UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO – DEMECP

PATRICK RÔMULO DA COSTA MELO

ANÁLISE DE CAUSAS DE CAVITAÇÃO E PROPOSTA DE MELHORIA EM BOMBAS DA CAEMA SACAVÉM

São Luís – MA

2015

PATRICK RÔMULO DA COSTA MELO

ANÁLISE DE CAUSAS DE CAVITAÇÃO E PROPOSTA DE MELHORIA EM BOMBAS DA CAEMA SACAVÉM

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira

São Luís – MA

2015

Melo, Patrick Rômulo da Costa

Analise de causas de cavitação e proposta de melhoria em bombas da CAEMA Sacavem . / Patrick Rômulo da Costa Melo– São Luís, 2015.

46 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

PATRICK RÔMULO DA COSTA MELO

ANÁLISE DE CAUSAS DE CAVITAÇÃO E PROPOSTA DE MELHORIA EM BOMBAS DA CAEMA SACAVÉM

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovação em: ___ /___ /___.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira

(Orientador – UEMA)

_____

Prof. Me. Louryval Coelho Paixão

(1º Examinador)

_____

Prof. Me. Paulino Cutrim Martins

(2º Examinador)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, que me concedeu a vida.

À senhora Raimunda e seu filho Michael Serra, que me acolheram em um dos momentos mais difíceis da minha vida.

A Ester Linhares e seus três filhos: Adriano, Aristide e Alexandre, pelo apoio e incentivo.

Ao meu amigo Maurício Silva Figueiredo, que sempre me incentivou a seguir em frente, e nunca desistir dos meus objetivos.

Ao meu amigo Johnny Melo, que sempre me ajudou durante esses cinco anos.

Ao meu amigo Maxwell Fonseca, que sempre esteve presente nas lutas acadêmicas.

A todos meus amigos da universidade, que juntos enfrentamos muitas dificuldade e nunca desistimos.

Aos amigos da Casa do Estudante da Universidade Estadual do Maranhão – CEUEMA, que são minha segunda família.

A todos os professores do curso de engenharia que me orientaram e contribuíram para meu aprendizado.

A todos que de alguma forma contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

E de forma especial, ao professor Fernando Lima, pela colaboração, incentivo, firmeza nas orientações, compreensão e paciência na elaboração deste trabalho, mesmo na situação difícil em que encontro.

RESUMO

Os problemas de cavitação são frequentes em sistemas hidráulicos, principalmente em bombas. A grande quantidade de instalações com problemas relacionados à cavitação é grave, chega no total de vinte sete e podem danificar mecanicamente a bomba. Esses problemas relacionados à cavitação podem diminuir a vida útil da bomba de forma significativa. O trabalho trata de um estudo das causas da cavitação em bombas de abastecimento da CAEMA SACAVÉM. Na presente monografia são abordadas algumas características da cavitação. Trata-se também um pouco sobre recirculação interna ou da entrada de gases no líquido, cujas características são bastante semelhantes aos da cavitação. Entretanto, as soluções desses problemas são bem distintas. Finalmente, é retratada a geometria das tubulações e em que vem a influenciar e também um esquema para o melhoramento do sistema, a fim de tentar minimizar a cavitação, ao máximo.

Palavras-chave: Causas da Cavitação. Geometria do material das tubulações. Melhoramento do sistema.

ABSTRACT

This work presents a way of making the study of the causes of cavitation in the gas station of CAEMA SACAVÉM. this monograph is discusses a bit about the characteristics of pump designs. It also discusses some internal recirculation or recirculation or the entrance of gases in liquids, whose symptoms are very similar to cavitation. However, the solutions of these problems are very different. Finally, we have the geometry of pipes and its influence. And to complete the project, it has produced a scheme to upgrade the system to try to prevent cavitation the fullest and save on costs.

Key words: Causes of Cavitation. Geometry of the pipes material. System upgrade.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Classificação das bombas	14
Figura 2 –	Disco girando com gotas de líquido	15
Figura 3 –	Bomba centrífuga	16
Tabela 1 –	Dados das Bombas e motores da elevatória de água do Sistema AT e AB da CAEMA SCAVÉM	21
Figura 4 –	Casa de máquina 01, Bomba B1	21
Figura 5 –	Válvula de bloqueio com vazamento	22
Figura 6 –	Casa de máquina 02, Bomba B2	23
Figura 7 –	Tubulação de aço fundido das Bombas B3 e B4 da Casa de máquina 02	24
Figura 8 –	Tubulação de aço fundido da Bomba B3	24
Figura 9 –	Tubulação de aço fundido da Bomba B4	25
Figura 10 –	Formação da cavitação	26
Figura 11 –	Processo de implosão de uma bolha em cavitação	27
Gráfico 1 –	NPSHr em relação à vazão	29
Figura 12 –	Evolução das bolhas de vapor à medida que a pressão aumenta	30
Gráfico 2 –	Eficiência X Vazão (Escola da Vida, 2013)	32
Figura 13 –	Tubulações da Casa de máquina 2	33
Figura 14 –	Tubulação da Casa de máquina 1	34
Figura 15 –	Entrada de ar e formação de vórtices	35
Figura 16 –	Ilustração da recirculação do rotor	36
Figura 17 –	Bombas de captação do rio Batatã	39
Figura 18 –	Casas de máquina 01 e 02	41
Figura 19 –	Velocidade recomendada para tubulações de sucção	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 10
1.1 Objetivos..... 11
1.1.1 Objetivo Geral..... 11
1.1.2 Objetivos Específicos..... 11
2 REFERENCIAL TEÓRICO..... 12
2.1 Bombas..... 13
2.1.1 Classificação das bombas..... 13
2.1.1.1 Bomba centrífuga..... 14
2.1.1.2 Partes e componentes..... 15
2.1.1.3 Aplicação das bombas centrífugas..... 20
2.2 Características das bombas centrífugas..... 20
2.3 A cavitação..... 25
2.4 NPSH..... 28
2.4.1 NPSHr..... 28
2.4.2 NPSHd..... 29
2.5 Consequências da cavitação..... 30
2.5.1 Erosão..... 30
2.5.2 Ruído..... 31
2.5.3 Vibração..... 31
2.5.4 Queda no rendimento..... 31
2.6 Geometrias dos materiais da tubulação..... 32
2.7 Entrada de gases..... 34
2.8 Recirculação interna..... 35
3 PROPOSTAS DE MELHORAMENTO DO SISTEMA..... 37
3.1 Troca das tubulações..... 37
3.1.2 Aço liga..... 38
3.2 Aproximação das bombas aos reservatórios..... 38
3.2.1 Reduzindo a distância e aumentando o nível de líquido no tanque de sucção..... 39
3.3 Aumento do diâmetro das tubulações de sucção das bombas..... 41
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 44
REFERÊNCIAS 45

1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste trabalho um estudo sobre as características, impacto danoso e soluções sobre a cavitação em bombas centrífugas de abastecimento da empresa CAEMA SACAVÉM, para obter o melhoramento do sistema. As bombas centrífugas, que trabalham com a função de deslocamento de água no local, está com a estrutura metálica desgastada pelo tempo, as quais se encontram em operação. As mesmas apresentam desgastes de peças internas, segundo relato dos técnicos da empresa, devido ao fenômeno da cavitação.

Outros fatores que pioram ainda mais a situação do funcionamento das bombas são as péssimas condições das casas de máquinas, bem como o tempo de funcionamento das mesmas, que foram instaladas em 1962. O melhoramento desse sistema é uma análise de estudo que envolve a modificação do material das tubulações, procurando os materiais mais resistentes ao fenômeno, relação de cálculo do NPSH (valor da altura manométrica de sucção positiva líquida), temperatura de bombeamento do líquido, entre outros.

Drummond (2006, p. 117) diz que:

> A vibração da bomba fica elevada e os ponteiros dos manômetros de sucção e de descarga oscilam. A pressão de descarga e a vazão ficam prejudicadas. Os impelidores podem sofrer danos. Nos casos mais severos, a bomba pode perder a escorva e deixar de bombear. Esse tipo de problema quase sempre é diagnosticado como cavitação clássica da bomba, o que nem sempre é verdade. Esses mesmos sintomas também podem ser decorrentes da recirculação interna ou da entrada de gases no líquido, cujos sintomas são bastante semelhantes. Entretanto, as soluções desses problemas são bem distintas. Quando a pressão de um líquido numa dada temperatura atinge a sua pressão de vapor, tem início a vaporização.

Como veremos esses mesmos sintomas também podem ser decorrentes da recirculação interna ou da entrada de gases no líquido, cujos sintomas são bastante semelhantes. Entretanto, as soluções desses problemas são bem distintas.

Na engenharia mecânica é grande a preocupação com a cavitação, assim como sedimentos transportados pela água no interior de bombas e turbinas, sobretudo devido aos prejuízos que podem causar nas estações elevatórias, nas turbinas e vertedores das usinas hidrelétricas e empresas que abastecem as cidades com água tratada.

Os responsáveis dessa área jamais devem confundir o fenômeno de corrosão com os fenômenos físicos da cavitação, embora os efeitos dos mesmos sejam parecidos.

