

Bombas & Instalações de Bombeamento

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

Bombas & Instalações de Bombeamento

1. Definições : as máquinas hidráulicas são divididas em dois grupos :

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

A. Turbinas Hidráulicas :

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

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

Bombas & Instalações de Bombeamento



Turbina Francis



Turbina Kaplan



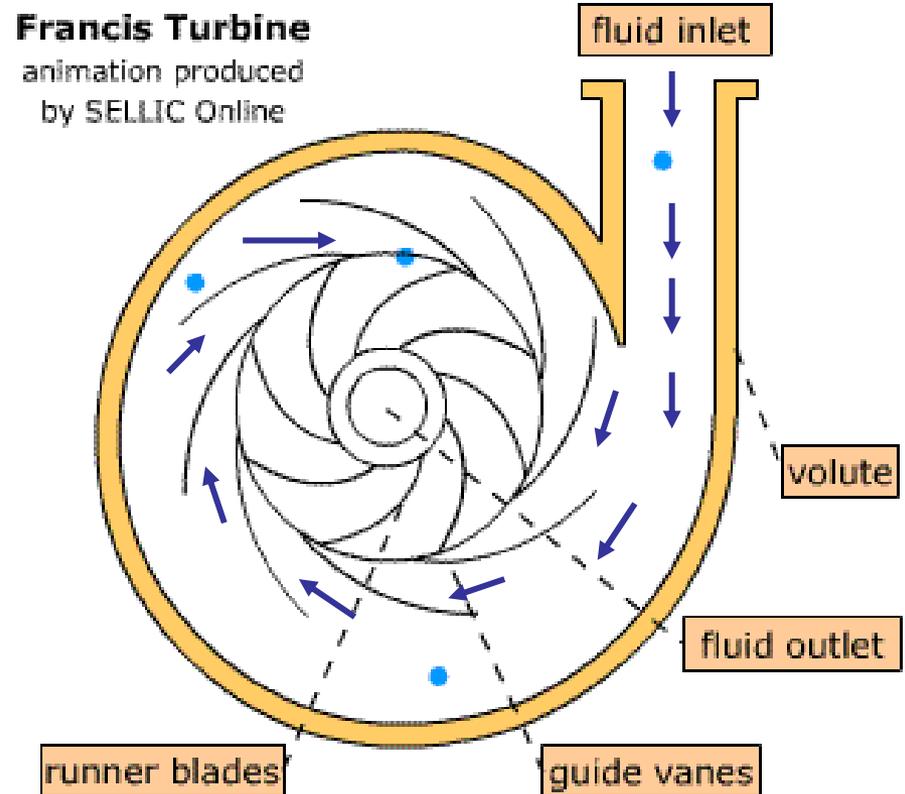
Turbina Pelton



Turbina Propeler

Bombas & Instalações de Bombeamento

Esquema de funcionamento de uma turbina hidráulica



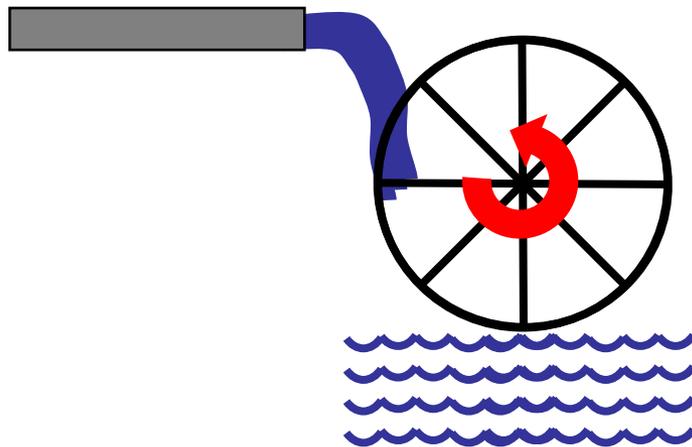
Bombas & Instalações de Bombeamento

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

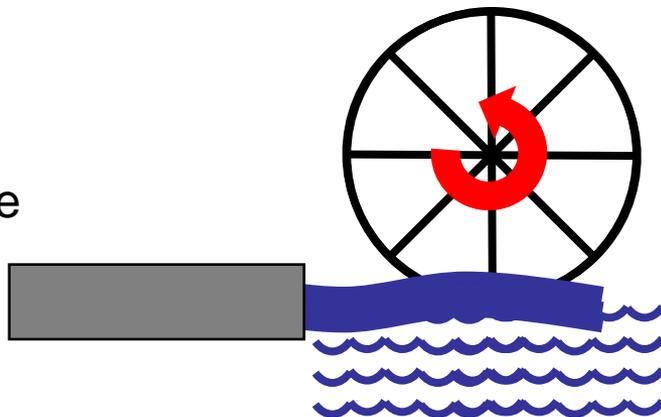
Bombas & Instalações de Bombeamento

Rodas d'água

Força



Velocidade



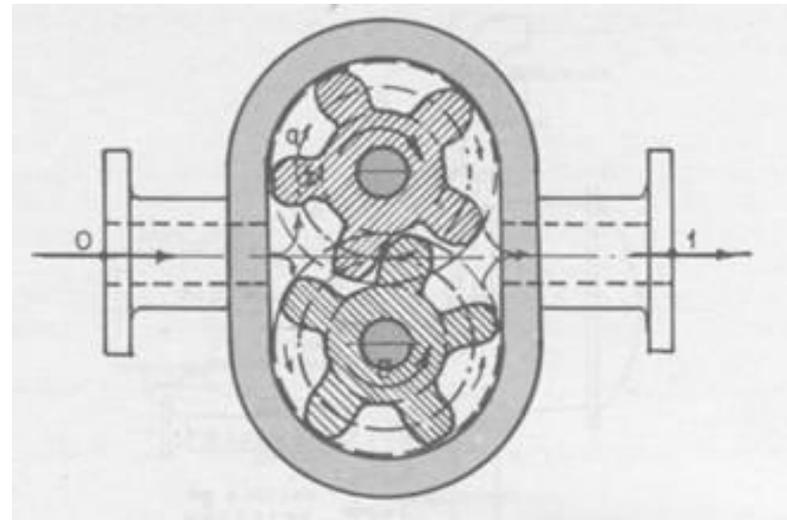
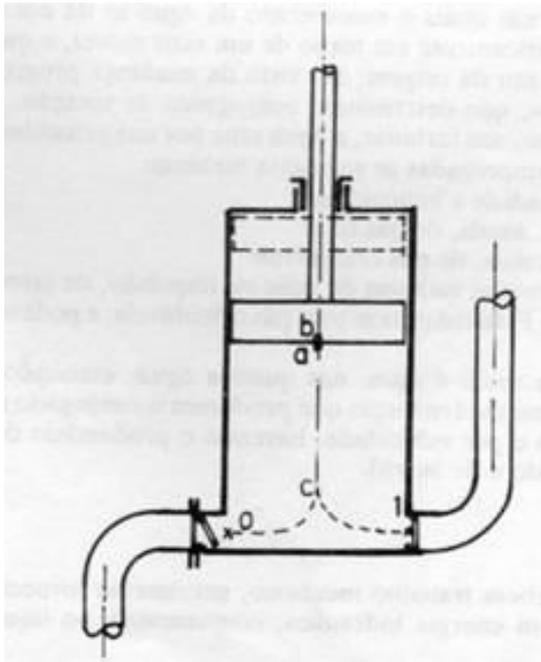
Bombas & Instalações de Bombeamento

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

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

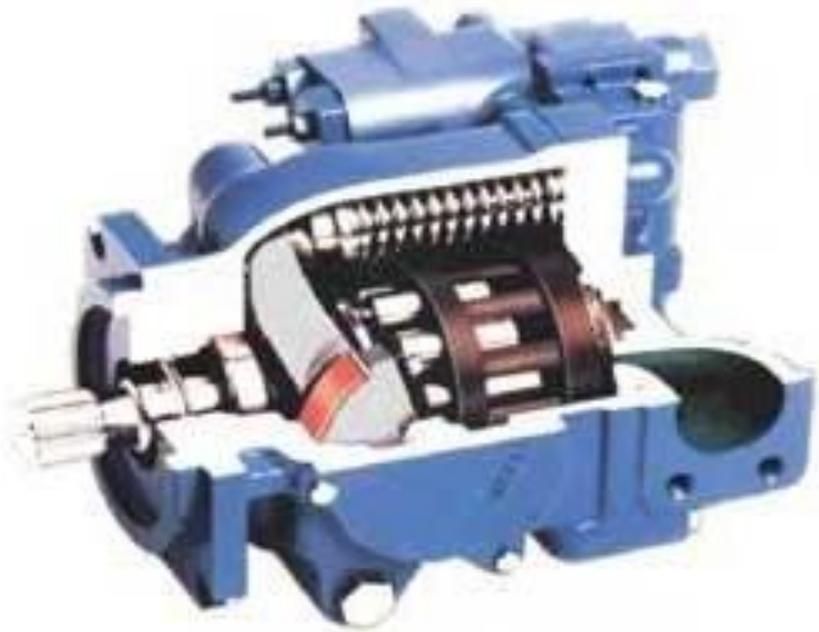
Bombas & Instalações de Bombeamento

- Bombas de deslocamento positivo
- Possuem uma ou mais câmaras, em cujo interior o movimento de um órgão propulsor comunica energia de pressão ao líquido, provocando o seu escoamento. Proporciona entyão as condições para que se realize o escoamento na tubulação da aspiração até a bomba e desta para a tubulação de recalque (saída).

