

Confiabilidade de Bombas Centrifugas

Autores:

Eneas F S Vasconcellos (1)

Alfredo J. G. Borba (2)

Murilo T. Tavares (3)

Resumo

Este trabalho descreve as principais características a serem especificadas para as bombas centrífugas de modo que as mesmas apresentem alta confiabilidade industrial expressa em um tempo médio entre falhas de pelo menos 4 anos, considerando que 3 anos de operação ininterrupta é um mínimo exigido pelo API-610.

São descritos alguns fenômenos físicos atuantes em bombas centrífugas, que podem ser prejudiciais, como as forças radiais e axiais atuantes, a cavitação, e o surge hidráulico.

Exigências de comportamento hidráulico e robustez mecânica são determinados;

Uma lista de recomendações contendo as boas práticas que pela experiência dos autores são fundamentais para atingir-se a confiabilidade desejada é apresentada.

São exibidos dois casos, da indústria petroquímica, para exemplificar uma correta especificação e a correspondente confiabilidade obtida;

(1) Engenheiro mecânico _ UFBA; especializado em engenharia de manutenção_ Petrobras; MBA em gestão de negócios_ Dom Cabral; com 38 anos na Petrobras na indústria petroquímica em diversas funções, entre elas, engenheiro de planta, gerente de engenharia, gerente de inspeção de equipamentos, gerente de manutenção e gerente confiabilidade; Atualmente Diretor de Engenharia da AlphaEM Consultoria e eng.

(2) Engenheiro mecânico _ UFBA; especializado em engenharia de manutenção_ Petrobras, MBA em gestão de negócios e gestão de projetos_ FGV; com 38 anos na Petrobras na indústria petroquímica e refino em diversas funções, como, engenheiro de planta, gerente de manutenção mecânica, e gerente de engenharia e de comissionamento equipamentos na área de implantação de empreendimentos; atualmente Diretor de Técnico da AlphaEM Consultoria e eng.

(3) Engenheiro mecânico _ UFBA; especializado em engenharia de manutenção_ Petrobras; MBA em gestão de projetos_ FVG e PMP pelo PMI; com 38 anos na Petrobras na indústria petroquímica e de refino em diversas funções, como, engenheiro de planta, gerente de manutenção, gerente de planta e gerente de implantação de empreendimentos; Atualmente Diretor de Empreendimentos da AlphaEM Consultoria e eng.

Sumário

1. Introdução
2. Bombas centrífugas
3. Confiabilidade Industrial
 - 3.1. Confiabilidade
 - 3.2. A demanda da Indústria
 - 3.3. O que exige o API 610 - Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries, 11a. Edição
 - 3.4. Performance possível aplicando os requisitos deste trabalho;
4. Fenômenos físicos atuantes fundamentais à confiabilidade;
 - 4.1. Forças radiais
 - 4.2. Força axial
 - 4.3. Cavitação
 - 4.4. Surge hidráulico
5. Robustez mecânica
6. Requisitos para bombas de alta confiabilidade
7. Casos representativos da aplicação dos requisitos para alta confiabilidade recomendados neste trabalho
 - 7.1. Bomba de recuperação de condensado
 - 7.2. Bombas de solução de uréia
8. Referências bibliográficas

1. Introdução

Bombas centrífugas são equipamentos muito utilizados em praticamente todas as atividades humanas, do abastecimento de água para os nossos lares, passando pela agricultura e indústria, especialmente as indústrias de processo.

As indústrias, em especialmente as indústrias de processo, não poderiam existir sem as bombas, notadamente as centrífugas, em uma gama enorme de serviços, desde o bombeio das águas, prediais, de processo, de caldeiras, à uma lista muito grande de produtos químicos.

Nas plantas de processo, nossa maior preocupação, como engenheiros de planta, podemos dizer que, as bombas centrífugas em número, depois dos instrumentos, são os equipamentos em maior quantidade.

Da importância não há qualquer dúvida. Nas indústrias de processo, a grande maioria das bombas centrífugas estão localizadas em postos de trabalho que se

falham em sua função, as plantas reduzem a capacidade, podendo até mesmo parar dependendo desse posto.

Desta forma, as bombas centrífugas se revestem de grande importância, o que explica o grande interesse da academia em estudar este tipo de equipamento e da indústria na aplicação prática da ciência, para prover o mercado com produtos de qualidade para todos os tipos de aplicação.

