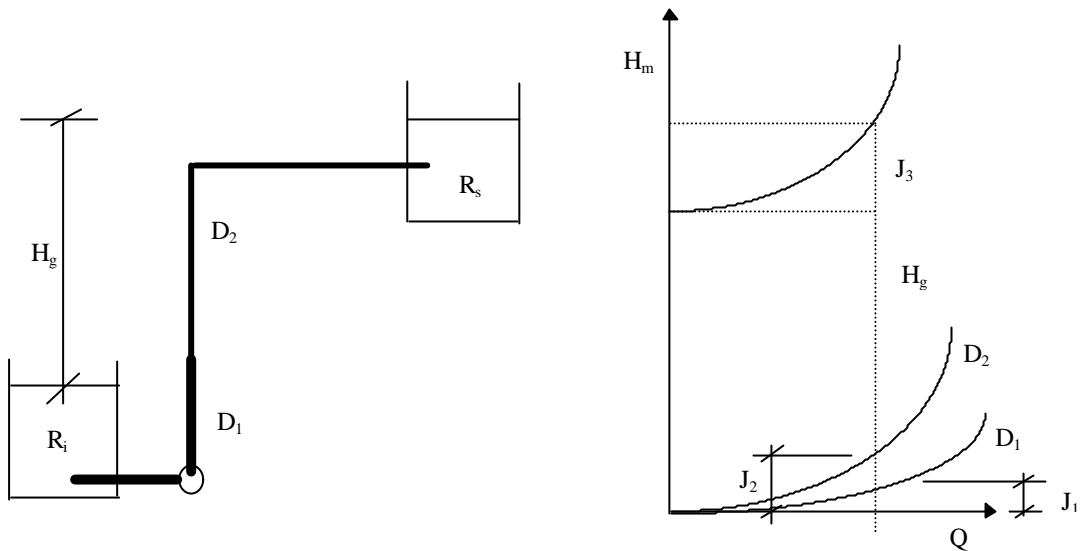
Podem-se traçar as curvas características de cada tubagem colocando os caudais em abcissas e as alturas manométricas em ordenadas.

O valor de r cresce com o comprimento da tubulação e decresce quando o diâmetro aumenta. A inclinação da curva, num ponto qualquer depende do valor de r .

Quando a H_g é nula a curva do sistema passa pela origem dos eixos.



5.8.2 - Tubagem em série

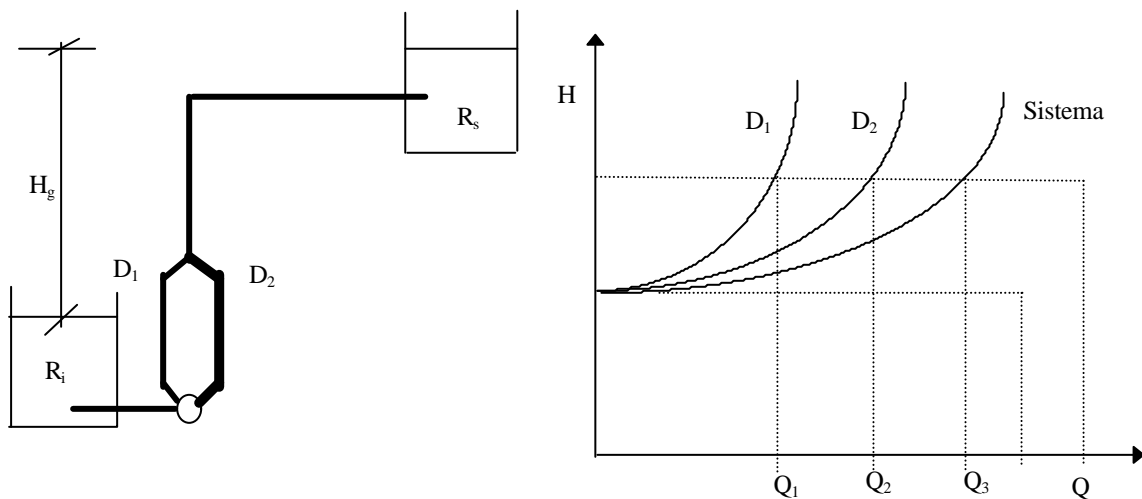


Na tubagem em série traçam-se as perdas de carga para cada troço. A perda de carga total é a soma das perdas de carga referentes a cada diâmetro.

$$J_3 = J_1 + J_2$$

O caudal é sempre o mesmo.