1.1 Objetivos

Para a obtenção do resultado esperado neste estudo, foram definidos os seguintes objetivos de caráter geral e específicos:

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar os problemas e soluções que o fenômeno cavitação em bombas centrífugas da CAEMA SACAVÉM vem causando à empresa, para um futuro melhoramento do sistema de funcionamento das bombas centrífugas, visando à diminuição dos custos da empresa e o abastecimento da sociedade com qualidade e rapidez.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Pesquisar os princípios causadores de cavitação nas bombas centrífugas de alimentação;
- ✓ Analisar o efeito que a cavitação pode trazer ao funcionamento das bombas;
- ✓ Analisar em que pode influenciar a geometria e a posição da instalação das tubulações industriais;
- ✓ Viabilizar o melhoramento do sistema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os problemas com a cavitação são mais frequentes que imaginamos e eles vêm aumentando nos últimos anos devido ao deficiente desenho do sistema de bombeamento e a falta de conhecimento a respeito do assunto. Os engenheiros dessa área não se especializam nesse assunto, por lidarem com uma variedade de tecnologias diferentes. O resultado disso tudo é que os problemas que envolvem a cavitação estão aumentando, mesmo esse fenômeno sendo de longa data.

A cavitação é causada quando o líquido dentro da bomba se transforma em bolhas de vapor à baixa pressão. As bolhas então implodem, o que gera uma onda de choque que atinge o impulsor e provoca uma vibração da bomba e danos mecânicos que, finalmente, levam a bomba a falhar.

Conforme Bob Went, o aumento no número de instalações com problemas relacionados à cavitação, como a vibração, por exemplo, são graves e podem danificar mecanicamente a bomba. Os problemas relacionados à cavitação podem diminuir a vida útil da bomba de cerca de 10 a 15 anos para apenas dois anos, em alguns casos. Por isso vemos a gravidade do problema, em se tratando de custo e produção.

Muitas vezes o dano é atribuído à própria bomba. Os problemas dos sistemas de bombeamento, que podem ser variados, incluindo a cavitação, se manifestam na bomba, mas raramente são causados por ela. Nove de cada dez problemas de bombeamento não são causados pela bomba em si, mas sim por problemas com a cavitação, um deficiente desenho do sistema e falta de manutenção etc. (WENT, Bob. 2014).

Bob Went afirma que um bom desenho é fundamental para evitar a cavitação. Mas no campo, uma vez que a bomba entra em operação, pode ser muito difícil e caro corrigi-la. Ainda segundo Went, está havendo um aumento no número de projetos nos quais uma nova bomba é colocada em uma instalação existente com pouca atenção dada a evitar problemas com cavitação. Para evitar tais problemas com esse fenômeno que vem causando alto custo às empresas, deve-se dar atenção à fase de desenho das bombas, ou seja, é importante evitar ao máximo os erros na fase de instalação das bombas, a fim de que a cavitação não venha a ser um problema futuro.

Mattos; Falco (1998, p. 176) dizem que existem dois aspectos a serem estudados no que concerne à cavitação em bombas. O primeiro, que constitui o objetivo principal, é determinar as condições que devem ser satisfeitas para evitar o fenômeno – o que é

normalmente conseguido; o segundo aspecto é apresentar procedimentos que atenuem os efeitos da cavitação, caso seja impossível ou impraticável evitar a sua existência.

2.1 Bombas

Drummond (2006, p. 66) conceitua bombas como:

> [...] máquinas destinadas à transferência de líquidos de um ponto para outro. Para realizar essa movimentação, as bombas cedem energia ao líquido sob a forma de pressão e de velocidade, sendo a forma de pressão a predominante. É importante conhecer o funcionamento de um equipamento para que possamos realizar manutenção adequada. Esse conhecimento facilita a identificação de falhas e o modo de saná-las.

Na indústria em geral, o acionamento das bombas é realizado, principalmente, por motores elétricos. Essa preferência é devido ao fato de os custos de aquisição e de operação serem inferiores aos das turbinas e dos motores a combustão.

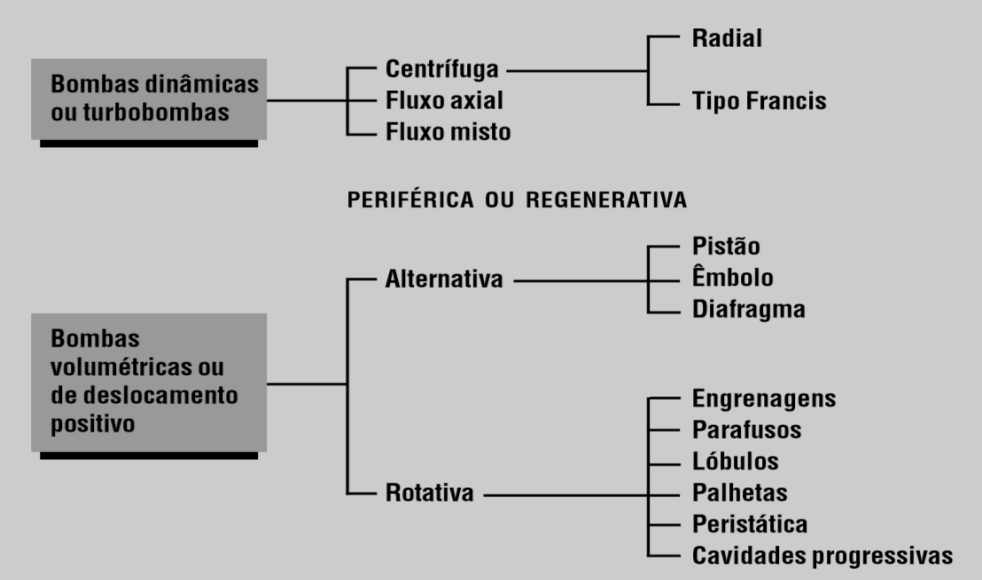
Mattos; Falco (1998, p. 105) alegam que "[...] A relação entre a energia cedida pela bomba ao líquido e a energia que foi recebida da fonte motora fornece o rendimento da bomba".

As bombas podem ser classificadas pela sua aplicação ou pela forma com que a energia é cedida ao fluido. Normalmente, existe uma relação estreita entre a aplicação e a característica da bomba que, por sua vez, está intimamente ligada à forma de cessão de energia ao fluido.

2.1.1 Classificações das bombas

No mercado existe um grande número de bombas disponíveis. Elas podem ser classificadas em dois tipos, cujas representações seguem abaixo na figura 1:

Figura 1 – Classificação das bombas



Fonte**:** Drummond (2006)

Segundo Macintyre (1997, p. 14)

> As turbobombas são caracterizadas por possuírem um órgão rotatório dotado de pás, chamado rotor, que exerce sobre o líquido forças que resultam da aceleração que lhe imprime. Já as 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 então as condições para que se realize o escoamento na tubulação de aspiração até a bomba e na tubulação de reclaque até o ponto de utilização.

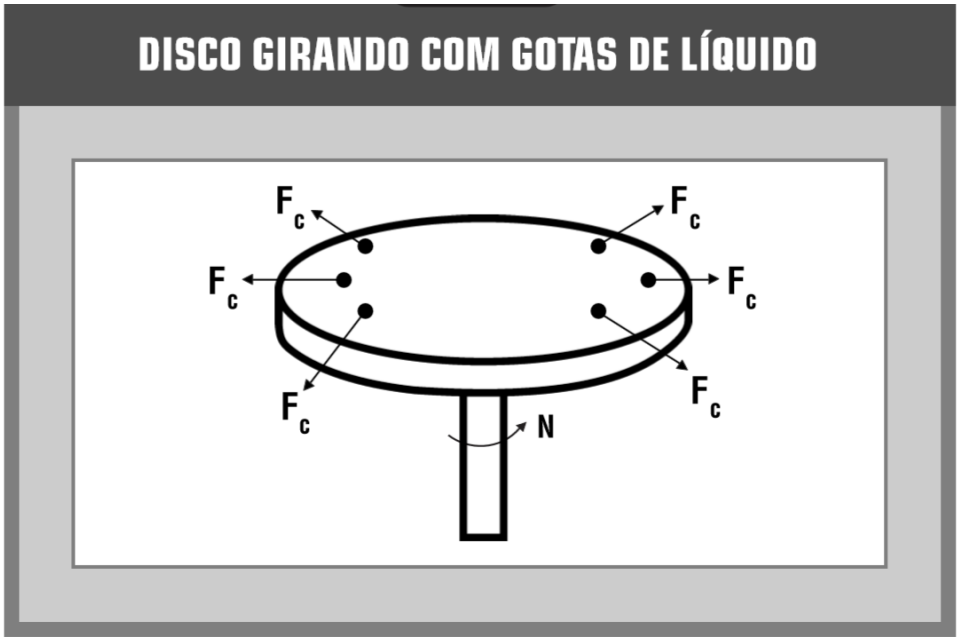
2.1.1.1 Bomba centrífuga

Sob a visão de Drummond (2006, p. 85), a bomba centrífuga pode ser:

> [...] do tipo radial ou tipo Francis. A bomba centrífuga radial ou centrífuga pura é a que possui as pás do impelidor com a curvatura em um só plano. Nesse tipo de bomba, o fluxo sai do impelidor perpendicularmente ao eixo. O impelidor cede energia ao líquido por meio da força centrífuga. A bomba centrífuga tipo Francis possui as pás do impelidor com curvatura em dois planos. Nesse tipo, a energia é cedida ao líquido pela força centrífuga e de arrasto. O líquido sai do impelidor perpendicular ao eixo.