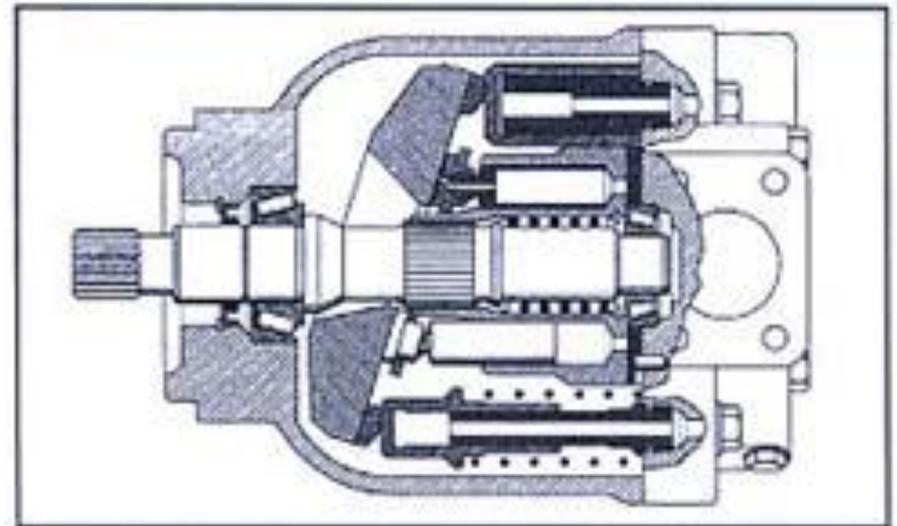


Bombas & Instalações de Bombeamento

Algumas bombas de deslocamento positivo



Bomba de pistões



Bombas & Instalações de Bombeamento

Bomba de palhetas

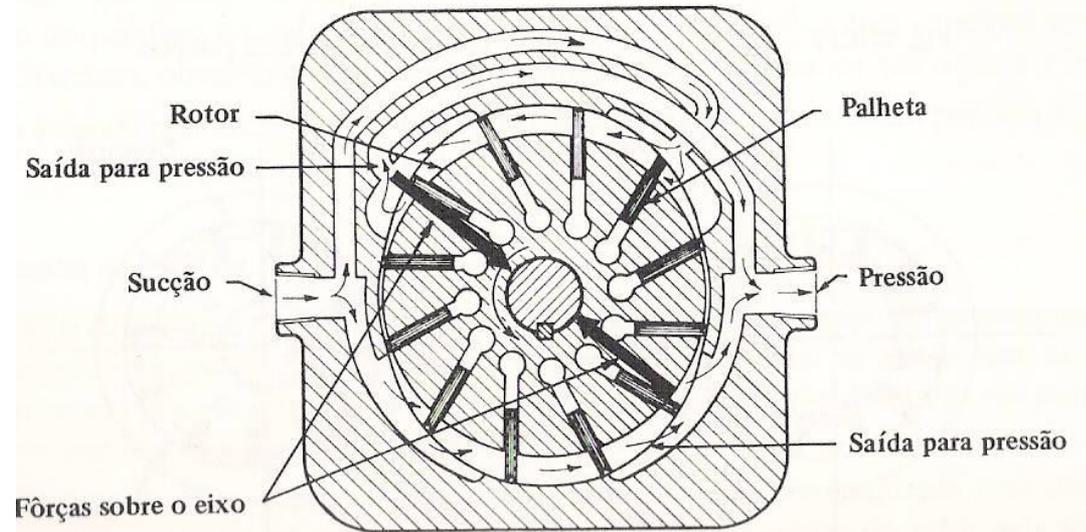
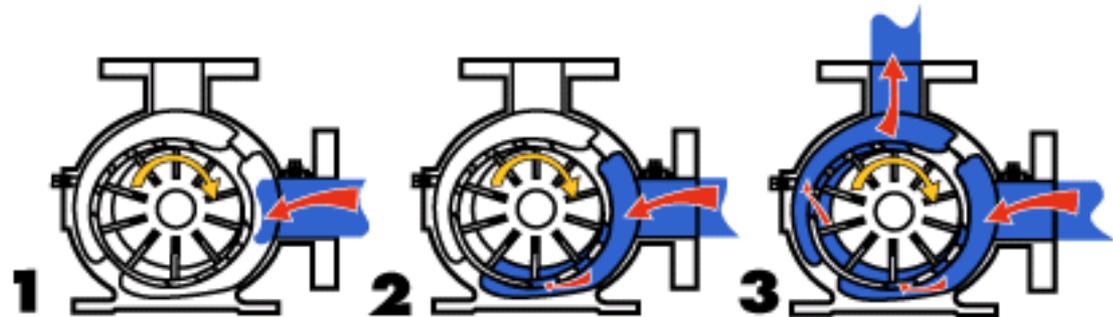
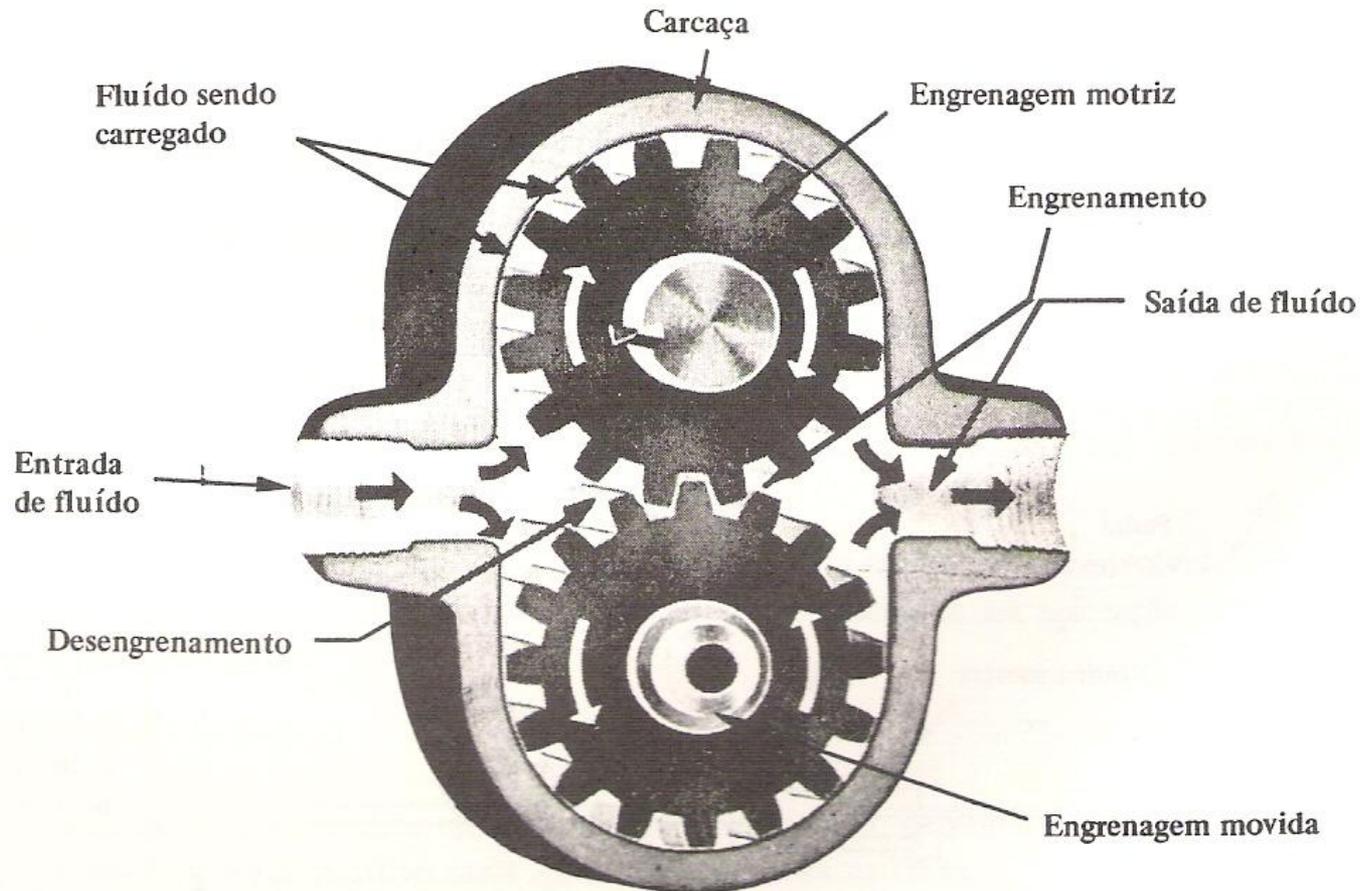


Fig. VIII.15 – Bomba de palhetas balanceada.



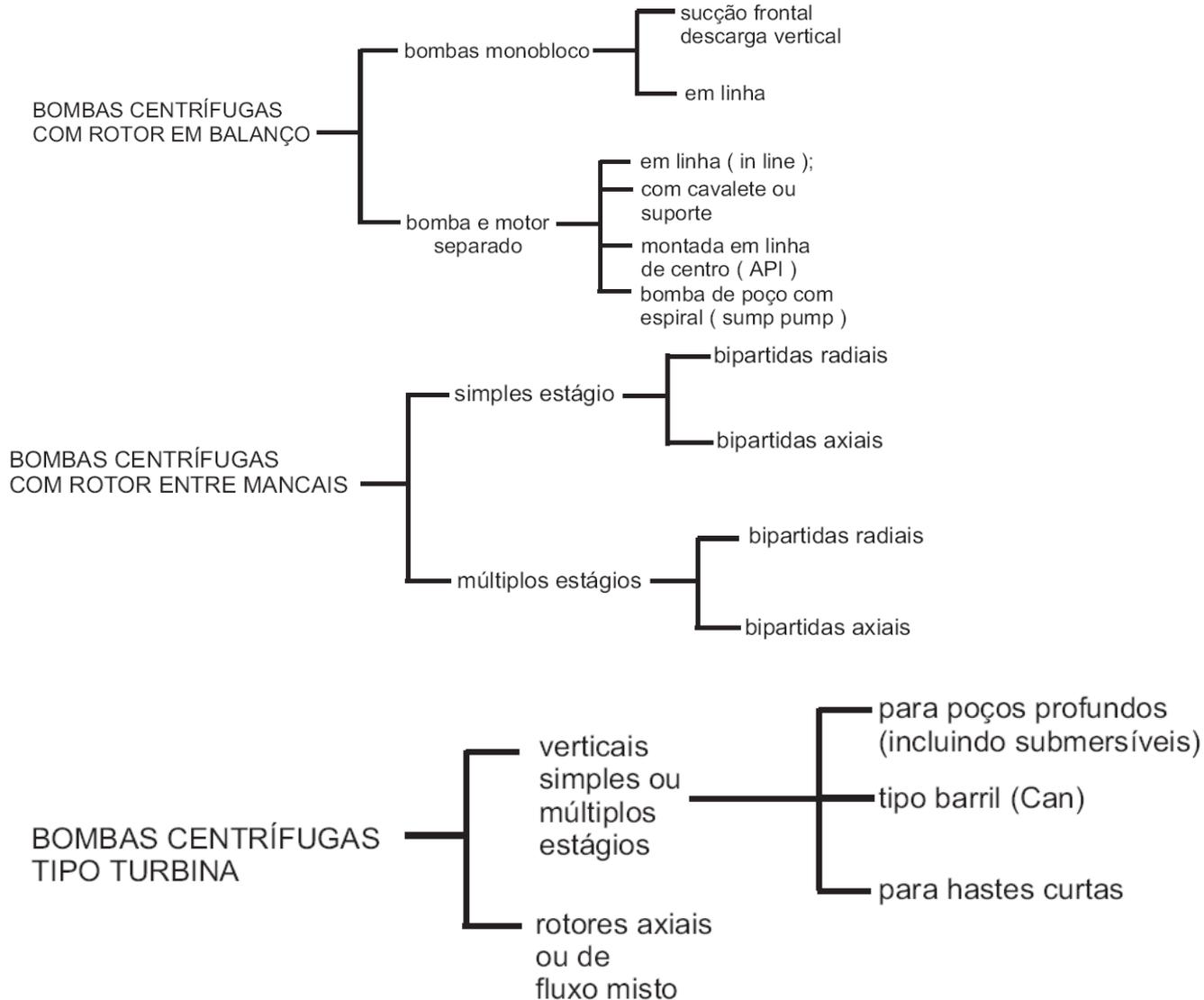
Bombas & Instalações de Bombeamento

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

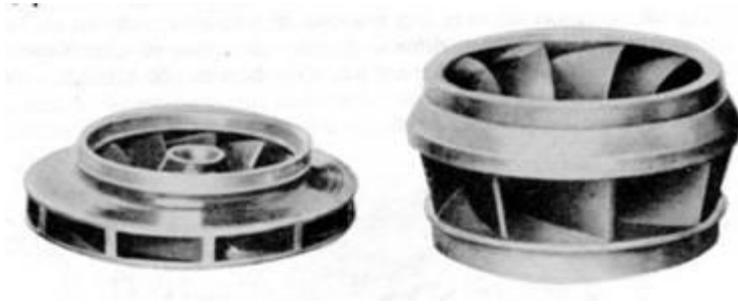


Bombas & Instalações de Bombeamento

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



Bombas & Instalações de Bombeamento



Rotores fechados de turbobombas



Rotor aberto de turbobomba

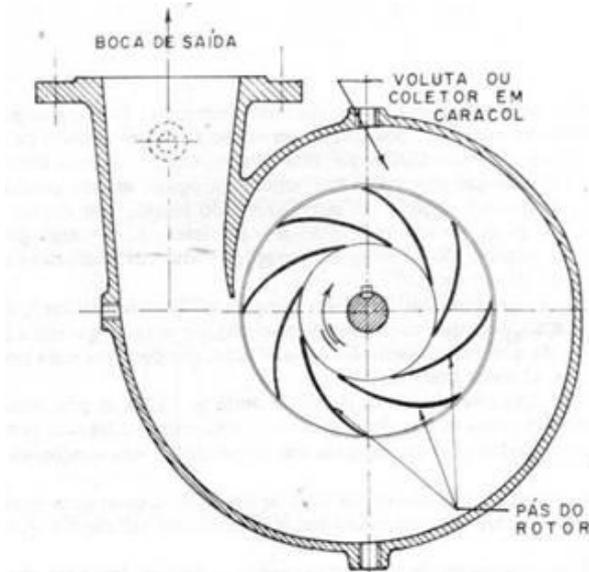
As turbobombas, também chamadas bombas rotodinâmicas, são caracterizadas por possuírem um dispositivo rotatório dotado de pás, chamado de rotor, que exerce sobre o líquido forças que resultam da aceleração que lhe imprime. A finalidade do rotor, ou impelidor,, é comunicar à massa líquida aceleração, para que adquira energia cinética e pressão. O rotor pode ser:

- Fechado, quando, além do disco onde se fixam as pás, existe uma coroa circular presa às pás. Pela abertura desta coroa, o líquido entra no rotor. Usa-se para líquidos sem substâncias em suspensão.

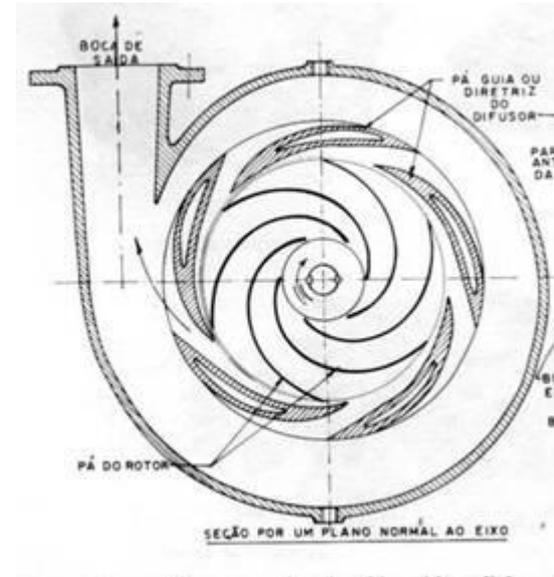
- Aberto , quando não existe essa cora circular . Usa-se para líquidos contendo pastas, lamas, areia, esgotos...

Bombas & Instalações de Bombeamento

As turbobombas necessitam de um outro dispositivo, o difusor, onde é feita a transformação da maior parte da elevada energia cinética com que o líquido sai do rotor, em energia de pressão. Desse modo, ao atingir a boca de saída da bomba, o líquido é capaz de escoar com velocidade razoável, equilibrando a pressão que se opõe ao seu escoamento. Esta transformação é operada de acordo com o teorema de Bernoulli, pois o difusor sendo de seção gradativamente crescente, realiza uma contínua e progressiva diminuição da velocidade do líquido que por ele escoar, aumentando a pressão.



Bomba centrífuga em caracol



Bomba centrífuga com pás guias

Bombas & Instalações de Bombeamento

Dependendo do tipo de bomba, o difusor pode ser:

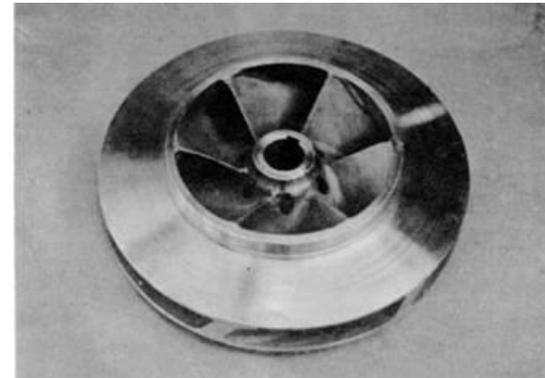
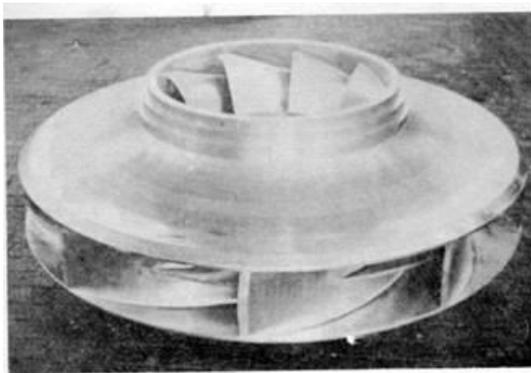
- **De tubo reto troncônico** nas bombas axiais
- **De caixa com forma de caracol** (voluta), para os demais tipos de bombas.
Entre a saída do rotor e o caracol, colocam-se palhetas devidamente orientadas, as “pás guias” para que o líquido que sai do rotor seja conduzido ao coletor com velocidade, direção e sentido tais que a transformação da energia cinética em energia potencial de pressão se processe com um mínimo de perdas por atrito ou turbulência.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Classificação das bombas

1) Segundo a trajetória do líquido no rotor.

- a) **Bomba centrífuga (ou radial):** o líquido penetra paralelamente ao eixo, sendo dirigido pelas pás para a periferia, segundo trajetórias contidas em planos normais ao eixo. As trajetórias são, portanto, curvas praticamente planas contidas em planos radiais. Estas bombas, pela sua simplicidade, se prestam a fabricação em série, com construção generalizada, e utilização estendida à grande maioria das instalações comuns. Quando se trata de descargas grandes e pequenas alturas de elevação, o rendimento das bombas centrífugas é baixo.



