



Universidade Federal de Pernambuco

Centro de Tecnologia e Geociências

Departamento de Engenharia Química

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA QUÍMICA

EQUIPAMENTOS PARA DESLOCAMENTO DE FLUIDOS

BOMBAS

Prof. Maurício A. da Motta Sobrinho

Prof. Valdemir Alexandre dos Santos

RECIFE

1998

1. INTRODUÇÃO

Em sistemas de escoamento, geralmente é necessário adicionar energia ao fluido para manter ou aumentar a sua velocidade ou pressão, compensando as perdas por atrito, ou para elevá-lo a um certo nível. Para se introduzir esta energia são utilizados equipamentos como bombas e compressores, que realizam trabalho sobre o fluido, ou seja, é realizado trabalho da vizinhança (bomba) sobre o sistema (fluido).

Os fluidos envolvidos em processos industriais podem ser gases, líquidos, soluções pastosas, sólidos granulados ou combinações destes. O termo bombeamento é empregado quando deslocamos líquidos ou soluções contendo sólidos de baixa granulometria, utilizando para isto bombas. Quando estão envolvidos gases, utilizam-se compressores, sopradores ou ventiladores. A seleção por um deles se fará dependendo da pressão que se deseja imprimir ao fluido.

Estes equipamentos tem papel fundamental no balanço energético do sistema e seu mal dimensionamento pode acarretar danos irreparáveis ao sistema ou desperdício de energia, elevando o custo do produto final.

2. BOMBAS

Bombas são máquinas hidráulicas cuja função é transmitir energia ao fluido líquido, pastoso ou em suspensão. Os inúmeros tipos existentes agrupam-se em duas classes principais :

- Bombas de deslocamento positivo - que imprimem um certa quantidade de movimento a cada ciclo do dispositivo, em regime pulsante ou contínuo.
- Bombas centrífugas – impelem um fluxo contínuo que dependerá da pressão de descarga ou da energia adicionada.

2.1. BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO

Estas bombas muitas vezes são empregadas na medição de vazão de fluidos, e podem ser classificadas como :

- Bombas alternativas - O movimento de vai e vem do(s) pistão(ões) é que irá promover a vazão do fluido em um fluxo pulsante.

Bombas rotativas - como o próprio nome diz, a vazão deste tipo de bomba vai depender do movimento de rotação das engrenagens existentes em seu interior, promovendo um fluxo contínuo.

2.1.1. BOMBAS ALTERNATIVAS

A taxa de vazão do fluido na bombas alternativas é uma função do volume varrido do pistão e do número de ciclos do pistão por unidade de tempo. A **eficiência volumétrica** de um bomba é definida como a razão entre o volume de fluido descarregado pela bomba e o volume percorrido pelo pistão, ou seja, a razão entre o

vazão prática e a teórica. Esta diferença pode ocorrer devido a enchimento incompleto ou vazamento do pistão. Quando a bomba está bem ajustada esta eficiência situa-se acima de 95%.

Já a **eficiência mecânica** é a relação entre a energia fornecida ao fluido pela energia fornecida a bomba. As perdas ocorridas é devido ao atrito mecânico da bomba e ao atrito do fluido. Este tipo de bomba geralmente apresenta eficiência mecânica superior às bombas centrífugas.

As bombas alternativas podem ser classificadas de acordo com o acionamento em :

- Bombas acionadas a motor, Figura 01, que utilizam um motor elétrico, uma correia, ou uma corrente, através de uma engrenagem motriz e de um eixo de manivela, transformam o movimento rotatório em linear.
- Bombas acionadas a vapor, que utilizam um cilindro de vapor com o pistão no mesmo eixo que os pistões da bomba.