A figura 2 mostra que, se colocássemos gotículas de líquido sobre um disco, ao girá-lo com uma rotação N, as gotículas seriam expelidas para a periferia pelo efeito da força centrífuga. Note-se:

Figura 2 – Disco girando com gotas de líquido

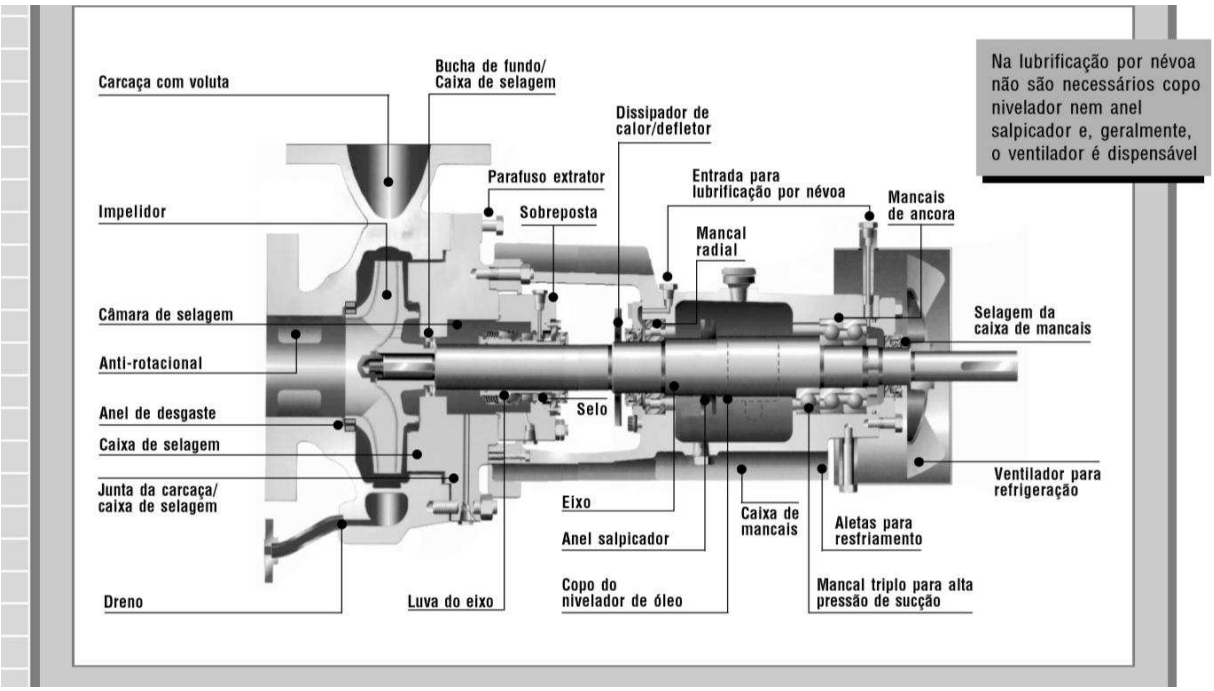


Fonte**:** DRUMMOND, 2006

2.1.1.2 Partes e componentes

Para Drummond (2006, p. 96), “As principais partes de uma bomba centrífuga e as funções que exercem os danos que eventualmente apresentam e as recuperações empregadas para restabelecer a condição normal de funcionamento são”: A figura 3 demonstra as partes e componentes da bomba centrífuga:

Figura 3 – Bomba centrífuga



Fonte**:** Drummond, 2006

- **Rotor ou conjunto rotativo**

Pela definição da norma API, rotor é o conjunto de todas as peças girantes, exceto os selos e rolamentos. O rotor é composto por eixo, impelidor, porcas de fixação, luvas do eixo e defletores. É prática comum chamar o impelidor de rotor, inclusive alguns fabricantes de bombas utilizam indevidamente esse nome.

- **Impelidor**

Sua função é a de fornecer energia ao líquido sob a forma de pressão e de velocidade. O impelidor raramente é recuperado, a não ser que seja de grande tamanho, sendo quase sempre substituído por um novo quando está desgastado**.**

- **Carcaça**

Sua função principal é a de conter o líquido. No caso de carcaça em voluta, esta serve também para transformar energia de velocidade em pressão na região do cone de saída. Não é usual necessitar reparos, a não ser nas bombas utilizadas com líquidos abrasivos ou corrosivos e nas que trabalham sob cavitação ou recirculação interna. Como, geralmente, não existem em estoque carcaças reservas, quando se danificam, costumam ser recuperadas por soldagem com posterior usinagem ou esmerilhamento. Em alguns casos, podem ser recuperadas por meio de deposição de resinas especiais, como as do tipo epóxi.

- **Caixa de selagem**

Também chamada de tampa da carcaça e de caixa de gaxetas. Juntamente com a carcaça, envolve o impelidor contendo o líquido. É através desta peça que o eixo sai para o exterior da bomba. Possui uma câmara que serve para instalar a selagem da bomba. Sua recuperação é semelhante à da carcaça.

- **Eixo**

Sua função é a de transmitir o torque do acionador ao impelidor, o qual lhe é fixado. Quando apresenta algum tipo de desgaste, é geralmente substituído.

- **Porca do impelidor**

Tem a função de fixar o impelidor no eixo.

- **Luva do eixo**

Serve para proteger o eixo. Em vez de trocá-lo, que é uma peça cara, troca se a luva, que é mais barata. Nos selos tipo cartucho, a luva permite que o selo seja todo montado externamente, antes de ser colocado na caixa de selagem.

- **Mancais**

Sua função é a de sustentar o eixo, gerando pouco atrito. A maioria das bombas utiliza mancais de rolamentos. Quando as condições operacionais (rotação e esforços) acarretam uma vida curta dos rolamentos, os projetistas das bombas os substituem por mancais de deslizamento (metal patente). Nas bombas verticais, é comum a utilização de mancais guias para o eixo, que são usualmente fabricados de bronze ou outro material macio, como o carvão ou Teflon impregnado.

- **Caixa de mancais**

Sua função é a de sustentar os mancais e criar uma região propícia para sua lubrificação. Raramente se danificam. Caso a pista externa do rolamento venha a girar na caixa, ela pode ser recuperada por meio de embuchamento. Cuidados devem ser tomados para garantir as concentricidades entre as regiões dos rolamentos e da guia, que é a responsável pela centralização da caixa de selagem. As caixas de mancais das bombas antigas eram de ferro fundido. Como esse material é frágil, podendo quebrar no caso do trancamento de um rolamento, o que levaria a um vazamento pela selagem, a norma API passou a recomendar que as caixas de mancais sejam fabricadas em aço-carbono quando o líquido bombeado for inflamável ou perigoso.

- **Selagem da bomba**

Sua função é a de evitar que o líquido vaze para o exterior pela região onde o eixo sai da carcaça. As bombas antigas usavam tanto gaxetas como selos mecânicos. Atualmente, devido às restrições de poluição ambiental, as gaxetas são utilizadas somente para produtos que não ocasionam problemas ao meio ambiente, caso venham a vazar. As gaxetas estão sendo utilizadas praticamente para água. Mesmo assim, o selo mecânico vem ganhando terreno nestas aplicações. Recentemente, surgiram no mercado gaxetas injetáveis, que estão sendo empregadas com sucesso.

- **Sobreposta**

No caso de selagem por gaxetas, recebe também o nome de preme-gaxetas. Nesse caso, é usual utilizarem uma bucha de bronze na região que pode vir a ter contato com o eixo. Na selagem por selo mecânico, serve de apoio para uma das sedes. Nesse caso, como são normalmente fabricadas de material nobre, quase sempre AISI 316, raramente necessitam de recuperação.

- **Selagem da caixa de mancais**

Sua função é a de evitar ou reduzir a entrada de sólidos (poeiras, catalisadores etc.), líquidos (água e o próprio produto bombeado) e vapores no interior da caixa de mancais, além de impedir que o óleo lubrificante ou a graxa vazem para o exterior. As bombas mais antigas usavam retentores com lábios de borracha ou labirintos. O retentor realizava sua função quando novo, mas, após alguns meses de funcionamento, os lábios endureciam, podiam surgir trincas ou acabavam por riscar o eixo, perdendo sua capacidade de vedação. Por isso, a norma API 610 passou a recomendar o uso de selos mais sofisticados que permanecem aptos a realizar sua função por tempo mais prolongado. Existe uma grande variedade desses selos, alguns vedam por meio de anel “O” e labirintos, enquanto outros são semelhantes a um selo mecânico, com uma face fixa e outra giratória provendo a vedação principal. Esses selos usam molas ou magnetismo para manter as sedes em contato.

- **Defletor**

É um disco geralmente fixado ao eixo, colocado na frente da selagem da caixa de mancais com a finalidade de evitar que jatos de líquidos ou vapores atinjam diretamente a região de selagem, dificultando a entrada de corpos estranhos nas caixas de mancais.

- **Anel pescador**

Sua função é carregar o óleo do reservatório para o eixo, fluindo daí para o mancal. O anel pescador é acionado pela rotação do eixo.

- **Anel salpicador**

É um anel fixado no eixo e que gira com ele, tendo por função salpicar o óleo lubrificante, lançando-o nas canaletas que levam aos rolamentos.