Bomba centrífuga de rotor fechado e aberto

Bombas & Instalações de Bombeamento

b) Bomba de fluxo misto ou diagonal.

b1) **bomba hélico-centrífuga.** O líquido entra no rotor axialmente. Atinge as pás cujo bordo de entrada é curvo e inclinada em relação ao eixo. Segue uma trajetória que é uma curva reversa, pois as pás são de dupla curvatura, e atinge a borda da saída que é paralela ao eixo ou ligeiramente inclinada em relação a ele.

b2) **bomba helicoidal ou semi-axial.** O líquido atinge a borda das pás que é curvo e bastante inclinado em relação ao eixo. A trajetória é uma hélice cônica, e as pás são superfícies de dupla curvatura. As bombas deste tipo prestam-se a grandes descargas e alturas de elevação pequenas e médias.



Bombas & Instalações de Bombeamento

- c) **Bomba axial ou propulsora.** Nestas bombas, as trajetórias das partículas líquidas começam paralelamente ao eixo e se transformam em hélices cilíndricas. Forma uma hélice de vórtice forçado. São empregadas para grandes descargas e elevação de até 40 m.



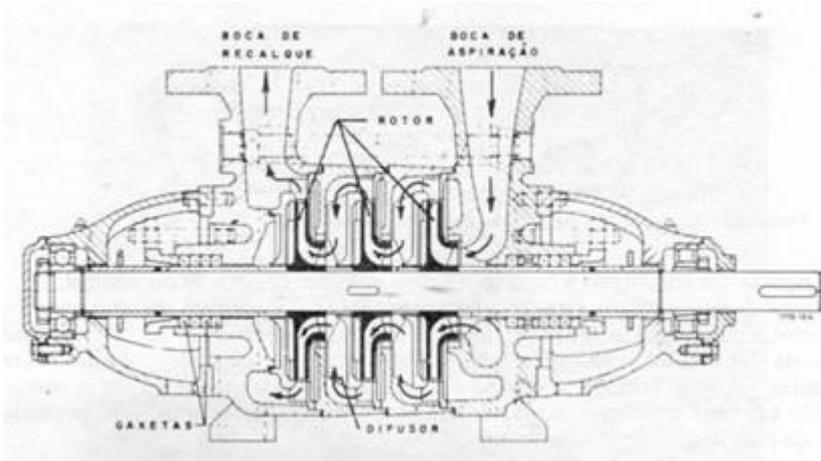
Rotor de bomba axial

Bombas & Instalações de Bombeamento

2) Classificação segundo o número de rotores empregados.

- **Bombas de simples estágio.** Com apenas um rotor, e, portanto, o fornecimento da energia ao líquido é feito em um único estágio. Um rotor e um difusor. Devido as dimensões excessivas e alto custo, não se faz bombas centrífugas de simples estágio quando se deseja elevações grandes.
- **Bombas de múltiplos estágios.** Quando a altura de elevação é grande, faz-se o líquido passar sucessivamente por dois ou mais rotores fixados ao mesmo eixo e colocados em uma caixa cuja forma permite esse escoamento. A passagem por cada rotor é um estágio. O difusor é colocado entre dois rotores.

São próprias para alta pressão. A altura final é, teoricamente, igual a soma das alturas parciais de cada rotor.



Bombas & Instalações de Bombeamento

Funcionamento de uma bomba centrífuga.

A bomba centrífuga precisa ser previamente enchida com o líquido a ser bombeado, isto é, deve ser escorvada. Devido a folga entre o rotor e o coletor e o restante da carcaça, não pode haver a expulsão do ar do corpo da bomba e do tubo de aspiração, de modo, a ser criada a rarefação com a qual a pressão, atuando no líquido no reservatório de aspiração, venha a ocupar o vazio deixado pelo ar expelido e a bomba possa bombear.

Logo que inicia o movimento do rotor e do líquido contido nos canais das pás, a força centrífuga cria uma zona de maior pressão na periferia do rotor e, conseqüentemente, uma de baixa pressão na sua entrada, produzindo o deslocamento do líquido em direção a saída dos canais do rotor e à boca de recalque da bomba. Gradiente hidráulico.

Pressão na entrada do rotor é menor do que o recipiente de aspiração.

A energia na boca do recalque torna-se superior a pressão estática na base da coluna de recalque da bomba, obrigando o líquido escoar para uma parte superior.

Bombas & Instalações de Bombeamento

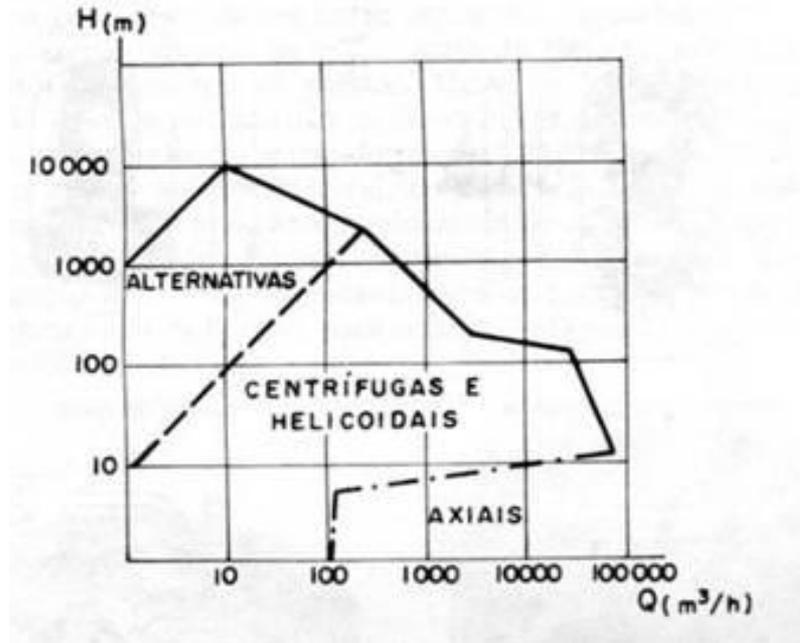
Funcionamento de uma bomba centrífuga.

É na passagem pelo rotor que se processa a transformação da energia mecânica em energia cinética e de pressão, que são aquelas que o líquido pode possuir. Saindo do rotor, o líquido penetra no difusor, onde parte apreciável de sua energia cinética é transformada em energia de pressão, e segue para a tubulação de recalque.

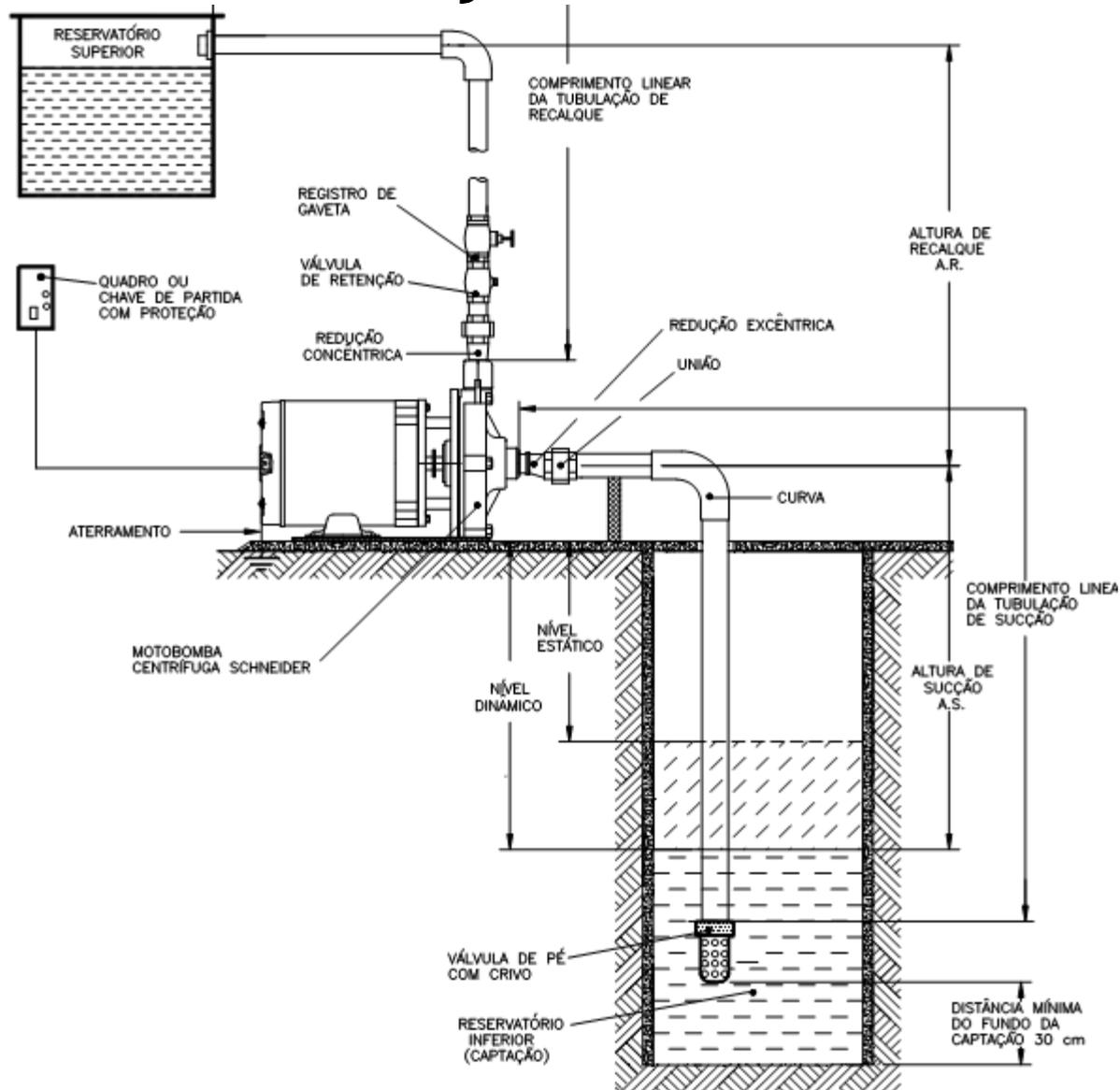
O nome de bomba centrífuga se deve ao fato de ser a força centrífuga a responsável pela maior parte da energia que o líquido recebe ao atravessar a bomba.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Campo de emprego das bombas



Bombas & Instalações de Bombeamento



Bombas & Instalações de Bombeamento

- **PERDA DE CARGA EM CONDUTOS**

O líquido ao escoar em um conduto é submetido a forças resistentes exercidas pelas paredes da tubulação e por uma região do próprio líquido. Nesta região denominada camada limite há um elevado gradiente de velocidade e o efeito da velocidade é significativo. A consequência disso é o surgimento de forças cisalhantes que reduzem a capacidade de fluidez do líquido. O conceito de camada limite foi desenvolvido em 1904 por *Ludwig Prandtl*.

O líquido ao escoar transforma (dissipa) parte de sua energia em calor. Essa energia não é mais recuperada na forma de energia cinética e/ou potencial e, por isso, denomina-se **perda de carga**. Trata-se de perda de energia devido ao atrito contra as paredes e à dissipação devido à viscosidade do líquido em escoamento.

Para efeitos de estudo e de cálculos para dimensionamentos em engenharia, a perda de carga, denotada por h_f , é classificada em perda de carga distribuída denotada por: $h_{d,i}$; e perda de carga localizada por: $h_{l,i}$.

A perda de carga distribuída ocorre em trechos retilíneos de tubulação, enquanto que a localizada, são devidas à trechos curvos, à peças e dispositivos especiais instalados na linha.

Bombas & Instalações de Bombeamento

- **PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA**

$$h_d = \frac{fLv^2}{2gD}$$

Fórmula universal, onde f é o fator de atrito, L é o comprimento do tubo, v é a velocidade do escoamento, g é a aceleração gravitacional e D o diâmetro da tubulação

- **PERDA DE CARGA LOCALIZADA**

2 métodos:

$$h_l = \frac{kv^2}{2g}$$

K é tabelado para cada acessório;

Comprimento equivalente: trabalha-se com a mesma equação da perda de carga distribuída, sendo a obstrução representada por uma tubulação de comprimento equivalente (L) tabelado.

SINGULARIDADES	K
Ampliação Gradual	0,30*
Bocais	2,75
Comporta Aberta	1,00
Controlador de vazão	2,50
Cotovelo de 90°	0,90
Cotovelo de 45°	0,40
Crivo	0,75
Curva de 90°	0,40
Curva de 45°	0,20
Curva de 22 1/2°	0,10
Entrada Normal de Canalização	0,50
Entrada de Borda	1,00
Existência de pequena derivação	0,03
Junção	0,40
Medidor Venturi	2,50**
Redução Gradual	0,15*
Registro de Ângulo Aberto	5,00
Registro de Gaveta Aberto	0,20
Registro de Globo Aberto	10,00
Saída de Canalização	1,00
Tê, Passagem Direta	0,80
Tê, Saída de Lado	1,30
Tê, Saída Bilateral	1,80
Válvula de pé	1,75
Válvula de Retenção	2,50
Velocidade	1,00

* Com base na velocidade maior (seção menor).

** Relativa à velocidade na canalização.

VALORES DOS COMPRIMENTOS EQUIVALENTES PARA PERDAS LOCALIZADAS (Le)
(Expressos em metros de canalização retilínea)

DIÂMETRO (D)		Cotovelo 90° (Raio Longo)	Cotovelo 90° (Raio Médio)	Cotovelo 90° (Raio Curto)	Cotovelo 45°	Curva 90° R/D = 11/2	Curva 90° R/D = 1	Curva 45°	Entrada normal	Entrada de borda	Saída de canalização
mm	pol.										
13	1/2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,4
19	3/4	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,5
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,7
32	1 e 1/4	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,9
38	1 e 1/2	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	1,0
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	1,5
63	2 e 1/2	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	1,9
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	2,2
100	4	2,1	2,8	3,4	1,5	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	3,2
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	4,0
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	5,0
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	6,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	7,5
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	9,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	11,0

VALORES DOS COMPRIMENTOS EQUIVALENTES PARA PERDAS LOCALIZADAS (Le)
(Expressos em metros de canalização retilínea)

DIÂMETRO (D)		Registro de gaveta aberto	Registro de globo aberto	Registro de ângulo aberto	Tê Passagem direta	Tê Saída de Lado	Tê Saída Bilateral	Válvula de pé e crivo	Válvula de Retenção tipo leve	Válvula de Retenção tipo pesado
mm	pol.									
13	1/2	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	1,1	1,6
19	3/4	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	1,6	2,4
25	1	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	2,1	3,2
32	1 e 1/4	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	2,7	4,0
38	1 e 1/2	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	3,2	4,8
50	2	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	4,2	6,4
63	2 e 1/2	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	5,2	8,1
75	3	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	6,3	9,7
100	4	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	6,4	12,9
125	5	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	10,4	16,1
150	6	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	12,5	19,3
200	8	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	16,0	25,0
250	10	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	20,0	32,0
300	12	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	24,0	38,0
350	14	2,4	120,0	80,0	7,3	23,0	22,0	90,0	28,0	45,0

NOTA → Os valores indicados para registros de globo aplicam-se também às torneiras, válvulas para chuveiros e válvulas de descarga.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Curvas Características de Bombas Centrífugas

As curvas características de bombas centrífugas traduzem através de gráficos o seu funcionamento, bem como, a interdependência entre as diversas grandezas operacionais.