5.8.3 - Tubagem em paralelo

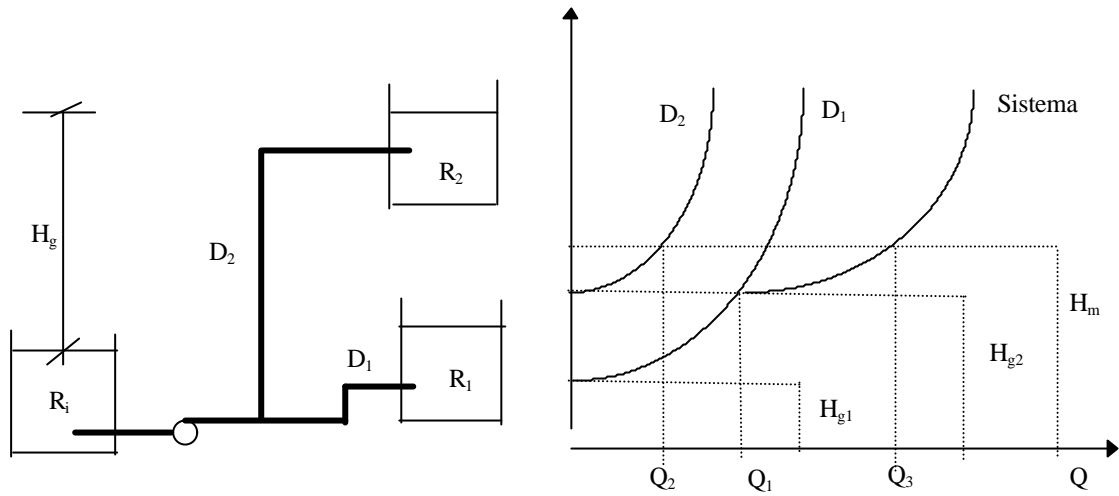


$$Q_3 = Q_1 + Q_2$$

A perda de carga é a mesma para todos os troços.

Somam-se os caudais.

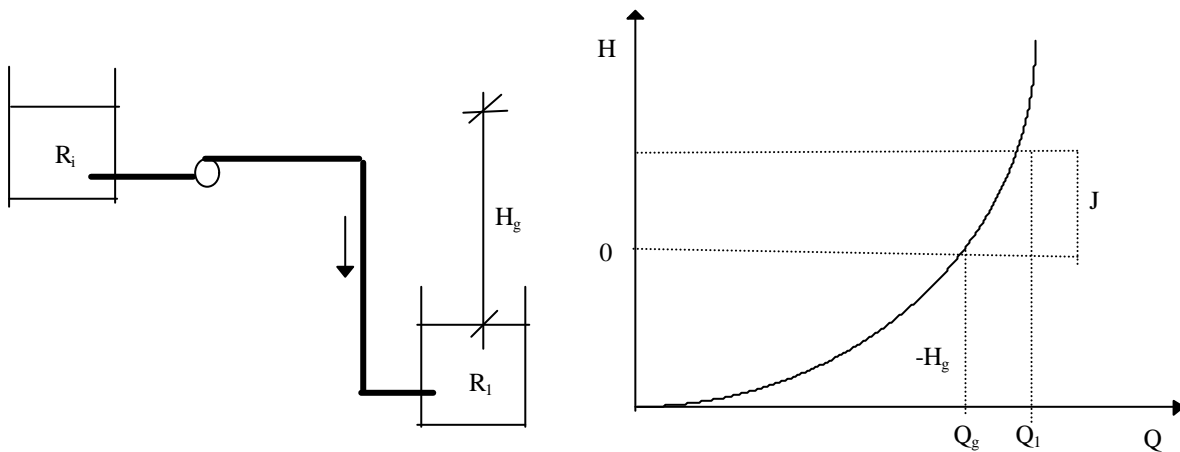
5.8.4 - Reservatórios em cotas diferentes



Para a mesma altura manométrica somam-se os caudais das duas tubulações e obtém-se a curva do sistema. Para caudais até Q_1 só o R_1 é abastecido.

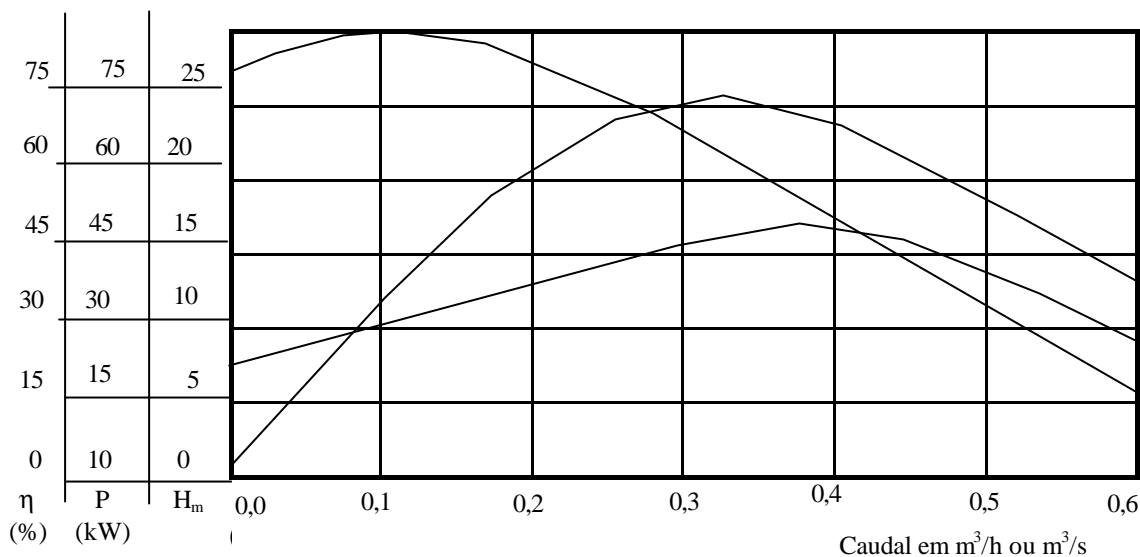
Para maiores caudais os tubos funcionam, como se estivessem em paralelo, com a altura manométrica H_m .