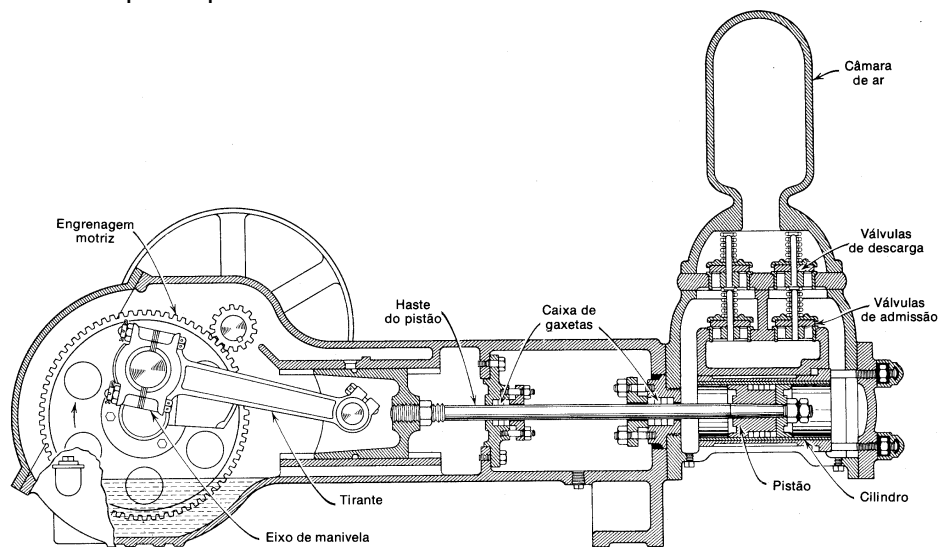


Figura 01- Bomba simplex de duplo efeito acionada a motor

Quanto a descarga do fluido estas bombas podem ser de simples ou duplo efeito. Quando só ocorre uma descarga por ciclo (na ida do cilindro) a bomba é dita de efeito simples e quando a descarga ocorre duas descargas por ciclo (uma na ida e outra na volta do cilindro), é dita de duplo efeito. Se a bomba apresenta dois cilindros com êmbolos separados ela é dita duplex, no caso de possuir apenas um é simplex.

Desta forma pode-se ter, por exemplo, bombas simplex de duplo efeito, como a da Figura 01. A Figura 02 mostra o comportamento da vazão para bombas simplex de simples efeito, onde não há fluxo durante a admissão do líquido no êmbolo; a simplex de duplo efeito, onde o fluxo só cessa no ponto de inversão entre a carga e a descarga e a duplex de duplo efeito, onde o fluxo não cessa porém há uma diminuição quando um dos cilindros estão invertendo seu movimento.

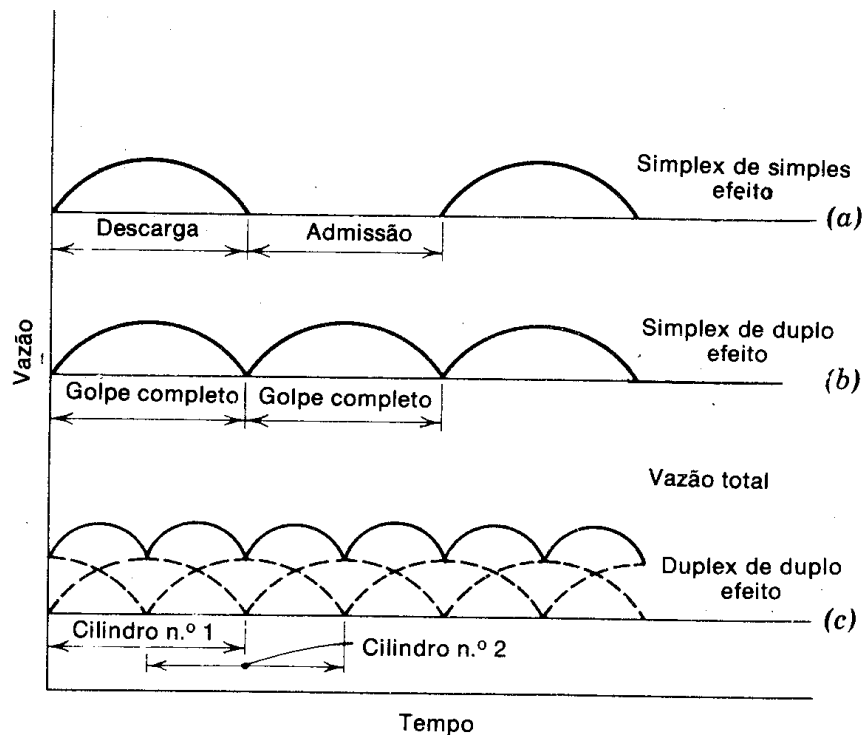


Figura 02 – Comportamento da vazão de uma bomba de deslocamento positivo em função do tempo

2.1.2. BOMBAS ROTATIVAS

Existem diversos tipos de bombas rotativas, dentre elas destacam-se a de engrenagem, a de parafuso e a de cavidade caminhante. O princípio de funcionamento é o mesmo para todos os tipos, na entrada o rotor gera uma pressão mais baixa que faz o fluido entrar na bomba, ficando preso entre o rotor e a carcaça para depois ser ejetado para fora. Estas bombas trabalham afogadas, ou seja, a baixa pressão da entrada da bomba não é suficiente para realizar a sucção do fluido.

As bombas rotativas são empregadas para deslocar líquidos com qualquer viscosidade e sólidos, desde que não sejam abrasivos. São essencialmente utilizadas no bombeamento de óleos, graxas melados e tintas. A Figura 03 mostra o funcionamento de uma bomba rotativa de engrenagem externa.