- **Anéis de desgaste**

Possuem diversas funções. A primeira é de ser uma peça de sacrifício, permitindo usar folgas menores entre o impelidor e a carcaça. Com folgas pequenas, o fluxo que passa da descarga para a sucção pode ser reduzido, aumentando a eficiência da bomba. Se não houvesse anéis de desgaste e ocorresse um "roçamento" das peças, teríamos de substituir ou recuperar o impelidor e/ou a carcaça, que são peças mais caras. Com o uso dos anéis, fica mais barato e rápido trocá-las. O seu diâmetro também serve para equilibrar os esforços axiais. Outra função dos anéis de desgaste é a de trabalhar como mancal, aumentando a rigidez do rotor. Quando suas folgas aumentam, esta função fica prejudicada e temos o aumento de vibração da bomba. Esta situação é crítica nas bombas com dois estágios em balanço.

- **Bucha de fundo da caixa de selagem**

Esta bucha é que separa a câmara de selagem do interior da bomba. No caso de bombas que utilizam selo mecânico, sua folga é importante porque vai ajudar a controlar a pressão e a vazão do líquido de refrigeração do selo, evitando que ele venha a vaporizar.

- **Bucha da sobreposta**

Sua função é a de restringir o vazamento entre a luva e a sobreposta.

- **Acoplamento**

Sua função é a de transmitir o torque do acionador para a bomba, absorvendo pequenos desalinhamentos entre os eixos, sem ocasionar aumentos consideráveis da vibração.

- **Ventilador**

É empregado como um meio de refrigerar a caixa de mancais. A maioria das bombas utiliza em seu lugar uma câmara de resfriamento com água nesta função. As bombas dotadas de lubrificação por névoa, na maioria dos casos, dispensam o uso de refrigeração nos mancais.

- **Anti-rotacional**

Sua função é de orientar o líquido para o impelidor, evitando que ele entre girando.

2.1.1.3 Aplicação das bombas centrífugas

No que concerne à aplicação das bombas centrífugas, Drummond afirma:

> Bomba centrífuga é um tipo de bomba bastante versátil, daí seu grande emprego na indústria. Suporta desde serviços leves, como o bombeamento de água residencial, feito com bombas pequenas com 1/8 hp, até bombas com consumo de potências bastante altas, que podem chegar a milhares de hp. Este tipo de bomba é usado praticamente em todas as indústrias, caso das unidades de uma refinaria, na exploração de petróleo, no transporte de líquidos (oleodutos), nas indústrias químicas, no abastecimento de água das cidades, em irrigação de lavouras, em termoelétricas, na indústria de papel e celulose, nas aciarias e nas demais indústrias. Uma das grandes vantagens da bomba centrífuga é sua capacidade de variar a vazão (2006, p. 95).

2.2 Características das bombas centrífugas CAEMA SACAVÉM

As bombas centrífugas da CAEMA SACAVÉM têm um papel muito importante para a sociedade, visto que elas fazem parte do conjunto de bombas que ajudam no bombeamento para o preparo da água que supre a necessidade da cidade de São Luís.

Neste trabalho foram estudadas cinco bombas, as quais estão em funcionamento. Na primeira casa de máquinas foram verificadas duas bombas denominadas de B1e B2, que têm a função de retirar água do rio prata e jogar na ETA (Estação de Tratamento de Água). Tais bombas encontravam-se em péssimo estado, devido à corrosão em suas estruturas, e o local estava em situação precária.

Na segunda casa de máquinas foi verificado o funcionamento de outras duas bombas chamadas de B3 e B4, bombas cujas estruturas estavam em estado de corrosão, devido ao tempo e às condições ambientais em que se encontram. Elas também tinham vazamentos nas válvulas da tubulação.

Ao apurar com os técnicos responsáveis pela manutenção das mesmas como era o funcionamento das bombas, verificou-se que elas apresentam constantemente problemas relacionados à cavitação, como: erosões, ruído, vibração e rendimento instável.

A tabela e as figuras a seguir comprovam os dados das bombas, estruturas e componentes em péssimo estado. Note-se:

Tabela 01 – Dados das Bombas e motores da elevatória de água do Sistema Sacavém AB e AT da CAEMA

COMPANHIA DE ÁGUAS E ESGOTOS DO MARANHÃO - CAEMA
SUPERINTENDÊNCIA METROPOLITANA - OM
DIVISÃO DE MANUTENÇÃO - OMDM

DADOS DAS BOMBAS

BOMBAS								
CÓD	MARCA	MODELO	VAZÃO (m^3/h)	RPM	M.C.A	Ø ROT. (mm)	ROLAMENTO	GAXETA
B - 01	KSB	ETA 150-26	280	1780		260	6409	1/2"
B - 02	KSB	ETA 150-26	280	1780		260	6409	1/2"
B - 03	KSB	ETA 150-26	280	1780		260	6409	1/2"
B - 04	KSB	ETA 150-26	280	1780		260	6409	1/2"

Fonte: CAEMA SACAVÉM (2015)

Figura 4 – Casa de máquina 01, Bomba B1, CAEMA SACAVÉM

Fonte: Elaboração própria do autor (2015)

Figura 5 – Válvula de bloqueio com vazamento, CAEMA SACAVÉM

Fonte: Elaboração própria do autor (2015)

Figura 6 – Casa de máquina 02, Bomba B2, CAEMA SACAVÉM

Fonte: Ricardo Borges, 2015

Figura 7 – Tubulação de aço fundido das Bombas B3 e B4 da Casa de Máquina 02, CAEMA SACAVÉM

Fonte: Ricardo Borges, 2015

Figura 8 – Tubulação de aço fundido da Bomba B3, CAEMA SACAVÉM

Fonte: Elaboração própria do autor, 20015

Figura 9 – Tubulação de aço fundido da Bomba B4, CAEMA SACAVÉM

Fonte: Elaboração própria do autor, 20015

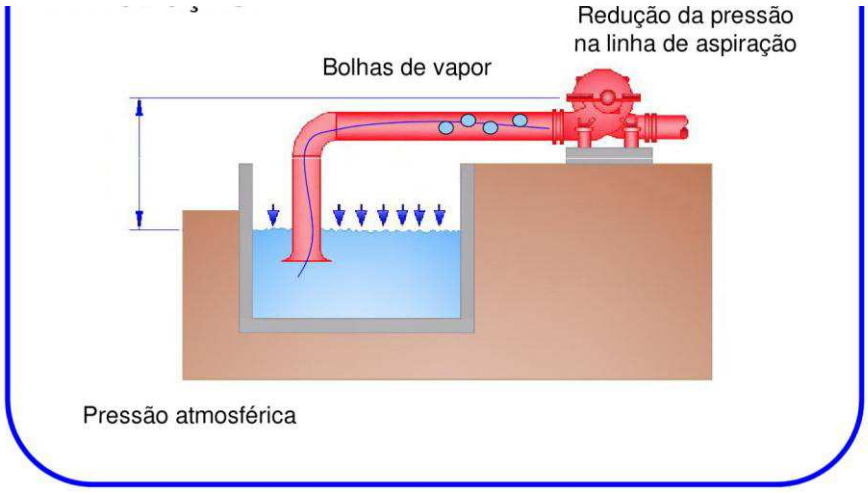
2.3 A cavitação

De acordo com Alan Sulato de Andrade:

> A cavitação é um fenômeno físico que ocorre principalmente no interior de sistemas hidráulicos e que consiste na formação de bolhas no meio fluido transportado. A cavitação ocorre quando a pressão estática absoluta local cai abaixo da pressão de vapor do liquido e, portanto causa formação de bolhas de vapor no corpo liquido, isto é, o liquido entra em ebulição.

A figura 10 mostra a formação da cavitação na entrada da sucção:

Figura 10 – Formação da cavitação

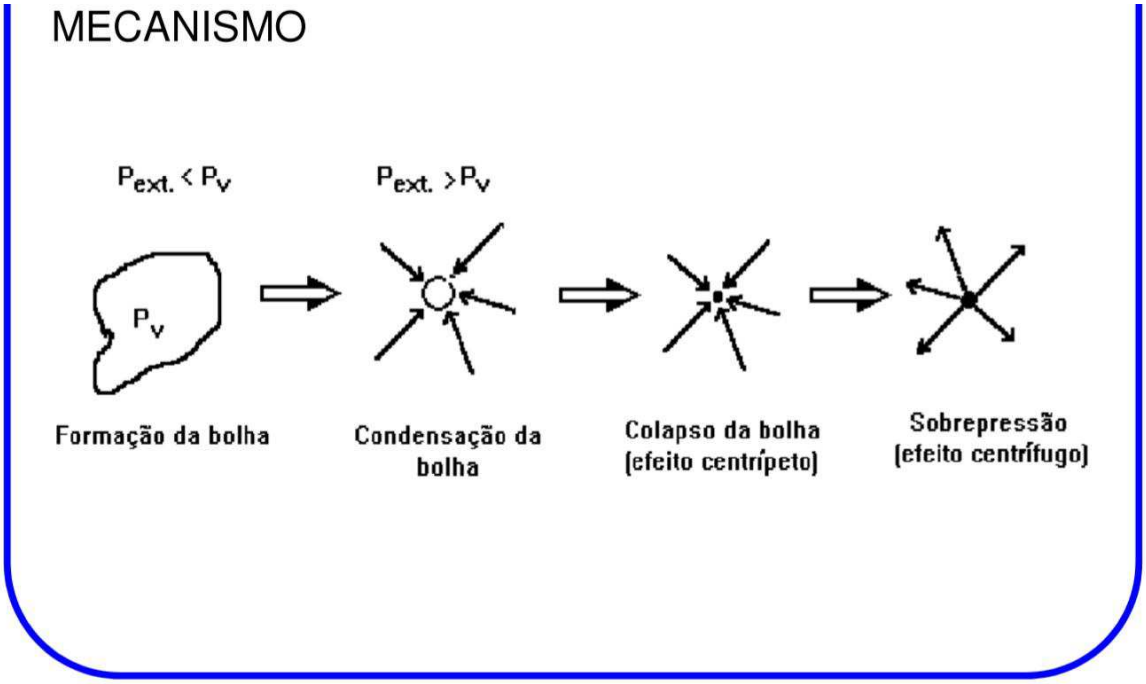


Fonte: Máquinas Hidráulicas AT 087, UFPR

Quando as bolhas de vapor são formadas, são conduzidas pelo fluxo do líquido até atingirem a pressão de vapor (região do rotor), onde ocorre o colapso destas bolhas. Então, há a condensação do vapor e o retorno à fase líquida.