As curvas características são função, principalmente, do tipo de bomba, do tipo de rotor, das dimensões da bomba, da rotação do acionador e da rugosidade interna da carcaça e do rotor.

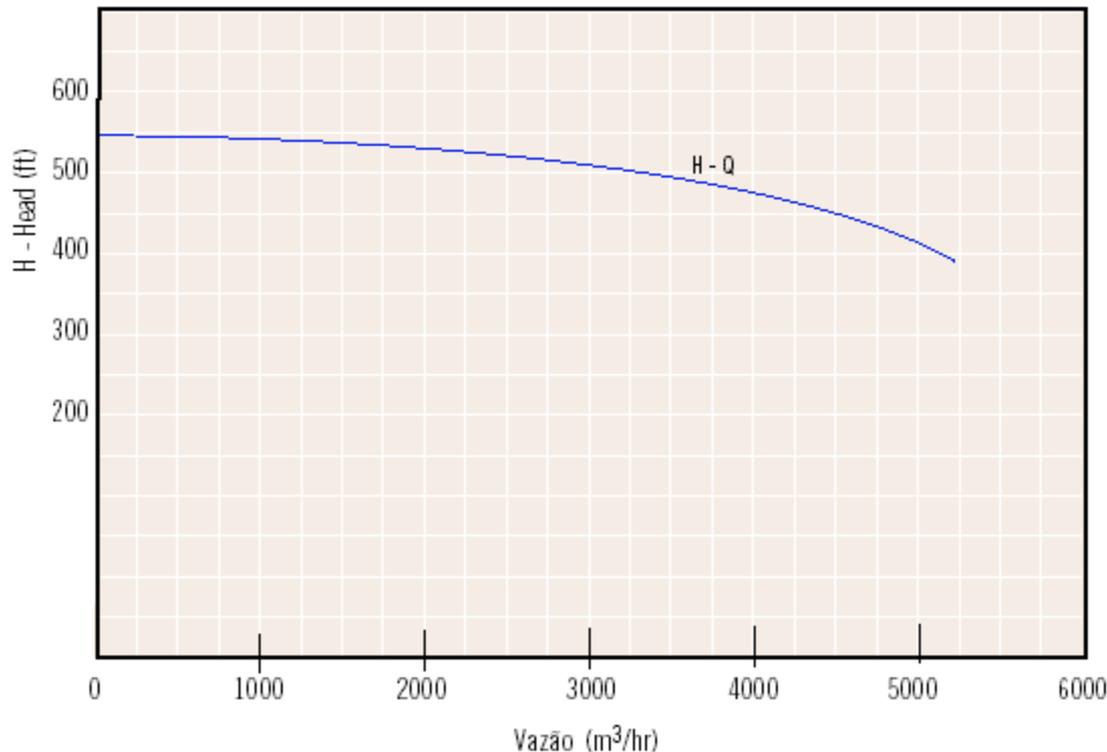
As curvas características são fornecidas pelos fabricantes das bombas, através de gráficos cartesianos, os quais podem representar o funcionamento médio de um modelo fabricado em série, bem como, o funcionamento de uma bomba específica, cujas curvas foram levantadas em laboratório.

Estas curvas podem ser apresentadas em um, ou mais de um gráfico e representam a performance das bombas operando com água fria, a 20° C. Para fluidos com outras viscosidades e peso específico, devem-se efetuar as devidas correções nas mesmas. Apresentamos a seguir os diversos tipos de curvas características das bombas centrífugas.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Altura Manométrica X Vazão (H_B X Q)

A carga de uma bomba, ou altura manométrica (H_B) é definida como a “Energia por Unidade de Peso” que a bomba fornece ao fluido em escoamento através da mesma; sendo função do tipo de pás do rotor, gerando vários tipos de curvas, as quais recebem diferentes designações, de acordo com a forma que apresentam.

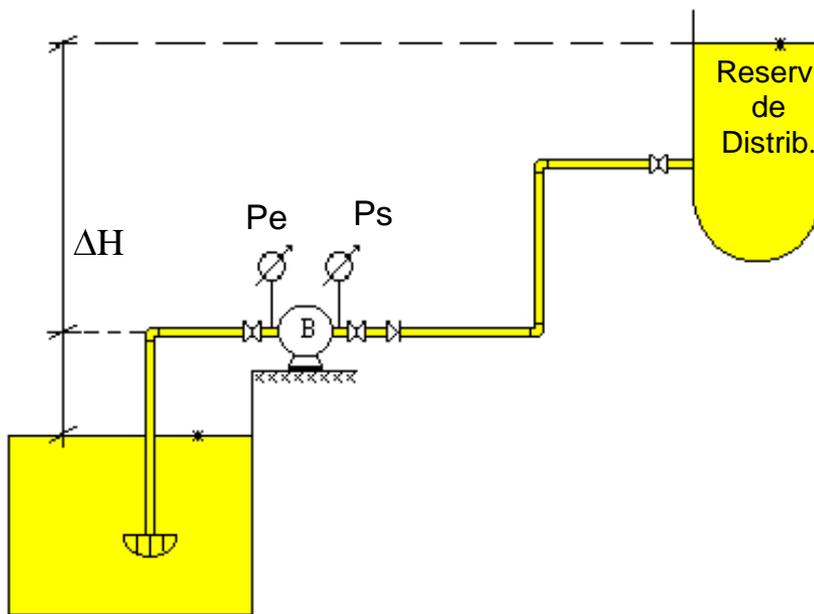


Estas curvas, fornecidas pelos fabricantes, são obtidas através de testes em laboratório; com água fria a 20 °C; entretanto as mesmas podem ser reproduzidas em uma instalação hidráulica existente, de acordo com o fluido em operação.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Altura Manométrica X Vazão (H_B X Q)

Seja a instalação esquematizada abaixo:



Aplicando a Equação da Energia entre a entrada e saída da bomba (local de instalação dos manômetros), tem-se:

$$\left(\frac{P_e}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2g} + Z_e \right) + H_B = \left(\frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_s \right)$$

Portanto:

$$H_B = \left(\frac{P_s - P_e}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_s^2 - V_e^2}{2g} \right) + (Z_s - Z_e)$$

Bombas & Instalações de Bombeamento

Altura Manométrica X Vazão (H_B X Q)

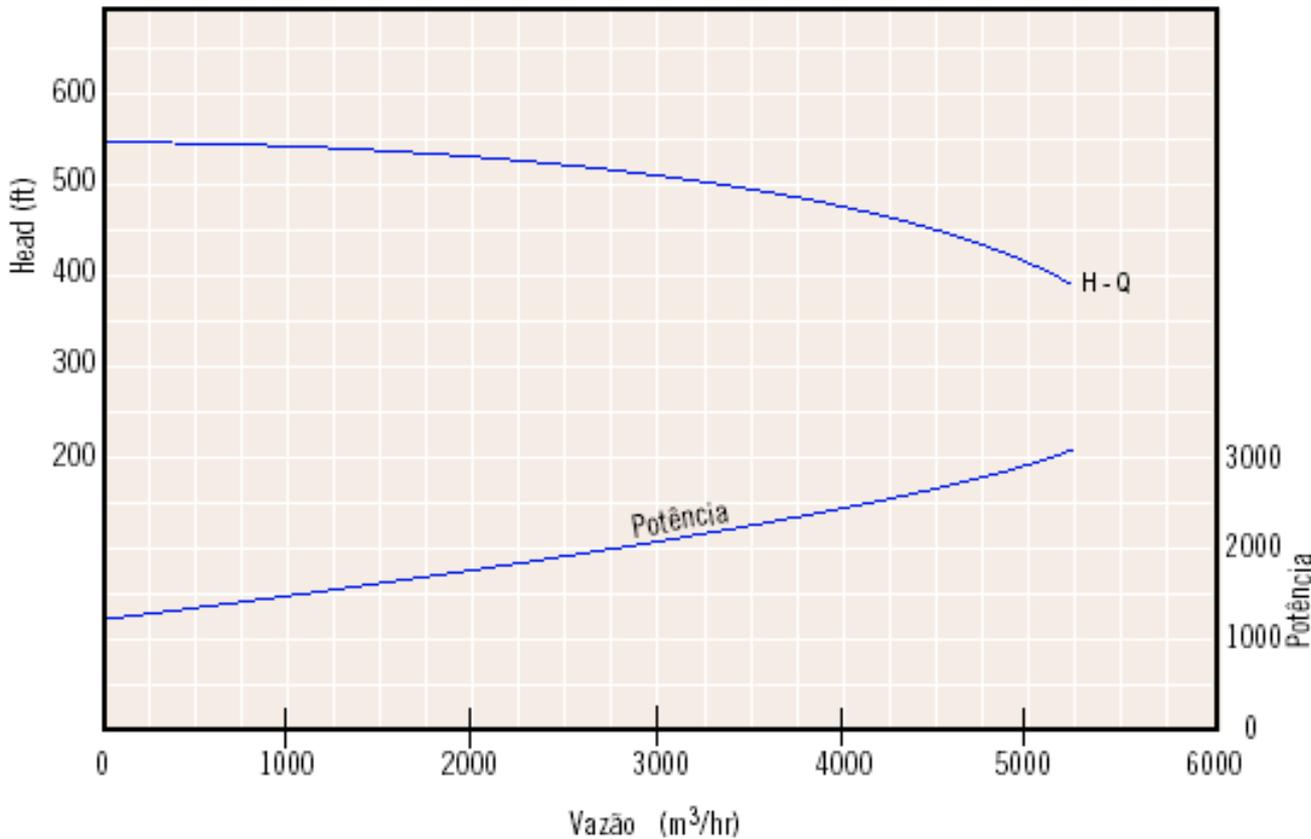
Operando a bomba com diversas vazões (por volta de 7), desde vazão zero até à vazão máxima operacional, é possível obter-se para cada uma dessas vazões, a correspondente altura manométrica e então a partir destes pontos, traçar a curva H X Q .

PONTO	VAZÃO	PRESSÕES		VELOCIDADES		COTAS	H_B
		P_e	P_s	V_e	V_s		
1	Zero					Z_e Z_s	H_{B1}
2	Q_2						H_{B2}
3	Q_3						H_{B3}
4	Q_4						H_{B4}
5	Q_5						H_{B5}
6	Q_6						H_{B6}
7	Q_7						H_{B7}

Bombas & Instalações de Bombeamento

Curva de Potência X Vazão ($N_B \times Q$)

Esta curva representa a potência total necessária no eixo da bomba nas condições de operação.



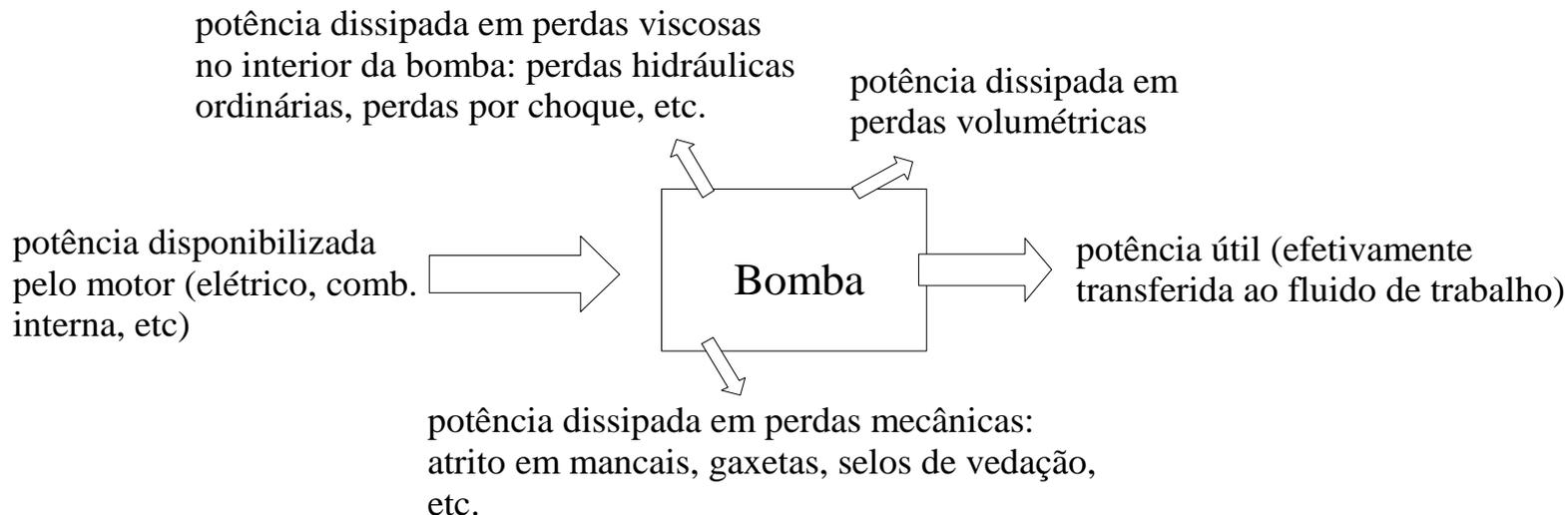
Bombas & Instalações de Bombeamento

Curva de Potência X Vazão (N_B X Q)

Esta potência é a soma da potência útil com a potência dissipada em perdas, inerente a todo processo de transferência de energia.

