

MECÂNICA DE FLUIDOS

Cap 6



Bombas hidráulicas

- 6.1 Considerações gerais
- 6.2 Características e funcionamento das bombas centrífugas
- 6.3 Seleção da bombas hidráulica mais adequada a uma instalação
- 6.4 Operação de bombas hidráulicas em paralelo e em série

▪Bibliografia:

- Quintela, A. 2000. *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa;
- Metcalf. 2003. *Wastewater engineering, treatment and reuse*. McGraw Hill
- Lencastre, A. 2000. *Hidráulica Geral*. 1996. Edição do autor. Lisboa;
- Oliveira, L.; Lopes, A. 2007. *Mecânica dos fluidos*. ETEP, Lisboa, 2ª edição

6.1. Considerações gerais

☐ Enquadramento do estudo das bombas hidráulicas

Para se efectuar o transporte de um fluido sob pressão é geralmente necessário adicionar energia ao fluido:

- Para **compensar as perdas de carga** que o fluido sofre ao percorrer a distância entre a origem da água e o destino;
- Para compensar os **desníveis** entre a origem da água e o destino;
- Para que o fluido atinja o destino com uma **determinada pressão ou velocidade**.



Definição e classificação

Bomba Hidráulica é uma *turbomáquina (TM)*

- Uma turbomáquina (TM) é um dispositivo mecânico onde se dá a *interacção entre um fluido em escoamento e um órgão provido de pás* (o rotor);
- O rotor está animado de movimento de rotação em torno de um eixo, havendo uma *transferência de energia entre este e o fluido*;
- No caso particular do fluido ser a água é habitual adoptar-se para aqueles dispositivos a designação de *Máquinas Hidráulicas (MH)*.

Numa **MH** transferência de energia pode dar-se do fluido para a máquina ou desta para o fluido:

Classificação das TM em função do sentido da transferência de energia

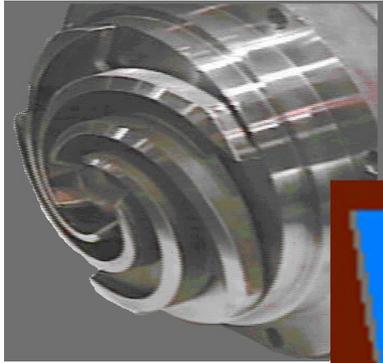
Turbomáquina	Conversão de energia	Fluido
Turbina	fluido → máquina	compressível ou incompressível
Bomba	máquina → fluido	incompressível

- As bombas hidráulicas *recebem energia potencial de um motor* e transformam parte dessa potência em:

- *Energia cinética (movimento)* – bombas cinéticas
- *Energia de pressão (força)* – bombas de deslocamento directo

- Com a facilidade de acesso à eletricidade e aos motores eléctrico, as *bombas cinéticas do tipo centrífugas* passaram a ser preferidas devido às seguintes razões:

- principio de funcionamento simples e bem testado;
- maior robustez;
- maior rendimento;
- menor custo de instalação, operação e manutenção;
- pequeno espaço exigido para montagem, comparativamente com as de pistão.