5.8.5 - Sistema por gravidade



Nestas instalações só se podem obter caudais até ao valor de Q_g . Para maiores caudais tem que se instalar uma bomba para suprir as perdas de carga.

5.9 - Curvas características das bombas centrífugas



h Rendimento

P Potência

H_m Altura manométrica.

A energia mecânica, gerada pelo impulsor, é transferida ao líquido. A intensidade das forças centrífugas varia com as dimensões, forma e número de rotações do impulsor ou propulsor.

Quando se altera um destes parâmetros altera-se, também, a curva característica.

A curva característica representa as condições hidráulicas em que a bomba trabalha com determinada rotação (na unidade de tempo, geralmente r.p.m. (rotações por minuto)).

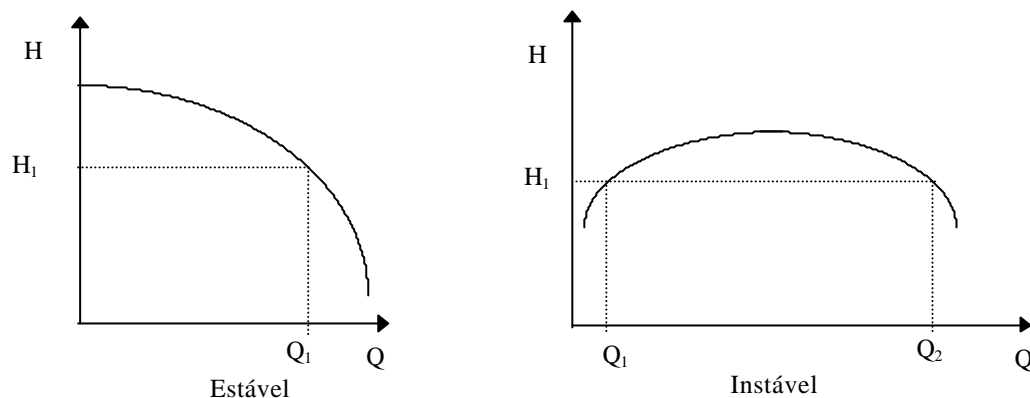
5.10 - Tipos de curvas características

As curvas características das bombas classificam-se em:

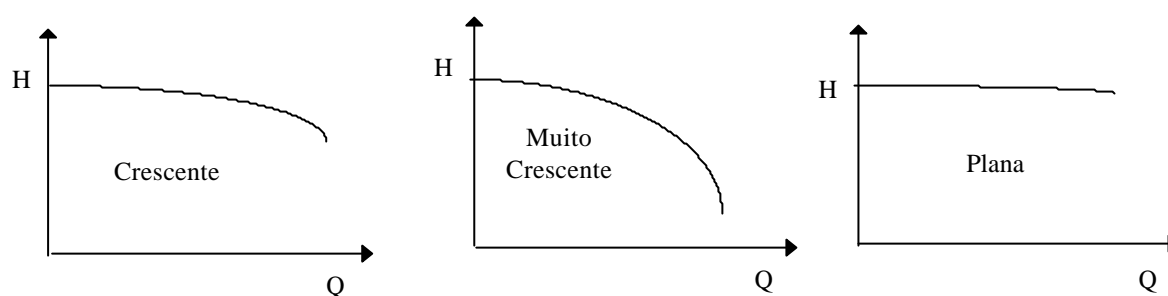
- a) - Estáveis
- b) - Instáveis

Nas bombas estáveis para cada H_m corresponde um único Q .

Nas instáveis para cada H_m correspondem dois ou mais Q .



As curvas estáveis classificam-se em:



a) Crescente (rising): a altura aumenta continuamente à medida que se diminui o caudal. Para cada caudal nulo a altura é aproximadamente 15 a 20% maior do que a altura correspondente ao melhor rendimento.

b) Muito crescente (Steep): a altura aumenta, de forma acentuada com a diminuição do caudal. A altura de caudal nulo é 50% maior do que no ponto de melhor rendimento. Usa-se em instalações onde o H_m varia constantemente.

c) Plana (flat): a altura do ponto de melhor rendimento é quase a mesma do ponto de caudal nulo. Recomendada em instalações onde há grande variação de caudal e pequenas variações de altura manométrica.

5.11 - Variação das curvas características

As curvas características podem variar de acordo com o diâmetro do impulsor, com a rotação e com a forma do impulsor.

a) Diâmetro do impulsor - A carcaça ou corpo de uma bomba pode trabalhar com propulsores de diâmetros diferentes. A cada diâmetro corresponde uma curva característica. Se a forma e rotação se mantiverem constantes as diversas curvas

características mantêm-se paralelas. As curvas superiores correspondem aos maiores diâmetros.

Quando o diâmetro do propulsor é modificado as curvas características apresentam relações bem definidas, expressas pelas equações:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)_1 \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)_2 \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)_3$$

onde 1, 2 e 3 referem-se às características primitivas e às alteradas ou seja com diâmetros “raspados” (diâmetros menores).

Uma “raspagem” pode ir até 25% do valor máximo do diâmetro sem afectar o rendimento.

b) Rotação - a curva característica da bomba modifica-se quando se altera a rotação, conservando a forma e o diâmetro do impulsor. A altura manométrica cresce com o número de rotações.

