

MÓDULO 4 - CURVA DE BOMBA

- 4.1 - Coordenadas de Seleção.
- 4.2 - Obtenção da Curva Característica de um rotor da bomba.
- 4.3 - Tipos de Curva Característica de Rotor.
- 4.4 - Curva de Potência Consumida pela bomba.
- 4.5 - Cálculo da Potência Consumida pela bomba.
- 4.6 - Curva de Rendimento.
- 4.7 - Curvas Características do Rotor.
- 4.8 - Curva de NPSH requerido.
- 4.9 - Indutores.



CURVA DE BOMBA

4.1 Coordenadas de Seleção

Pela definição de bomba verificamos que esta tem por finalidade conferir energia, expressa em altura de líquido para promover o seu deslocamento.

Sabemos também que a bomba é selecionada em função de cada instalação, e que os parâmetros básicos de seleção são a ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL (AMT) e a VAZÃO (Q).

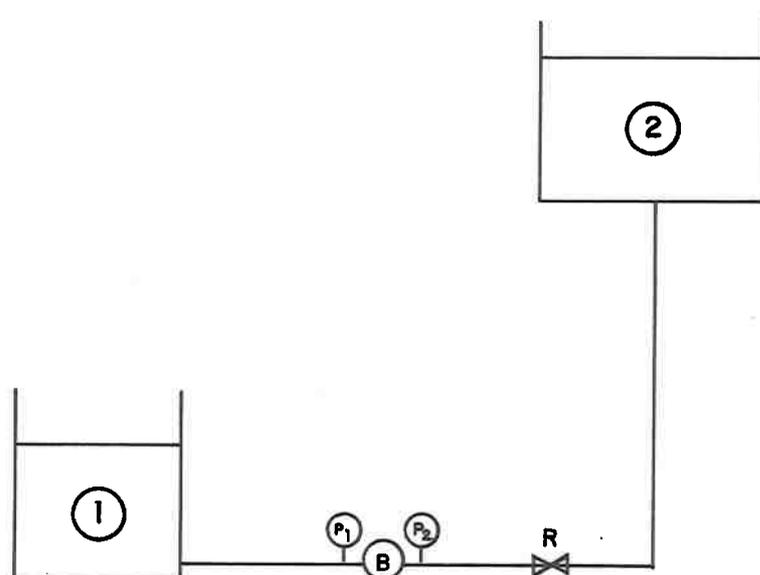
Se analisarmos de uma maneira mais ampla, verificaremos que a bomba quando em funcionamento poderá operar com VAZÕES diferentes da de cálculo em função de diversos fatores, tais como:

- Erro no cálculo da AMT.
- Registro parcialmente fechado.
- Etc.

Assim é necessário que tenhamos a curva de bomba representada graficamente para que possamos analisar o seu comportamento. Para tanto, optamos por representá-la através dos eixos cartesianos; que representamos no eixo horizontal as VAZÕES e no vertical as ALTURAS fornecidas pela bomba.



4.2 Obtenção da curva característica do rotor da bomba



Baseando-nos na figura acima obteremos a curva característica da bomba para um diâmetro de rotor, como segue:

- a-Considerando-se que:
- P1 seja a leitura manométrica no flange de sucção, da bomba (pressão de sucção).
 - P2 seja a leitura manométrica no flange de descarga da bomba (pressão de descarga).
 - B seja a bomba propriamente dita, com um diâmetro de rotor \emptyset 1 definido.
 - R seja o registro de descarga.

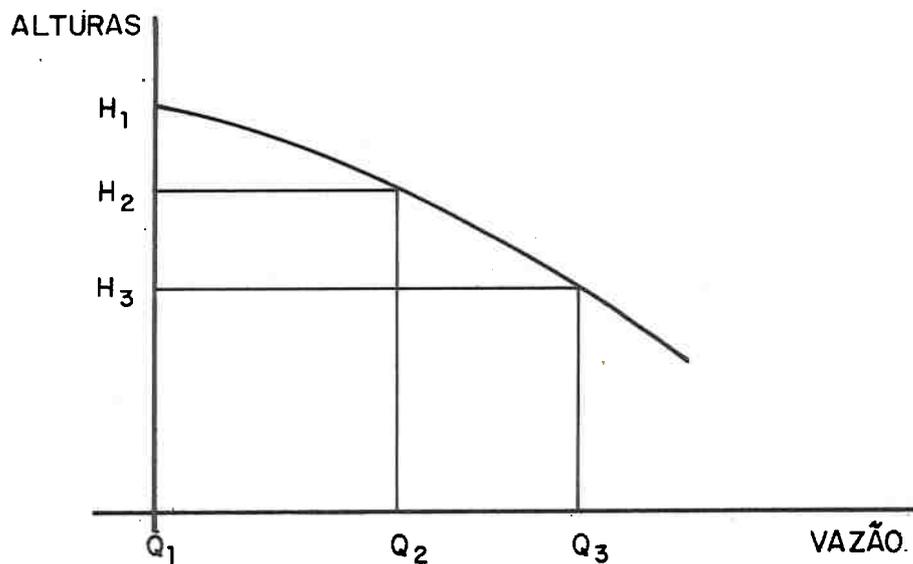
b-Coloca-se a bomba em funcionamento, com o registro de descarga totalmente fechado ($Q_1 = 0$) e determina-se a pressão desenvolvida pela bomba, que é igual a pressão de descarga menos a pressão de sucção, que é representada pela fórmula $AMT = AMR - AMS$, que também pode ser expressa em termos de pressões, como:

$AMT = \frac{PD - PS}{\gamma}$. A representação gráfica deste ponto, que também é denominado de Shut-Off (altura desenvolvida pela bomba correspondente a vazão zero), será H_1 .

c-Abre-se parcialmente o registro, verifica-se a vazão Q_2 que passa através da tubulação, utilizando-se medidores de vazão, e procede-se de maneira análoga a anterior, visando determinar a altura fornecida para esta segunda condição, que chamaremos de H_2 .

d-Abre-se um pouco mais o registro e de maneira análoga às anteriores, determina-se H_3 e Q_3 .

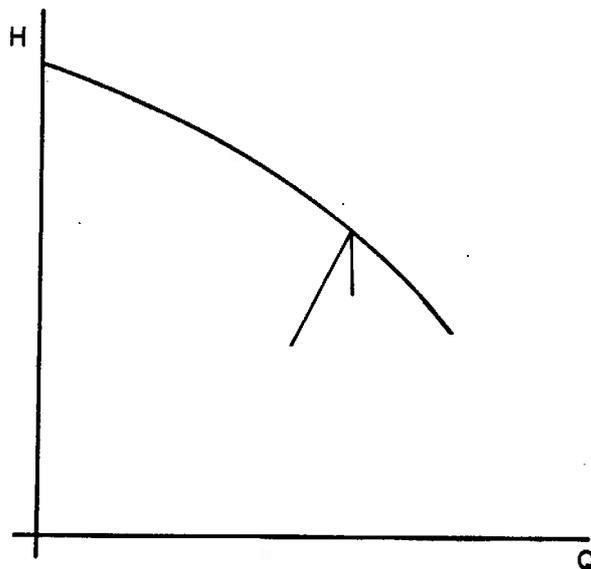
e-Com os valores obtidos, conforme demonstrado anteriormente, plota-se os pontos nos eixos cartesianos (lembrando que no eixo horizontal as vazões e no eixo vertical as alturas), os quais representarão o comportamento hidráulico do rotor de diâmetro $\phi 1$.