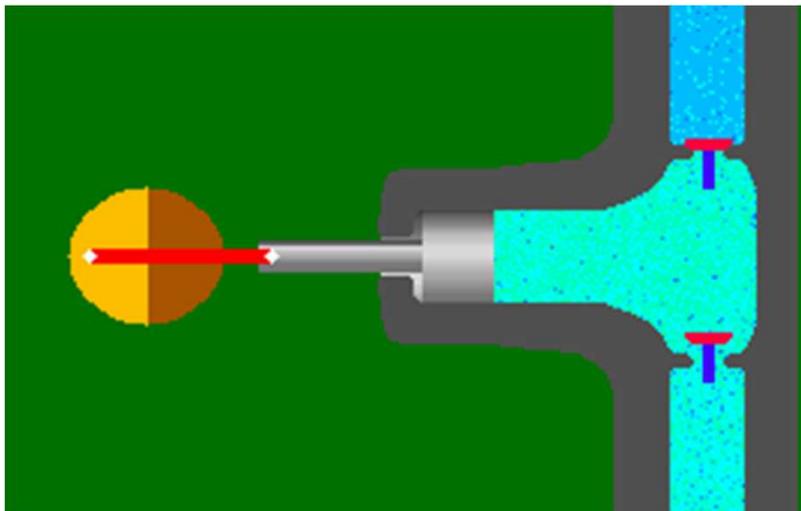
Bombas hidráulicas

Exemplo de bomba cinética - centrífuga



Bombas hidráulicas

Exemplo de bomba de deslocamento directo

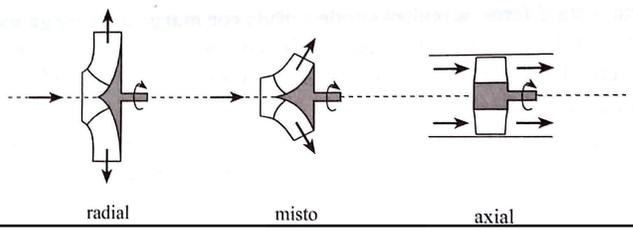


6.2. Características e funcionamento das bombas centrífugas *Bombas hidráulicas*

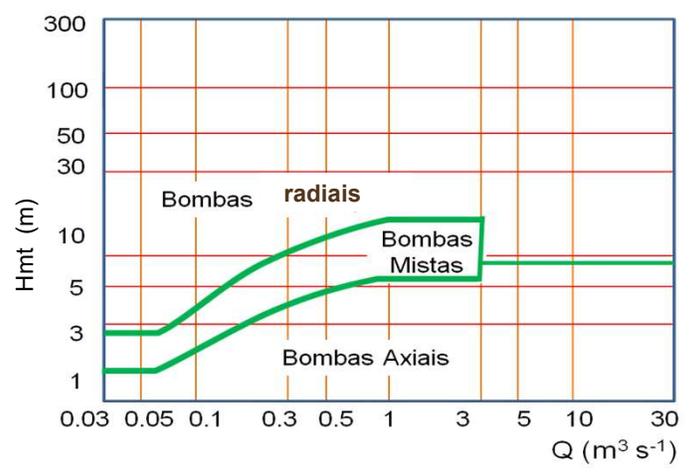
- ❑ Característica principal
 - O fornecimento de energia à água é feito sob forma de energia de velocidade (altura cinética);
 - Essa energia converte-se, dentro da bomba, em energia de pressão.
- ❑ Classificação das BH centrífugas quanto ao trajecto do fluido no seu interior

Radiais	Quando escoamento se faz predominantemente em planos perpendiculares ao eixo de rotação
Axiais	Se o escoamento se faz predominantemente em direcções paralelas ao eixo de rotação.
Mistas	Se o escoamento se faz parcialmente de uma e de outra das formas descritas atrás.

Vista em corte de três tipos de impulsor de bomba



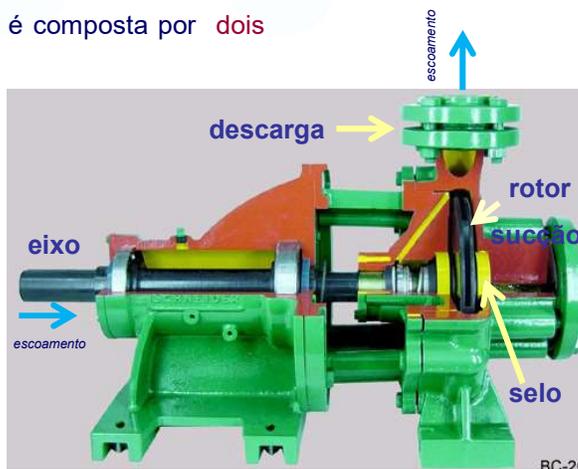
❑ Domínios de aplicação das bombas centrífugas *Bombas hidráulicas*



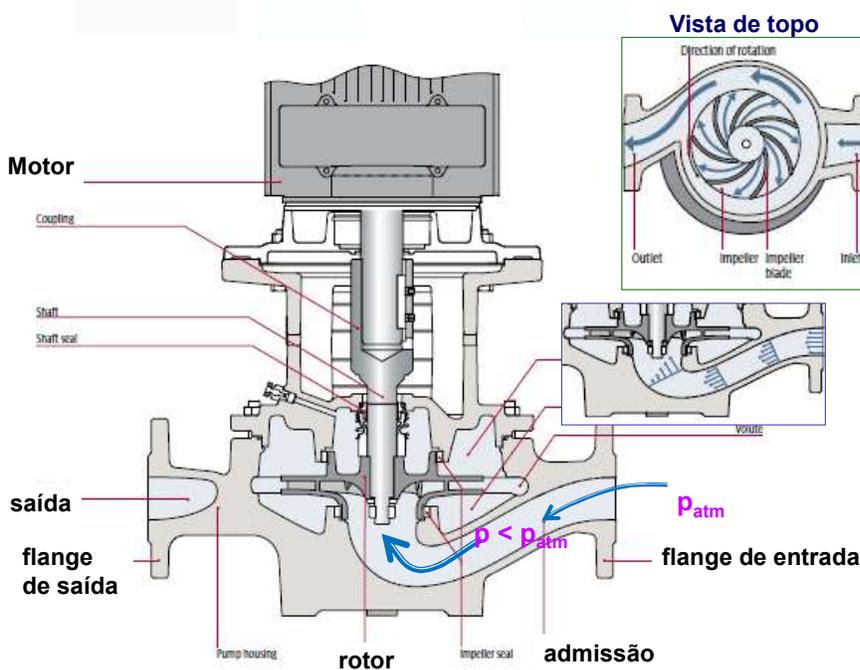
Componentes das bombas centrífugas

Uma bomba centrífuga é composta por dois elementos principais:

- o corpo da bomba (carcaça), que dirige o líquido para o rotor e o afasta a pressão mais elevada;
- o rotor ou impulsor, que modifica a direcção das trajectórias líquidas



O corpo da bomba apresenta, a montante e a jusante do rotor, trechos de conduta (aspiração e impulsão respectivamente) que se designam por flanges.



➤ **O Rotor**

É o elemento rotativo das bombas centrífugas. É constituído por um núcleo movido pelo respectivo eixo, a que se ligam as pás.

Pode ser de ferro fundido, bronze ou inox, dependendo das condições de emprego.