Ainda conforme Alan Sulato de Andrade (p. 6), "[...] Quando o líquido escoa através de uma bomba centrífuga axial, a pressão estática no olho do rotor é reduzida e a velocidade do fluxo aumenta. Existe então uma possibilidade de que bolhas de cavitação possam se formar na entrada do rotor ou na tubulação de aspiração". A figura 11 demonstra os processos de implosão de uma bolha em cavitação:

Figura 11 – Processo de implosão de uma bolha em cavitação



Fonte: Máquinas Hidráulicas AT 087, UFPR

Segundo Mattos; Falco (1998, p. 168):

> A teoria clássica estipula que a cavitação inicia quando em qualquer ponto do sistema a pressão é reduzida ao valor da pressão de vapor do líquido na temperatura de operação. Na realidade, o problema não é tão simples assim, pois, para que uma cavidade possa ser criada, há necessidade de ruptura do líquido e esta ação não é medida pela pressão de vapor, e sim pela resistência à tensão, correlacionada à tensão superficial do líquido na temperatura de operação.

Para Alan Sulato de Andrade (p. 13):

> Os efeitos da cavitação são visíveis a longo prazo e a curto prazo, sendo ambos mensuráveis. Em longo prazo, os rotores apresentam perdas consideráveis comprometendo o desempenho da bomba e podendo levar à sua ruptura. Em curto prazo, o fenômeno da cavitação copromete a performance da bomba com a queda de rendimento da bomba, vibrações não características das bomba, estes provocados pela implosão do líquido.
> A cavitação, além de ocorrer no rotor, pode-se manifestar na entrada da bomba, na linha de aspiração na voluta e nas pás diretrizes do difusor. Este último é mais intenso quando a bomba opera fora da descarga nominal, devido à divergência entre os ângulos de saída do líquido no rotor e de entrada no difusor. Já ouve casos de retirada de pedaços de aproximadamente 2 cm de espessura da tubulação de aspiração.

Conforme Mattos; Falco (1998, p. 169), as principais características de uma bomba em cavitação são: “Vibração; Alteração nas curvas características; Danificação do material; Queda de rendimento e; Desbalanceamento que acarreta ruído Provocado pelas implosões das bolhas”.

Após o diagnóstico do problema, eventuais análises devem ser feitas para ver o que tem que ser feito para reparos como: reparo de dispositivos, quando possível, ou troca e análise do bombeamento.

Alan Sulato de Andrade (p. 22-23) diz que:

> As maneiras de se evitar ou diminuir os problemas da cavitação é a utilização de materiais resistente à corrosão por cavitação, através do projeto adequado da linha de sucção, minimizando o aparecimento de baixas pressões. Normalmente em bombas afogadas, ou seja, onde a altura de aspiração está localizada acima do eixo da bomba, a cavitação praticamente é eliminada.
> Sabendo que a linha de sucção de uma bomba é o local onde geralmente as pressões são baixas, sendo assim, é o local que se deve ter cuidado para que durante o bombeamento de líquidos a pressão não atinja a pressão de vaporização na temperatura que o líquido se encontra. A altura de aspiração ou sucção de uma bomba é definida como a distância vertical do centro do eixo da bomba e o nível do líquido no reservatório de sucção.

2.4 NPSH

NPSH diz respeito à sigla da expressão inglesa *Net Positive Suction Head*, a qual divide-se em:

> NPSH disponível - Pressão absoluta por unidade de peso existente na sucção da bomba (entrada do rotor), a qual deve ser superior a pressão de vapor do fluído bombeado, e cujo valor depende das características do sistema e do fluído;
> NPSH requerido - Pressão absoluta mínima por unidade de peso, a qual deverá ser superior a pressão de vapor do fluído bombeado na sucção da bomba (entrada de rotor) para que não haja cavitação. Este valor depende das características da bomba e deve ser fornecido pelo fabricante da mesma; O NPSHdisp deve ser sempre maior que o NSPHreq (INDÚSTRIAS SCHNEIDER S.A., 2001, p. 5).

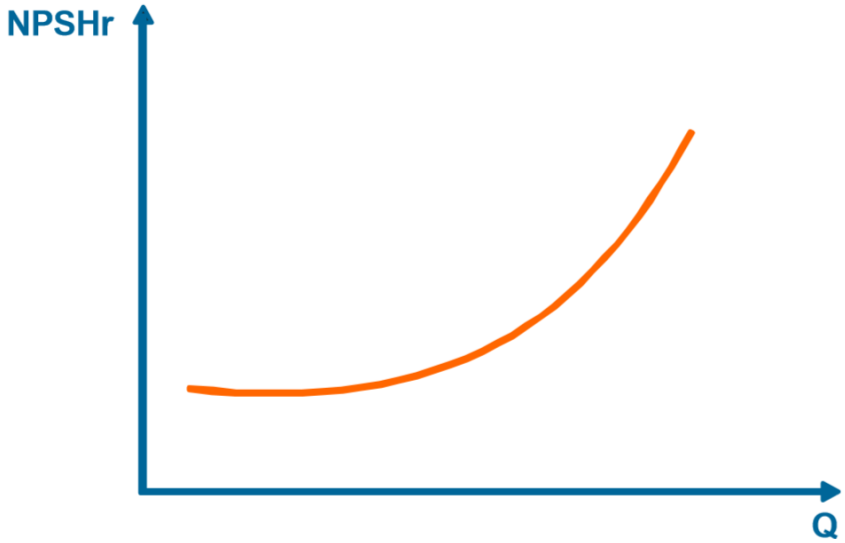
2.4.1 NPSHr

Segundo a CNI *et al*,

> O NPSHr requerido ou real é uma característica da bomba, determinada em seu projeto de fábrica, por meio de cálculos e ensaios de laboratório. Tecnicamente, NPSHr é a energia necessária para vencer as perdas de carga entre a conexão de sucção da bomba e as pás do rotor, assim como criar a velocidade desejada no líquido, nas pás do rotor.
> Esse dado deve ser obrigatoriamente fornecido pelo fabricante por meio das curvas características das bombas (curva do NPSH). Os fabricantes fornecem em seus catálogos, para cada tipo de bomba, um gráfico do NPSHr em função da vazão da bomba, (2009 p. 144).

O gráfico a seguir mostra a relação entre o NPSHr e a vazão de uma bomba. Note-se:

Gráfico 1 – NPSHr em relação à vazão



Fonte: Bombas: guia básico / Eletrobrás [et al.]. Brasília : IEL/NC, 2009

2.4.2 NPSHd

NPSHd disponível se refere à disponibilidade de energia do líquido ao entrar na bomba, a qual depende da maneira como é projetada a instalação hidráulica.

> De uma forma geral o NPSHd, que é uma característica da instalação hidráulica, pode ser definido como a energia que o líquido possui, num ponto imediatamente anterior ao flange de sucção da bomba, acima da sua pressão de vapor. Essa variável deve ser calculada por quem dimensionar o sistema, em função da bomba, utilizando-se de coeficientes tabelados e dados da instalação.
> O líquido no reservatório de sucção está sujeito a uma pressão interna diferente da pressão atmosférica. No momento em que o nível desse líquido está abaixo do centro da bomba, a pressão interna será negativa e poderá provocar a cavitação. Quando o nível do líquido desse reservatório estiver acima do centro da bomba, a pressão interna será positiva e, normalmente, não ocorrerá a cavitação (CNI *et al*, 2009, p. 145).

A pressão de sucção deverá ser sempre superior à pressão em que a água ferve referente à temperatura em que ela se encontra no momento de bombeamento para que não ocorra o fenômeno de cavitação.

Podemos equacionar o NPSHd (disponível) da seguinte maneira:

- NPSHd (disponível) = Hatm + Hgeos - Hv - ΔPS + PRes.
- Onde:
- NPSHD = energia disponível na instalação para sucção, em mca;
- Hatm = pressão atmosférica local, em mca;

- Hgeo = altura geométrica de sucção; é positiva quando a bomba está afogada e negativa quando estiver acima do nível de água, em mca.
- Hv = pressão de vapor do fluido em função da sua temperatura, em mca.
- ΔPS = perda de carga total na linha de sucção, em mca.
- PRes. = Pressão do reservatório de sucção.