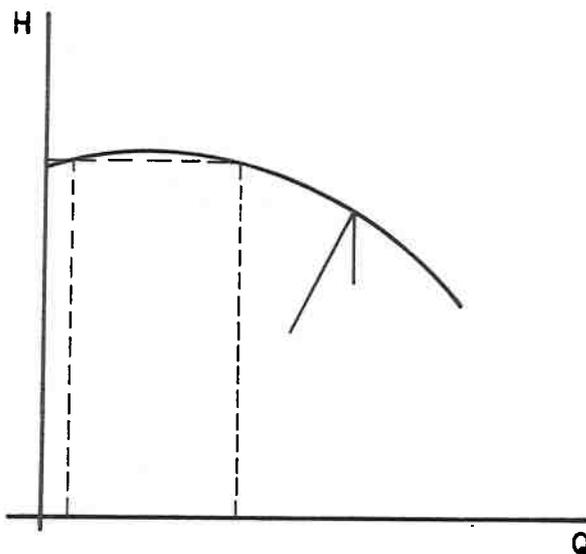
4.3-Tipos de Curva Característica de Rotor

Estamos representando abaixo as curvas típicas de rotores.

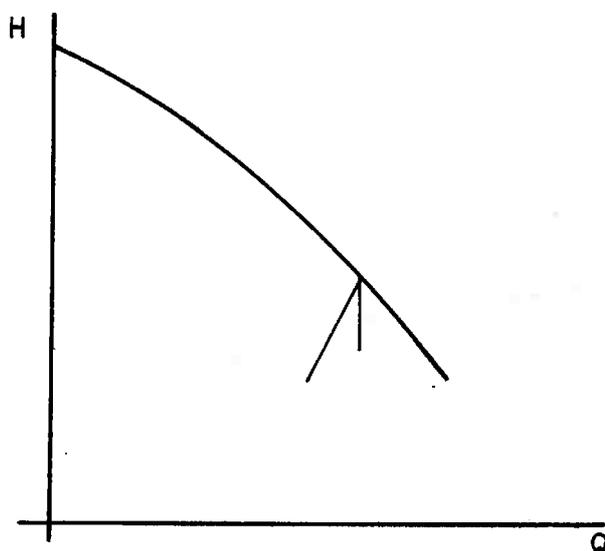
4.3.1 RISING - A altura aumenta continuamente com a diminuição da vazão. A altura correspondente a vazão nula é de 10 a 20% maior que a altura para o ponto de melhor eficiência.



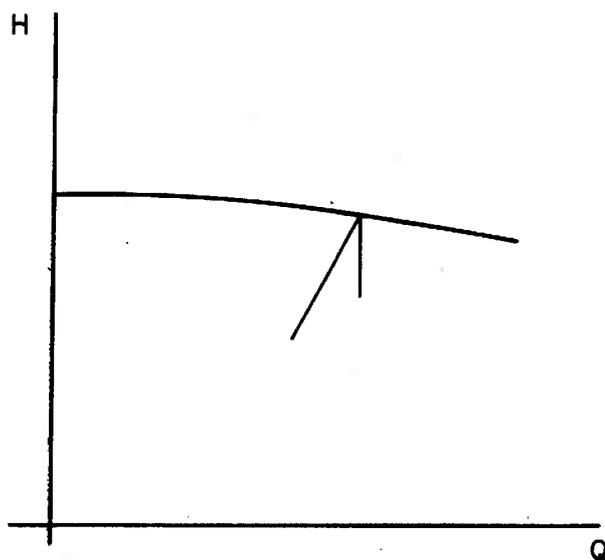
4.3.2 DROOPING - A altura produzida com vazão zero, é menor do que outras correspondentes a algumas vazões. Neste tipo de curva verifica-se que para alturas superiores ao shut-off dispomos de duas vazões diferentes para uma mesma altura.



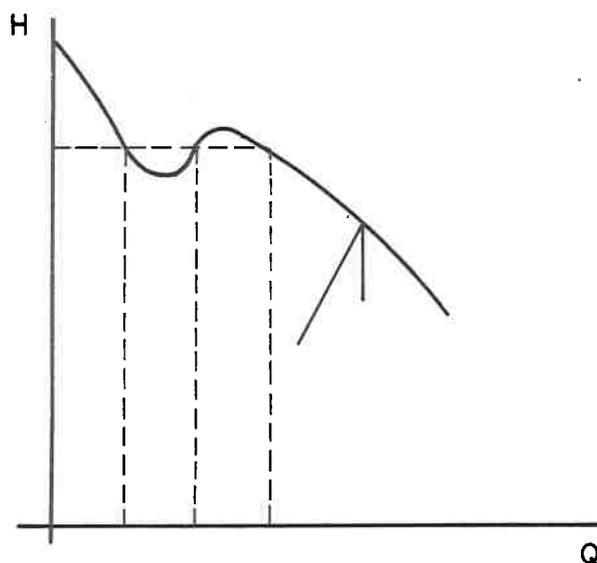
4.3.3 STEEP - É semelhante a RISING, na qual a diferença entre a altura para vazão nula e a do ponto de melhor eficiência é de 40 a 50%.



4.3.4 FLAT - A altura varia pouco com a vazão, é semelhante a RISING.



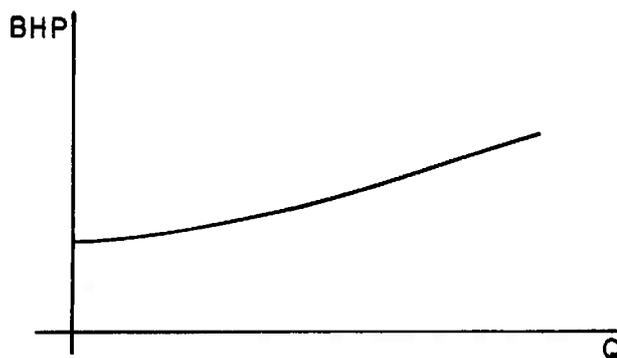
4.3.5 INSTÁVEL - É a curva na qual a mesma altura corresponde a duas ou mais vazões num certo trecho de instabilidade, é idêntica a DROOPING.



4.4 CURVA DE POTÊNCIA CONSUMIDA PELA BOMBA

Em função das características elétricas do motor que aciona a bomba determina-se a potência que está sendo consumida por ela (BHP).