As bombas de fluxo radial podem ter rotores do tipo aberto, semi-aberto e fechado.



rotor fechado



rotor semi-aberto



rotor aberto

É o elemento que mais influencia o desempenho da bomba



ROTOR FECHADO

O rotor fechado tem as pás compreendidas entre dois discos paralelos, podendo ter entrada de um só lado (sucção simples) ou de ambos os lados.



É mais eficiente que os outros tipos, porém é recomendado para água limpa.

ROTOR ABERTO E SEMI ABERTO

- O rotor aberto tem pás livres na parte frontal e quase livres na parte posterior;
- No rotor semi-aberto, as pás são fixadas de um lado num mesmo disco, ficando o outro lado livre.



Estes dois tipos de rotores destinam-se a bombear líquidos viscosos ou sujos (com partículas sólidas em suspensão), pois dificilmente são obstruídos (águas residuais sem pré-tratamento).

➤ Outros componentes:

- Eixo;
- Mancais ou rolamentos;
- Selo mecânico: função de vedação.
- Gaxetas: anéis de metal com a função de impedir vazamentos ou entrada de ar;



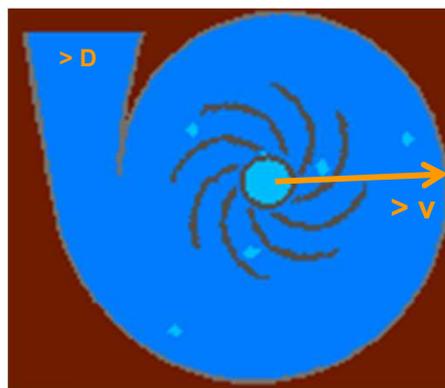
SELO MECÂNICO

☐ Como é conseguido o aumento na pressão?

- A *pressão no interior da bomba é inferior à p_{atm}* aspirando o líquido;
- A energia *cinética do líquido aumenta* no percurso do rotor, ao longo do raio;
- O *acréscimo de energia cinética é transferido parcialmente para energia de pressão* nos órgãos da bomba a jusante do rotor.

Nas bombas centrífugas radiais a conversão de energia cinética em energia de pressão é feita na **voluta ou flange** (conduta que envolve o rotor e cuja secção cresce progressivamente para jusante) e no **cone divergente** que se segue e que termina na flange de ligação à conduta de impulsão.

Ao longo da voluta a energia cinética vai gradualmente sendo transformada em pressão.



Vantagens das bombas centrífugas

- construção simples
- baixo custo (instalação, operação, manutenção)
- o fluido é fornecido a pressão uniforme, sem choques ou flutuações de pressão
- a tubagem de elevação pode ser parcialmente ou totalmente fechada sem danificar a bomba
- podem ser usadas em líquidos com grandes quantidades de sólidos em suspensão
- podem ser ligadas directamente a motores
- o funcionamento não envolve uso de válvulas
- menores custos de manutenção

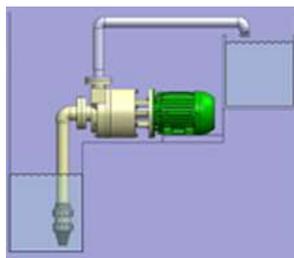
Desvantagens das bombas centrífugas

- têm que ser ferradas para iniciar o seu funcionamento
- a eficiência máxima ocorre numa gama restrita de condições
- não são eficientes para fluidos com alta viscosidade

Classificação das BH centrífugas quanto à posição na captação



Bomba submersível



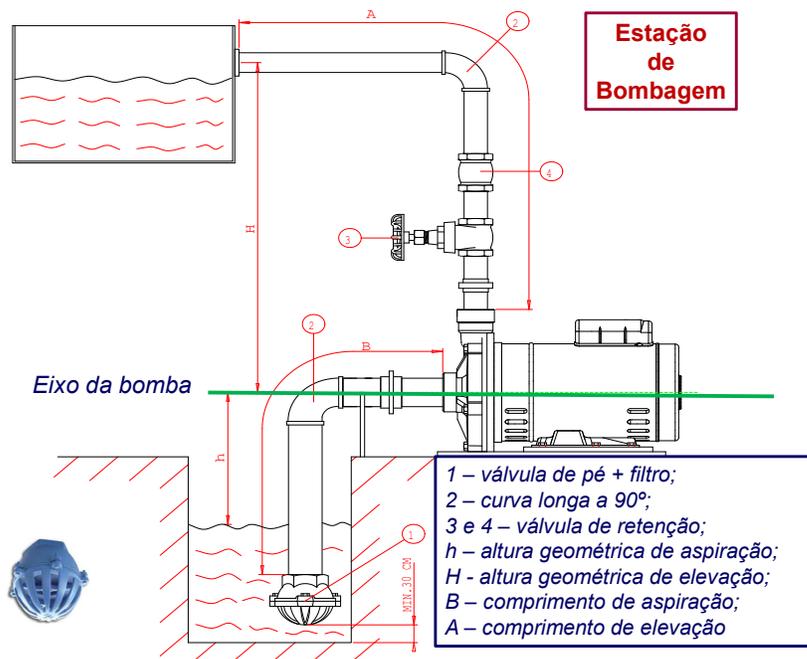
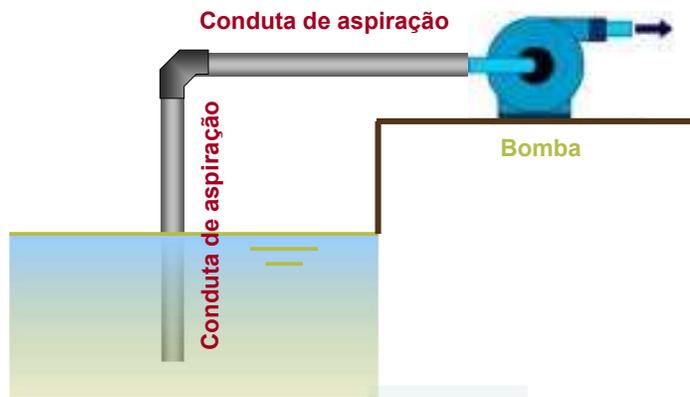
Bomba de sucção negativa (aspiração)



