

PROBLEMAS DECORRENTES DA SELEÇÃO EQUIVOCADA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA

Micelli Rodrigues Camargo

Engenheiro mecânico pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) e mestrando pela USP (Universidade de São Paulo) na área de transientes hidráulicos através do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).

Mais de 18 anos de experiência, sendo 15 anos no atendimento ao setor industrial, atuando com equipamento como bombas centrífugas, bombas de deslocamento positivo e outros equipamentos rotativos.

Atualmente é coordenador e instrutor de treinamentos pela Engenharia e Cia: Cursos e Treinamentos

Endereço: Rua Serra de Japi, 259 Apto 153 – Vila Gomes Cardim – São Paulo – SP | 03309-000
011 98482 7250 – contato@engenhariaecia.eng.br

RESUMO

Uma das principais causas de quebra frequentes de bombas centrífugas é o emprego do tipo e/ou tamanho inadequado para a aplicação, ou seja, pega-se uma bomba pequena ou grande demais para aplicação ou uma bomba desenvolvida para uma dada aplicação e usa-se em outra, como por exemplo, usar uma bomba projetada para água de irrigação e usá-la para caldeira de vapor.

Embora o comportamento de uma bomba centrífuga, representado por meio de sua *curva característica* possa levar a interpretação de que é possível trabalhar em qualquer faixa de vazão, na prática isso não é bem assim.

O ponto ideal de operação é o mais próximo possível do BEP, do contrário, problemas operacionais surgirão, entre eles, pressão ou vazão baixas, aumento de vibração, cavitação, desgastes mecânicos, entre outros.

Tais fatos levarão a uma redução da produtividade, e conseqüentemente, uma diminuição da rentabilidade da empresa.

PALAVRAS-CHAVE: bomba centrífuga, dimensionamento de bomba, rentabilidade

INTRODUÇÃO

O dimensionamento de uma bomba centrífuga para uma instalação de bombeamento é realizado com base na altura manométrica da bomba (HB) relacionada a energia de pressão e na vazão volumétrica (Q) relacionada com a energia cinética da bomba.

Q é, normalmente, determinada em função do processo, ou do que se deseja. Por exemplo, desejamos encher completamente uma caixa de água de 10.000 litros em duas horas, nesse caso devemos ter uma vazão de 5.000 L/h (litros por hora) ou 5 m³/h (metros cúbicos por hora).

Já para obter o HB, é necessário avaliar a instalação de bombeamento. HB equivale a altura geométrica de elevação, h_{geo}, (cota vertical entre o nível de onde o líquido irá sair até onde ele irá chegar) mais as perdas de carga (perdas de energia) no trajeto.

Aqui entra o primeiro erro em relação ao dimensionamento da bomba. Muitos, sem conhecer direito o processo, compram uma bomba baseada apenas na altura de elevação (distância vertical entre o nível do reservatório de sucção e a descarga), não considerando a perda de energia devido às perdas de carga que serão abordadas em mais detalhes, mais a frente).

Outra forma equivocada de dimensionamento de bomba é se basear numa instalação existente, ou seja, compra-se uma bomba idêntica sem fazer uma avaliação de equiparação com a nova instalação. Acredite, algumas curvas a mais, altitude ou temperatura podem alterar significativamente o comportamento da instalação de bombeamento, que afeta a perda de carga do sistema e, conseqüentemente, o HB necessário.

No primeiro exemplo, a bomba escolhida será menor do que o necessário, enquanto no segundo caso, pode-se ter uma bomba pequena ou grande, dependendo das características distintas entre ambas instalações.

Bomba pequena para a instalação, normalmente, é um “problemão” tendo em vista que ela não fará o desejado, podendo impactar significativamente, no desempenho do sistema, acarretando em menor produtividade e redução de receita.

Já bomba grande, é “menos ruim”, tendo em vista que ela atenderá ao que se deseja, no entanto, problemas operacionais poderão surgir, alguns deles serão discutidos mais adiante.