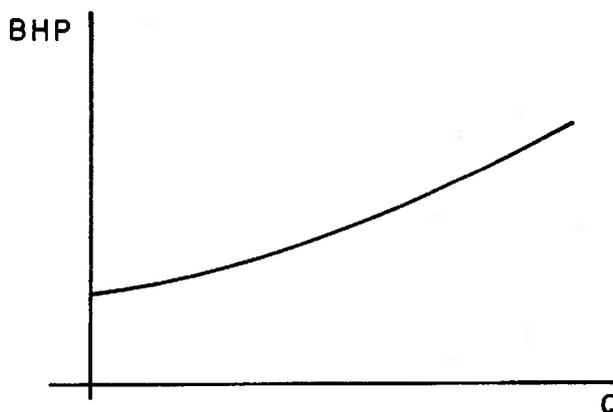
Analogamente a obtenção das curvas características do rotor de diâmetro $\emptyset \cdot 1$, estes valores são determinados para determinadas vazões ($Q = 0, Q_1, Q_2$, etc), e assim podemos representá-los graficamente, como segue:



4.4.1- TIPOS DE CURVAS DE POTÊNCIA

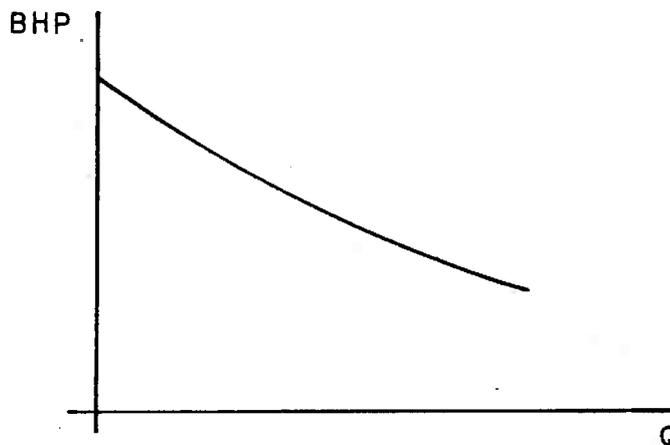
As bombas centrífugas se subdividem em 3 (três) tipos de fluxos que são: radial, axial e misto. Para cada tipo de fluxo verifica-se a existência de curvas de potências consumidas diferentes, que passamos a analisar:

a. fluxo radial



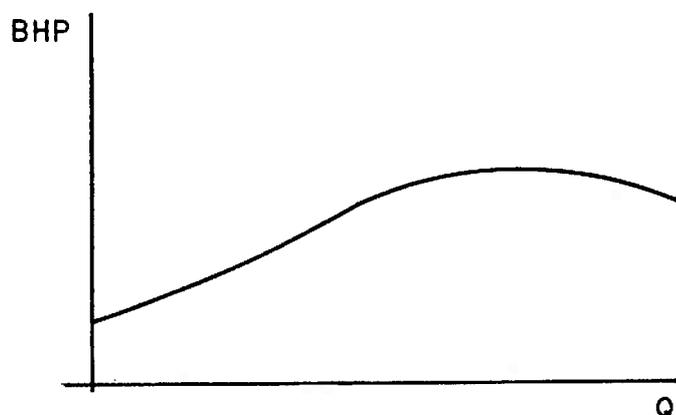
A potência consumida aumenta continuamente com a vazão.

b. fluxo axial



A potência consumida aumenta com a diminuição da vazão.

c. fluxo misto



A potência consumida aumenta até certo valor, mantém-se constante para valores seguintes da vazão e decresce em seguida.

4.5 CÁLCULO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELA BOMBA

O trabalho útil feito por uma bomba centrífuga é naturalmente o produto do peso do líquido deslocado pela altura desenvolvida. Se considerarmos este trabalho na unidade de tempo, teremos a potência hidráulica (Water Horsepower), que é expressa pela fórmula:

$$WHP = \frac{Q \times H \times \gamma}{K}, \text{ onde}$$

WHP = Water Horsepower

Q = Vazão

H = Altura Manométrica Total

γ = Peso Específico

K = Fator para compatibilizar as unidades

A potência requerida para acioná-la ou potência consumida pela bomba (Brake Horsepower - BHP) quando fornecendo a vazão Q de um líquido de γ dado contra uma altura manométrica total H , com rendimento η é:

$$\eta = \frac{WHP}{BHP} \quad BHP = \frac{WHP}{\eta} \quad BHP = \frac{Q \times H \times \gamma}{\eta \times K}$$

Onde: - Q , H e γ são conhecidos

- η é o rendimento da bomba em valores decimais.

- K assumirá os valores seguintes:

$$. K = 274 \quad Q = \text{m}^3/\text{h}$$

$$H = \text{m}$$

$$BHP = \text{HP}$$

$$. K = 270 \quad Q = \text{m}^3/\text{h}$$

$$H = \text{m}$$

$$BHP = \text{CV}$$

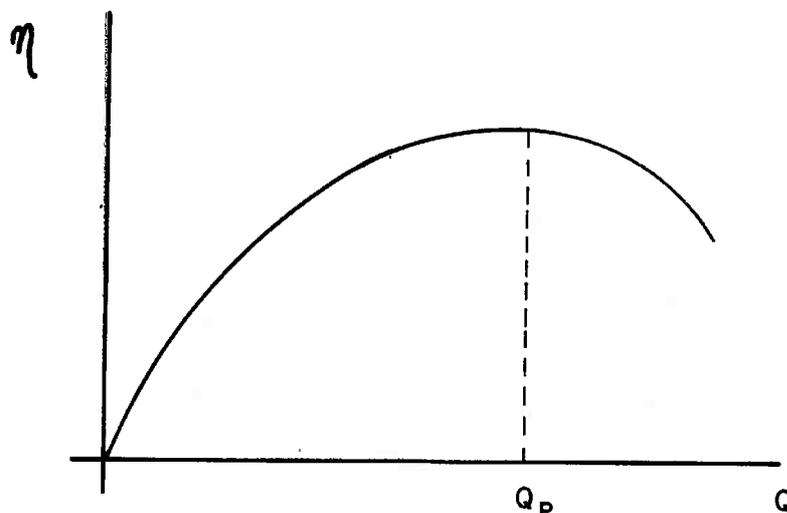
$$. K = 3960 \quad Q = \text{GPM}$$

$$H = \text{FT}$$

$$BHP = \text{HP}$$

4.6 CURVA DE RENDIMENTO

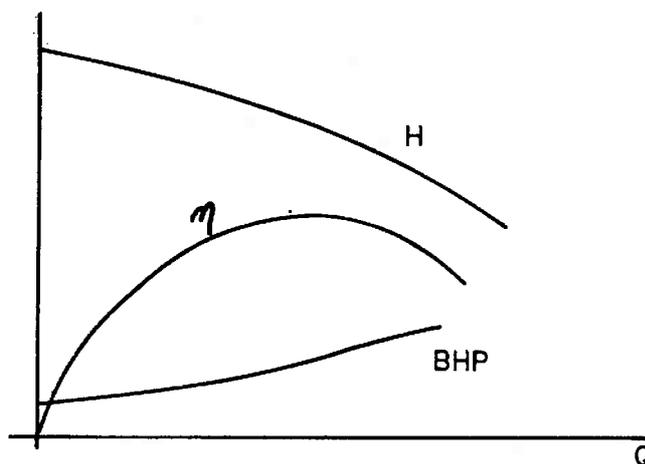
Como vimos o rendimento é obtido pela divisão de WHP por BHP, que são conhecidos. Assim podemos representá-lo graficamente como segue.