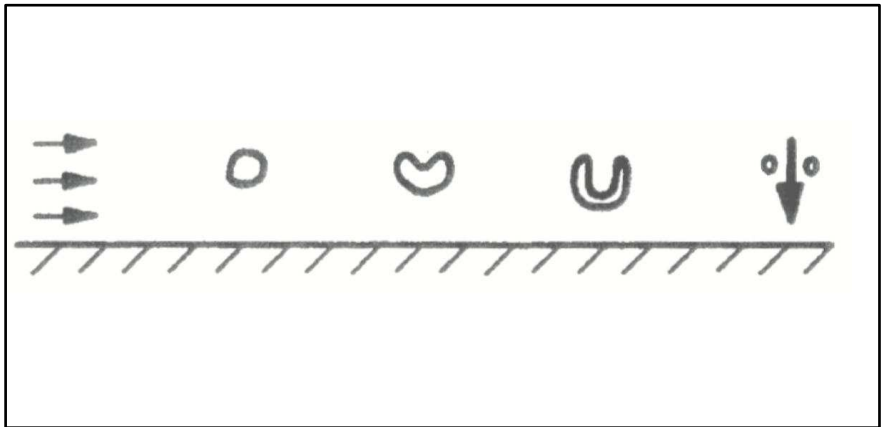
2.5 Consequências da cavitação

2.5.1 Erosão

Uma das consequências mais indesejáveis da cavitação tem a ver com a situação que ocorre quando as bolhas de vapor voltam a entrar numa zona de pressão superior à pressão de vapor. Ao contrário do que se poderia supor, o tamanho das bolhas não diminui até ao seu total desaparecimento. As bolhas assumem uma forma de rim, acabando por implodir violentamente de encontro às pás do impulsor, sob a forma de jatos microscópicos. Os jatos microscópicos vão gradualmente causar fadiga na superfície do material e, como consequência, a matéria começa a desagregar-se, devido às pressões pontuais, da ordem dos 105 bar (LEITE, 2012, p. 38).

Com a evolução das bolhas de vapor, à medida que a pressão aumenta os danos causados pela erosão devido à cavitação, tal como a profundidade da erosão ou a perda de massa, estão diretamente relacionados com, pelo menos, quatro fatores: tempo de exposição à cavitação; Intensidade da cavitação; Propriedades do fluido e; Resistência do material à erosão por cavitação. A figura 12 mostra a evolução das bolhas com o aumente de pressão:

Figura 12 – Evolução das bolhas de vapor à medida que a pressão aumenta



Fonte: KBS, Bombas e Válvulas SA, 2012

2.5.2 Ruído

Para Sérgio Lopes dos Santos (2007, p. 153):

> O ruído característico da cavitação acontece devido às vibrações que são provocadas pelas forças aplicadas e também pelo material que está sendo arrancado das peças internas.
> O barulho é semelhante à crepitação da lenha bem seca quando está queimando; pode ser comparada também ao barulho de betoneiras metálicas pequenas que misturam areia, cimento e pedra. O nível do ruído obviamente depende da intensidade da cavitação ou de suas consequências.

2.5.3 Vibração

Mattos; Falco (1998, p. 169) afirmam que "[...] a vibração é provocada, fundamentalmente, pela instabilidade gerada pelo colapso das bolhas".

> A vibração resultante da cavitação é devida à combinação de três fatores: Como a região preenchida com bolhas varia de pá para pá, num mesmo impulsor, a passagem do escoamento em redor dessas regiões também varia, afetando o equilíbrio desse impulsor; Cada região preenchida com bolhas também sofre variações de dimensão, podendo daí resultar vibrações com frequências não constantes; Se as regiões ocupadas por bolhas forem muito extensas, causam uma queda de pressão a jusante do impulsor, resultando na saída separada e irregular do escoamento de cada canal, desequilibrando o impulsor. (LEITE, 2012, p. 38).

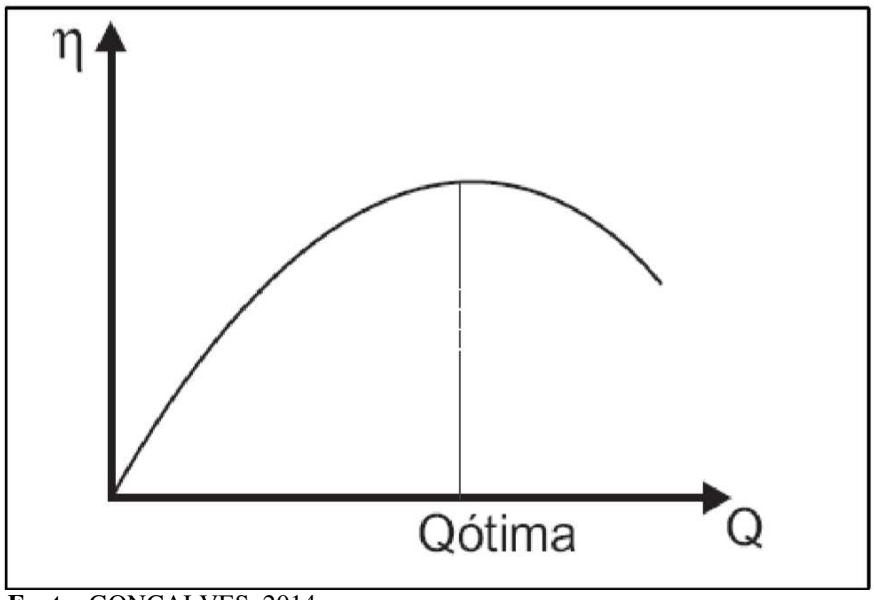
2.5.4 Queda no rendimento

Para Drummond (2006, p. 154), "[...]o rendimento ou eficiência de uma bomba é a relação entre a potência que ela fornece ao líquido e a potência recebida do acionador", representado através de:

$$\eta = \frac{Potencia\ útil}{Potencia\ total}$$

O gráfico abaixo demonstra a relação entre eficiência e vazão:

Gráfico 2 – Eficiência X Vazão (Escola da Vida, 2013)



Fonte: GONÇALVES, 2014

Para Drummond (2006, p. 155-156):

> O rendimento cresce com a vazão até um determinado ponto, passa por um valor máximo e começa a cair. O ponto de máxima eficiência, usualmente chamado de BEP – Ponto de Máxima Eficiência (Best efficiency point) da bomba. A vazão do BEP é a vazão para a qual a bomba foi projetada. O rendimento é máximo porque o líquido entra no impelidor com o ângulo mais favorável em relação às pás, praticamente sem choques. Por esse motivo, as bombas apresentam valores menores de vibrações quando trabalham próximas desse ponto.
> Quando surge a cavitação, ela influencia de forma direta no rendimento das bombas, logo a bomba perde boa capacidade de bombear o fluido, então sua vazão diminui, causando queda no rendimento.

2.6 Geometrias dos materiais da tubulação

Verificou-se que as tubulações das quatro bombas da CAEMA SACAVÉM são de material ferro fundido. Sem a eventual manutenção e ainda com o aparecimento da cavitação, o material foi entrando em estado de degradação.

Segundo o que foi apurado no local com o estagiário de engenharia mecânica da CAEMA, Ricardo Borges, a mesma está com um projeto de manejo desses tubos, devido ao grande tempo de uso e seus desgastes que só vêm a comprometer o funcionamento das bombas e o abastecimento de água para população. As figuras abaixo ilustram o estado precário das tubulações:

Figura 13 – Tubulações da Casa de máquina 2

Fonte: Elaboração própria do autor, 2015

Figura 14 – Tubulação da Casa de máquina 1

Fonte: Elaboração própria do autor (2015)

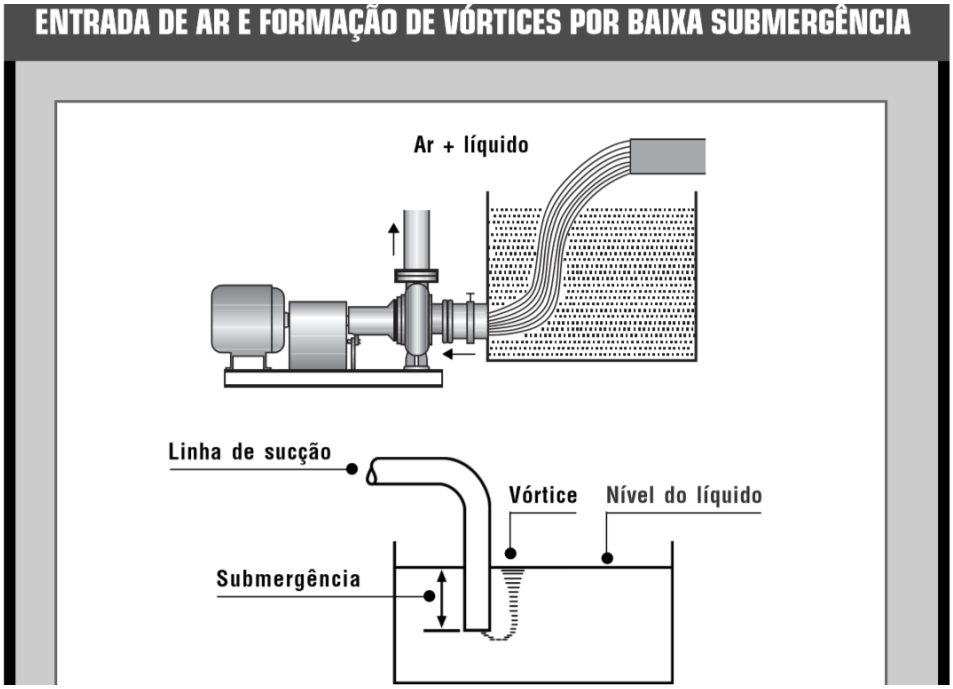
2.7 Entrada de gases

Drummond afirma que:

> A entrada de ar ou gases misturados com o líquido no interior da bomba, a partir de certo percentual, gera os mesmos fenômenos ocasionados pela cavitação e pela recirculação interna, ou seja, ruído, perda de desempenho, vibração, oscilação dos manômetros. A diferença é que as bolhas não são formadas por vaporização no interior da bomba, mas já entram com o líquido. Um dos problemas da entrada de gás junto com o líquido é causado pela separação que ocorre pela centrifugação. O ar tende a ficar junto ao olhal do impelidor, prejudicando o fluxo (2006, p. 142).