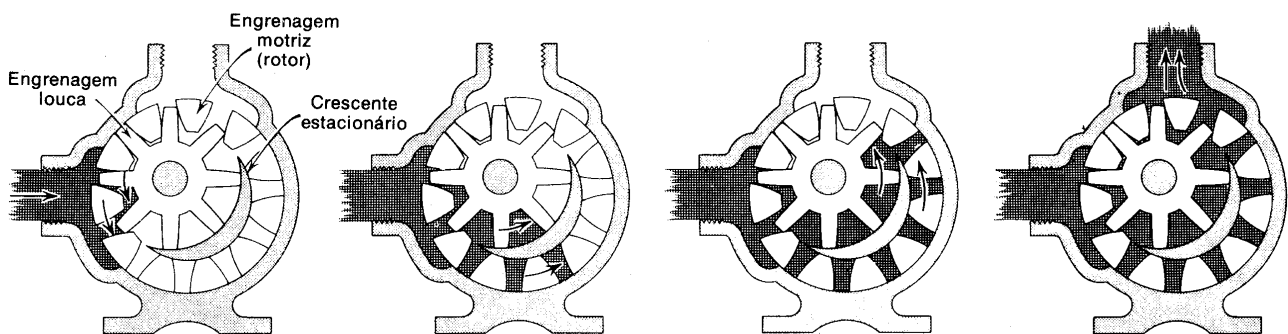


Figura 03 – Bomba rotativa de engrenagem externa

A Figura 04 mostra curvas de desempenho de uma bomba rotativa de engrenagem externa. Esta pode ser utilizada para o cálculo de velocidade e potência da bomba. Como exemplo faremos estes cálculos para uma vazão de 90 gal/min e 200 psi.

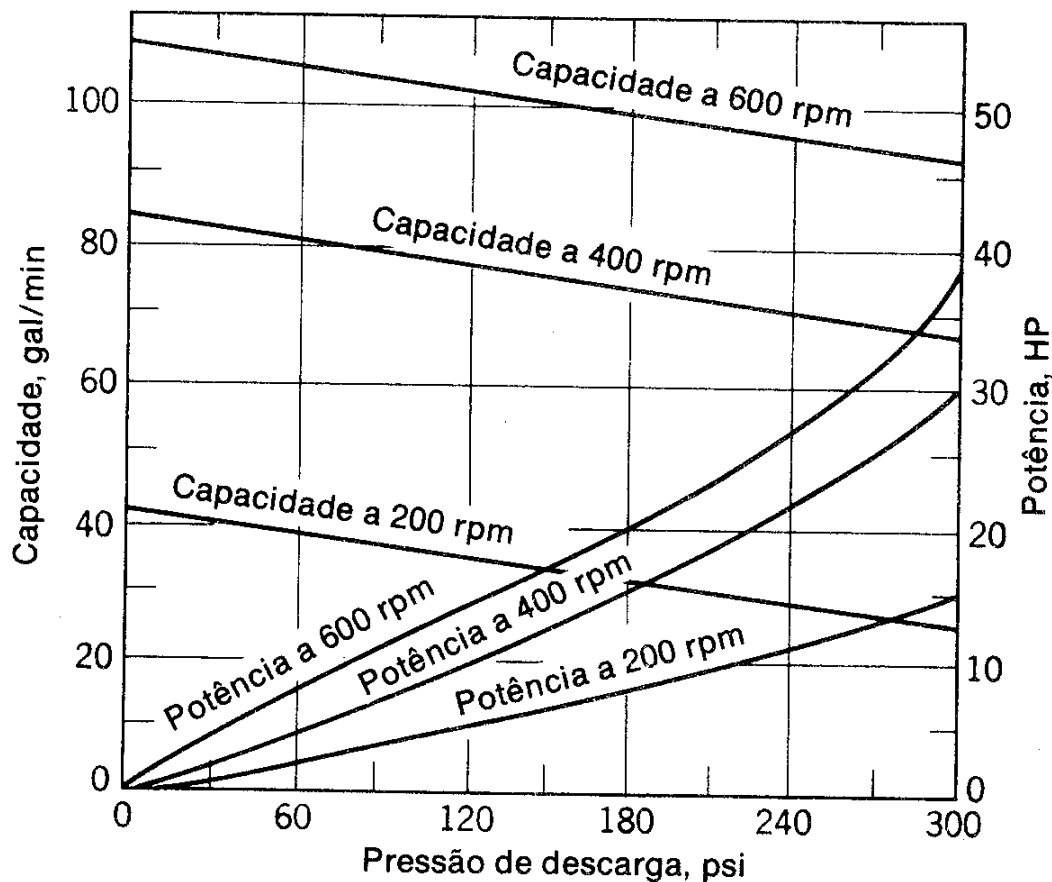


Figura 04 – curva de desempenho característico de um bomba rotativa de engrenagem externa

Utilizando-se a Figura 04 e tomando como base o valor da vazão e da pressão, encontramos que a capacidade da bomba deve-se situar entre 400 e 600 rpm. Fazendo a interpolação (não é linear conforme pode ser observado pela diferença entre 200 e 400 rpm), obtém-se 450 rpm. Utilizando-se as curvas de potência encontradas na parte inferior do gráfico e interpolando para 450, encontramos que uma potência de 21 HP é suficiente para obter-se a pressão de 200 psi.