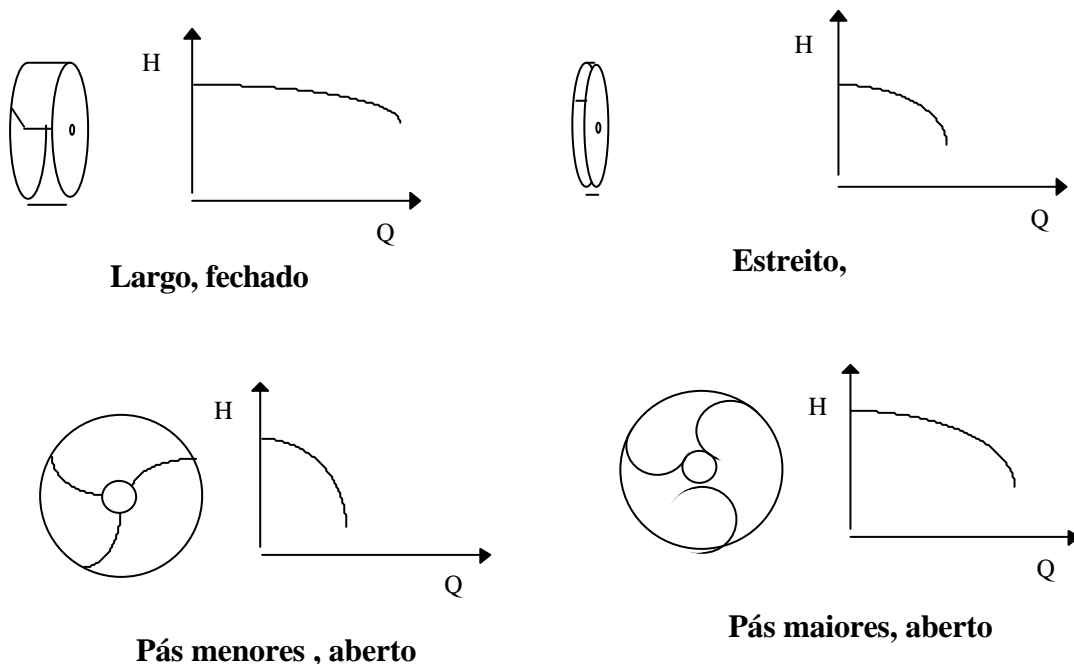
A rotação pode ser analisada pelas seguintes expressões:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)_1 \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)_2 \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)_3$$

Estas igualdades só são válidas quando as variações de velocidade são moderadas.

c) - Com a forma do propulsor

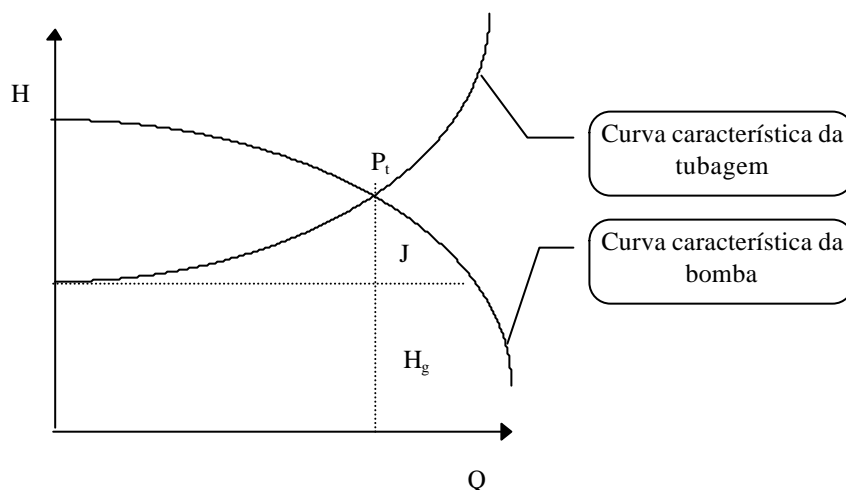
Como vimos em 2.6.4 os propulsores podem ser abertos fechados e semi-abertos.



5.12 - Ponto de trabalho

Nas bombas de tipo crescente a maior altura manométrica corresponde ao caudal nulo. Este ponto denomina-se ponto de caudal nulo ou *sheet off* e indica que a bomba trabalha com sua rotação normal mas com as válvulas da tubagem completamente fechadas.

Mantendo a bomba trabalhando e abrindo gradualmente a válvula, a água começa a escoar originando as respectivas perdas de carga na altura manométrica. A pressão vai diminuindo até atingir o equilíbrio no ponto em que se cruzam as curvas características da bomba e do sistema.



O ponto de trabalho ou ponto de funcionamento da bomba P_t é definido pelo cruzamento das curvas características da bomba e da tubagem.