$Q_p = \bar{e}$ o ponto de melhor eficiência da bomba para o rotor considerado.

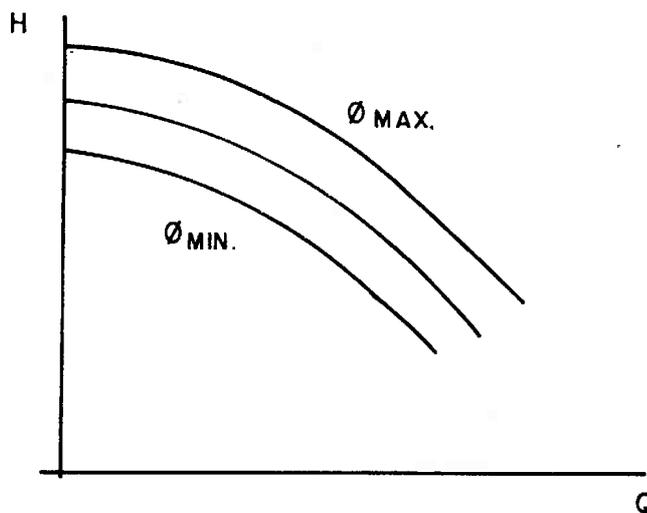
4.7 CURVAS CARACTERÍSTICAS DO ROTOR

Se associarmos as curvas mencionadas anteriormente considerando o diâmetro de rotor $\emptyset 1$, teremos:



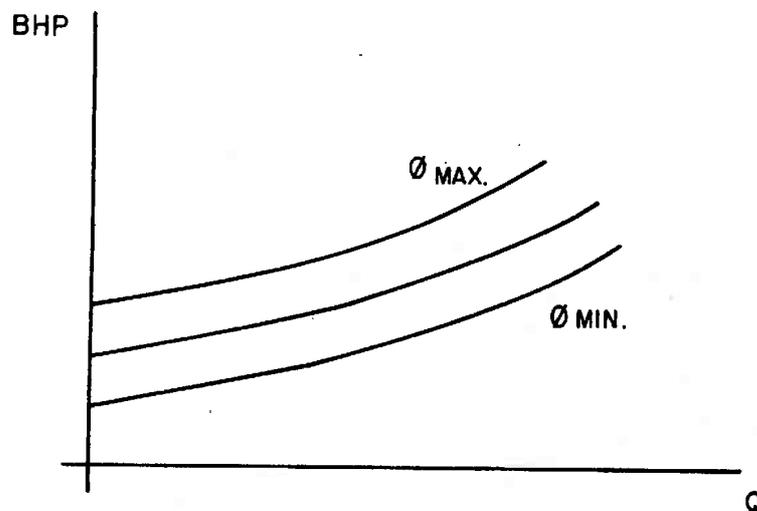
O gráfico acima apresenta as curvas características apenas para um diâmetro de rotor. Como em uma mesma bomba temos vários diâmetros de rotores diferentes, torna-se necessário que representemos num mesmo gráfico toda a faixa operacional, desde o rotor máximo até o mínimo. Assim:

. A curva Q x H assumirá a seguinte configuração:

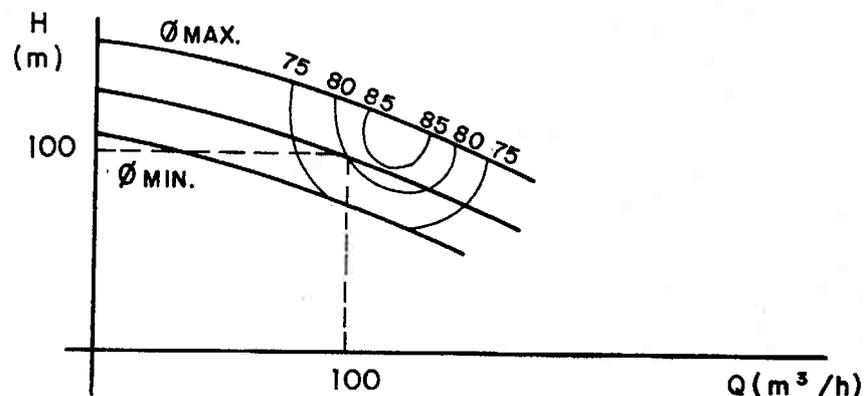


NOTA: Toda bomba apresenta esta limitação de rotores de diâmetro máximo e mínimo. O diâmetro máximo é consequência do espaço físico existente no interior da bomba e o diâmetro mínimo é limitado em função das características hidráulicas, ou seja, diâmetros menores que estes apresentariam problemas de funcionamento para a bomba.

.A curva Q x BHP será a que segue:



.A curva Q x η assumirá uma configuração diferente da apresentada anteriormente uma vez que seria impraticável tal representação. Esta nova configuração baseia-se em marcar sobre a curva Q x H de cada rotor o valor do rendimento (valores inteiros previamente estabelecido) comuns para todos os demais; posteriormente unem-se os pontos de mesmo rendimento, formando assim as curvas características de catálogos comerciais dos fabricantes de bombas.



Calculemos por exemplo a potência consumida pela bomba cuja curva característica está representada acima, sendo:

$$Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}, \text{ AMT} = 100\text{m}, \gamma = 1,0 \text{ tf} / \text{m}^3$$