As perdas nas bombas incluem perdas hidráulicas, mecânicas, pelo atrito hidráulico, e por vazamentos. Diante disto, nem toda a potência é utilizada para gerar pressão e fluxo. Uma parte da energia é transformada em calor (devido ao atrito) dentro da bomba. A energia pode também ser perdida em virtude da recirculação de fluido entre o rotor e a voluta.

O esquema abaixo ilustra o processo de transferência de energia para o fluido de trabalho, em uma bomba:



Bombas & Instalações de Bombeamento

Curva de Potência X Vazão (N_B X Q)

Assim temos as seguintes potências envolvidas:

✓ Potência entregue pela bomba ao fluido: $N = \gamma \cdot Q \cdot H_B$

✓ Potência fornecida pelo motor elétrico no eixo da bomba:

$$N_B = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_B}{\eta_B}$$

✓ Potência elétrica retirada da rede elétrica pelo motor elétrico:

$$N_{el} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_B}{\eta_B \cdot \eta_{el}}$$

A potência retirada da rede elétrica pode ser obtida, também, pela seguinte expressão:

$$N_{el} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi$$

Onde:

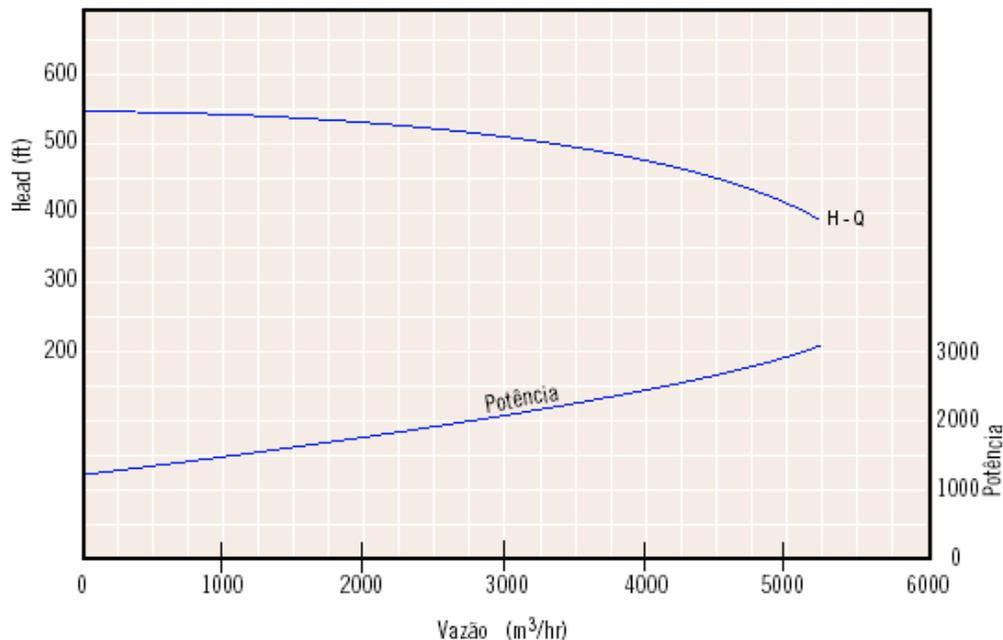
- $\sqrt{3}$ \Rightarrow Para sistemas trifásicos
- V \Rightarrow Tensão entre fases (Volts)
- I \Rightarrow Corrente elétrica (Ampéres)
- $\cos\varphi$ \Rightarrow Fator de potência do motor elétrico

Bombas & Instalações de Bombeamento

Partida de Bombas Centrífugas

Analisando a curva de potência x vazão, podemos notar que a potência é mínima para a vazão zero ($Q = 0$), ou seja, quando a válvula de descarga da bomba está fechada. Nesta condição a bomba consome potência apenas para seus atritos internos e para as perdas de atrito do rotor girando na massa fluida. Por esta razão deve-se partir as bombas centrífugas com a válvula de descarga fechada.

A situação de uma bomba operando com vazão zero ($Q = 0$) denomina-se “Shut-off” e é importante se conhecer o valor de H_B para Shut-off. As bombas hélico-centrífugas e as axiais não devem ser partidas com a válvula de descarga bloqueada, pois nesta condição a potência é, consideravelmente, maior do que para a descarga normal.



Bombas & Instalações de Bombeamento

Sobrecarga da Bomba

Quando um líquido mais viscoso que a água começa a ser bombeado, normalmente ocorre aumento de pressão, elevando-se, em consequência, a corrente do motor elétrico, ocorrendo a possibilidade de haver desligamento do mesmo.

Os danos causados por se sobrecarregar um motor nem sempre aparecem de imediato. O superaquecimento momentâneo, causa apenas um desligamento. Após um certo período, no entanto, o isolamento dos enrolamentos irá se deteriorar (devido ao calor), correndo o risco de queimar o motor, caso o motor não tenha proteção adequada, tendo que ser enrolado de novo.

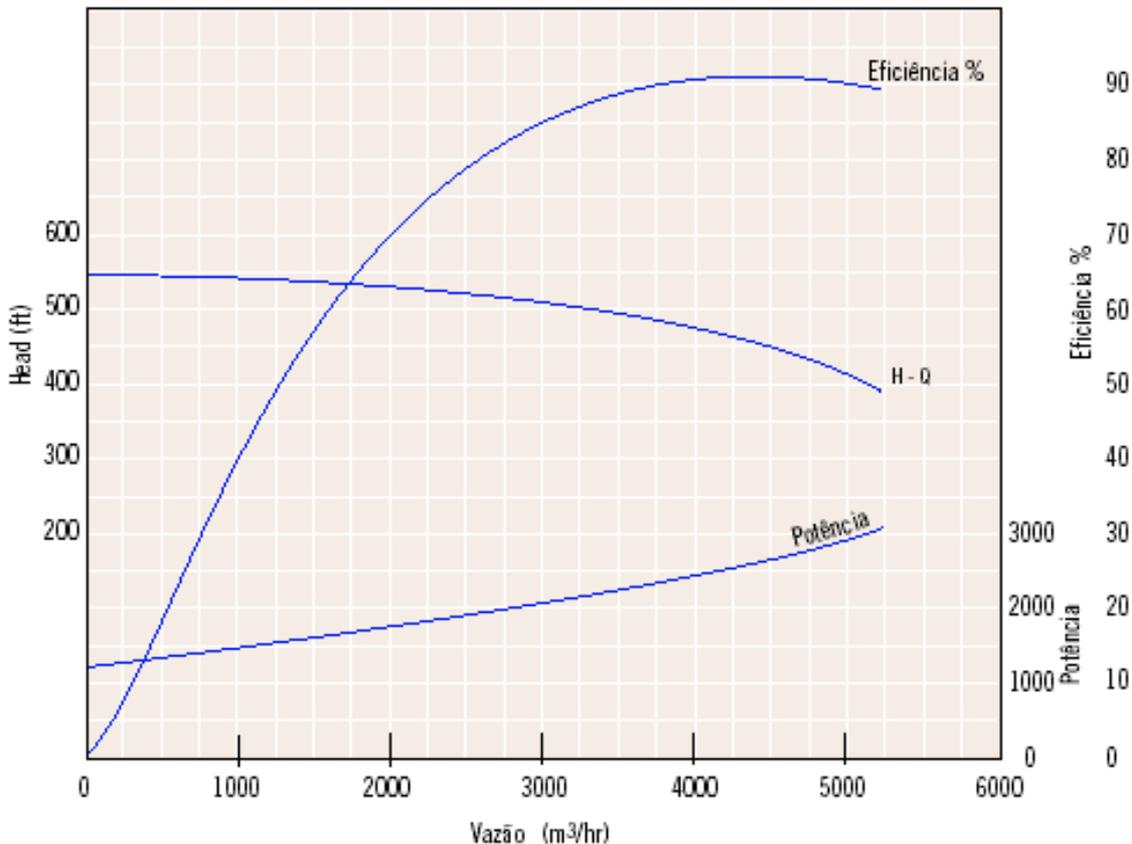
Fator de Serviço do Motor Elétrico

O fator de serviço é a margem de segurança inerente ao motor elétrico, em relação a sua potência nominal. A medida que aumenta a vazão, o motor tende a, continuamente, puxar mais corrente elétrica. Quando a potência consumida ultrapassar o limite do fator de serviço, o motor costuma ser desligado automaticamente.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Curva de Rendimento X Vazão ($\eta_B \times Q$)

O rendimento da bomba é definido como a relação entre a potência fornecida ao fluido e aquela fornecida pelo motor elétrico à bomba. É fornecida pelo fabricante, conforme curva abaixo, ou calculada conforme formula:



$$\eta_B = \frac{\text{Potência fornecida ao fluido}}{\text{Potência recebida do acionador}}$$

Bombas & Instalações de Bombeamento

Curva de Rendimento X Vazão (η_B X Q)

A Curva η_B X Q representa a variação da potência necessária no eixo de uma bomba centrífuga em função da vazão, para uma rotação constante.

A curva de eficiência (x) vazão é a indicação da energia perdida na bomba.

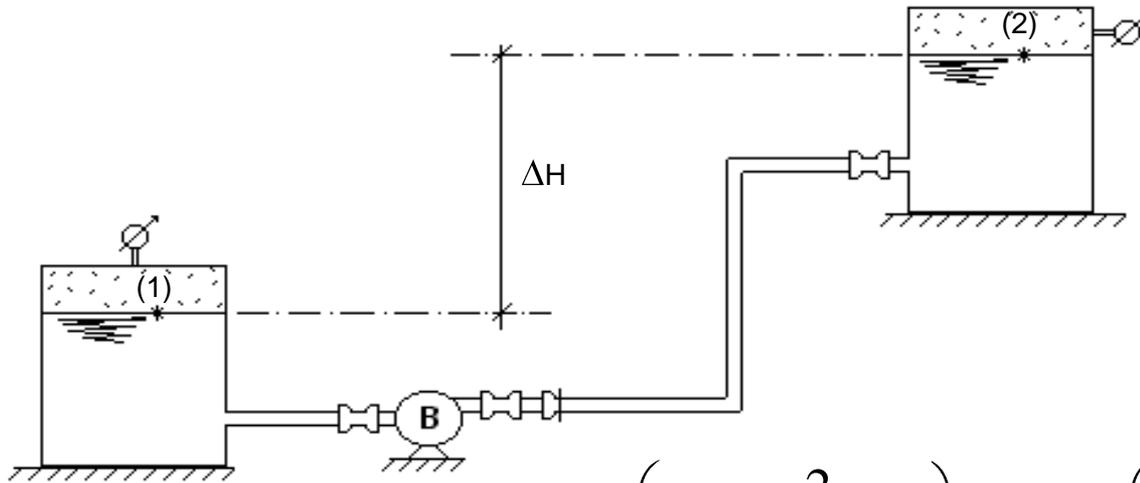
Quanto menores as perdas, mais elevada será a eficiência. Esta curva permite ao operador observar a vazão em que a bomba melhor opera. As bombas devem ser operadas eficientemente para se controlar o custo da energia consumida e para se utilizar as bombas adequadamente.

A curva (H x Q) não indica as perdas internas na bomba, as quais são consideradas na curva de eficiência. A eficiência, para cada ponto na curva, relaciona a energia transmitida para o líquido, com a energia suprida pelo eixo da bomba, conforme fórmula anterior.

Bombas & Instalações de Bombeamento

CURVA CARACTERÍSTICA DA INSTALAÇÃO (CCI) OU CURVA DO SISTEMA (CS)

Seja a instalação representada abaixo:



Aplicando a equação da energia, tem-se:
$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) + H_S = \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right) + HP_{1,2}$$

sendo $V_1 = V_2 = 0$; e reagrupando as parcelas, tem-se:
$$H_S = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + (Z_2 - Z_1) + HP_{1,2}$$

Bombas & Instalações de Bombeamento

CURVA CARACTERÍSTICA DA INSTALAÇÃO (CCI) OU CURVA DO SISTEMA (CS)

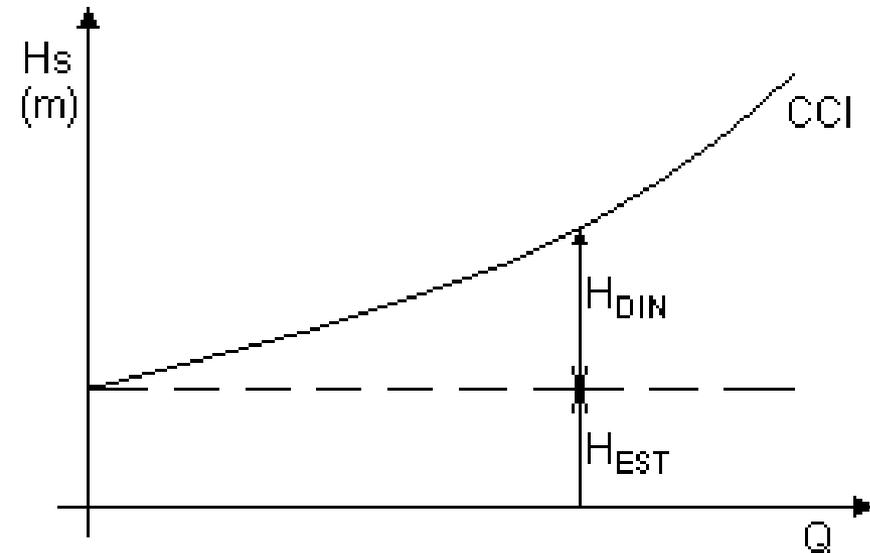
Analisando as parcelas, verificamos que as pressões, o peso específico e o desnível mantém-se constantes para todas as vazões no sistema, o que não ocorre com a perda de carga, que é função da vazão.

Assim podemos fazer:

$$H_{EST} = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + (Z_2 - Z_1) \quad H_{DIN} = HP_{1,2}$$

$$H_S = H_{EST} + H_{DIN}$$

e pode ser representado graficamente, como:



$$H_S = H_{EST} + H_{DIN}$$

Bombas & Instalações de Bombeamento

Obtenção da CCI

A construção da curva característica da instalação pode ser feita da seguinte maneira: Fixam-se várias vazões (em torno de 7), estando entre elas a vazão zero e a provável vazão da instalação,

Calculam-se as alturas manométricas H_S para cada uma das vazões estabelecidas no item anterior, conforme tabela abaixo:

PONTO	Q (m ³ /s)	H _{EST} (m)	H _{DIN} (m)	H _S (m)
1	0	Valor constante para todas as vazões	0	H _{EST}
2				
3				
4				
5				
6				
7				

Bombas & Instalações de Bombeamento

Ponto de Trabalho de uma Bomba Centrífuga numa Instalação (PT)

O ponto de trabalho (PT), também designado por ponto de operação (PO) e ponto de funcionamento (PF), representa as condições operacionais de uma bomba num sistema, isto é, indica em que condições uma determinada bomba operará em uma determinada instalação ou sistema.