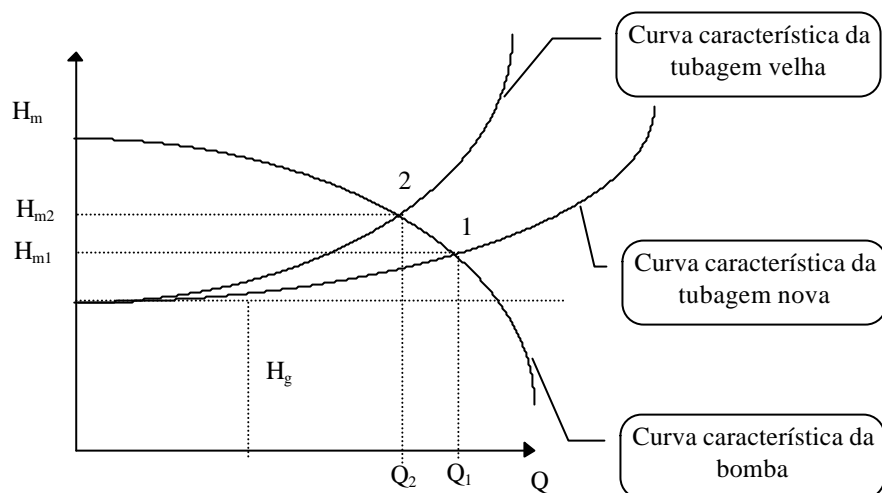
A vazão Q_t no ponto P_t é conseguido com a válvula toda aberta. O caudal cresce de zero até Q_t e altura manométrica cresce de H_g até ao seu valor de funcionamento ($H_g + J$).

5.13 - Faixa de trabalho das bombas centrífugas

Para se obter um rendimento máximo os caudais e as alturas manométricas são bem definidas. Pode-se operar com caudais maiores ou menores assim como com alturas manométricas menores ou maiores mas as bombas operam com rendimentos inferiores.

5.14 - Envelhecimento da tubagem

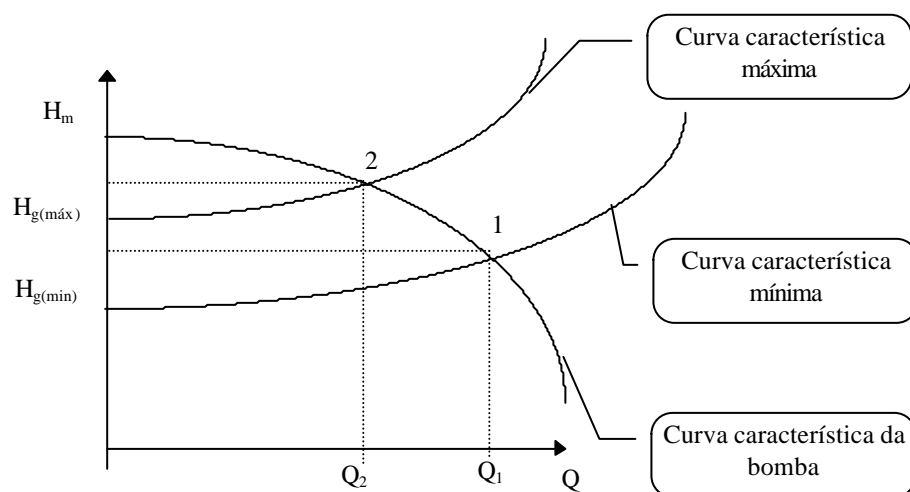
Com o envelhecimento da tubagem (tuberculização, incrustação, etc.) as perdas de carga aumentam e conseqüentemente aumentam as alturas manométricas. As bombas respondem com menores caudais.



Quando a altura manométrica aumentou, devido ao envelhecimento da tubagem (maior perdas de carga) a bomba passou a fornecer caudal Q_2 menor do que o anterior Q_1 .

5.15 - Variações dos níveis de aspiração e de compressão

A altura geométrica de elevação altera-se com a variação dos níveis de aspiração e de compressão, e com ela, desloca-se paralelamente a ela mesma, a curva do sistema.



Nestes casos calcula-se a altura geométrica mínima que se verifica quando as alturas de aspiração h_a e de compressão h_c registam os menores valores e a altura geométrica máxima fornecida pela altura de aspiração e de compressão maiores. Traçam-se, depois, as curvas características da tubagem referentes às duas situações, obtendo-se os pontos Q_1 e Q_2 .

Para a maior altura manométrica a bomba fornece caudal menor Q_2 . O ponto Q_1 corresponde ao maior caudal e menor altura.

5.16 - Selecção das bombas

Para escolha de uma bomba deve-se conhecer o caudal e altura manométrica em primeiro lugar. O primeiro passo será consultar os gráficos de selecção relativos à linha de produção de cada fabricante. Estes gráficos são diagramas cartesianos que especificam o campo de cada uma das bombas pertencentes a uma série do mesmo tipo.

Escolhida a bomba no gráfico de selecção, procura-se no catálogo a respectiva curva característica que fornece o diâmetro do rotor, o rendimento e outros dados úteis.

5.17 - Associação de bombas centrífugas

Várias são as razões que levam à necessidade de fazer associação de bombas.