Neste sentido são incontáveis os tipos e modelos de bombas centrífugas e o número de indústrias, mundo afora, que produzem este tipo de bem.

Com a relação a confiabilidade, não há o que questionar, a confiabilidade das plantas industriais em entregar os fatores de utilização (FUT) requeridos dependem diretamente da confiabilidade intrínseca das bombas centrífugas.

Os fatos acima citados são a razão e motivação para escrevermos este trabalho técnico, fruto de nossa vivência de mais de 38 anos, na indústria do refino e petroquímica, na aplicação deste tipo de equipamento.

2. Bombas Centrífugas

Bombas são máquinas para transferir, ou empurrar, fluidos de uma situação de menor energia para uma zona de maior energia, realizando assim um trabalho. Esse transferir ou empurrar é chamado de bombear, daí o termo bomba.

As bombas chamadas centrífugas, são assim referidas, porque o princípio de funcionamento destes equipamentos é por centrifugação dos fluidos. Para realizar tal trabalho, as bombas centrífugas usam os seus dois principais componentes, que são o impelidor e a carcaça.

O impelidor girando em alta rotação, centrifuga as partículas de fluido de seu centro para a extremidade, que encontrando a carcaça, onde, devido um formato próprio desta, transforma a velocidade do fluido, imposta pela centrifugação, em pressão. Novas partículas tomam o lugar daquelas centrifugadas do centro do impelidor, e assim, se estabelece um fluxo de uma zona de baixa pressão para uma de alta.

Nas bombas centrífugas, como nas bombas em geral, a energia mecânica do impelidor, é transformada em energia de pressão no fluido. Esta é a finalidade do equipamento.

Se nesse processo o ganho de pressão for em mais de um impelidor e bomba será chamada, bomba centrífuga multi-estágios;

Ver figuras 1 a 6, abaixo.