Mas antes de ser apresentado os problemas relacionados ao dimensionamento equivocado de uma bomba, faz-se necessário apresentar o processo de cálculo, assim como, o funcionamento das bombas centrífugas.

OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são discutir o procedimento adequado de dimensionamento de uma bomba centrífuga para uma dada instalação e os possíveis problemas quando sua avaliação é feita de forma equivocada.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

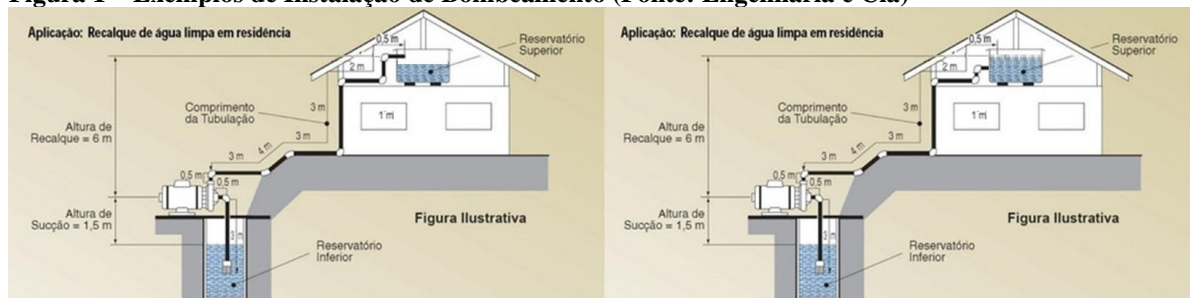
Embasamento para o Dimensionamento de Bombas

Como já mencionado, o dimensionamento de uma bomba é feito com base na altura manométrica da bomba, HB, e da vazão, Q.

Q vem da necessidade, enquanto, HB, deve ser calculado para cada instalação.

O cálculo de HB é baseado na *equação da energia* aplicada entre o nível do reservatório de sucção e o ponto de descarga (figura 1 à esquerda) ou nível do reservatório de recalque, caso a entrada do líquido esteja abaixo do nível (figura 1 à direita). A altura entre o nível do reservatório de sucção e o nível do reservatório de recalque ou descarga é chamado de *altura geométrica de elevação, hgeo*.

Figura 1 – Exemplos de Instalação de Bombeamento (Fonte: Engenharia e Cia)



Note na figura 1 que o nível do reservatório à esquerda é mais baixo que o nível a ser considerado no cálculo.

Aplicando-se a equação da energia entre o nível do reservatório de sucção (seção 01) e o nível de descarga (seção 2), obtém-se:

$$H_1 + H_B = H_2 + Perdas_{1 \rightarrow 2} \quad \text{Equação (01)}$$

Onde:

- $H = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z$
- HB → altura manométrica da bomba
- $Perdas_{1 \rightarrow 2}$ → perdas de carga totais entre a seção 1 e a seção 2.

H_1 e H_2 são determinados pelas condições em cada seção, ou seja, a pressão P , a velocidade v , e a posição z . Já γ é o peso específico do líquido e g a aceleração da gravidade.

Assim, o principal trabalho para se encontrar o HB da bomba, é a obtenção das Perdas_{1→2}.

As perdas de carga são classificadas em dois tipos, a distribuída e a localizada.

Perda de carga distribuída, H_d , é aquela que acontece ao longo da tubulação, relacionada diretamente com o comprimento do tubo, e pode-se encontrar pela equação de Darcy-Weisbach:

$$H_d = f \frac{L \cdot v^2}{2g \cdot D} \quad \text{Equação (02)}$$

Onde

- f é o coeficiente de perda de carga distribuída
- L é o comprimento da tubulação
- V é a velocidade média do escoamento
- g é a aceleração da gravidade
- D é o diâmetro da tubulação