2.2. BOMBAS CENTRÍFUGAS

Dentre todas, as bombas centrífugas, Figura 05, são as mais utilizadas na indústria por razões tais como : simplicidade de modelo, pequeno custo inicial, manutenção barata e flexibilidade de operação. Este tipo pode operar em amplas faixas de pressão e vazão.

O seu funcionamento, ilustrado na Figura 06, é fundamentado na força centrífuga imprimida ao fluido quando é lançado do centro do rotor à ponta das palhetas

propulsoras, aumentando a sua energia cinética que é transformada em pressão quando o fluido sai do impulsor e entra na voluta ou difusor.

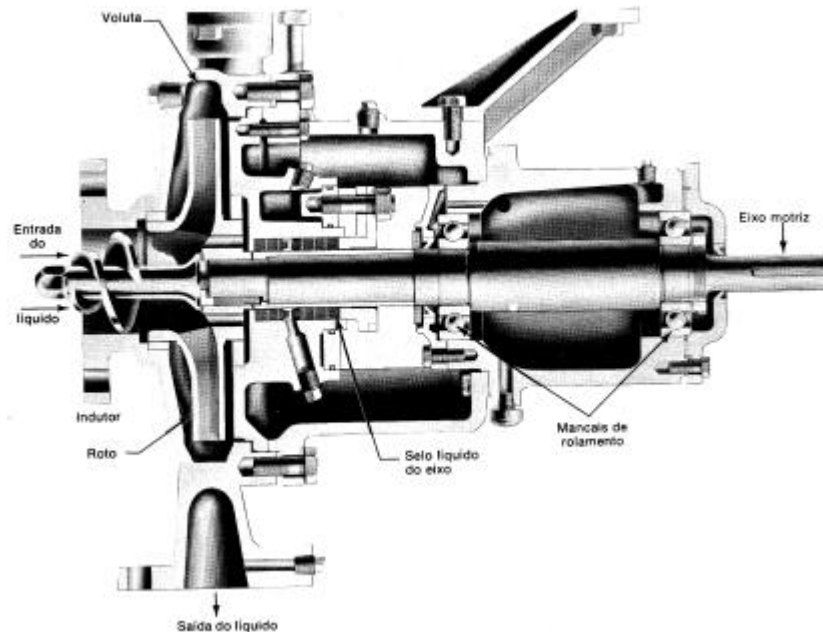


Figura 05 – Corte de uma bomba centrífuga

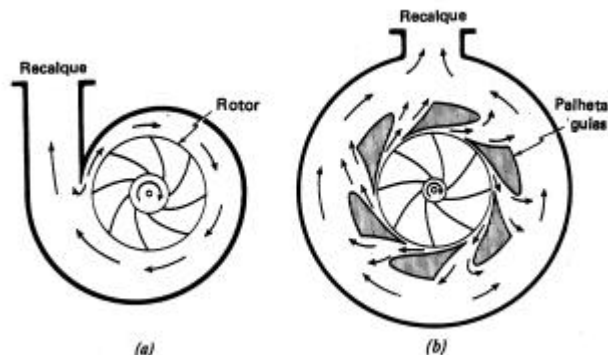


Figura 06 – carcaças de bombas centrífugas

Conforme pode ser observado na Figura 6, a carcaça de uma bomba centrífuga pode ser circular, de uma forma anular que inclui um difusor ou em forma de caracol (voluta).

O rotor é o coração da bomba, é a peça mais importante. Ele pode ser aberto, fechado ou semi-fechado. O primeiro deles, é empregado para líquidos viscosos ou com partículas sólidas em suspensão. O rotor semi-aberto tem uso praticamente igual ao do aberto, enquanto o fechado só é empregado para líquidos límpidos. As pás são posicionadas na posição inversa ao do escoamento. A descrição do funcionamento da bomba acima é para as que tem escoamento puramente radial. Existe ainda as bombas turbina, que têm palhetas pequenas e operam a alta velocidade, promovendo vazões moderadas com pressões relativamente altas, onde há um escoamento misto radial e axial. As bombas de escoamento axial e compressores possuem rotores com várias palhetas com grandes vazões e pressão do fluido relativamente baixa, com escoamento puramente axial.

As bombas centrífugas podem ser configuradas para bombear líquidos especiais, como ácidos em que o rotor e a carcaça possuem uma proteção especial.

2.2.1. ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL

Para se calcular a altura manométrica total deve-se calcular a altura de sucção e a de recalque.