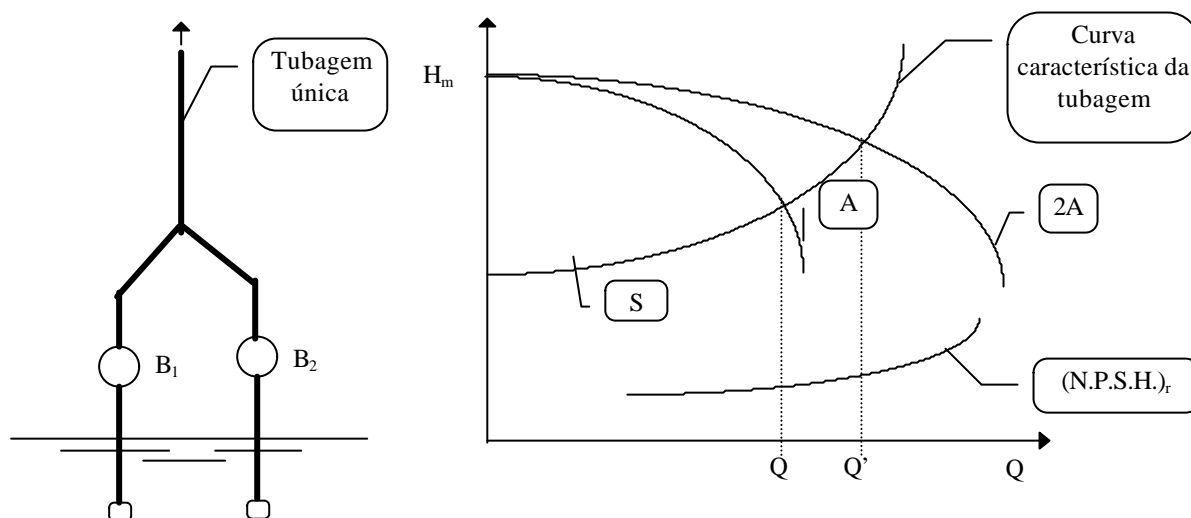
- a) Quando o caudal é muito grande e no mercado não existem bombas capazes de atender à demanda pretendida;
- b) Aumento do caudal no tempo;
- c) Inexistência de bombas capazes de vencer uma grande altura manométrica.

As duas primeiras alíneas dão origem à associação em paralelo que consiste em fazer duas ou mais bombas elevarem a água numa única linha ou seja cada uma bombeia um caudal parcial.

Quando a altura manométrica é muito grande faz-se uma associação em série. Neste caso as bombas elevam numa linha comum de tal modo que a anterior bombeia para a aspiração da posterior, recebendo a água maior quantidade de energia de pressão.

5.17.1 - Bombas em paralelo

Em paralelo todas as bombas trabalham sob a mesma altura manométrica total. Os caudais são somados.



Consideremos o sistema formado pelas bombas B_1 e B_2 iguais. Na associação em paralelo é conveniente que as bombas sejam iguais, pois o caudal distribui-se igualmente entre elas.

A curva A é característica de uma das bombas e a $2A$ é a característica de duas bombas iguais, operando em paralelo.

A curva S é a característica do sistema.

O ponto de trabalho do conjunto situa-se em P' mas se uma bomba parar o ponto de trabalho desloca-se para P fornecendo o caudal Q . No ponto P' o caudal fornecido é o Q' sempre menor do que $2Q$.

O caudal total do sistema é menor do que a soma dos caudais das bombas operando isoladamente.

O ponto de trabalho desloca-se para a direita quando as bombas operam em paralelo.

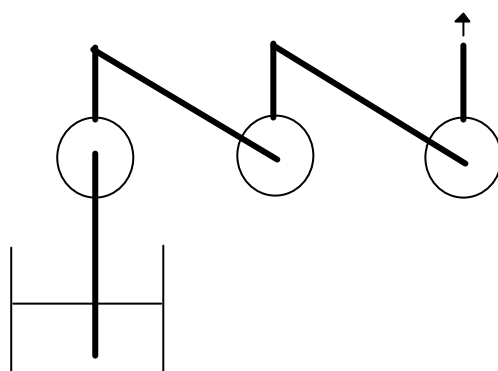
Se uma bomba parar, a outra continuará operando, com o seu ponto de trabalho em P.

A potência absorvida e o (N.P.S.H.), são maiores em P' motivo porque, ao projectar-se uma linha em paralelo, deve-se estudar os valores para o ponto P'.

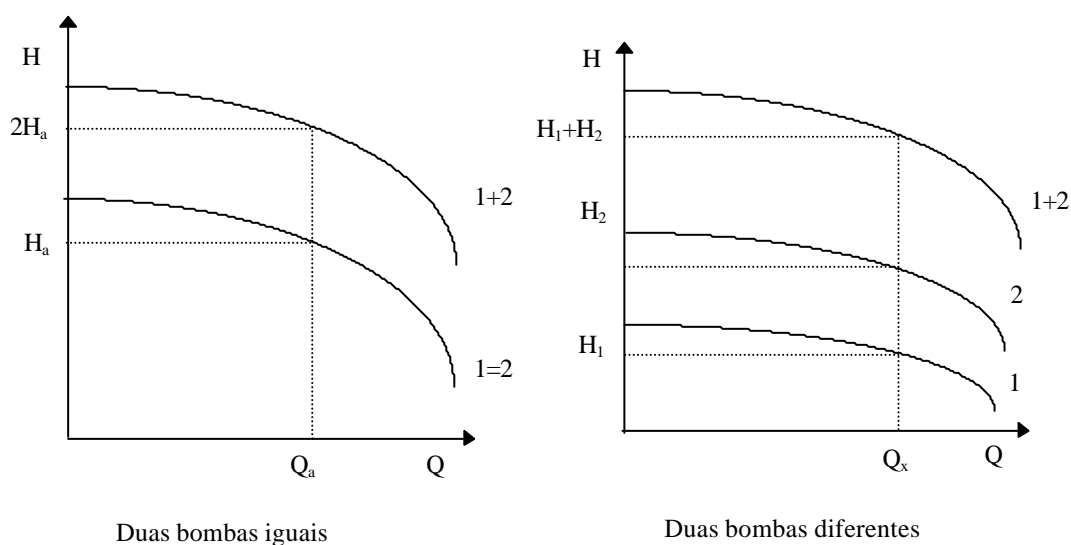
Quando as bombas têm características diferentes podem também operar em paralelo mas apresentam problemas mais sérios do que no caso de bombas iguais.