Bomba afogada ou de sucção positiva

Quase todas as bombas a utilizar no âmbito desta UC pertencem à categoria das bombas *centrifugas não submersíveis, de aspiração*.

O termo refere-se a uma bomba colocada *cima da superfície da água* e com um tubo de aspiração.



Altura geométrica de aspiração (Δz_{asp})



$$\Delta z_{asp} = z_B - z_o$$

Altura geométrica de elevação (Δz_{elev})



Classificação das BH quanto ao número de elementos do rotor

Unicelular	Se o rotor for constituído apenas por um conjunto de pás principais.
Multicelular	Se o rotor for constituído por mais de um conjunto de pás principais, idênticos ou não.



Outras classificações podem ser estabelecidas com base em diferentes critérios, tais como:

- **Caudal a elevar**
 - Pequena ($Q < 50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$);
 - Média ($50 < Q < 500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$);
 - Grande ($Q > 500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$).
- **Altura total de elevação, altura manométrica total, ou altura de carga** (para água limpa)
 - Baixa pressão ($H_b < 15 \text{ m.c.a.}$);
 - Média pressão ($15 < H_b < 50 \text{ m.c.a.}$);
 - Alta pressão ($H_b > 50 \text{ m.c.a.}$).

Tratando-se de águas residuais, os limites superiores podem ser significativamente menores.

- **Velocidade de rotação do rotor**
 - Baixa rotação ($n < 500 \text{ rpm}$);
 - Média ($500 < n < 1800 \text{ rpm}$);
 - Alta ($n > 1800 \text{ rpm}$).

As velocidades de rotação tendem a serem menores com o aumento dos caudais de projecto. Pequenos equipamentos, trabalhando com água limpa, têm velocidades da ordem de 3200 rpm. Para elevação de esgotos sanitários, por exemplo, em virtude das partículas abrasivas na massa líquida, os limites superiores podem ser significativamente menores ($n < 1200 \text{ rpm}$).

Rendimento de uma bomba hidráulica, η

- O fluido ao atravessar a BH sofre uma evolução *alterando o seu estado termodinâmico* ao permutar energia com o exterior, quer recebendo (bombas) quer cedendo (turbinas);
- A evolução do fluido na BH é acompanhada da *formação de turbilhões que originam perdas de energia*. Estas perdas devidas ao escoamento dependem fundamentalmente da geometria da máquina e são chamadas de *perdas hidráulicas*.
- Além das perdas hidráulicas há a considerar as *perdas mecânicas*, devidas a atritos, fugas, etc.

A eficiência hidráulica em conjunto com a eficiência mecânica definem a eficiência global ou rendimento global η

$$\eta = \frac{H_{mt} Q \gamma}{P_b}$$

- A quantidade de energia eléctrica a ser fornecida ao conjunto motor-bomba não é totalmente aproveitada para elevação do líquido, uma vez que não é possível a existência de máquinas que transformem energia sem consumo nesta transformação;
- Há consumo no motor, na transformação da energia eléctrica em mecânica e na bomba na transformação desta energia mecânica em hidráulica.

O *rendimento* de uma bomba é a relação entre a potência fornecida pela bomba ao líquido (*potência útil*) e a cedida a bomba pelo eixo do motor (*potência motriz*).

Uma bomba recebe energia mecânica através de um eixo e consome uma parcela desta energia no *funcionamento das suas engrenagens*, além do que parte da energia cedida pelo rotor ao líquido perde-se no interior da própria bomba em consequência das *perdas hidráulicas diversas, da recirculação e das fugas*, de modo que só parte da energia recebida do motor é convertida em energia hidráulica útil.

- Compreende-se facilmente o interesse deste parâmetro na medida em que permite avaliar a qualidade das condições de funcionamento duma máquina e determinar as condições de utilização mais rentáveis economicamente.
- Isto é particularmente importante no caso das grandes TM onde as energias postas em jogo são enormes, obrigando os fabricantes a otimizar o rendimento, já que 1% ganho pode representar uma diferença de produção enorme.

Valores mínimos aconselháveis de rendimento de bombas centrífugas

Características	Baixa pressão		Alta pressão			Grandes caudais		
Q (L s ⁻¹)	3	25	2	25	100	150	1000	2000
η	0.56	0.78	0.53	0.81	0.84	0.86	0.9	0.91

- Baixa pressão (H_{mt} < 15 m.c.a.);
- Média pressão (15 < H_{mt} < 50 m.c.a.);
- Alta pressão (H_{mt} > 50 m.c.a.).