A altura manométrica de sucção (H_s) é expressa pela seguinte equação :

$$H_s = \pm S + h_{fs} - P_s \quad (1)$$

onde : S = altura estática de sucção

h_{fs} = perda de carga total na linha de sucção

P_s = pressão manométrica no reservatório de sucção

Para a altura de recalque é válida a seguinte equação :

$$H_D = \pm D + h_{fd} + P_D \quad (2)$$

onde : D = altura estática de descarga

h_{fd} = perda de carga total na linha de descarga

P_D = pressão manométrica no reservatório de descarga

Desta maneira pode-se exprimir a altura manométrica total, H_T , é expressa pela seguinte equação :

$$H_T = \pm S \pm D + h_{fs} + h_{fd} + P_D - P_s \quad (3)$$

Pode-se exprimir H_T em função de leituras feitas simultaneamente por um vacuômetro, instalado na linha de sucção, e por um manômetro, instalado na linha de descarga. Tem-se assim :

$$H_T = (p' + p''/g) + i + i' - i'' \quad (4)$$

Onde: p' = leitura do manômetro

p'' = leitura no vacuômetro

i = distância vertical entre o bocal de saída e o plano central da bomba

i' = distância vertical entre a entrada e o centro do manômetro

i'' = distância vertical entre a entrada e o centro do vacuômetro

definindo-se m como a diferença de cotas entre os centros ou as entradas destes instrumentos, ou seja,

$$m = i + i' - i'' \quad (5)$$

obtem-se,

$$H_T = (p' + p''/g) + m \quad (6)$$

2.2.2. POTÊNCIA DO CONJUNTO MOTOR-BOMBA

Na instalação de uma bomba, deve-se Ter em mente que o motor a ser utilizado deve Ter uma potência suficiente para vencer as diferenças de nível (h), e as perdas de carga na sucção e no recalque (h_f) e a dissipação de energia tanto no motor como na bomba. A dissipação de energia é na realidade, o rendimento do conjunto motor-bomba, que é dado pela seguinte expressão :

$$h = h_{motor-bomba} = h_{motor} \times h_{bomba} \quad (7)$$

para motores elétricos são tomados os seguintes rendimentos :

N (HP)	½	¾	1	1 ½	2	3	5	10	20	30	50	100
η_{motor} %	64	67	72	73	75	77	81	84	86	87	88	90

Onde N é a potência indicada na placa no motor

Para as bombas centrífugas operando a 1750 rpm, são tomados os seguintes valores :

Q (l/seg)	5	7,5	10	15	20	25	30	40	50	100	200
η_{bomba} %	52	61	66	68	71	75	80	84	85	87	88

Além disto, recomenda-se os seguintes acréscimos para a potência instalada:

Potência do motor (HP)	até 2	2 a 5	5 a 10	10 a 20	acima de 20
Acréscimo (%)	50	30	20	15	10

Desta forma, a potência do conjunto motor-bomba pode ser dado pela seguinte equação :

$$N = \frac{\rho Q H_T}{75 \eta} \quad (8)$$

onde : ρ = peso específico do líquido (kg/m^3)

Q = vazão (m^3/h)

H_T = altura manométrica total

η = rendimento do conj. motor-bomba

N = potência (HP ou CV)

2.2.3. CAVITAÇÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS

As bombas centrífugas estão sujeitas a cavitação, para evitá-la é necessário calcular-se o saldo positivo de carga de sucção (net positive suction head) NPSH, que é definido como a diferença entre a carga estática na entrada da sucção e a carga correspondente à pressão do vapor do líquido na entrada da bomba.

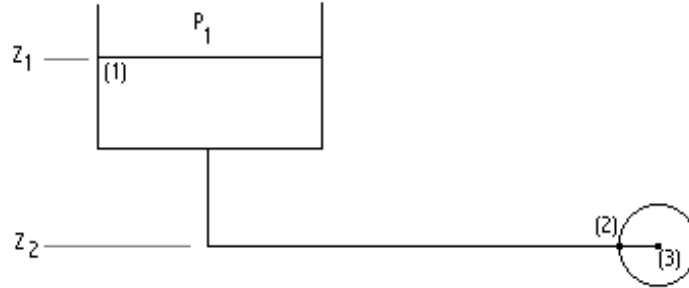


Figura 07 - Sistema reservatório bomba

A Figura 07 mostra um constituído por um reservatório aberto e uma bomba, onde a pressão atmosférica é representado por P_1 e a altura do nível do líquido em relação a cota da bomba (Z_2) é Z_1 . Aplicando-se um balanço de energia por unidade de massa para este sistema, obtém-se:

$$\frac{P_1}{\rho} + Z_1 \frac{g}{g_c} + \frac{\bar{V}_1^2}{2g_c} = \frac{P_2}{\rho} + Z_2 \frac{g}{g_c} + \frac{\bar{V}_2^2}{2g_c} + \sum F \quad (9)$$

onde : $\sum F$ = perda de carga total por atrito na tubulação

$\bar{V}_1$ e $\bar{V}_2$ = velocidades no líquido nos pontos 1 e 2 respectivamente