5.18 - Bombas em série

O arranjo típico de associação de bombas em série é o seguinte:



Quando duas ou mais bombas operam em série o caudal é o mesmo para todas elas mas as alturas manométricas somam-se, como se vê nos diagramas a seguir.



Na associação em série, com duas bombas iguais, para uma altura manométrica H_a corresponde um caudal Q_a e com outra bomba igual dispõe-se do mesmo caudal para uma $H_m = 2H_a$.

No caso de duas bombas diferentes a altura manométrica total, para o mesmo caudal é $H_m = H_1 + H_2$.

5.19 - Associação de bombas (rendimentos)

5.19.1 - Bombas em paralelo

As bombas elevam a água através da mesma tubagem sendo o caudal final a soma dos caudais de cada bomba.

Para uma altura manométrica H_m e duas bombas será:

Bomba 1 $\Rightarrow Q_1, P_1, h_1$;

Bomba 2 $\Rightarrow Q_2, P_2, h_2$;

$$P_1 = \frac{\mathbf{g} \cdot Q_1 \cdot H_m}{\mathbf{h}_1}$$

$$P_2 = \frac{\mathbf{g} \cdot Q_2 \cdot H_m}{\mathbf{h}_2}$$

Se for η o rendimento total

$$P_1 + P_2 = \frac{\mathbf{g} \cdot (Q_1 + Q_2) \cdot H_m}{\mathbf{h}}$$

$$\frac{\mathbf{g} \cdot Q_1 \cdot H_m}{\mathbf{h}_1} + \frac{\mathbf{g} \cdot Q_2 \cdot H_m}{\mathbf{h}_2} = \frac{\mathbf{g} \cdot (Q_1 + Q_2) \cdot H_m}{\mathbf{h}}$$

$$\frac{Q_1}{\mathbf{h}_1} + \frac{Q_2}{\mathbf{h}_2} = \frac{Q_1 + Q_2}{\mathbf{h}}$$

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{h}_1 \cdot \mathbf{h}_2 \cdot (Q_1 + Q_2)}{\mathbf{h}_2 \cdot Q_1 + \mathbf{h}_1 \cdot Q_2} \quad \text{associação em paralelo}$$

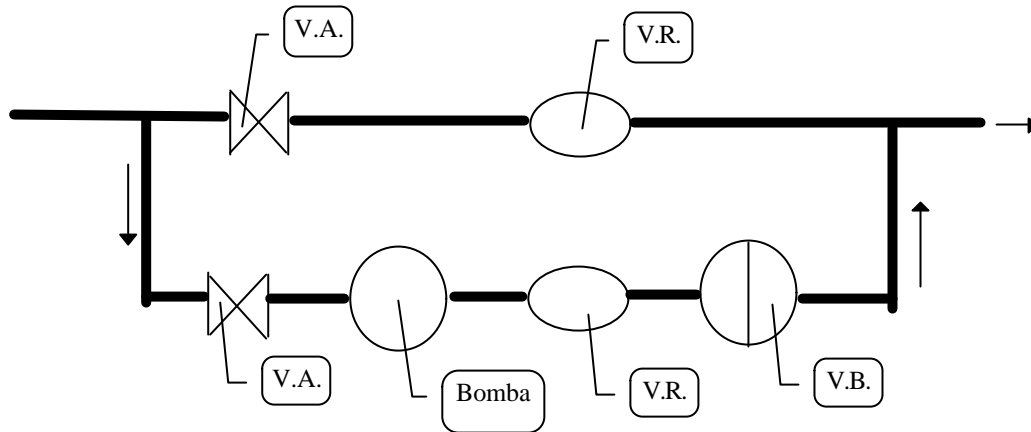
5.19.2 - Bombas em série

O caudal é o mesmo para cada uma das bombas mas as alturas manométricas são diferentes. Por semelhança.

$$h = \frac{h_1 \cdot h_2 \cdot (H_1 + H_2)}{h_2 \cdot H_1 + h_1 \cdot H_2} \quad \text{associação em série.}$$

5.20 - BOOSTERS

BOOSTER é uma bomba que, quando colocada numa tubagem, aumenta a pressão.