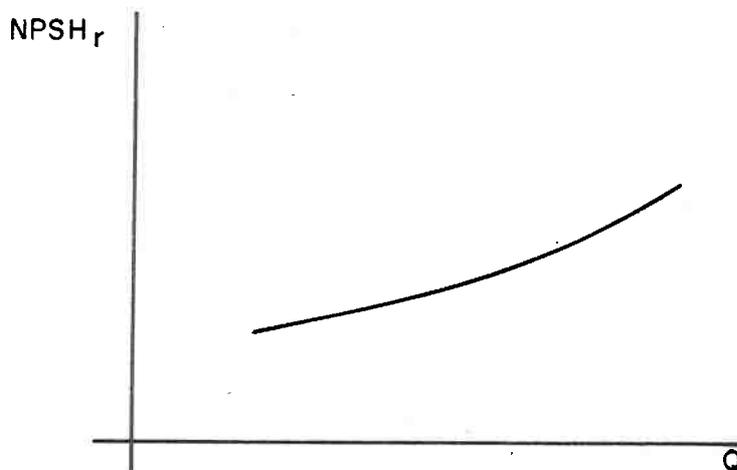
$$\text{BHP} = \frac{Q \times \text{AMT} \times \gamma}{\eta \times K}$$

$$\text{BHP} = \frac{100 \times 100 \times 1,0}{274 \times 0,80}$$

$$\text{BHP} = 45,62 \text{ HP}$$

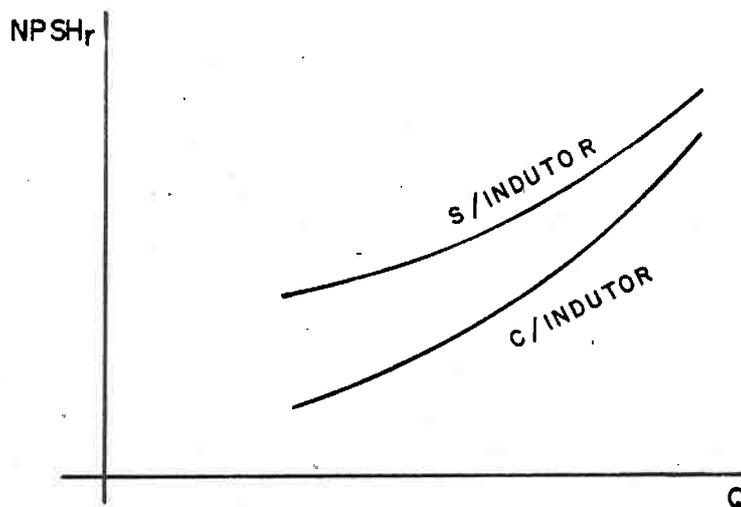
4.8 CURVA DE NPSH_r (Net positive suction Head)

Modernamente, toda curva característica de uma bomba, inclui a curva do NPSH_r em função da vazão. Esta curva representa a energia mínima necessária que o líquido deve ter, em unidades absolutas, no flange de sucção da bomba, para garantir o seu perfeito funcionamento. Esta tem a seguinte apresentação gráfica.



4.9 INDUTORES

A finalidade do indutor é diminuir o NPSHr de uma bomba, permitindo, assim, aplicar esta bomba em instalações onde bombas convencionais não poderiam ser usadas. O efeito do indutor na curva de NPSHr é indicado abaixo:



Observações:

- Lembre-se que as curvas características apresentadas, apesar de serem obtidas na bancada de teste do fabricante da bomba com água limpa à temperatura ambiente, as seguintes considerações deverão ser feitas:
- Curva $Q \times H$ = representa a energia fornecida expressa em altura de líquido sem viscosidade.
- Curva $Q \times \text{NPSHr}$ = representa a energia requerida (de líquido) no flange de sucção da bomba.
- Curva $Q \times \eta$ e $Q \times \text{BHP}$ = representa os rendimentos e potências consumidas pela bomba quando operando em água.

-Para que possamos visualizar as afirmações citadas acima, podemos imaginar uma pedra na extremidade de uma corda girando em torno de um centro e dotada de uma certa rotação. Supondo que esta rotação seja constante, verificaremos que a velocidade tangencial em qualquer ponto da trajetória da pedra também o será.

Se alterarmos o peso da pedra para maior ou menor e continuarmos mantendo a rotação constante, concluiremos que a velocidade tangencial permanecerá constante em todos os pontos da trajetória, no entanto o esforço feito para manter a mesma rotação será maior ou menor em função do peso da pedra.

Se assimilarmos o conjunto pedra-corda a um rotor, verificaremos que, a curva Q x H de um rotor será a mesma para qualquer líquido, ou seja, mantendo a rotação constante, as velocidades periféricas do rotor serão constantes, acarretando a mesma energia cinética conferida ao líquido e conseqüentemente a mesma energia total será desenvolvida pela bomba para bombear qualquer líquido sem viscosidade. Neste caso podemos afirmar que a curva Q x H é para líquidos sem viscosidade.

A curva Q x BHP pode ser assimilada ao torque (esforço) feito para acionar a pedra e manter a rotação constante, ou seja se a pedra é menor o esforço é menor e se for maior este também o será. Neste caso quanto mais denso (maior densidade) for o líquido maior será o BHP e quanto menos denso menor será o BHP.

A curva Q x η será função do BHP e será obtido por:

$$\eta = \frac{Q \times H \times \delta}{K \times \text{BHP}}$$

A curva Q x NPSHr representa a energia requerida no flange de sucção da bomba em altura de coluna de líquido.

RELAÇÕES CARACTERÍSTICAS NAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Existem certas relações que permitem obter a curva característica da bomba para uma rotação diferente daquela para a qual se conhece a curva característica.

Outras relações permitem predizer a nova curva característica de uma bomba se for reduzido o diâmetro do rotor, dentro naturalmente de limites que dependem do tipo da bomba.

VARIAÇÃO DA ROTAÇÃO DA BOMBA

Quando se varia a rotação:

- .A vazão em cada ponto da curva característica varia na proporção direta da rotação.
- .A altura varia com o quadrado da rotação.
- .A potência consumida varia com o cubo da rotação.

Considerando: Q_1 = Vazão
 H_1 = Altura Manométrica Total
 P_1 = Potência consumida (BHP)

Obtidos da curva característica conhecida, referente à rotação inicial N_1 , e chamando de:

Q = Vazão
 H = Altura Manométrica Total
 P = Potência consumida (BHP)

aos valores referentes à condição final na rotação N , teremos matematicamente:

$$Q = Q_1 \frac{N}{N_1}$$

$$H = H_1 \left(\frac{N}{N_1}\right)^2$$

$$P = P_1 \left(\frac{N}{N_1}\right)^3$$

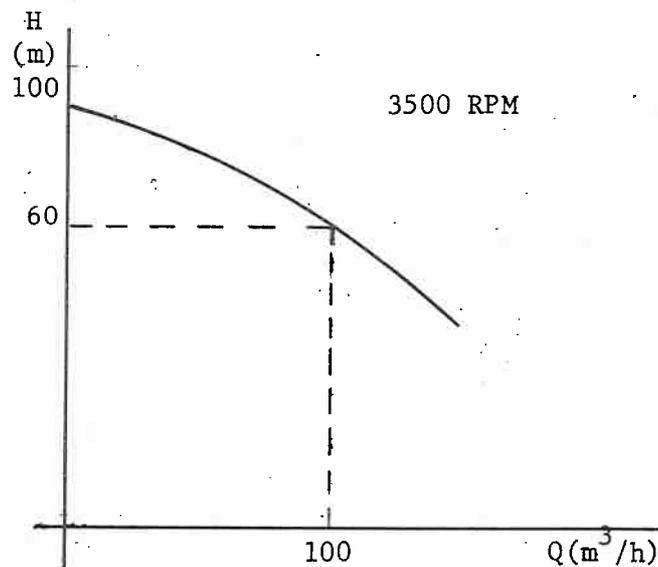
ou

$$\frac{N}{N_1} = \frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{P}{P_1}}$$

Essas relações podem ser usadas seguramente para variações moderadas na rotação. Elas podem não ser exatas em grandes variações, particularmente em aumentos de rotação.