ρ = densidade do líquido

Z_1 e Z_2 = cotas de nível do líquido no reservatório e no eixo da bomba

tomando Z_2 como referência e desprezando V_1 diante de V_2 , tem-se

$$\frac{P_2}{\rho} + \frac{\bar{V}_2^2}{2g_c} = \frac{P_1}{\rho} + Z_1 \frac{g}{g_c} - \sum F \quad (10)$$

A pressão no olho do rotor, ponto (3) na Figura 07, deve ser menor que a na entrada da bomba (2), esta diferença pode ser calculada a partir da equação 7.

$$\Delta P = \frac{fV_3}{2g_c} \quad (11)$$

onde : ϕ = coeficiente de queda de pressão

V_3 = velocidade no olho do fluido

A definição de NPSH é dada pela equação 12

$$NPSH = \left(\frac{P_2}{r} + \frac{\bar{V}_2^2}{2g_c} \right) - \frac{P_v}{r} \quad (12)$$

onde : P_v = pressão vapor do fluido a ser bombeado

substituindo a Eq. 12 na Eq. 10, chega-se a

$$NPSH = \frac{P_1}{r} + Z_1 \frac{g}{g_c} - \sum F - \frac{P_v}{r} \quad (13)$$

A cavitação é possível se a carga total na sucção menos a carga de aceleração deste ponto até o olho do rotor for igual ou menor que a pressão vapor, ou seja,

$$\frac{P_1}{r} + Z_1 \frac{g}{g_c} - \sum F - \frac{\bar{V}_2^2}{2g_c} - f \frac{\bar{V}_3^2}{2g_c} \leq - \frac{P_v}{r} \quad (14)$$

A Eq. 14 pode ser utilizada para exprimir a cavitação incipiente. Desta maneira, deve-se calcular as velocidades $\bar{V}_1$ e $\bar{V}_2$, pela Eq. 15, de modo que a cavitação seja evitada.

$$\frac{P_1}{r} + Z_1 \frac{g}{g_c} - \sum F - \frac{P_v}{r} = \frac{\bar{V}_2^2}{2g_c} + f \frac{\bar{V}_3^2}{2g_c} \quad (15)$$

rescrevendo a Eq. 15 em função de NPSH, tem-se

$$NPSH = \frac{\bar{V}_2^2}{2g_c} + f \frac{\bar{V}_3^2}{2g_c} \quad (16)$$

Como o valor do NPSH é fornecido pelo fabricante da bomba, através da Eq. 16 pode-se saber as velocidades em que a bomba pode operar sem que haja cavitação.

2.2.4. CURVAS CARACTERÍSTICAS

Denomina-se de curvas características de bombas centrífugas o esboço gráfico de alguns parâmetros como potência de acionamento (fornecida), eficiência e altura de elevação do líquido em função da vazão de trabalho. Um esboço gráfico dessas curvas pode ser visto na Figura 06.

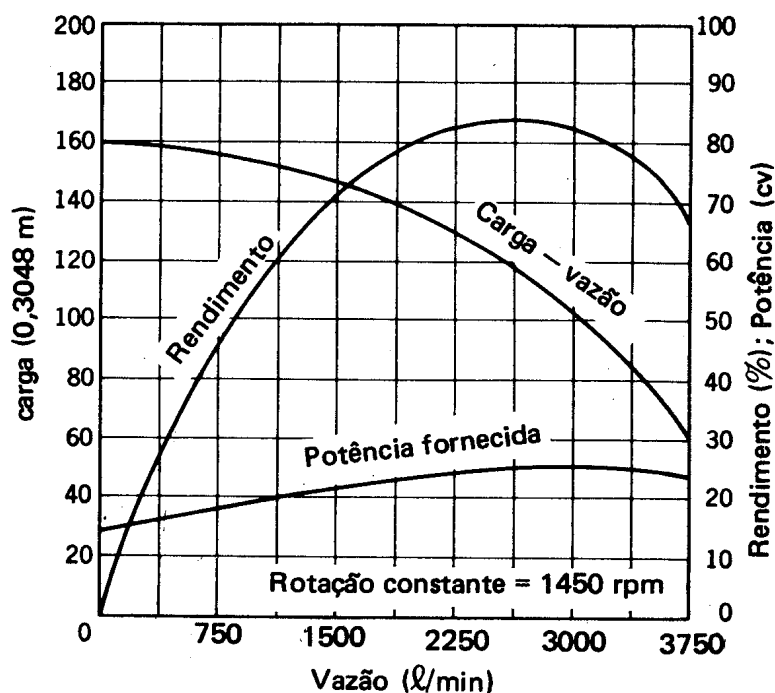


Figura 08 – Curvas características de um bomba centrífuga (Linsley pg 41)

Dentre as curvas características de uma bomba centrífuga, a carga - vazão (H versus Q) é que mais varia de forma, podendo assumir tipos bem particulares como : suave, íngreme, instável e plana.