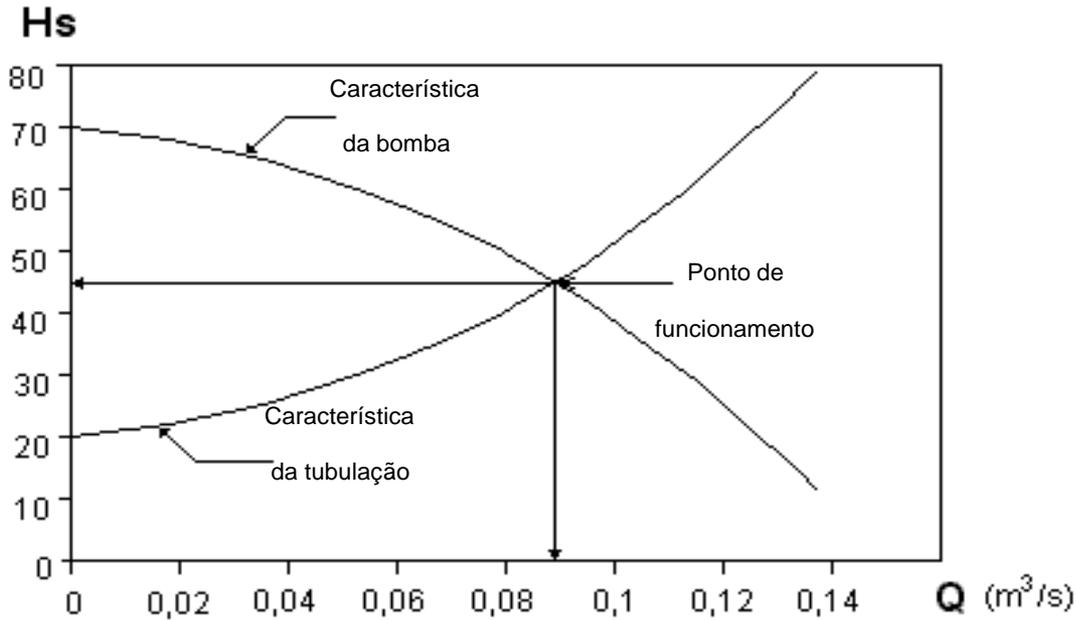
A curva característica da bomba $H_B = f(Q)$ indica, para as condições de regime permanente, a energia que a bomba fornece ao fluido para cada vazão de operação, sendo a mesma decrescente com a vazão.

Já a curva característica da instalação $H_S = f(Q)$ indica, também para as condições de regime permanente, a energia que deve ser fornecida ao fluido para cada vazão de operação, de modo que o mesmo possa escoar na instalação; sendo a mesma crescente com a vazão.

O ponto de operação de uma bomba num sistema, normalmente, é obtido por via gráfica, sobrepondo-se a curva característica da instalação à curva característica da bomba.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Ponto de Trabalho de uma Bomba Centrífuga numa Instalação (PT)



O ponto de cruzamento das duas curvas representa o ponto de funcionamento, podendo-se obter nos respectivos eixos, os valores operacionais da altura manométrica e da vazão.

As bombas devem ser selecionadas para operação nas instalações, de tal forma que o ponto de trabalho, na medida do possível, corresponda ao ponto de máximo rendimento da bomba.

Bombas & Instalações de Bombeamento

CAVITAÇÃO

Cavitação é um fenômeno de ocorrência limitada a líquidos, com conseqüências danosas para o escoamento e para as regiões sólidas onde a mesma ocorre.

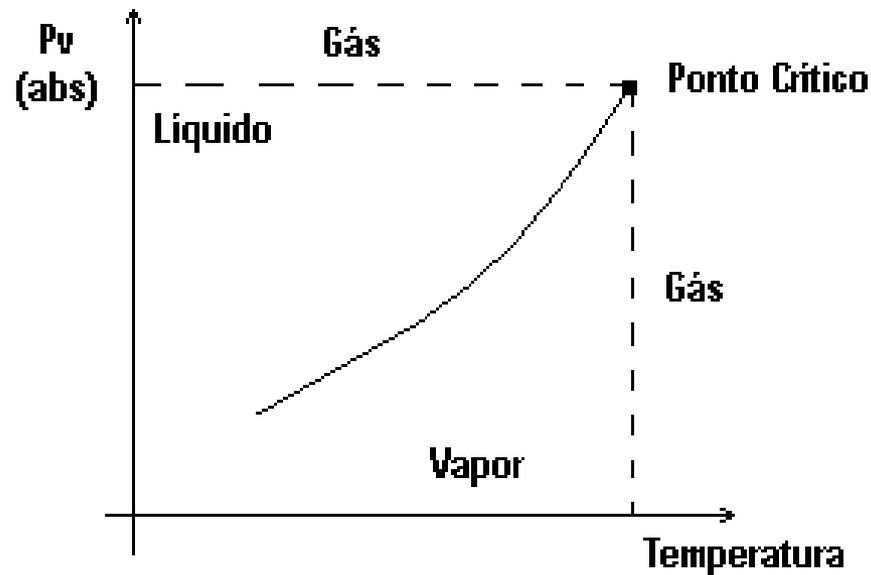
O estudo da cavitação pode ser dividido em duas partes: o fenomenológico, que corresponde à identificação e combate à cavitação e seus efeitos; e o teórico, onde interessa o equacionamento do fenômeno, visando a sua quantificação no que se refere às condições de equilíbrio, desenvolvimento e colapso das bolhas.

Para o perfeito entendimento da cavitação, torna-se necessário abordar o conceito de pressão de vapor.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Pressão de Vapor

Pressão de vapor de um líquido a uma determinada temperatura é aquela na qual o fluido coexiste em suas fases líquido e vapor.



Nessa mesma temperatura, quando tivermos uma pressão maior que a pressão de vapor, haverá somente a fase líquida e quando tivermos uma pressão menor, haverá somente a fase vapor.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Conceito de Cavitação

Pelo conceito de pressão de vapor, vimos que mantendo-se um fluido a uma temperatura constante e diminuindo-se a pressão, o mesmo ao alcançar a pressão de vapor, começará a vaporizar.

Este fenômeno ocorre nas bombas centrífugas, pois o fluido perde pressão ao longo do escoamento na tubulação de sucção.

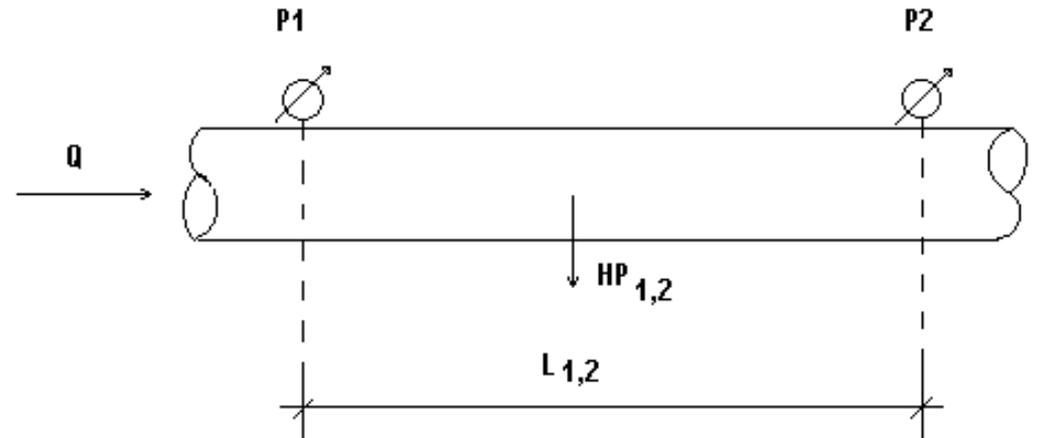
Bombas & Instalações de Bombeamento

Conceito de Cavitação

O esquema abaixo representa duas seções (1) e (2), quaisquer, no sistema de escoamento na sucção de uma bomba.

Balanco de energia:

$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) - \text{HP}_{1,2} = \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right)$$



sendo: $V_1 = V_2$ e $Z_1 = Z_2$

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} - \text{HP}_{1,2}$$

Se a pressão absoluta do líquido, em qualquer ponto do sistema de bombeamento, for reduzida (ou igualada) abaixo da pressão de vapor, na temperatura de bombeamento; parte deste líquido se vaporizará, formando “cavidades” no interior da massa líquida.

Estará aí iniciado o processo de cavitação.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Conceito de Cavitação

As bolhas de vapor formadas são conduzidas pelo fluxo do líquido até atingirem pressões mais elevadas que a pressão de vapor (normalmente na região do rotor), onde então ocorre a implosão (colapso) destas bolhas, com a condensação do vapor e o retorno à fase líquida. Tal fenômeno é conhecido como CAVITAÇÃO.

Normalmente a cavitação é acompanhada por ruídos, vibrações e com possível erosão das superfícies sólidas (pitting).

Deve-se salientar, que a erosão por cavitação não ocorre no local onde as bolhas se formam, mas sim onde as mesmas implodem.

Os efeitos da cavitação dependem do tempo de sua duração, da sua intensidade, das propriedades do líquido e da resistência do material à erosão por cavitação.

A cavitação, naturalmente, apresenta um barulho característico, acompanhado de redução na altura manométrica e no rendimento. Se de grande intensidade, aparecerá vibração, que comprometerá o comportamento mecânico da bomba.

Em resumo, são os seguintes, os inconvenientes da cavitação:

- a) Barulho e vibração.
- b) Alteração das curvas características.
- c) Erosão - remoção de partículas metálicas - pitting.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Região Principal de Cavitação

Pelo que foi exposto, concluímos que a região que está susceptível à cavitação é a sucção da bomba, pois é onde o sistema de bombeamento apresenta a menor pressão absoluta.

Portanto o ponto crítico para a cavitação é a entrada do rotor. Nesta região a quantidade de energia é mínima, pois o líquido ainda não recebeu nenhuma energia por parte do rotor.

Assim, a cavitação, normalmente, inicia-se nesse ponto, em seguida, as cavidades são conduzidas pela corrente líquida provocada pelo movimento do rotor, alcançando regiões de pressão superior à de vapor do fluido, onde se processa a implosão das cavidades (bolhas).

Bombas & Instalações de Bombeamento

NPSH – Net Positive Suction Head

O NPSH é um conceito oriundo da escola americana, que predominou entre os fabricantes instalados no país e na norma da ABNT que trata de ensaios de cavitação em bombas.

A condição $P_{e_{abs}} > P_v$ é necessária mas não suficiente, pois por detalhes construtivos poderá ocorrer cavitação no interior da própria máquina.

Em termos práticos, o procedimento usual para analisarmos a operação de determinada bomba num sistema, é através do conceito de $NPSH_{REQ.}$ e $NPSH_{DISP.}$

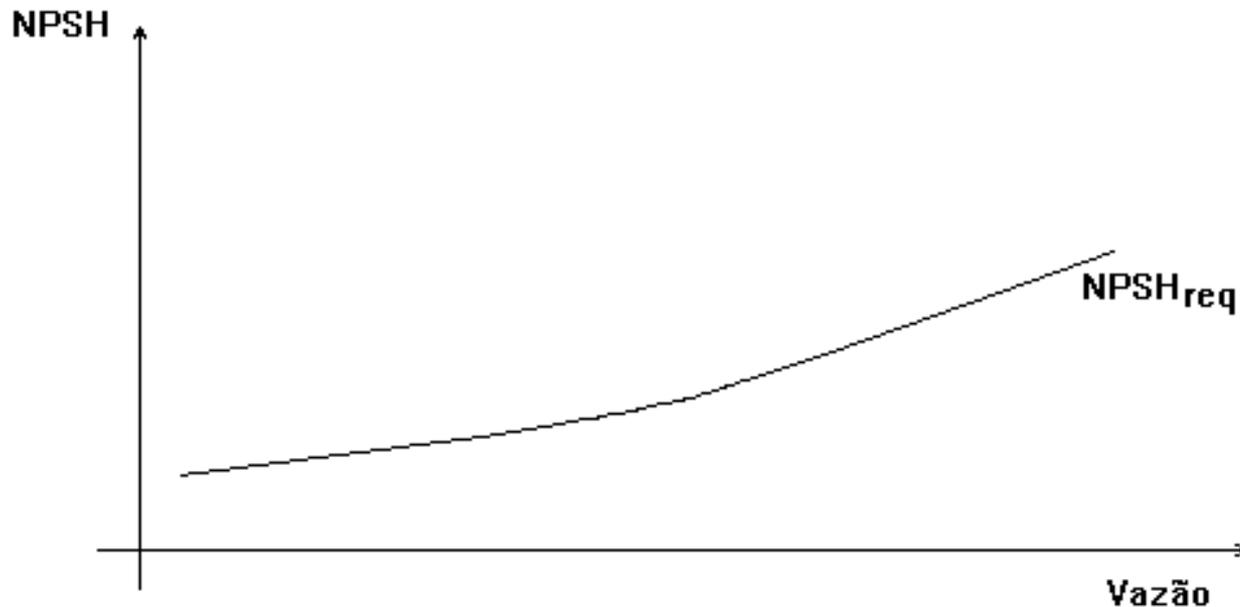
O NPSH representa a “Energia Absoluta” no flange de sucção, acima da pressão de vapor do fluido naquela temperatura.