Exemplo:

Alterar a curva abaixo de 3500 RPM para 1750 RPM.



Inicialmente calculamos o fator $\frac{N}{N_1}$, ou seja, necessitamos reduzir a rota-

ção, assim sendo, sabemos que as vazões e alturas manométricas correspondentes serão reduzidas.

$$\frac{N}{N_1} = \frac{1750}{3500} = 1/2$$

O fator para correção da vazão será $1/2$

O fator para correção da altura será $(1/2)^2 = (1/4)$

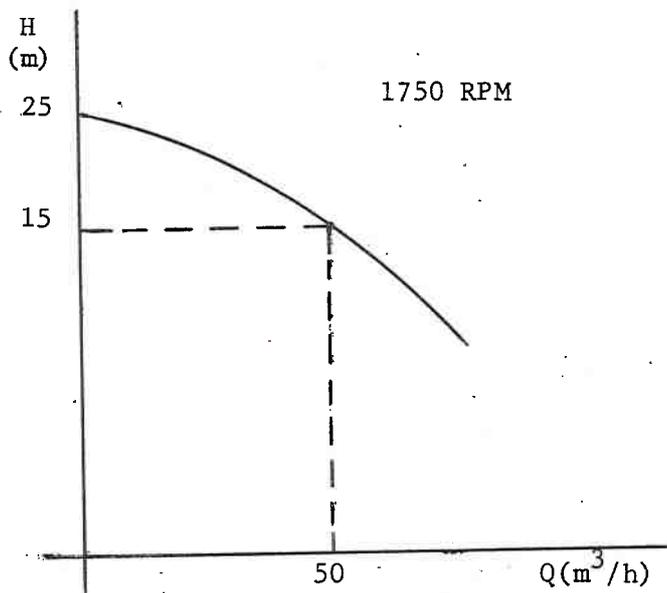
desta maneira teremos:

. 100m³/h em 3500 RPM corresponde a $100 \times \frac{1}{2} = 50\text{m}^3/\text{h}$ em 1750 RPM.

. 100m em 3500 RPM corresponde a $100 \times \frac{1}{4} = 25\text{m}$ em 1750 RPM.

. 60m em 3500 RPM corresponde a $60 \times \frac{1}{4} = 15\text{m}$ em 1750 RPM.

A nova curva de performance ficará representada por:





VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO ROTOR

Se reduzirmos ou aumentarmos o diâmetro do rotor de uma bomba, mantendo a mesma rotação, verificaremos que:

.A vazão em cada ponto da curva característica variará na proporção direta do diâmetro.

.A altura variará com o quadrado do diâmetro.

.A potência consumida variará com o cubo do diâmetro.

Chamando de Q_1 , H_1 e P_1 , respectivamente a vazão, altura e potência consumida correspondentes às condições iniciais com o rotor de diâmetro D_1 , e chamando de Q , H e P aos valores relativos às condições finais com diâmetro D , teremos:

$$Q = Q_1 (D/D_1)$$

$$H = H_1 (D/D_1)^2$$

$$P = P_1 (D/D_1)^3$$

$$\frac{D}{D_1} = \frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{P}{P_1}}$$

A limitação de diâmetros máximos e mínimos deverá estar em conformidade com as informações do fabricante.

NPSH DISPONÍVEL/ALTURA MÁXIMA DE SUÇÃO

NPSH DISPONÍVEL

NPSHd

Verificamos no módulo 4 que a bomba necessita no flange de sucção de uma energia, expressa em altura absoluta de líquido, superior a pressão de vaporização do líquido referida à linha de centro da sucção, para garantir o seu perfeito funcionamento. Para que isto ocorra torna-se necessário que a instalação disponha de uma energia maior ou igual que a requerida pela bomba, pois esta só adicionará energia ao líquido quando ele chegar ao rotor. Esta energia é que denominamos de NPSH disponível do sistema e pode ser calculado pela fórmula:

$$\text{NPSHd} = \frac{P - PV}{\gamma} + HS - hs, \text{ onde:}$$

- .NPSHd é a energia disponível.
- .P é a pressão existente no reservatório de sucção.
- .PV é a pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento.
- . γ é o peso específico do líquido.
- .HS é a altura de sucção que poderá ser:
 - positivo, quando a linha de centro da bomba estiver abaixo do nível de líquido na sucção.
 - negativo, quando a linha de centro da bomba estiver acima do nível de líquido na sucção.
- .hs é o somatório de todas as perdas de carga na sucção.

Para reservatórios abertos, onde a pressão sobre a superfície do líquido é a atmosférica, a fórmula fica alterada para:

$$\text{NPSHd} = \frac{Pa - PV}{\gamma} + HS - hs, \text{ onde: } Pa \text{ é a pressão atmosférica local e os demais são os mencionados anteriormente.}$$

Se, por exemplo, o líquido bombeado for à água a uma temperatura de 100°C, onde Pa é igual a PV, a fórmula passa a ser:

$$\text{NPSHd} = + HS - hs$$

Para garantirmos que a operação da bomba seja satisfatória, o NPSHd tem que ser sempre maior que o NPSHr, pois isto garantirá que o líquido chegará ao rotor da bomba, sem que haja a sua vaporização.

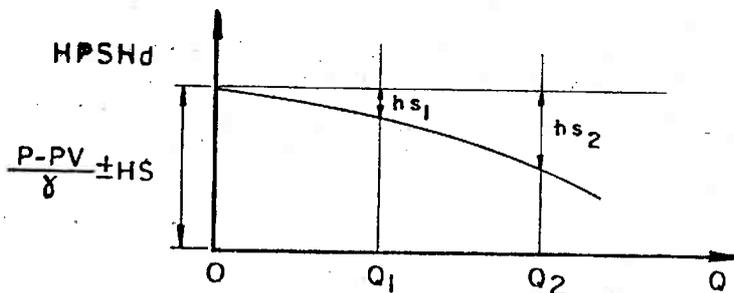
Verificamos também no módulo 4 que o NPSHr é representado graficamente em função da vazão da bomba. Como o NPSHd tem que ser sempre maior que o NPSHr, devemos representá-lo graficamente visando determinar se a bomba poderá operar satisfatoriamente na instalação em análise, pois devemos lembrar que NPSHr depende única e exclusivamente da bomba, enquanto que o NPSHd depende apenas do sistema.