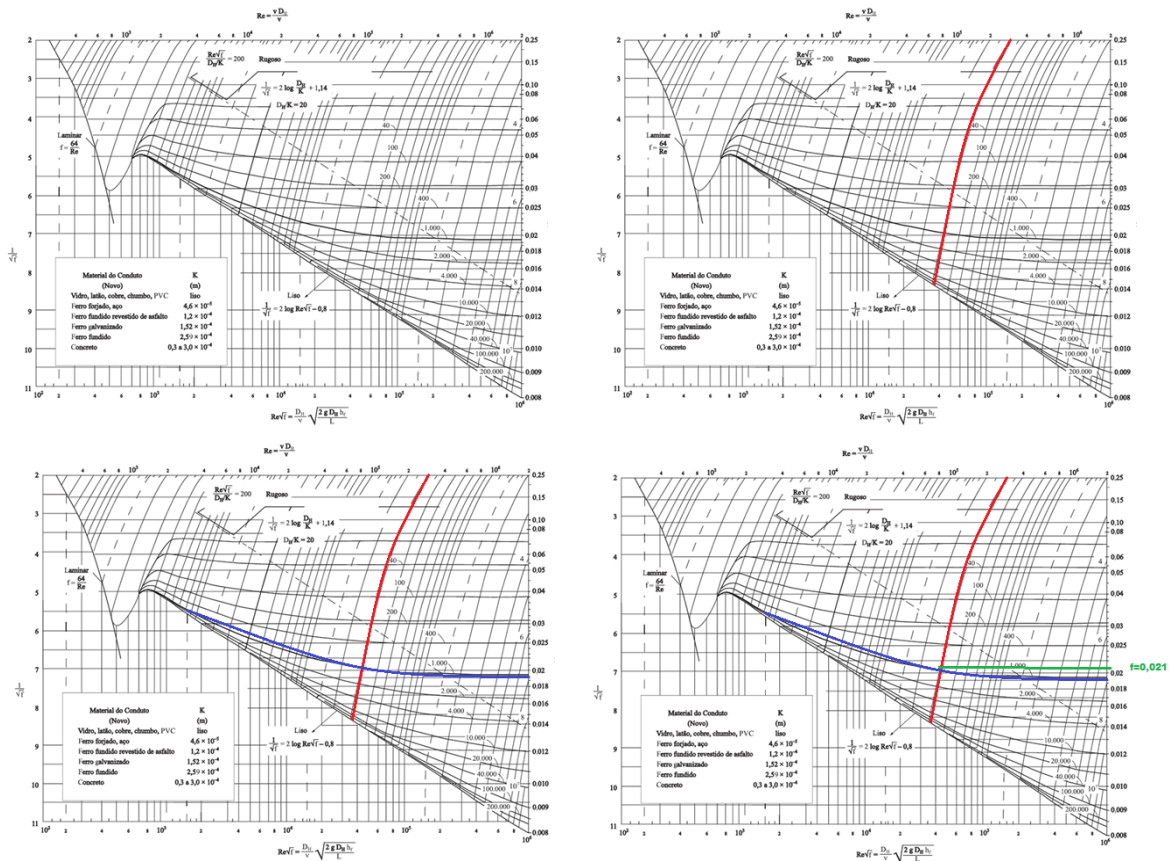
De todos os parâmetros, o fator f é o mais trabalhoso de se obter, se o escoamento for laminar, o valor é $64/Re$, já se o escoamento for turbulento, o método mais tradicional é pelo diagrama de Moody, mas também existem fórmulas empíricas que podem ser utilizadas.

Para utilizar o diagrama de Moody, ilustrado na figura 2, é necessário calcular o número de Reynolds, e D/K , onde K é a rugosidade equivalente do tubo.

O número de Re pode ser calculado pela expressão:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad \text{Equação (03)}$$

Figura 2 – Diagrama de Moody (Fonte: Franco Brunetti)



Já a perda de carga localizada, é aquela que acontece pontualmente em qualquer situação que cause perturbação no escoamento, como por exemplo, válvulas, curvas, medidores de vazão, reduções, ampliações, etc.