Bombas & Instalações de Bombeamento

NPSH Requerido ($NPSH_{REQ}$)

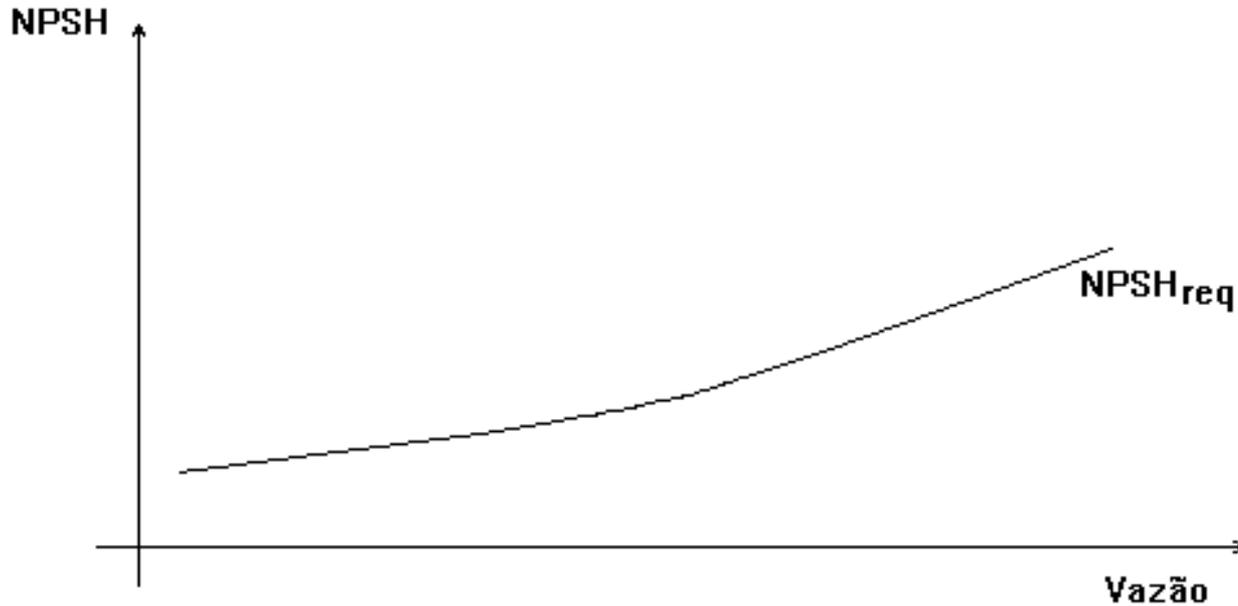
Cada bomba, em função de seu tamanho, características construtivas, etc..., necessita de uma determinada energia absoluta (acima da pressão de vapor) em seu flange de sucção, de tal modo que a perda de carga que ocorrerá até à entrada do rotor não seja suficiente para acarretar cavitação, quando operada naquelas condições de vazão. A esta energia denominamos NPSH REQUERIDO.

Os fabricantes de bombas fornecem o NPSH requerido, através de uma curva $NPSH_{req}$ x VAZÃO, para cada bomba de sua linha de fabricação, conforme padrão abaixo:



Bombas & Instalações de Bombeamento

NPSH Requerido ($NPSH_{REQ}$)



Esta curva é uma característica própria da bomba, sendo obtida experimentalmente, através de testes de cavitação em bancadas do fabricante, com água fria a 20° C.

Assim, em resumo, o NPSH requerido, representa a energia absoluta do líquido, acima de sua pressão de vapor, necessária no flange de sucção da bomba, de tal forma que garanta a não ocorrência de cavitação na mesma.

Para definição do $NPSH_{REQ}$ de uma bomba, é utilizado como critério, a ocorrência de uma queda de 3% na altura manométrica para uma determinada vazão. Este critério é adotado pelo Hydraulic Institute Standards e American Petroleum Institute (API-610).

Bombas & Instalações de Bombeamento

NPSH Disponível ($NPSH_{DISP}$)

O NPSH disponível é uma característica do sistema e representa, ou define, a quantidade de energia absoluta disponível no flange de sucção da bomba, acima da pressão de vapor do fluido naquela temperatura.

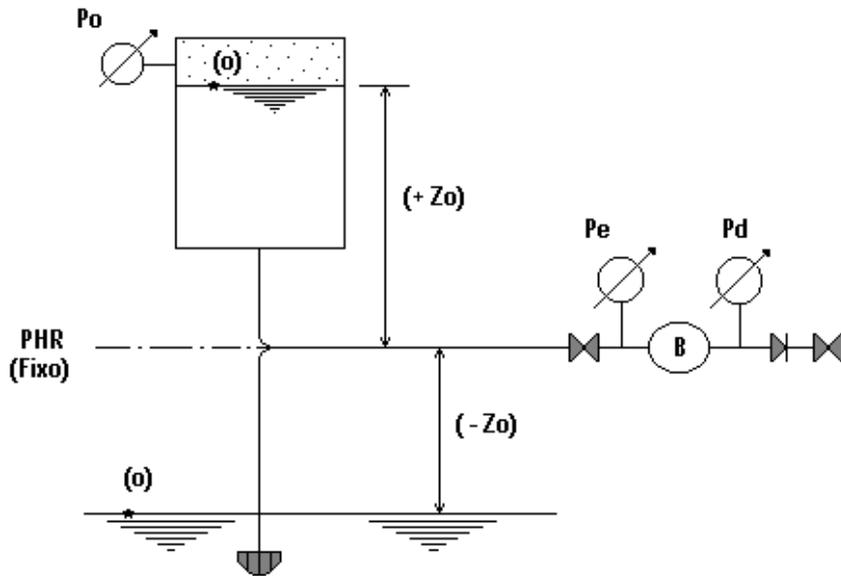
O NPSH disponível pode ser calculado de duas formas:

- fase de projeto
- fase de operação

Bombas & Instalações de Bombeamento

$NPSH_{DISP}$ - Fase de Projeto

O esquema abaixo representa duas situações de instalações hidráulicas, a primeira com a bomba succionando de um reservatório cujo nível está acima da linha de centro da bomba (bomba afogada) e a segunda com a bomba succionando de um reservatório com cota inferior à linha de centro da bomba.



Partindo do balanço de energia entre (0) e (e), assumindo que em (e) a pressão total é igual a de vapor P_v a energia disponível acima da pressão de vapor é:

$$NPSH_{DISP} = \left(\frac{P_o + P_{ATM}}{\gamma} \right) \pm Z_{SUC} - HP_{SUC} - \frac{P_v}{\gamma}$$

Onde::

P_o - pressão manométrica no reservatório de sucção.

P_{ATM} - pressão atmosférica local.

P_v - pressão de vapor do fluido à temperatura de bombeamento.

HP_{SUC} - perda de carga total na sucção.

Z_{SUC} - cota da superfície do nível do reservatório de sucção.

Bombas & Instalações de Bombeamento

NPSH_{DISP} - Fase de Projeto

Analisando-se esta expressão do NPSH_{DISP}, verificamos que para obtermos valores elevados, devemos tomar as seguintes providencias:

- a) diminuir a altura geométrica de sucção negativa ($-Z_{SUC}$), ou aumentar a altura geométrica de sucção positiva ($+Z_{SUC}$),
- b) diminuir a perda de carga na sucção. Para tal recomenda-se:
 - utilizar tubulações curtas.
 - baixar a velocidade do fluído na sucção, aumentando-se o seu diâmetro.
 - reduzido número de acessórios (curvas, válvulas, etc...).
- c) diminuir a temperatura do fluído bombeado, para diminuir a pressão de vapor do mesmo.

Bombas & Instalações de Bombeamento

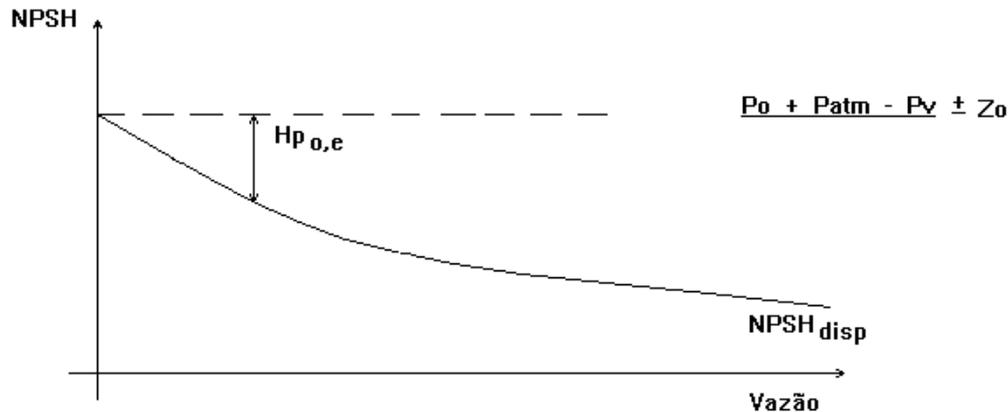
$NPSH_{DISP}$ – Fase de Operação

Considerando o conceito de $NPSH_{DISP}$ como sendo a energia disponível na entrada da bomba acima da pressão de vapor, ou seja, conhecendo-se a pressão na entrada da bomba:

$$NPSH_{DISP} = \left[\left(\frac{P_e + P_{ATM}}{\gamma} \right) + \frac{V_e^2}{2g} + Z_e \right] - \frac{P_v}{\gamma}$$

ONDE:

- P_e - pressão na entrada da bomba, isto é, no flange de sucção (manométrica).
- P_{ATM} - pressão atmosférica local.
- P_v - pressão de vapor do líquido à temperatura de bombeamento.
- V_e - velocidade do fluxo na sucção da bomba (local da tomada de pressão).
- Z_e - distancia entre a linha de centro da bomba e do manômetro.

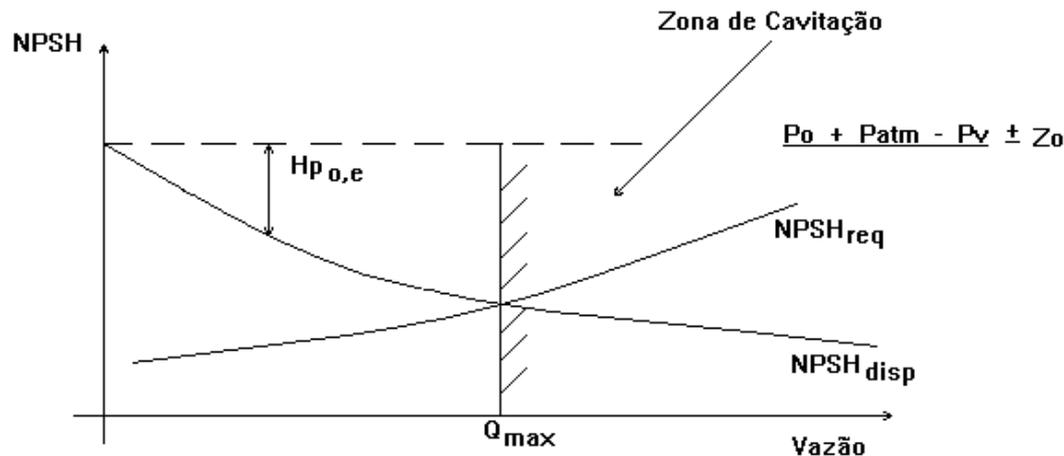


Bombas & Instalações de Bombeamento

Análise da Faixa de Operação de uma Bomba em um Sistema

Esta análise pode ser feita colocando-se num mesmo gráfico as curvas do $NPSH_{REQ}$ e a do $NPSH_{DISP}$.

À direita do ponto de encontro das duas curvas observa-se a zona de cavitação.



Para não ocorrer cavitação, devemos ter:	$NPSH_{DISP} \geq NPSH_{REQ}$
Na prática utilizamos:	$NPSH_{DISP} \geq 1,20 NPSH_{REQ}$
No mínimo:	$NPSH_{DISP} \geq (NPSH_{REQ} + 1,0) \text{ m}$

Bombas & Instalações de Bombeamento

Pressão Atmosférica em Função da Altitude:

Apesar da pressão atmosférica ser afetada pelas condições climáticas, pode-se utilizar, para fins práticos a seguinte relação entre pressão atmosférica e altitude:

$$P_{ATM} = 760 - 0,081h \text{ (mm de Hg)}$$

onde:

P_{ATM} = Pressão atmosférica local em [mmHg];

h = a altitude do local em metros.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Pressão de Vapor e Peso Específico da Água:

Temperatura °C	Pressão de Vapor (PV) [kgf/cm²]	Peso Específico [γ] (kgf/m³)
0	0,0061	999,8
5	0,0087	1000,0
10	0,0123	999,7
15	0,0174	999,2
20	0,0234	998,3
25	0,0322	997,0
30	0,0429	996,0
35	0,0572	994,0
40	0,0750	992,3
45	0,0974	990,0
50	0,1255	988,0
55	0,1602	986,0
60	0,1992	983,2
65	0,2547	981,0
70	0,3175	978,0
75	0,3929	975,0
80	0,4828	971,6
85	0,5894	969,0
90	0,7149	965,0
95	0,8620	962,0
100	1,0333	958,1

Bombas & Instalações de Bombeamento

ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

Dentre as razões que conduzem a necessidade de associarmos bombas citamos:

- a) a inexistência, no mercado, de bombas que possam, isoladamente, atender a vazão necessária;
- b) aumento escalonado de vazões com o correr do tempo;
- c) inexistência no mercado de bombas capazes de vencer a altura manométrica de projeto.

As razões (a) e (b) requerem a associação em paralelo, que consiste em fazer duas ou mais bombas recalcarem em uma ou mais linhas comuns, de forma que cada bomba recalque uma parte da vazão.

Para satisfazer a razão (c) é necessária a associação em série. Neste caso as bombas recalcam em linha comum, de tal forma que a anterior, bombeia para a sucção da posterior, que recebe o fluido com maior quantidade de energia.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Associação de Bombas em Paralelo

É recomendável neste tipo de associação, que as bombas tenham as mesmas características, ou pelo menos muito próximas.

Neste tipo de associação tem-se:

⇒ as bombas operando com a mesma altura manométrica: $H_{B1} = H_{B2}$,

⇒ a vazão do sistema é $Q_s = Q_1 + Q_2$.