Para se estimar as curvas de características de uma bomba, deve-se manter a velocidade de rotação constante e plotar a variação da altura manométrica, eficiência e potência em função da variação da vazão. O ponto ideal de funcionamento da bomba deve corresponder ao melhor rendimento.

2.2.5. PREVISÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Gráfico do comportamento assumido pelo sistema de recalque provocado pelas perdas totais ou altura manométrica total em função da vazão desse sistema, é denominado de curva característica. Sua configuração é dada no gráfico a seguir :

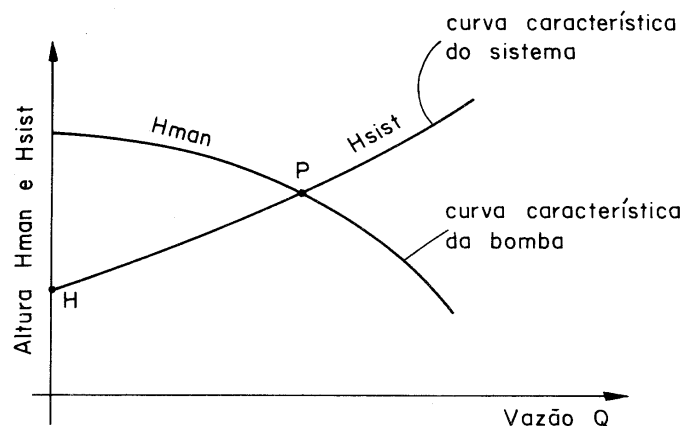


Figura 09 – Curva para cálculo do ponto de operação do sistema de bombeamento

Essa curva, característica do sistema, deve ser prevista no projeto de instalação de bombeamento porque será utilizada na determinação do ponto de operação.

Utilizando-se a curva característica da bomba, relativa a altura de bombeamento, e a curva característica do sistema, altura total versus a vazão, determina-se o ponto de operação como o ponto de interseção entre as duas curvas, conforme pode ser observado na figura 09.

O desejável é que o ponto de funcionamento do sistema coincida com o ponto de maior rendimento da bomba, de maneira que pode-se Ter o maior rendimento.

2.2.6. LEIS DE SEMELHANÇA

Suponhamos que uma bomba centrífuga funcionando com um número N de rotações, eleva uma descarga de Q a uma altura h, gastando para isto uma potência P. Se modificarmos sua rotação para N', existirão as seguintes relações em função dos parâmetros anteriores :

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{N'}{N} \quad (17) \qquad \frac{h'}{h} = \left(\frac{N'}{N} \right)^2 \quad (18) \qquad \frac{P'}{P} = \left(\frac{N'}{N} \right)^3 \quad (19)$$

Como o rendimento das bombas varia com a velocidade, essas relações não são absolutamente corretas. Entretanto, se a alteração de velocidade até um fator igual a 2, o erro resultante pode ser desprezado.

2.2.7. ROTAÇÃO ESPECÍFICA

A indicação do tipo de rotor de uma bomba nos é fornecido por um parâmetro denominado de velocidade específica N_s , expresso por :

$$N_s = \frac{0,211NQ^{1/2}}{h^{3/4}} \quad (20)$$

onde : N= rotação por minuto

Q = vazão em litros por minuto

h = altura de elevação em metros

As rotações específicas das bombas são determinadas pelas características operacionais quando em rendimento máximo. Nas bombas de dupla sucção a vazão a ser usada na Eq. 1 é a metade da vazão total da bomba. Nas bombas de múltiplo estágio, h é a carga por estágio

A Figura 07 mostra o corte de vários rotores e suas respectivas rotações específicas. Pode-se observar que bombas com rotação abaixo de 800 rpm tendem a ter baixo rendimento.