Esta perda pode ser calculada pelo método do comprimento equivalente, usando a equação (2) ou pelo método do coeficiente ks, usando a expressão:

$$H_L = k_s \frac{v^2}{2g} \tag{Equação (04)}$$

Os fatores de ks são encontrados em livros de Mecânica dos Fluidos ou fornecidos pelos fabricantes, assim como, o comprimento equivalente.

Na tabela 01, ilustra-se, alguns valores.

Tabela 1 – Coeficientes ks para perda de carga localizada



Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30*	Medidor Venturi	2,50**
Comporta aberta	1,00	Pequena derivação	0,03
Controlador de vazão	2,50	Redução gradual	0,15*
Cotovelo ou joelho de 45°	0,40	Saída de canalização	1,00
Cotovelo ou joelho de 90°	0,90	Tê de passagem direta	0,60
Crivo	0,75	Tê de saída bilateral	1,80
Curva de 22,5°	0,10	Tê de saída de lado	1,30
Curva de 45°	0,20	Válvula borboleta aberta	0,30
Curva de 90°	0,40	Válvula de ângulo aberta	5,00
Entrada de Borda	1,00	Válvula de gaveta aberta	0,20
Entrada normal	0,50	Válvula de pé	1,75
Junção	0,40	Válvula de retenção	2,50
		Válvula globo aberta	10,00

Uma vez calculadas as perdas de carga, obtém-se o HB da bomba.

Especificação de Bombas Centrífugas

No tópico anterior, foi apresentado o processo de dimensionamento de bomba, no entanto, a especificação ou seleção de bomba ainda não acabou.

Pode acontecer da bomba ter a capacidade de fazer o bombeamento desejado e mesmo assim não ser a bomba adequada para a aplicação.

Outro ponto que deve ser analisado é o chamado NPSH, que vem Net Positive Suction Head, que traduzindo, temos algo do tipo *altura de sucção positiva líquida*. Esse parâmetro está relacionado com a bomba ter a energia suficiente para realizar o bombeamento sem a presença do fenômeno de cavitação.

Os parâmetros que fazem parte do cálculo de NPSH são divididos em dois grupos, aqueles relacionados à bomba, sendo um dado fornecido pelo fabricante, recebendo o nome de NPSH requerido (NPSHr) e aqueles relacionados com a instalação, chamado de NPSH disponível (NPSHd).

No caso, deseja-se que o $NPSHd > NPSHr$. É comum adotar um fator de segurança, entre 0,6 e 1,2 m.

Caso esse parâmetro não seja observado, a bomba irá trabalhar cavitando e em alguns caso, nem conseguirá bombear.

Portanto, no processo completo, além de encontrar o tamanho adequado por meio do HB x Q, tem-se que avaliar o NPSH.

Resumindo, os passos para uma correta especificação das bombas centrífugas são:

1. Verifique a vazão de projeto, Q.
2. Calcule as velocidades médias nas seções de sucção e de recalque.
3. Identifique a pressão, a velocidade (pode ser diferente da seção) e posição vertical do início e no fim do escoamento. Normalmente são os níveis do reservatórios de sucção e de descarga, ou na ausência desse, do ponto de descarga da tubulação.
4. Identifique a rugosidade equivalente K que é em função do material da tubulação.
5. Calcule os números de Reynolds para sucção e recalque (serão diferentes se os diâmetros forem diferentes).
6. Calcule o D/K para sucção e recalque.
7. Entre no diagrama de Moody e identifique os fatores de perda de carga distribuídas para sucção e recalque.
8. Calcule as perdas de cargas na sucção e recalque.
9. Calcule a altura manométrica da bomba HB, aplicando a equação da energia
10. Calcule o NPSH disponível

Com o HB e a Q, pede-se uma cotação de bomba para o fabricante ou distribuidor. Uma vez recebendo, os dados do fabricante, finalize.