6.3 Selecção da bomba hidráulica mais adequada a uma instalação?

- Grandezas usadas para caracterizar o desempenho de uma bomba hidráulica, e respectivas dimensões:
 - Diâmetro do rotor, D [L]
 - Velocidade de rotação, ω [L⁻¹] ou n de rotações, n (rpm);
 - Caudal, Q [L³ T⁻¹];
 - Altura manométrica total, H_b [L];
 - Potência cedida ou recebida, P [ML²T⁻³];
 - Massa volúmica do fluido, ρ [ML⁻³];
 - Viscosidade dinâmica do fluido, μ [ML⁻¹T⁻¹];
 - Aceleração da gravidade, g [LT⁻²];
 - Velocidade de rotação específica, n_q [adim].

$$n_q = n \frac{Q^{1/3}}{H^{3/4}}$$

Curvas características de uma bomba hidráulica

Grandezas características das bombas

- Caudal, Q
- Altura total de elevação da bomba, H_b
- Rendimento, η
- Potência necessária, P_b

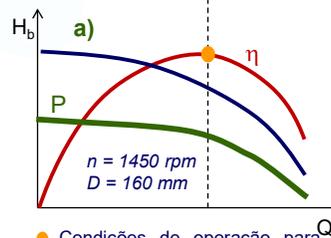
Curvas características das bombas

As condições de funcionamento de uma bomba em regime permanente sintetizam-se num gráfico do tipo a) ou b) onde se representam duas famílias de curvas:

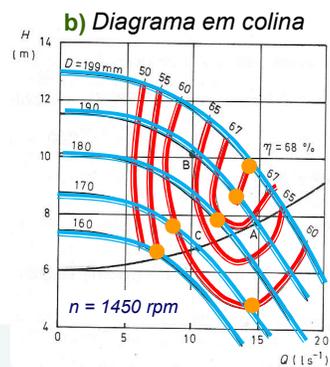
- As **isolinhas do rendimento** e
- As **curvas características**, que são parábolas da forma geral: $H_b = a - b Q^2$.

Cada uma destas relações é representada para um (a) ou **vários (b) diâmetros** do rotor e para ω (ou n) **constante**.

Bombas hidráulicas



• Condições de operação para rendimento máximo, BEP



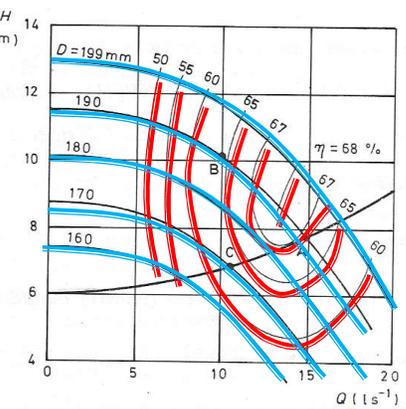
Bombas hidráulicas

Aspectos evidenciados pelo diagrama

- O caudal a fornecer **varia inversamente** com a altura manométrica total;
- Dentro do intervalo de funcionamento da bomba, **existe uma combinação de H_b e de Q** a elevar para a qual a bomba funciona no seu **melhor ponto de eficiência ou rendimento (BEP)**;
- A curva do rendimento relaciona-se com as outras variáveis através de:

$$\eta = \frac{H_b Q \gamma}{P_b}$$

- Qualquer **desvio do BEP** resultará em desperdício de energia.
- O diagrama em colina apresenta uma **zona de funcionamento** da bomba indicada pelo construtor de modo a **limitar a quebra de rendimento e evitar o aparecimento de cavitação**.



Custo total de um sistema de bombagem e suas componentes:

- O consumo de energia é de cerca de 90 % do custo total da bomba centrífuga para o seu tempo de vida;
- Os restantes 10 % são atribuídos à compra, instalação e manutenção do equipamento.



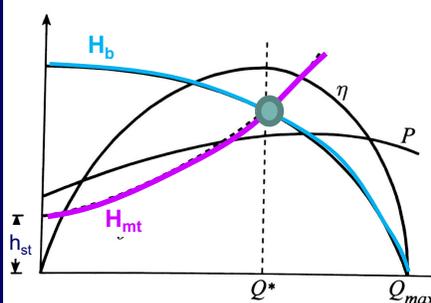
Qualquer melhoria que aumente a eficiência da estação de bombagem vai conduzir a poupança considerável, para além de reduzir a pegada de carbono.

☐ A bomba como parte integrante de uma instalação

Uma bomba não é suposta actuar isoladamente, mas sim como parte integrante de uma instalação, cujo funcionamento assegura.