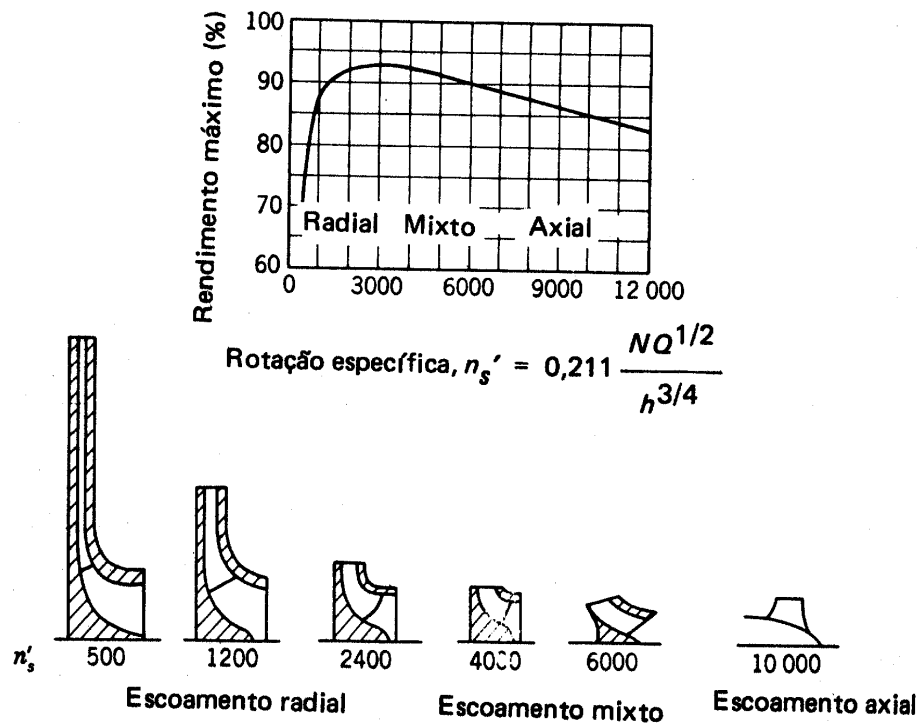


Figura 10 – Variação do rendimento e do tipo de rotor em função da rotação específica. (Linsley pag 421)

3. ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS

As bombas podem ser associadas em série ou paralelo, de acordo com o objetivo que se deseja alcançar.

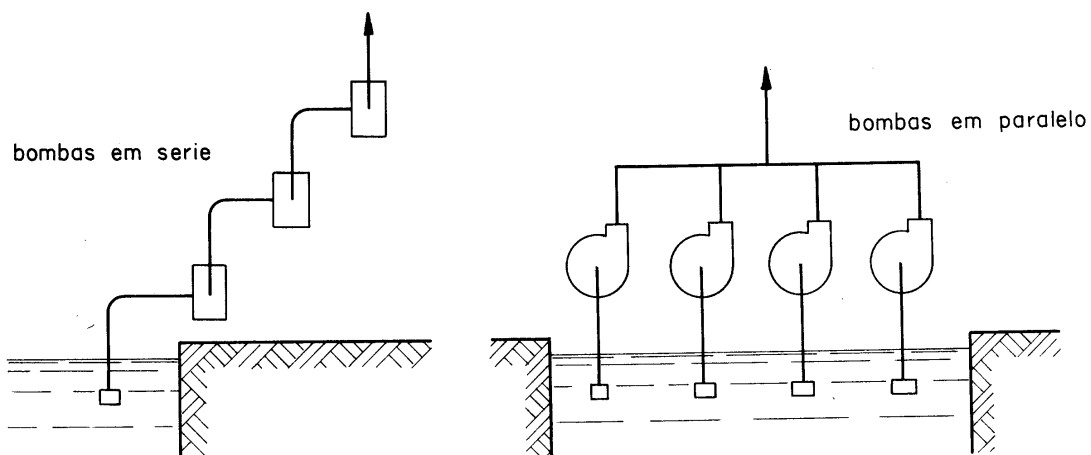


Figura 11 – Associação de bombas em série e em paralelo

3.1. ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE

Quando se deseja aumentar a altura manométrica de um sistema de bombeamento, pode-se associá-las em série.

3.2. ASSOCIAÇÃO EM PARALELO

Utiliza-se a disposição de bombas em paralelo quando a vazão é elevada.

4. BIBLIOGRAFIA BÁSICA

- Bennett, G.O. & Myers, J.E., 1978, «Fenômenos de Transporte», Mc Graw-Hill do Brasil, São Paulo, S.P.
- Bird, R.B., Stewart, W.E. & Lightfoot, E.N., 1960, «Transport Phenomena», John Wiley and Sons, USA.
- Black, P.O. , 1987, «Bombas», Ao Livro Técnico S/A, Rio de Janeiro, R.J.
- Brown, G.G., 1950, «Unit Operation», John Wiley and Sons, USA.
- Foust, S.A. et alii, 1982, «Princípios das Operações Unitárias», Guanabara Dois
- Fox, R.W. & Mc. Donald, A.T., 1981, «Introdução à Mecânica dos Fluidos», 2^a.ed., Guanabara Dois, Rio de Janeiro, R.J.
- Hammer, M.J., 1979, «Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotos», Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, R.J.
- Linsley, R.K., Franzini, J.B., 1978, «Engenharia de Recursos Hídricos», Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, S.P.
- Souza, H.R., 1977, «Hidráulica», Escola Protec, São Paulo, S.P.
- Streeter, V. & Wylie, B., 1983, «Mecânica dos Fluidos», 7^a.ed., Mc Graw-Hill do Brasil, São Paulo, S.P.