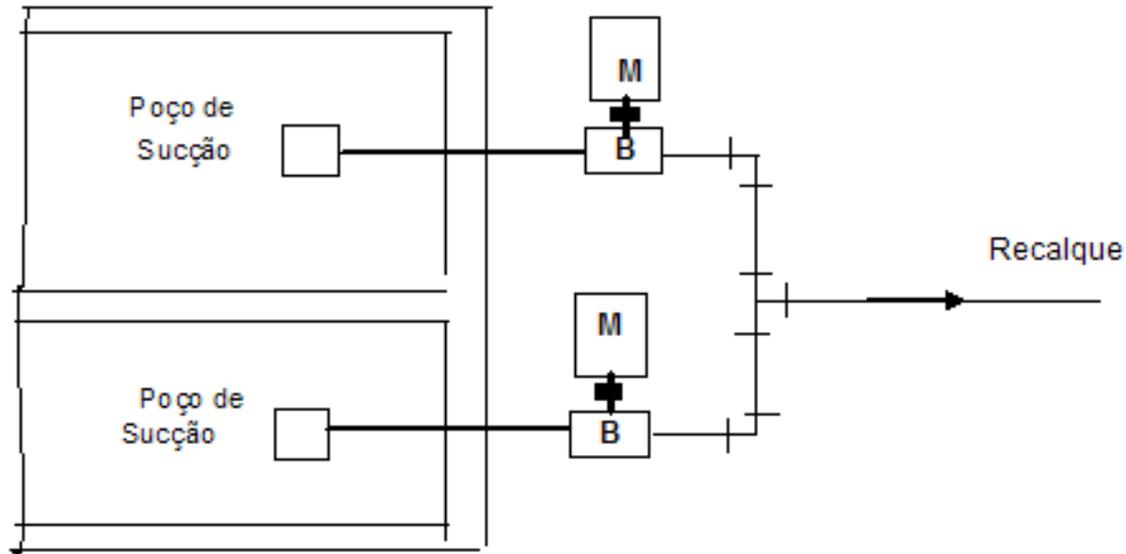
Recomendações para associação em paralelo.

- a) selecionar bombas com curvas características do tipo estável;
- b) utilizar de preferência bombas iguais;
- c) empregar motores cujas potências sejam capazes de atender a todas as condições de trabalho (bombas operando em paralelo e isoladamente), sem perigo de sobrecarga;
- d) projetar a instalação, de modo que o $NPSH_{DISP} > NPSH_{REQ}$ em qualquer ponto de trabalho (bombas operando em paralelo e isoladamente).

Bombas & Instalações de Bombeamento

Associação de Bombas em Paralelo

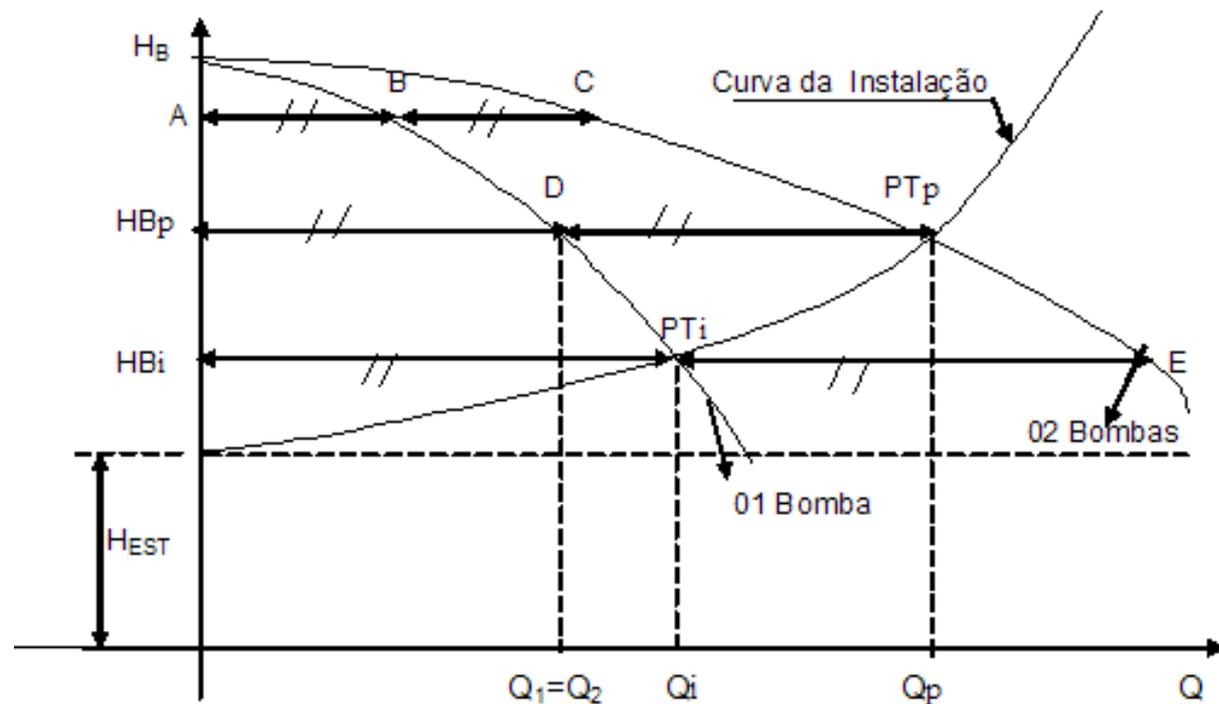
A figura abaixo mostra, esquematicamente, uma instalação com bombas funcionando em paralelo.



Bombas & Instalações de Bombeamento

Associação em Paralelo de Bombas Iguais

É a associação normal e na maioria das aplicações a única aconselhável. Neste caso, as vazões se dividem igualmente entre as bombas quer tenham duas, três ou mais bombas operando.



Bombas & Instalações de Bombeamento

Associação em Paralelo de Bombas Iguais

Na figura tem-se que:

- a) Igualdade de trechos: $A-B = B-C$; $HBp-D = D-PTp$; $HBi-PTi = PTi-E$
- b) $PTi \Rightarrow$ Ponto de Trabalho das bombas operando isoladamente (uma de cada vêz);
- c) $HBi \Rightarrow$ Altura manométrica de cada bomba operando isoladamente;
- d) $Qi \Rightarrow$ Vazão de cada bomba operando isoladamente;
- e) $PTp \Rightarrow$ Ponto de Trabalho das bombas operando em paralelo;
- f) $HBp \Rightarrow$ Altura manométrica de cada uma das bombas que estão operando em paralelo;
- g) $Qp \Rightarrow$ Vazão do sistema na operação em paralelo (é o total fornecido pelas duas bombas):
- h) Q_1 e $Q_2 \Rightarrow$ Vazões de cada uma das bombas na operação em paralelo;

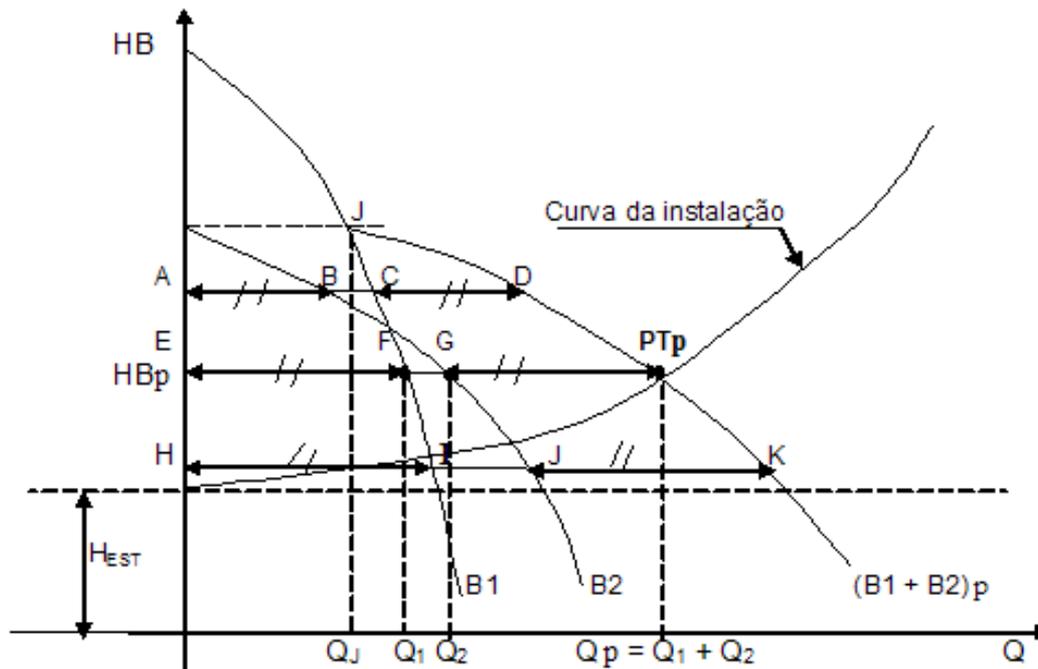
Nesta forma de associação observa-se que:

- a) a vazão total do sistema é menor do que a soma das vazões das bombas operando isoladamente;
- b) se por qualquer razão umas das bombas parar de funcionar, a unidade que permanecer operando terá a potência absorvida e o $NPSH_{REQ}$ maior do que quando estiver funcionando em paralelo. Por isso, ao projetar uma instalação deste tipo, temos que analisar essas grandezas, quando as bombas estão trabalhando em paralelo, bem como, isoladamente.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Associação em Paralelo de Bombas com Características Diferentes

Duas bombas com características diferentes podem eventualmente trabalhar em paralelo, mas apresentam sérios problemas operacionais, conforme veremos adiante.



Bombas & Instalações de Bombeamento

Associação em Paralelo de Bombas com Características Diferentes

Na figura tem-se:

- a) Igualdade de trechos: $A-B = C-D$; $E-F = G-PTp$; $H-I=J-K$
- b) $PTp \Rightarrow$ Ponto de Trabalho das bombas operando em paralelo;
- c) $HBp \Rightarrow$ Altura manométrica da associação das bombas 1 e 2 operando em paralelo
- d) $(HBp = HBp_1 = HBp_2)$
- e) $HBp_1 = HBp_2 \Rightarrow$ Altura manométrica de cada uma das bombas que estão operando em paralelo;
- f) $Q_p = Q_1 + Q_2 \Rightarrow$ Vazão do sistema na operação em paralelo (é o total fornecido pelas duas bombas):
- g) Q_1 e $Q_2 \Rightarrow$ Vazões de cada uma das bombas na operação em paralelo;
- h) a parcela de vazão de cada bomba é diferente ou seja $Q_1 \neq Q_2$
- i) se a altura manométrica do sistema superar a da bomba 2, somente a bomba 1 recalcará o fluido. Neste caso a bomba 2 terá vazão nula e sofrerá sobreaquecimento.

Bombas & Instalações de Bombeamento

Associação de Bombas em Série com Características Diferentes

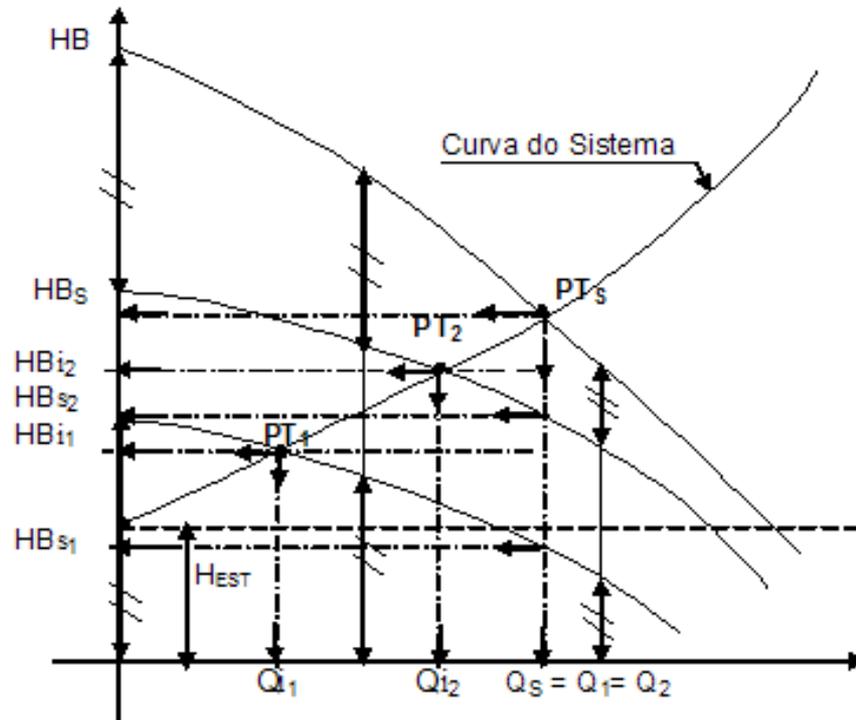
Se duas ou mais bombas estão operando em série as vazões se mantêm e as alturas manométricas totais se somam.

Nestas aplicações, deve-se tomar cuidados de verificar se a flange de sucção da segunda bomba suporta a pressão de descarga da primeira.

Para a associação em série, a curva resultante tem as seguintes características:

$$HB_S = HB_{S_1} + HB_{S_2}; \quad Q_S = Q_1 = Q_2.$$

A figura abaixo apresenta as curvas da associação de duas bombas com características diferentes em série.



Bombas & Instalações de Bombeamento

Associação em Série de Bombas com Características Diferentes

Na figura tem-se:

- a) $PT_1 \Rightarrow$ Ponto de Trabalho da bomba 1 operando isoladamente;
- b) $PT_2 \Rightarrow$ Ponto de Trabalho da bomba 2 operando isoladamente;
- c) $PTs \Rightarrow$ Ponto de Trabalho das bombas 1 e 2 operando em série;
- d) $Qi_1 \Rightarrow$ Vazão da bomba 1, quando operando isoladamente;
- e) $Qi_2 \Rightarrow$ Vazão da bomba 2, quando operando isoladamente;
- f) $Qs = Q_1 = Q_2 \Rightarrow$ Vazão do sistema na operação em série, que é a mesma vazão de operação de cada bomba na associação em série;
- g) $HBi_1 \Rightarrow$ Altura manométrica da bomba 1, quando operando isoladamente;
- h) $HBi_2 \Rightarrow$ Altura manométrica da bomba 2, quando operando isoladamente;
- i) $HBs \Rightarrow$ Altura manométrica da associação das bombas 1 e 2 em série ($HBs = HBs_1 + HBs_2$);
- j) $HBs_1 \Rightarrow$ Altura manométrica da bomba 1, quando operando na associação em série;
- k) $HBs_2 \Rightarrow$ Altura manométrica da bomba 2, quando operando na associação em série

Bombas & Instalações de Bombeamento

Exercícios:

1) Na especificação de uma nova bomba a ser instalada no sistema abaixo calcular, para uma vazão de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ de ácido sulfúrico a 98% em peso a 25°C ($\rho=1840 \text{ kg/m}^3$, $\mu=15 \text{ cp}$, e pressão de vapor = $0,0015 \text{ mmHg}$):

a) a altura manométrica total.

b) NPSH disponível.