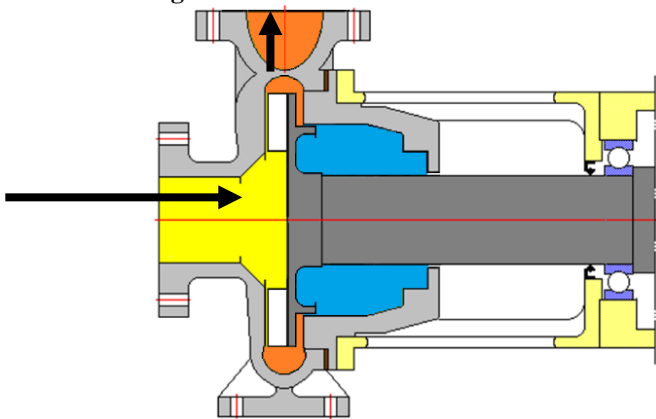
11. Verificando se o NPSH disponível é maior que o NPSH requerido da bomba. Se não for, mudanças devem ser feitas, ou troca-se a bomba ou muda-se algum parâmetro da instalação como posição vertical da bomba em relação ao nível do reservatório, diâmetro da tubulação. Esse passo não é verificado pelo fabricante ou distribuidor.

Funcionamento de Uma Bomba Centrífugas e O Ponto de Operação

Tipicamente, uma bomba centrífuga, tem um fluxo axial, paralelo ao eixo, na entrada no rotor e por efeito centrífugo, o fluido é direcionado radialmente para fora do rotor, conforme ilustrado na figura 3.

É na voluta, que acontece a principal transformação de pressão na bomba.

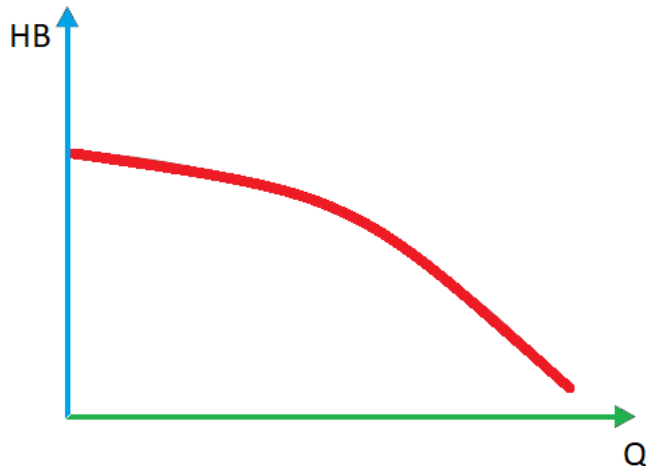
Figura 3 – Funcionamento de Uma Bomba Centrífuga (Fonte: Engenharia e Cia)



O comportamento de uma bomba centrífuga pode ser representado por meio de diagramas que recebem o nome de curvas características. Entre as principais, temos o diagrama H versus Q e o NPSHr versus Q.

Estes parâmetros estão atrelados ao tamanho do equipamento e também à rotação de operação. Para uma dada rotação, tem-se um exemplo representado na figura 4.

Figura 4 – Digrama H versus Q (Fonte: Engenharia e cia)



Note que quanto maior for a vazão bombeada menor será a altura manométrica da bomba, e vice-versa.

Avaliando o diagrama, não é raro imaginar que é possível trabalhar em qualquer ponto do gráfico, mas isso não é verdade, sendo esses pontos, os principais argumentos a serem apresentados nesse trabalho e será visto a seguir.