Baseando-nos na fórmula $NPSHd = \frac{P - PV}{\gamma} + HS - hs$, verificamos que $\frac{P - PV}{\gamma}$

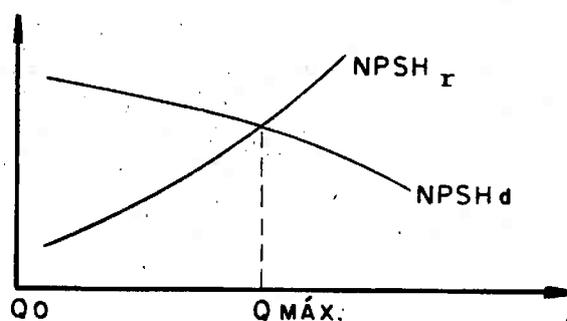
+ HS é uma constante, enquanto que hs varia em função da vazão ou seja:

- para $Q = 0$ $hs = 0$
- para $Q = Q_1$ $hs = hs_1$
- para $Q = Q_2$ $hs = hs_2$

Abaixo apresentamos a representação gráfica do NPSHd:



Se plotarmos num mesmo gráfico as curvas do NPSH_d e a do NPSH_r, obteremos:



Do gráfico acima, concluímos que a vazão máxima que poderá ser fornecida pela bomba é $Q_{\text{máx.}}$, uma vez que para esta vazão o $\text{NPSH}_d = \text{NPSH}_r$, ou seja para valores de vazões inferiores a esta vazão (de Q_0 a $Q_{\text{máx.}}$) o NPSH_d é maior que NPSH_r .

Lembre-se que a análise das curvas de NPSH deverá ser feita por ocasião da análise da curva de bomba x curva de sistema, para que possamos definir se a bomba em estudo atende aos requisitos do sistema.

ALTURA MÁXIMA DE SUCCÃO

A altura máxima de sucção de uma bomba é definida em função do seu NPSH_r , uma vez que por se tratar intrinsecamente da sucção podemos considerar que o NPSH_d seja igual NPSH_r . Ao desenvolvermos a equação verificaremos que:

$$H_{\text{máx}} \leq \frac{P - P_V}{\gamma} - h_s - \text{NPSH}_r$$

CAVITAÇÃO

Quando o NPSHd for menor que o requerido, o líquido em parte se vaporiza ao chegar ao rotor, pois a queda de pressão dentro da bomba é tal que a pressão na entrada do rotor é inferior a pressão de vapor do líquido bombeado. Nessas condições, as bolhas de vapor que se formam são novamente transformadas em líquido ao atingirem regiões de maiores pressões, no percurso dentro do rotor. Essa nova passagem ao estado líquido é de tal intensidade que chega a remover pequenas partículas metálicas do rotor. Este fenômeno é denominado de cavitação.

Sinais e inconvenientes da cavitação

.Barulho e vibração

- Resultam do colapso das bolhas de vapor, ao atingirem as zonas de alta pressão. Quanto maior a bomba, maiores o barulho e a vibração.

.Alterações das curvas características

- Há uma queda acentuada nas curvas $Q \times H$ e $\eta \times Q$, logo após o ponto em que a cavitação é iniciada.

.Pitting da palheta do rotor

= Este fenômeno não deve ser confundido com corrosão (química ou eletrolítica) ou erosão. É o resultado do colapso das bolhas de vapor nas palhetas do rotor, ocasionando a remoção de pequenas partículas metálicas. O local de ocorrência do pitting é o percurso do líquido na palheta do rotor (parte visível da palheta).

Recomendações

Visando impedir a cavitação, as seguintes situações deverão ser evitadas:

- a. altura manométrica total muito mais baixa que a correspondente ao ponto de melhor rendimento, ou operação com capacidade muito maior do que a correspondente ao ponto de melhor rendimento (pois o NPSHr pela bomba aumenta com o quadrado da vazão).
- b. altura de sucção negativa maior do que o valor máximo de altura de sucção definido abaixo.
- c. Temperatura do líquido sensivelmente superior a que serviu para a seleção da bomba, pois o valor da pressão de vapor pode aumentar, reduzindo o NPSHd.
- d. Rotações superiores aquela para a qual a bomba foi selecionada (NPSHr aumenta aproximadamente com o quadrado da rotação).
- e. Instalação com linha de sucção demasiadamente comprida, cheia de curvas, válvulas, etc. e com diâmetro não adequado acarretando excessiva perda de carga.

Recirculação

É um fenômeno semelhante à cavitação que ocorre em bombas que são operadas em vazões muito abaixo de seu ponto de melhor eficiência. Quando a bomba opera nestas condições, parte do fluxo que entra no rotor retorna. Como na cavitação, este fenômeno é acompanhado pela formação de bolhas que, em certo ponto, implodem. A recirculação pode ser distinguida da cavitação, já que os danos causados no rotor se dão na parte invisível da palheta para o caso de recirculação e na parte visível no caso de cavitação. No caso de recirculação aumentando-se a vazão, o fenômeno deixa de existir.

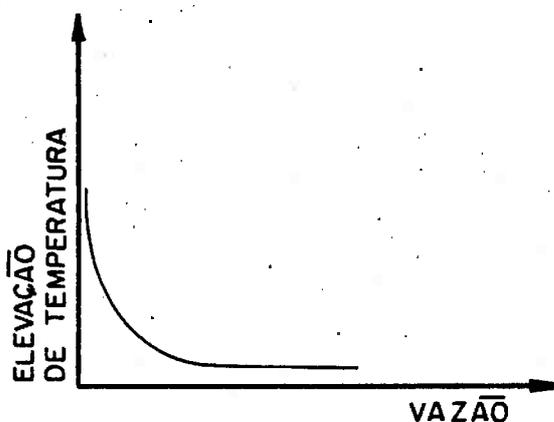
Tal como na cavitação a recirculação é acompanhada de ruído e vibração. Operação prolongada nesta situação culmina com danos irreversíveis ao rotor.

As vazões mínimas contínuas das bombas são inerentes ao projeto das mesmas, assim sendo estas vazões são fornecidas pelo fabricante em função do modelo.

OPERAÇÃO COM VAZÕES REDUZIDAS/VAZÃO MÍNIMA DE OPERAÇÃO

OPERAÇÃO DA BOMBA COM VAZÕES REDUZIDAS

Certos equipamentos são limitados quanto a operação com vazões reduzidas, em função da recirculação. No entanto a maioria deles permitem operações contínuas com vazões próximas ao SHUT-OFF. Neste caso é necessário que saibamos que, o aumento de temperatura do líquido em função da vazão é representado graficamente por:



A diferença entre a potência consumida pela bomba (BHP) e a potência hidráulica representa as perdas internas da bomba. Estas perdas são convertidas em calor, que é transferida ao líquido que passa pela bomba, aumentando a temperatura do mesmo (despreza-se o calor dissipado por radiação e por convecção através da carcaça da bomba):

Quando a bomba está trabalhando com válvula de descarga fechada, a potência consumida é igual às perdas. Estas são convertidas em calor, o qual é transferido ao líquido dentro da bomba.