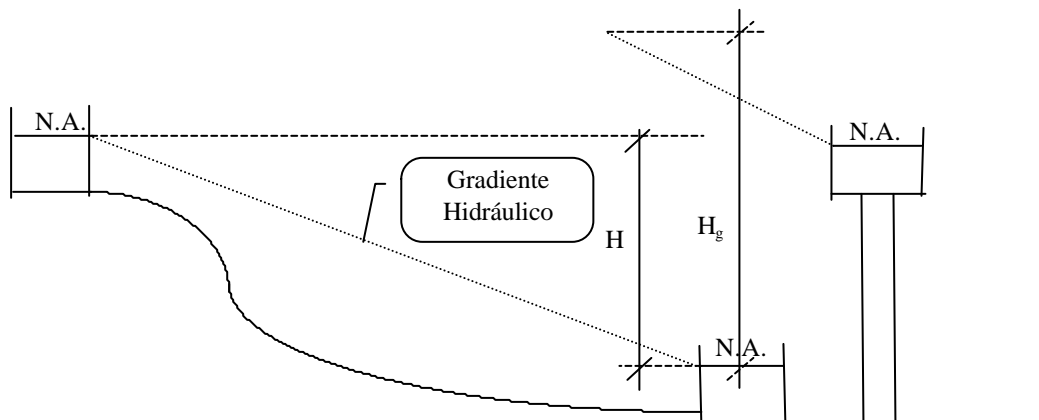
V.A. Válvula de adufo;

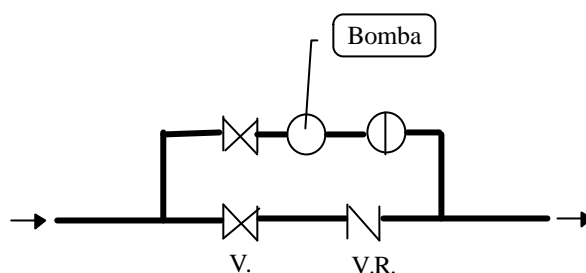
V.R. Válvula de retenção;

V.B. Válvula de borboleta.

Um BOOSTER fica intercalado numa adutora mantendo constante o caudal e compensando as perdas de carga.

É instalado geralmente em *bypass* isto é, em paralelo. Na adutora deve ser colocada uma válvula de retenção e uma válvula de adufo.





Sem o BOOSTER o caudal na tubagem depende exclusivamente da altura geométrica ou seja do desnível topográfico.

Ao operar, o BOOSTER gera uma energia H que origina um “degrau” no gradiente hidráulico dando-lhe mais cota com a válvula V totalmente fechada o caudal passa todo através da bomba. O caudal quando escoar devido somente à gravidade é proporcional a

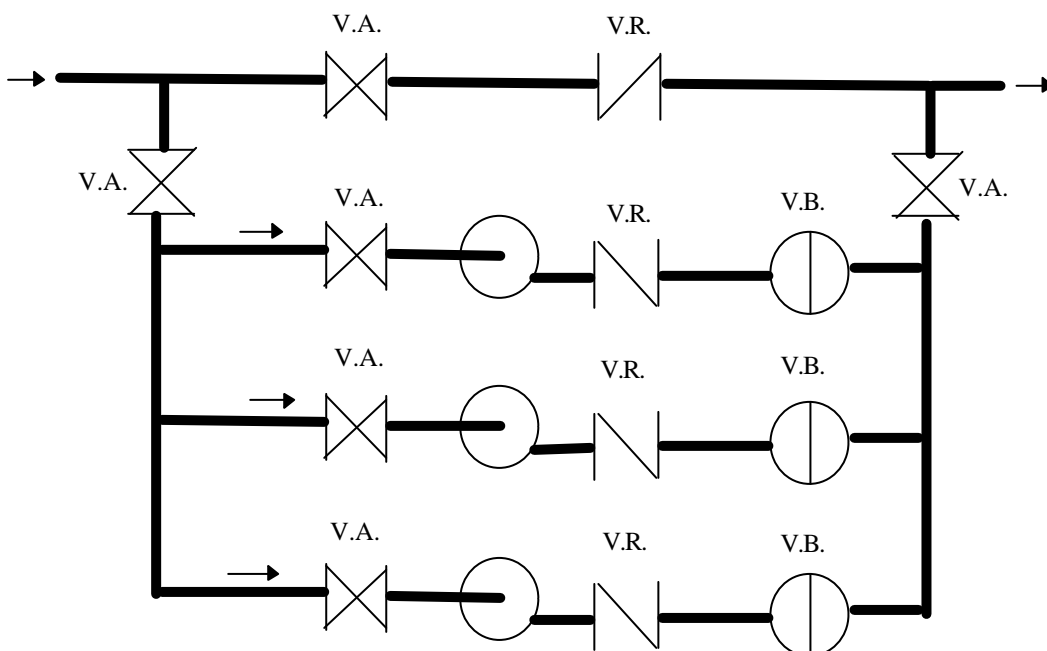
$\sqrt{\frac{H_g}{L}}$ mas, sob o efeito da energia $H_g + H$ o caudal no BOOSTER e na tubagem é

proporcional a $\sqrt{\frac{H_g + H}{L}}$.

Isto é, como se baixasse o nível do reservatório de jusante de uma profundidade H referente à energia que o BOOSTER fornece.

5.20.1 - Associação de BOOSTERS

Podem-se associar BOOSTERS em paralelo conforme o esquema abaixo.



B Bomba;

V.A. Válvula de adufa;

V.B. Válvula de borboleta;

V.R. Válvula de retenção.