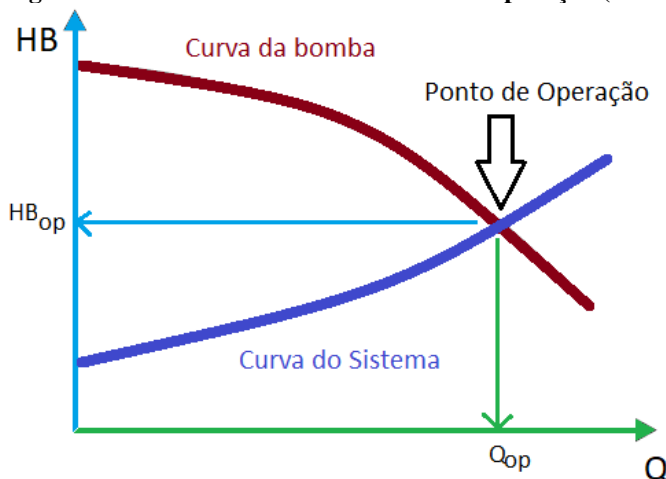
Para essa mesma bomba, caso, deseje-se aumentar a vazão e altura manométrica ao mesmo tempo, é necessário aumentar a rotação, o que fará a curva vermelha subir e alongar-se para a direita, por outro lado, reduzindo-se, ela irá baixar e contrai-se para a esquerda.

Mas afinal de contas, em que ponto a bomba irá trabalhar?

Para responder a essa pergunta, tem-se que conhecer a *curva do sistema*, *CS*. Esta é composta pela altura geométrica de elevação, hgeo mais as perdas de carga.

Pelas equações (2) e (4), vê-se que as perdas são proporcionais ao quadrado da velocidade. Como a velocidade é proporcional a vazão, então quando se aumenta a vazão, a velocidade aumenta na mesma proporção e as perdas aumentam ao quadrado, com isso, a *CS*, é semelhante a uma parábola de uma função do segundo grau positiva, como ilustrado na figura 4.

Figura 4 – Curva do Sistema e o Ponto de Operação (Fonte: Engenharia e Cia)

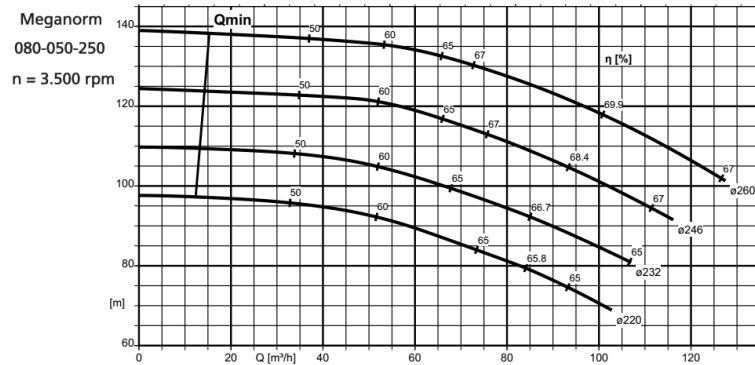


A curva do sistema representa exatamente os cálculos que o projetista da instalação realiza na hora de dimensionar a bomba para diversas vazões. Normalmente, ele é obtido por curva de tendência, a partir de alguns pontos, ou no caso de softwares, ponto a ponto.

Deseja-se que o ponto de operação coincida com o BEP que vem de Best Efficiency Point, que traduzindo, tem-se ponto de máxima eficiência.

O BEP corresponde ao ponto de projeto, onde todos os parâmetros são otimizados para se ter a máxima eficiência do equipamento. Para localizá-lo, tem-se que analisar a curva da bomba, conforme ilustrado na figura 5, da bomba Meganorm 080-050-250 a 3500 RPM da KSB.

Figura 5 – Curva Característica da Bomba Meganorm (Fonte: KSB)



Nesse exemplo, o BEP corresponde ao rendimento máximo de 69,9 % para a vazão de por volta dos 100 (m³/h) e por volta do 118 m de HB. Note que o rendimento cai, seja aumentando ou diminuindo a vazão.

Note também que o maior rendimento é para o rotor de maior diâmetro, no caso 260 mm. Isso acontece com qualquer bomba centrífuga, uma vez que reduzindo o diâmetro do rotor, a folga aumenta e tem-se uma maior recirculação interna na bomba.