Para uma determinada gama de variação de caudais, há que distinguir entre:

- Altura de carga disponível que a bomba fornece efectivamente ao fluido, H_b (catálogo da bomba) – curva característica da bomba
- Altura de carga necessária (ou requerida) que a bomba deverá fornecer ao fluido para que a instalação possa funcionar, H_{mt} (calculada pela EB) – curva característica da instalação;



A curva característica da bomba é uma parábola com a concavidade voltada para baixo $H_b = a - b Q^2$

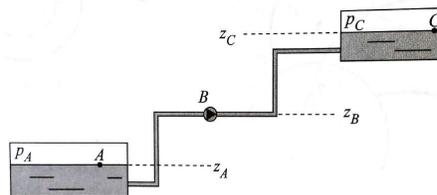
A curva característica da instalação é uma parábola com a concavidade voltada para cima $H_{mt} = a + b Q^2$

Ponto de operação da bomba nesta instalação

Curva característica da instalação

$$\frac{p_A}{\gamma} + Z_A = \frac{p_C}{\gamma} + Z_C + \Delta H - H_{mt} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow H_{mt} = \underbrace{(Z_C - Z_A) + \left(\frac{p_C}{\gamma} - \frac{p_A}{\gamma}\right)}_{h_{st}} + \Delta H$$

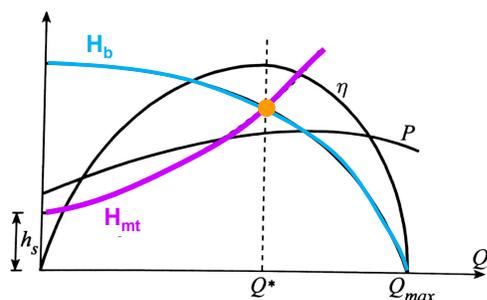


- h_{st} chama-se altura de carga estática e representa o que a bomba tem que vencer para iniciar o escoamento, ou seja, para a instalação passar de $Q = 0$ para $Q > 0$ e
- ΔH é a soma das perdas de carga por fricção e devidas às singularidades

Uma vez que a perdas de carga variam, em regime turbulento, com o quadrado da velocidade (ou do caudal), a equação anterior será uma parábola do tipo:

$$H_{mt} \cong h_{st} + C^{te} Q^2$$

As condições de funcionamento da bomba são determinadas pela **intersecção das curvas $H_{mt}(Q)$ e $H_b(Q)$** , (**ponto de funcionamento**) ou seja, pelo caudal ao qual a altura fornecida pela bomba iguala a altura requerida pela instalação.

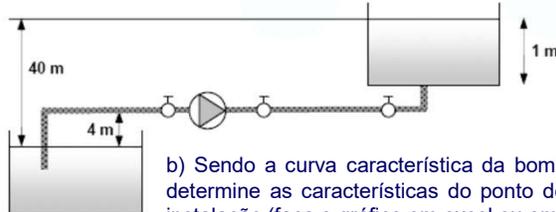


Será desejável que o caudal correspondente à intersecção se aproxime o mais possível do caudal que determina o valor máximo da curva do rendimento (●).

Se tal acontecer exactamente (como na Fig), então o ponto de operação corresponde ao ponto de maior eficiência sendo usual fazer-se a seguinte apresentação:

$$(Q, H, P)_{\eta \text{ máx}} = Q^*, H^*, P^*$$

a) Determine a curva característica da seguinte instalação:



Diâmetro da tubagem = 1"

$$\Delta H_{asp} = 2.5 v^2/2g;$$

$$\Delta H_{elev} = 100 v^2/2g$$

b) Sendo a curva característica da bomba: $H_b = 109 - 15.5 \times 10^6 Q^2$, determine as características do ponto de funcionamento da bomba na instalação (faça o gráfico em excel ou em papel milimétrico)

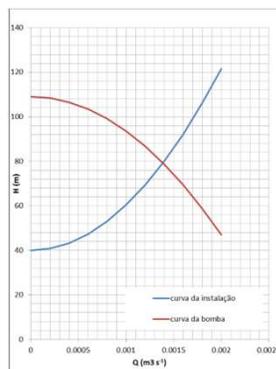
R: $H_{mt} = 40 + 20388923 Q^2$

Características do ponto de funcionamento:

$Q = 0.0013585 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$;

$H = 79 \text{ m}$

(0.00136;79)



Regulação por associação de bombas em série e em paralelo

Dependendo da necessidade física ou da versatilidade desejada nas estações elevatórias, pode optar-se por conjuntos de duas ou mais bombas colocadas **em série ou em paralelo**.

- altura manométrica elevada → bombas em série
- elevar grandes caudais → bombas em paralelo

Bombas em paralelo

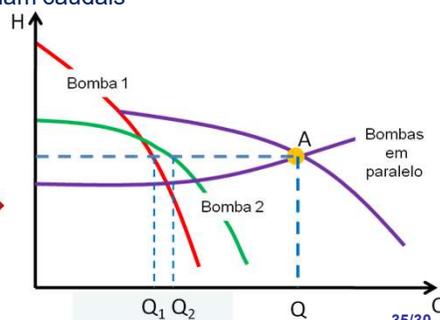


☐ Bombas em paralelo

- É prática comum em sistemas de *abastecimento de água, drenagem de águas residuais ou serviços industriais*, a instalação de bombas em paralelo, principalmente com capacidades idênticas.
- Esta solução torna-se viável quando o *caudal de projecto for muito elevado* ou no caso em que *a variação do caudal for perfeitamente predeterminada* em função das necessidades de serviço.

- Obtenção da curva característica do conjunto:
Teoricamente, bombas em paralelo somam caudais

Quando duas ou mais bombas funcionam em paralelo:
curva característica do conjunto
⇔ soma das abcissas das curvas características
 $H_b = H_b(Q)$ de cada bomba a uma mesma altura de elevação.