O aumento de temperatura é dado pela fórmula:

$$(\text{°F/min.}) = \frac{(\text{BHP} \times 42,4)}{P_b C_b + PC}, \text{ onde: } \Delta T = \text{elevação de temperatura em °F/min.}$$

BHP = potência consumida no Shut-Off

P_b = peso da bomba em libras

C_b = calor específico do material da carcaça (0,13)

P = peso do líquido na carcaça da bomba em libras.

C = calor específico do líquido (água = 1,0)

Como pode ser verificado no gráfico, a medida que se reduz a vazão da bomba, a elevação da temperatura aumenta, chegando a ser assintótica ou eixo das ordenadas para vazão igual a zero. O aumento de temperatura, quando a bomba fornece a vazão Q e altura H é calculada pela fórmula:

$$\Delta T = \frac{(1 - \eta) H}{778}, \text{ onde,}$$

ΔT é o aumento de temperatura, em °F

η é o rendimento da bomba na vazão Q

H é a altura manométrica total em ft

VAZÃO MÍNIMA DE OPERAÇÃO

Quando houver possibilidade de uma bomba trabalhar algum tempo com válvula fechada, recomenda-se o uso de uma derivação (by-pass) da descarga da bomba para a sucção. O objetivo é impedir que a bomba trabalhe abaixo de um determinado valor da vazão, para evitar sobreaquecimento.

Para fins práticos pode-se calcular a vazão mínima por:

$$Q_{\text{mín}} = \frac{6,0 \text{ (BHP)}}{\Delta T}, \text{ onde,}$$

Q é a vazão em GPM

BHP é a potência no Shut-Off em HP

ΔT é o aumento de temperatura permissível em °F.

Lembre-se que em virtude de certos equipamentos apresentarem restrições quanto a vazão mínima, é necessário que esta condição seja verificada antes de se proceder ao cálculo acima.

PLACA DE ORIFÍCIO

PLACA DE ORIFÍCIO.Generalidades

De uma maneira geral podemos distinguir 2(duas) aplicações típicas com o emprego da placa de orifício, que são:

- Adaptação da placa de orifício na descarga da bomba.
- Adaptação da placa de orifício na tubulação de by-pass.

.Adaptação da placa de orifício na descarga da bomba

Em certos casos necessitamos adaptar uma bomba num sistema que requer uma altura manométrica total inferior a altura (energia) fornecida pela bomba. Neste caso será necessário criar uma perda de carga localizada que deverá ser igual a diferença entre a altura fornecida pela bomba e a requerida pelo sistema. Esta perda pode ser obtida das seguintes maneiras:

- regulando a válvula de descarga
- diminuindo o diâmetro do rotor da bomba
- diminuindo a rotação da bomba
- adaptando-se uma placa de orifício na descarga da bomba

.Cálculo do diâmetro da placa de orifício

Como sabemos a placa de orifício tem por finalidade "estrangular" a passagem de líquido, aumentando assim a perda de carga do sistema.

Quanto maior a restrição (menor o diâmetro de passagem de líquido) maior a perda e conseqüentemente maior será a altura manométrica do sistema.

As fórmulas apresentadas abaixo nos permitem determinar o diâmetro da placa de orifício.

-para $d/D \geq 0,3$, temos:

$$Q = 19,636 K d^2 \cdot \sqrt{h} \cdot \sqrt{\frac{1}{1-(d/D)^4}}, \text{ ou}$$

-para $d/D \leq 0,3$, temos:

$$Q = 19,636 K d^2 \cdot \sqrt{h}$$

Onde:

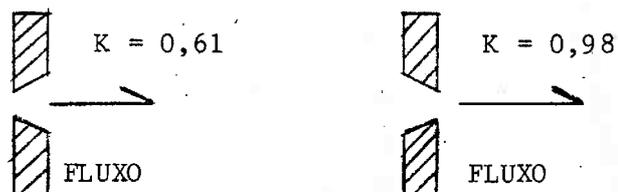
d = diâmetro interno do orifício

D = diâmetro nominal do tubo

Q = Vazão em GPM

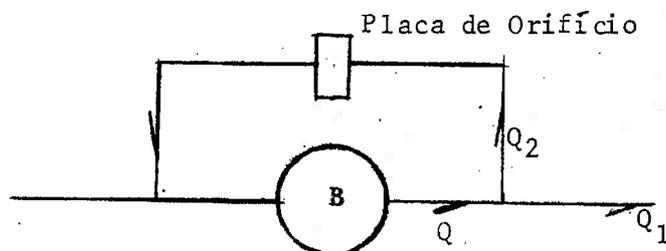
h = perda de carga em ft

K = coeficiente de descarga que pode ser considerado como:



Adaptação da placa de orifício na tubulação de by-pass

Quando a bomba opera muito a esquerda do seu ponto de melhor eficiência, podemos utilizar uma tubulação de by-pass dotada de uma placa de orifício, visando fazer com que a bomba opere em melhores condições operacionais (mais próximo do ponto de melhor eficiência). Notar que a vazão fornecida pela bomba e-tã dividida em 2 (duas) parcelas, sendo uma para o sistema e a outra retornará através do by-pass, conforme esquema abaixo:



$$Q = Q_1 + Q_2, \text{ sendo}$$

Q = Vazão fornecida pela bomba

Q_1 = Vazão fornecida ao sistema

Q_2 = Vazão que retorna à sucção através do by-pass

.Determinação da vazão a recircular

Esta vazão é sempre definida em função da vazão mínima de operação da bomba, que pode ser a vazão mínima contínua para evitar a recirculação ou a vazão mínima para evitar o aquecimento excessivo de líquido. A vazão mínima para evitar o aquecimento excessivo pode ser calculada por:

$$Q_{\text{mín.}} = 6,0 \frac{\text{BHP}}{\text{AT}}, \text{ onde:}$$

Onde: Q = vazão em GPM

BHP=Potência consumida no shut-off em HP

AT= Elevação de temperatura permissível em °F

Para água fria, obtemos utilizar: $Q_{\text{mín.}} = \frac{\text{BHP}}{16,6}$

O cálculo da elevação de temperatura no interior da bomba é dado por:

$$\text{AT} = \frac{42,4 \text{ BHP}}{P_b C_b + PC}$$

Onde: AT = elevação de temperatura permissível em °F

BHP = potência consumida no shut-off em HP

P_b = peso da bomba em libras

C_b = calor específico do material da carcaça
(0,13 aproximadamente)

P = peso do líquido na carcaça da bomba em libras

C = calor específico do líquido (1.0 para água).

Obs: Para bombas de alimentação de caldeira, o aumento de temperatura deve ser limitado em 15°F.

O sistema de by-pass, também denominado de linha de recirculação, próximo da bomba, quando esta opera com a vazão mínima para evitar o aumento excessivo da temperatura do líquido, deverá descarregar o líquido num tanque suficientemente grande ou num trocador de calor, de modo a permitir que este seja bombeado novamente.