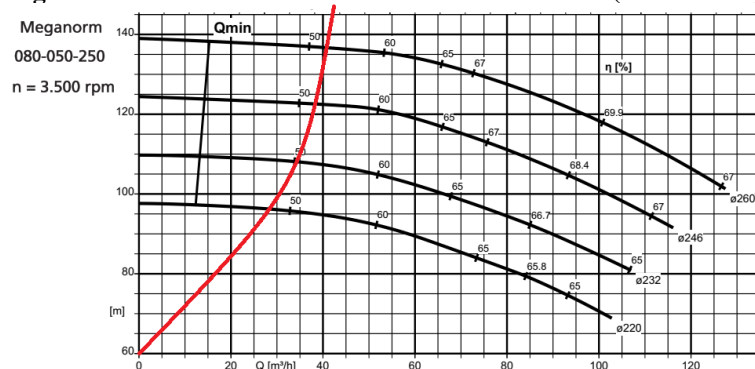
Feita uma prévia do processo de especificação de bomba e do funcionamento da bomba, vamos, portanto, ao ponto central desse trabalho.

Problemas Decorrentes da Seleção Equivocada de uma Bomba Centrífuga

Citou-se anteriormente, na Introdução, que algumas pessoas desavisadas compram equipamento somente com base na altura geométrica de elevação, hgeo e com isso, a bomba não tem energia suficiente para promover o bombeamento na vazão e na pressão desejadas.

No caso, para conseguir fazer o bombeamento, será necessário reduzir a vazão da bomba, como pode-se nas curvas representadas na figura 6, novamente, com a bomba Meganorm KSB.

Figura 6 – Curva Característica + Curva do Sistema (Fonte: KSB)



O primeiro problema dessa situação é a redução da vazão. Isso por si só já é um problemão, tendo em vista que não se terá a produtividade desejada ou o tempo de transferência de produto será maior, aumentando os custos de operação e reduzindo a lucratividade. Dependendo da instalação, pode acontecer de nem conseguir bombear, o que seria um problema ainda maior.

Continuando a avaliação, note que o rendimento no ponto de trabalho sai de 69,9% para algo em torno de 52%. Isso significa que, além de não bombear a vazão desejada, ainda terá um aumento do consumo de energia aumentando ainda mais os custos de operação do equipamento.

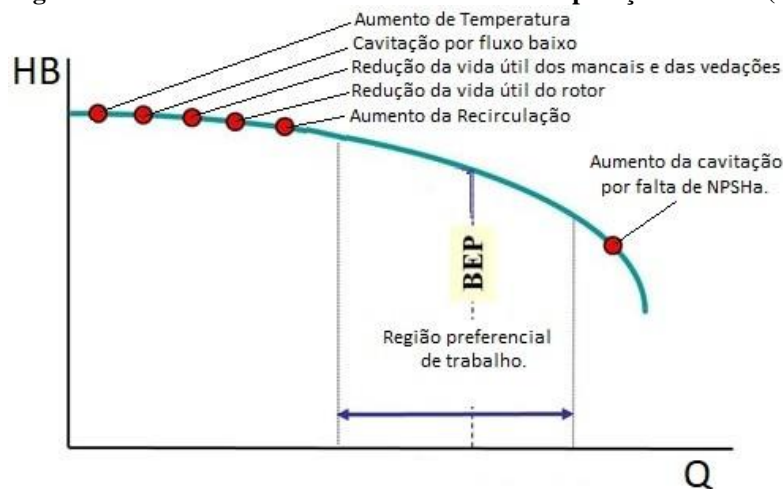
Aqui existe um possível problema adicional relacionado à potência do motor de acionamento. Potência hidráulica, Ph , que é aquela potência de fato entregue ao fluido, é determinada pelo peso específico, γ , vezes a vazão, Q , vezes a altura manométrica, HB ($Ph = \gamma \times Q \times HB$). A potência do motor, Pm , é determinada pela Ph dividido pelo rendimento da bomba, η , ($Pm = Ph/\eta$). Com a diminuição do rendimento, aumenta-se a potência do motor. Sendo o motor determinado para um rendimento maior, pode faltar potência disponível.