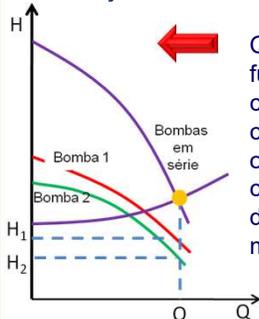


➤ Vantagens da associação de bombas em paralelo:

- O emprego de bombas em paralelo permite a vantagem operacional de que, havendo falha no funcionamento em uma das bombas, *não acontecerá a interrupção completa* e, sim, apenas uma redução do caudal bombeada pelo sistema. No caso de apenas uma bomba aconteceria a interrupção total, pelo menos temporária, no fornecimento.
- Na 2ª situação, a associação em paralelo possibilita uma *flexibilização operacional no sistema*, pois como o caudal é variável poderemos retirar ou colocar bombas em funcionamento em função das necessidades e sem prejuízo do caudal pedido.

□ Associação de bombas em série

- Quando a *altura manométrica for muito elevada*, devemos analisar a possibilidade do emprego de bombas em série, pois esta solução poderá ser mais viável, tanto em termos técnicos como económicos.
- Como principal precaução neste tipo de associação, devemos verificar se *cada bomba a jusante tem capacidade de suporte das pressões de montante na entrada e de jusante no interior da sua própria carcaça*.
- Para melhor operacionalidade do sistema é aconselhável a associação de bombas idênticas, pois este procedimento flexibiliza a manutenção e reposição de peças.
- Obtenção da curva característica do conjunto (bombas em série somam alturas)



Quando duas bombas funcionam em série: curva característica do conjunto ⇔ soma das ordenadas das curvas características $H_b = H_b(Q)$ de cada bomba a um mesmo caudal.

Em ambos os casos o ponto de funcionamento é dado pela intersecção das características do conjunto das bombas e da instalação

□ O rendimento nas associações de bombas hidráulicas

Para qualquer tipo de associação de BH, A potência consumida é igual a soma das potências individuais

$$P_{A//B} = P_A + P_B$$

$$\frac{Q_{ass} \cdot \gamma \cdot H_{ass}}{\eta_{ass}} = \frac{Q_A \cdot \gamma \cdot H_A}{\eta_A} + \frac{Q_B \cdot \gamma \cdot H_B}{\eta_B}$$

Em paralelo – alturas manométricas iguais

$$\eta_{A//B} = \frac{Q_{A//B}}{\frac{Q_A}{\eta_A} + \frac{Q_B}{\eta_B}}$$

Em série – caudais iguais

$$\eta_{A-B} = \frac{H_{A-B}}{\frac{H_A}{\eta_A} + \frac{H_B}{\eta_B}}$$

☐ **Cavitação**

Relembrar: O risco de cavitação está associado aos pontos de menor pressão de um sistema; Ao ocorrer, este fenómeno traduz-se imediatamente pelo aparecimento de vibrações mecânicas, acompanhadas de um ruído característico e uma diminuição drástica do caudal e altura manométrica. De tudo isto resultam danos irreparáveis nas pás do rotor ou impulsor.

Para evitar a ocorrência deste fenómeno, há que assegurar que na zona crítica (*vizinhança imediata do rotor, do lado da aspiração*) a pressão absoluta se mantém sempre superior à correspondente pressão de vapor.



A região mais sujeita a cavitação é a entrada da bomba (ponto onde ocorre o < valor da pressão absoluta)

39/30

Define-se assim um *limiar de segurança*, como sendo a diferença entre o valor da pressão total absoluta na zona crítica e a pressão de vapor do líquido.

Esta diferença de pressão, quando apresentada em altura equivalente é designada de

Net Positive Suction Head (NPSH)

Há que distinguir dois NPSH :

- $NPSH_{RB}$: é a energia requerida pela bomba para aspirar a água desde a origem até ao eixo da bomba .
- $NPSH_{DI}$: é a energia de aspiração disponível na instalação

40/30

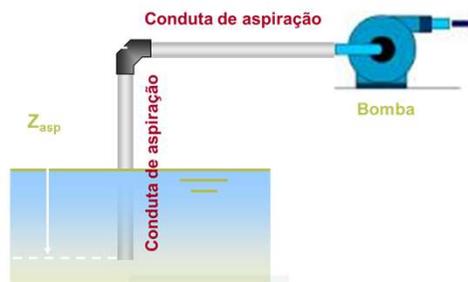
$NPSH_{RB}$: é a energia requerida pela bomba para aspirar a água desde a origem até ao eixo da bomba .

- É função das características da bomba e do caudal a elevar;
- É definido pelo construtor e o seu valor é indicado no catálogo da bomba.

$NPSH_{DI}$: é a energia de aspiração disponível na instalação

- É calculada para cada instalação pela EB na aspiração;
- Depende das perdas de carga e do desnível na aspiração.

Se a energia disponível não for suficiente para aspirar a água, esta começa a libertar o ar dissolvido conduzindo à desferia da bomba e à interrupção do caudal (ocorre cavitação).