Quanto aos danos no impelidor, alguns autores afirmam que a entrada de gases não causa danos significativos às bombas, simplesmente reduz o desempenho pelo espaço ocupado pelos gases. Outros autores afirmam que os danos são semelhantes aos causados pela cavitação. Os gases podem já vir dissolvidos no líquido ou penetrar na tubulação de sucção pelas juntas dos flanges quando a pressão de sucção é negativa. Outros pontos de entrada de ar são na selagem por gaxetas e na tomada da linha de sucção. Esta última, se não tiver a submergência adequada, pode ocasionar a formação de vórtices (redemoinhos) (DRUMMOND, 2006, p. 142). A figura abaixo esboça tal fenômeno:

Figura 15 – Entrada de ar e formação de vórtices



Fonte: Drummond (2006)

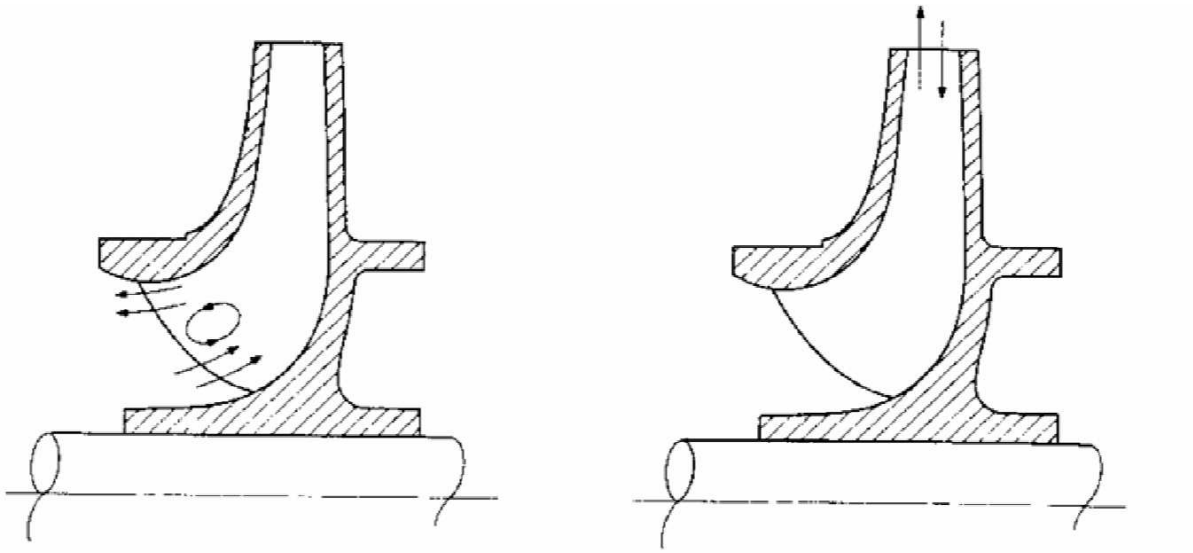
2.8 Recirculação interna

Para Daniel Lopes Misquiati (2005, p. 10), "[...] Recirculação interna é o retorno de uma parte do fluxo contrario ao sentido natural do escoamento. A recirculação na entrada do rotor é chamada de recirculação interna na sucção e a recirculação na saída do rotor é chamada de recirculação interna na descarga".

> A recirculação na sucção causa danos semelhantes à da cavitação por falta de NPSHd, porém a causa desse problema não está relacionado com falta de NPSHd e sim com bombas centrífugas operando a vazões muito baixas, onde ocorre a recirculação do fluido bombeado pela sucção. Essa recirculação cria vórtices que causam danos ao rotor. (GOUVÊA, 2008, p. 19).

É possível atestar tal fato nas imagens a seguir:

Figura 16 – Ilustração da recirculação do rotor



(a) Recirculação na Sucção **(b) Recirculação na Descarga**

Fonte: GOUVÊA, 2008

3 PROPOSTAS DE MELHORAMENTO DO SISTEMA

3.1 Troca das tubulações

Segundo Mattos; Falco (1998, p. 173):

> [...] é fato conhecido que, quando uma bomba opera por um tempo em cavitação, haverá danificação do material adjacente à zona de colapso das bolhas, sendo a quantidade de material perdido dependente das características do material e da severidade da cavitação.

As tubulações das bombas da CAEMA SACAVÉM foram colocadas em uso desde 1962, e são de ferro fundido. Devido à ação do tempo e de problemas causados pela cavitação, se desgastaram e estão em péssimo estado de uso, sendo assim evidente a necessidade da troca dessa tubulação, visando o melhoramento do sistema nas seguintes partes: cavitação, corrosão e erosão.

Para Callister Jr. (2002), a desvantagem principal de muitas ligas ferrosas é a suscetibilidade à corrosão". O ferro-fundido é empregado em meio industrial, pois são os de mais baixo custo; nas tubulações são utilizados em grande escala. Eles são compostos por ferro e cerca de 2,14 a 4,5% de carbono, adquirindo, assim, uma propriedade com as seguintes características:

- ✓ Resistência: É definida pela quantidade de carbono adicionado na formação. Quanto mais carbono, maior a resistência mecânica. Mas isso não inibe a corrosão no material; eles oxidam-se facilmente e suas propriedades deterioram-se a baixas e altas temperaturas;
- ✓ Ductilidade: Diminui com o teor de carbono, fazendo com que o material se torne frágil, ou seja, os efeitos da cavitação terá certa vantagem sobre o mesmo.

  É preciso o emprego de um material com propriedades mais favoráveis à proteção contra esses fenômenos. Neste caso, é preciso mudar o material para o aço, e a alguns acrescentar outros materiais adjacentes a ele para melhorar suas propriedades. Esse novo material recebe o nome de aço inoxidável.

3.1.2 Aço liga

Conforme Callister Jr. (2002), o aço inoxidável é um material ferro-carbono que leva alguns materiais que vêm a incrementar as propriedades do material, aumentando a sua durabilidade com relação aos problemas vistos acima.

Os materiais utilizados são:

- ✓ Cromo (Cr): Melhora a resistência à corrosão e consequentemente a cavitação, resistindo à ação da água e outros fluidos; aumenta a resistência à tração.
- ✓ Cobre (Cu): Melhora a resistência à corrosão por agentes atmosféricos, evitando começos de erosões.
- ✓ Alumínio (Al): Usado em pequenas quantidades, como desoxidante e agente de controle de grãos, esse controle de grãos é essencial para minimizar a cavitação nas tubulações.
- ✓ Vanádio (V): Refina a estrutura do aço, impedindo o crescimento de grãos, minimizando a cavitação.
- ✓ Níquel (Ni): Aumenta o limite de elasticidade, impedindo eventualmente o rápido rompimento do material, que pode ser causado pela cavitação.

Com a mistura desses materiais ao aço, é formada uma liga de intensa propriedade, que reduz os problemas da cavitação, erosão e corrosão, melhorando o sistema de bombeamento de água.

3.2 Aproximação das bombas aos reservatórios

O sistema de abastecimento da CAEMA SACAVÉM retira água do rio Batatã através de bombas que ficam próximas ao rio e enviam para o centro de tratamento. A água que chega à estação de tratamento do SACAVÉM é depositada em um reservatório de água bruta, que tem aproximadamente 5 metros de profundidade e logo em seguida uma parte dessa água, vai para estação de tratamento de água (ETA). Logo em seguida a água é remanejada para os devidos pontos de alimentação da cidade, através das bombas B1, B2, B3 e B4.

Essas bombas ficam em casas de máquinas que se encontram totalmente desgastadas, e isso vem a influenciar no processo de deterioração das mesmas. As bombas encontram-se a uma distância aproximada de nivelamento no mesmo nível superior dos reservatórios, fazendo com que o surgimento da cavitação seja presente. A distância das casas

de máquinas aos reservatórios é de aproximadamente 1,5m. A captação de água do rio Batatã é demonstrada a seguir:

Figura 17 – Bombas de captação do rio Batatã

Fonte: Elaboração própria do autor (2015)

3.2.1 Reduzindo a distância e aumentando o nível de líquido no tanque de sucção

A segunda alternativa para evitar ou reduzir a cavitação é aproximar as bombas o máximo possível dos reservatórios e elevar a altura dos reservatórios em relação às bombas. Porém, elevar a altura dos tanques, tornaria inviável pela quantidade de água e pelo custo que seria muito grande. Então, outra possibilidade seria ampliar a capacidade de volume do tanque para que se reduzissem os riscos de cavitação.