No caso dos motores elétricos, a corrente elétrica de operação poderá ser maior do que o recomendado, diminuindo a vida útil do motor elétrico.

Além desses problemas já citados, relativos ao dimensionamento equivocado, existem outros que são mais sutis.

Alguns deles estão indicados na figura 7.

Figura 7 – Problemas relacionados ao Ponto de Operação e o BEP (Fonte: Adaptado de Pump Industry)



Como falado anteriormente, o BEP corresponde ao ponto de projeto da bomba. E todos os dimensionamentos subsequentes vem dos parâmetros determinados ali. Um dos mais importantes é o dimensionamentos do mancais, estes, são selecionados para suportar os esforços mecânicos e hidráulicos do equipamento que dependem da vazão e pressão de trabalho.

Pensando em vazões mais baixas, trabalhar muito afastado do BEP, fará com que o equipamento esteja sujeito a esforços bem diferentes daqueles para o qual ele foi projetado, e conseqüentemente, um desgaste acelerado será observado no mancais e nas vedações, principalmente, nos selos mecânicos. Isso aumentará a frequência de manutenção da bomba, aumentando os custos e, conseqüentemente, reduzindo ainda mais a rentabilidade.

Ainda, em baixas vazões, a recirculação interna aumentará, provocando um aumento de temperatura, o que pode ser um problema, a depender das vedações empregadas. Além, do risco de cavitação, por geração de vórtices, como pode ser visto na figura 7.

Figura 7 – Cavitação Gerada por Vórtices (Fonte: Arquivo Interno Engenharia e Cia)



Por outro lado, se a vazão estiver acima da vazão do BEP, teremos uma velocidade média maior e, como já dissemos, a perda de carga será maior ao quadrado. Isso reduzirá ainda mais o NPSHd e, ainda aumentará o NPSHr, tornando a possibilidade de cavitação ainda maior.

Nesse sentido, o recomendado pelos fabricantes é que o ponto de operação esteja entre 65% a 110 % do BEP, evitando assim, os problemas listados.

CONCLUSÃO

Embora a curva da bomba sugira que é possível trabalhar em qualquer ponto, trouxe-se nesse trabalho argumentos para mostrar que a prática não é bem assim.

É muito frequente se deparar com bombas com alto índice de quebra e manutenção, cuja causa raiz é o seu uso em aplicações incompatíveis, seja com uma vazão muito baixa, ou uma vazão muito alta.

Tal situação pode ser evitada, observando-se o dimensionamento e a seleção adequados da bomba, ainda na fase de projeto da instalação, garantindo que em todas as possíveis condições de funcionamento, o ponto de operação esteja entre o 65% e o 110%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTALL, R. *Understanding Pump Curves #5: Minimum Flow*, Pump Industry, 2013. <Disponível em <https://www.pumpindustry.com.au/understanding-pump-curves-5-minimum-flow-part-one>> Acesso em: 26/05/2023.
2. FRANCO, B. *Mecânica dos Fluidos*, Pearson Education, 1ª Edição, 2007.
3. CAMARGO, M. *Apostila Treinamento Especificação de Bombas Centrífugas*, Engenharia e Cia, 2023
4. CAMARGO, M. *Como Especificar uma Bomba Centrífuga*, Engenharia e Cia, 2022. Disponível em <https://www.engenhariaecia.eng.br/post/como-especificar-uma-bomba-centrifuga>
5. CAMARGO, M. *Problemas Relacionados com Erros no Dimensionamento da Bomba Centrífuga de Instalação de Bombeamento*, Engenharia e Cia, 2022. Disponível em <https://www.engenhariaecia.eng.br/post/como-especificar-uma-bomba-centrifuga>
6. *Folheto de Curvas Técnicas Bomba Meganorm*, KSB, 2013