41/30

Portanto, para prevenir a ocorrência de cavitação:

$$NPSH_{DI} \geq NPSH_{RB}$$

- o $NPSH_{RB}$ obtém-se do catálogo da bomba;
- o $NPSH_{DI}$ calcula-se para a situação em causa através da fórmula:

$$NPSH_{DI} = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - \Delta H_{asp} - \Delta N_{asp} - \frac{v_{asp}^2}{2g}$$

P_{atm} = pressão atmosférica absoluta (m)

ΔN_{asp} = desnível entre a origem e o eixo da bomba (m)

P_v = pressão de vapor (m)

ΔH_{asp} = perdas de carga na aspiração (m)

v_{asp} = velocidade na conduta de aspiração(m/s)

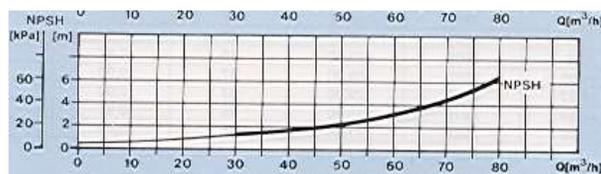
Por vezes só é possível satisfazer a condição acima se a bomba for instalada a um nível inferior ao do reservatório de partida passando o termo gravítico a constituir uma contribuição positiva



Bomba afogada ou de sucção positiva

42/30

NPSH requerido pela bomba para que não ocorra cavitação <- catálogo da bomba



Modos de evitar a Cavitação

No projecto

- No projecto ou dimensionamento da bomba deverá ter-se logo em conta este aspecto, calculando as secções de passagem do fluido de modo a evitar velocidades excessivas, próximo das condições nominais.
- Deverão eliminar-se os ângulos bruscos e as passagens estreitas no escoamento.
- Deve igualmente verificar-se o valor de $NPSH_R$ para o caudal máximo, recorrendo à curva característica disponibilizada pelo fabricante.

Na utilização:

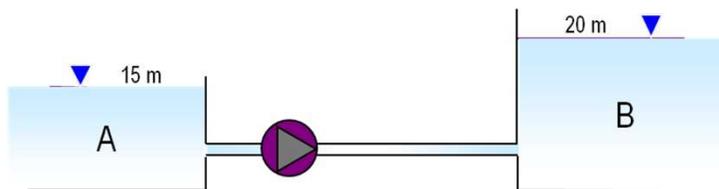
- Ao colocar a bomba hidráulica na instalação convém que a respectiva altura de instalação seja adequada para a gama de condições de funcionamento previstas;
- A altura de instalação deve ser a menor possível, compatível com as características da instalação e as limitações económicas;
- Utilizam-se bombas submersas para elevar água de poços profundos;
- Convém atender sobretudo à conduta de aspiração, procurando reduzir as perdas de carga. Devem evitar-se, tanto quanto possível, condutas longas, com paredes rugosas, curvas de pequeno raio, válvulas, bifurcações, etc;
- Nesta conduta deve utilizar-se uma secção de passagem tão grande quanto possível, para reduzir a velocidade de escoamento;
- Curvas na conduta de aspiração que estejam situadas em planos diferentes, por poderem induzir um movimento helicoidal no escoamento, devem ser evitadas, pois apressam as condições de cavitação.

Uma bomba eleva água de um reservatório A para um outro, B, através de uma conduta de betão, liso e novo, com 1000 metros de comprimento e 60 cm de diâmetro ($f=0,019$). A relação entre a altura total de elevação e o caudal da bomba, acoplada a um motor eléctrico de velocidade de rotação constante, exprime-se por

$$H_b = 23 - 20 Q^2 \quad H \text{ em m e } Q \text{ em } m^3 s^{-1}$$

Considerando as perdas de carga singulares como sendo 10 % das perdas de carga contínuas, determine o caudal na conduta,

- a) Nas condições indicadas; (R: $Q = 0.653 m^3 s^{-1}$)
- b) Quando uma bomba igual é instalada em paralelo com a primeira; (R: $Q = 0.82 m^3 s^{-1}$)
- c) Quando uma bomba igual é instalada em série com a primeira. (R: $Q = 0.81 m^3 s^{-1}$)



Bombas hidráulicas

Q (m ³ s ⁻¹)	Hb (m)	Hmt (m)	Série		Paralelo	
0	23.0	5.0	0	46	0	23
0.1	22.8	5.2	0.1	45.6	0.2	22.8
0.2	22.2	5.9	0.2	44.4	0.4	22.2
0.3	21.2	7.0	0.3	42.4	0.6	21.2
0.4	19.8	8.5	0.4	39.6	0.8	19.8
0.41	19.7	8.7	0.41	39.36	0.82	19.68
0.5	18.0	10.5	0.5	36	1	18
0.6	15.8	13.0	0.6	31.6	1.2	15.8
0.65	14.46	14.46	0.65	28.92	1.31	14.46
0.7	13.2	15.9	0.7	26.4	1.4	13.2
0.8	10.2	19.2	0.8	20.4	1.6	10.2
0.81	9.8	19.6	0.81	19.63	1.62	9.81
0.82	9.6	19.9	0.82	19.10	1.64	9.55
0.9	6.8	22.9	0.9	13.6	1.8	6.8
1.0	3.0	27.2	1.0	6.0	2.0	3.0