- ✓ Aproximação das bombas B1, B2, B3 e B4: As bombas B1, B2, B3 e B4 estão aproximadamente a 3m de distância dos seus reservatórios de água. Para obter uma redução da cavitação, segundo Mattos; Falco (1998, p. 183), pode-se diminuir essa

distância das bombas ao tanque o máximo possível, aumentando o rendimento da bomba e diminuindo as perdas de carga.

- ✓ Elevação da altura dos reservatórios em relação às bombas: Verificou-se que as bombas B1, B2, B3 e B4 estão quase no mesmo nível de altura dos reservatórios de água bruta e da ETA, isso influencia no aumento de problemas por cavitação. Para Mattos; Falco (1998), a melhor forma de reduzir os riscos de cavitação é elevar a altura dos reservatórios, de forma que a bomba fique afogada. Com isso, a pressão da coluna de líquido aumenta e reduz-se o risco de cavitação; mas em termos de custos para a empresa, ficariam muito elevados os gastos com esse procedimento, visto que os tanques têm um volume muito significativo para tal manobra.

  A solução mais simples e econômica para o problema, sob a visão de RZR Bombas positivas, seria aumentar a capacidade dos tanques (volume) de sucção para aumentar a pressão da coluna de líquido e reduzir os riscos de cavitação. Esta solução só se torna inviável se o reservatório for um rio.

  Podemos ver pela seguinte equação:

$$NPSHd = Ps\uparrow + Pa\uparrow - Pvp\downarrow - Pf\downarrow$$

Onde:

Ps = Pressão exercida pela coluna de líquido acima da linha da bomba

Pa = Pressão absoluta exercida sobre a superfície do líquido no tanque sucção.

Pvp = Pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento

Pf = Perdas de carga na linha de sucção

Aumentando o Ps, diminuem-se os riscos de cavitação, pois o NPSHd tende aumentar.

Abaixo estão ilustradas as casas de máquinas das bombas:

Figura 18 – Casas de máquinas 01 e 02

Fonte: Elaboração própria do autor (2015)

3.3 Aumento do diâmetro das tubulações de sucção das bombas

Outro fator que reduz o risco de cavitação nas bombas centrifuga é aumentar o diâmetro da tubulação na entrada de sucção.

Ao ver de Mattos; Falco (1998, p. 183), "[...] é necessário ter em mente que qualquer alteração nas características físicas da tubulação de sucção ou acessórios, modifica o valor NPSH disponível e naturalmente, terá alteração na vazão que implicará na diminuição ou aumento de perda de carga de sucção".

Uma das possibilidades de melhoramento do sistema de abastecimento CAEMA SACAVÉM é aumentar o diâmetro da tubulação de sucção das bombas, isso implicaria na redução da velocidade devido ao aumento da vazão, e reduziria a perda de carga na tubulação, pois se houve aumento da vazão, a velocidade diminui, e com isso os problemas de cavitação reduziriam.

Em relação ao custo-benefício, esse procedimento é viável porque melhora o rendimento das bombas, e reduz os problemas com cavitação, no qual tem-se um prejuízo muito alto quando se comparado a um investimento desse porte.

Para Mattos; Falco (1998, p. 98), "[...] A estimativa do diâmetro da tubulação de sucção de uma bomba é dada de acordo com a equação de continuidade", a saber:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} . V \qquad D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$$

OU

$$D = 1{,}128 \sqrt{\frac{Q}{V}}$$

Onde:

D = Diâmetro da tubulação

Q = Vazão do fluido

V = Velocidade do fluido

A equação acima dará uma estimativa do diâmetro de tubulação a ser utilizado na sucção da bomba. A tabela abaixo fornece valores de velocidade recomendada para tubulações de sucção operando com água e outros tipos de fluidos de propriedades diferentes.

Aumentando o diâmetro de 260mm² para 520mm² na entrada do flange de sucção, a velocidade cai, vindo a reduzir os riscos com cavitação na entrada de sucção da bomba.

Substituindo os valores na equação acima, temos:

$$260 = 1{,}128 \sqrt{\frac{280}{V}} \quad : . \text{ V} = 0{,}26\text{m/s}$$

Para reduzir os riscos de cavitação na entrada de sucção da bomba o diâmetro deve ser aumentado.

$$520 = 1{,}128 \sqrt{\frac{280}{V}} \quad : . \text{ V} = 0{,}19\text{m/s}$$

Dobrando o diâmetro na entrada de sucção a velocidade tem uma redução que influencia diretamente no aumente de pressão, reduzindo os riscos de cavitação.

Figura 19 – Velocidade recomendada para tubulações de sucção

Diâmetro de tubulações		**Água**		**Óleos leves**		**Líquido saturados**		**Líquidos viscosos**	
in.	mm	ft/s	m/s	ft/s	m/s	ft/s	m/s	ft/s	m/s
1"	25	1,5	0,50	1,5	0,50	1,0	0,300	1,0	0,300
2"	50	1,6	0,50	1,5	0,50	1,0	0,300	1,1	0,330
3"	75	1,7	0,50	1,6	0,50	1,0	0,300	1,2	0,375
4"	100	1,8	0,55	1,8	0,55	1,0	0,300	1,3	0,400
6"	150	2,0	0,60	2,0	0,60	1,1	0,350	1,4	0,425
8"	200	2,5	0,75	2,3	0,70	1,2	0,375	1,5	0,450
10"	250	3,0	0,90	3,0	0,90	1,5	0,450	1,7	0,500
12"	300	4,5	1,40	3,0	0,90	1,5	0,450	1,7	0,500
acima de 12"		5,0	1,50						

Fonte: Mattos; Falco (1998)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho, a partir de estudos bibliográficos correlacionado com estudo de caso, teve como objetivo propor ideias para o melhoramento do sistema de bombeamento da CAEMA SACAVÉM, a fim de reduzir os problemas causados pela cavitação.

A aplicação dessas manobras no quadro de bombas estudada poderia reduzir os gastos da empresa com manutenção e melhorar o sistema de abastecimento.

De modo geral, foram apresentadas propostas viáveis, visando custo e benefício para o melhoramento do sistema. No caso da troca das tubulações, mesmo o custo sendo mais elevado em relação ao material anterior, vale ressaltar que é um investimento custo-benefício favorável, devido ao grande tempo de durabilidade e resistência à cavitação em relação ao outro material antigo das tubulações. Como o fluido trata a água para abastecimento e consumo de pessoas, a troca dessas tubulações deve ser feita o mais rápido possível, por conta da deterioração encontrada no material, que solta partículas oxidadas, as quais podem ser arrastadas pela tubulação e contaminar a água.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Carlos Farias de; OLIVEIRA, Paula Gusmão; *et. al*. **Aços para tubulações** – Materiais de construção mecânica. Vitória: UFES-CETEC, 2009.

ANDRADE, Alan Sulato de. **Máquinas hidráulicas AT – 087**. Disponível em: http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT087-Aula04.pdf. Acesso em: 02 de setembro de 2015.

CALLISTER JR, William D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 5. ed. Sérgio Murilo Stamile (trad.). Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CNI – Confederação Nacional da Indústria; IEL – Núcleo Central ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Bombas: guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2008.

DRUMMOND, Getúlio V. PETROBRAS Petróleo Brasileiro. **Manutenção e Reparo de Bombas** Rio de Janeiro – RJ. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br>. Acesso em: 15 de març. de 2015, às 9h.

GONÇALVES, Matheus Donadio Gonçalves. Re**-dimensionamento de uma bomba centrífuga para o sistema de combate a incêndio de uma planta industrial**. Rio de Janeiro, UFRJ: 2014, 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso.

GOUVÊA, Marcos Martins Rezende de. Estudo de confiabilidade em bombas centrífugas. Campinas/SP: Universidade São Francisco, 2008. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso.

INDÚSTRIAS SCHNEIDER S.A. **Manual técnico**. Joinville/SC, Maio de 2001. (Apostila).

LEITE, João. **Cavitação em bombas centrífugas**. Disponível em: <http://www.industriaeambiente.pt/xFiles/scContentDeployerIA_pt/docs/Doc1443.pdf>. Acesso em: 30 de set. de 2015, às 14:56.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1987.

MATTOS, Edson Ezequiel; FALCO, Reinaldo de. **Bombas industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

MISQUIATI, Daniel Lopes. **Análise das condições operacionais de bombas hidráulicas de fluxo radial de grande porte**. São Paulo, USP: 2005, 86 p. Dissertação de Mestrado.

RZR Bombas positivas. **Entenda o que é NPSH**. Disponível em: <http://www.rzrbombas.com.br/suporte/entenda-o-que-e-npsh-e-como-evitar-a-cavitacao>. Acesso em: 24 de sete. de 2015, às 10:00.

SANTOS, Sérgio Lopes dos. **Bombas e instalações**. São Paulo: LCTE Editora, 2007.

WENT, Bob. **Novo artigo sobre como evitar a cavitação de bombas**. 2014. Disponível em: <http://impeller.xyleminc.com/pb/edificios-comerciais-e-residenciais/2014/11/25/novo-artigo-sobre-como-evitar-a-cavitacao-de-bombas>. Acesso em: 29 de set. de 2015, às 20:11.