Fig-1 _ Voluta em caracol

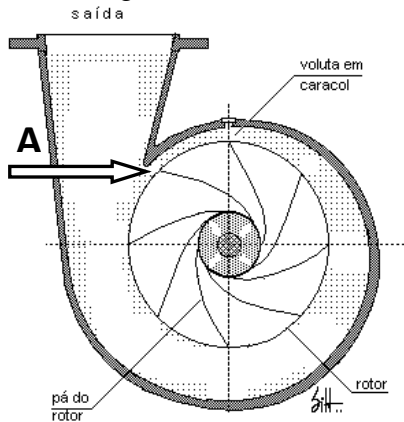


Fig-2 _ Voluta Dupla

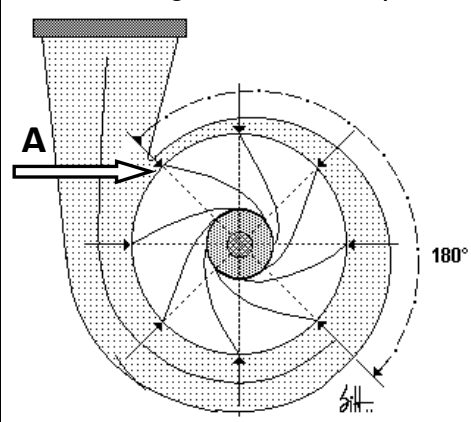


Fig-3 _ Bomba Centrífuga

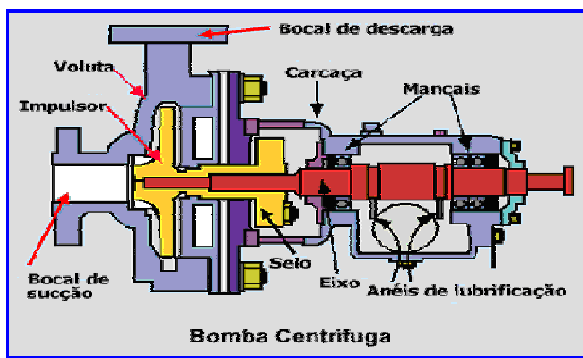


Fig-4 _ Curvas

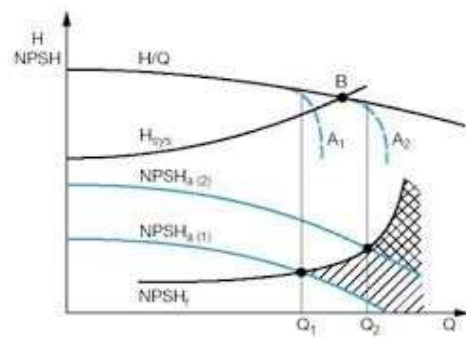


Fig-5 _ Bomba Multi-estágio

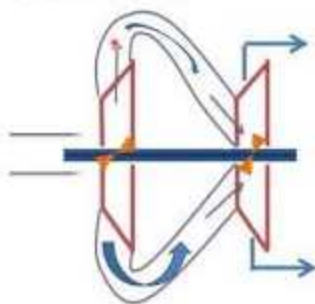
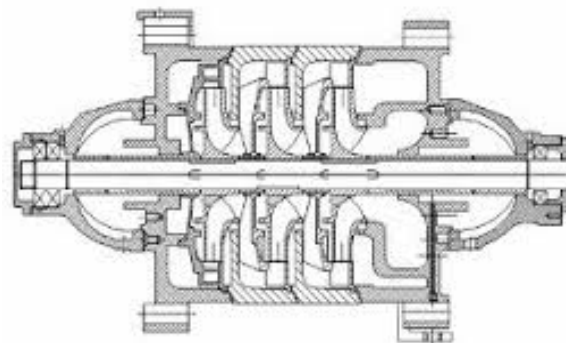


Fig-6 _ Bomba Multi-estágio



3. Confiabilidade Industrial

3.1. Confiabilidade

É expressa como a probabilidade de um equipamento realizar 100% da função especificada, em termos capacidade e eficiência, dentro de um intervalo de tempo preestabelecido.

3.2. A demanda da Indústria

As indústrias do petróleo, a petroquímica, a indústria de geração de energia, e afins, são constituídas de plantas de altíssimo custo de instalação e que requerem custos fixos operacionais também muito elevados, e desta forma, para se viabilizarem, precisam de operar em altíssima performance, o que quer dizer alta confiabilidade industrial.

Em termos de números, é esperado que essas plantas operem com fatores de utilização (FUT) médio acima de 90%.

Para tal, é essencial que os equipamentos em geral, entre eles as bombas centrífugas, que existem em grande quantidade nestas plantas, tenham cada uma individualmente uma alta confiabilidade, o que em números quer dizer, que tenham um Tempo Médio Entre Falhas (TMEF) de pelo menos três anos.

3.3. O que exige o API 610 - Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries, 11a. Edição

Para as bombas centrífugas industriais, para serviço pesado em refinarias, petroquímicas e plantas de geração de energia, conforme especifica a norma americana API 610-11a. edição, espera-se que realizem seu trabalho sem queda de eficiência por pelo menos 3 anos ininterruptos.

3.4. Performance possível aplicando os requisitos deste trabalho;

É plenamente possível atingir-se um TMEF acima do mínimo preconizado acima pelo API e chegar-se acima de 4 anos. Serão apresentados dois casos, onde, seguindo as recomendações deste trabalho, este TMEF foi superado;

4. Fenômenos físicos atuantes fundamentais à confiabilidade;

4.1. Forças radiais

Ao passar pelo impelidor nas bombas centrífugas, devido a mudança de velocidade e direção, o fluido observa uma mudança brusca de energia. É uma característica inerente a esse tipo de bombas.

Esta mudança de estado do fluido, acarreta o surgimento de forças radiais atuantes ao longo na periferia dos impelidores. Conseqüentemente, aparece uma força resultante, que tende a flexionar o eixo, gerando um momento fletor. Essa força precisa ser minimizada. Ver figuras 7 e 8 abaixo.

Ocorre que, no projeto de bombas centrífugas, é impossível minimizar essa força resultante em todas as vazões e pressão ao longo da curva característica do equipamento, existindo, portanto, uma força resultante para cada ponto de operação como se observa na figura 7, abaixo. Esta força resultante é mínima em torno do ponto de máxima eficiência do equipamento, o qual é chamado simplesmente de BEP (do inglês *Best Efficiency Point*)

A questão central que surge, é a escolha da bomba, em determinado fabricante, cujo BEP coincida com o ponto operacional desejado. Neste caso, nosso eixo e mancais estarão trabalhando em carga mínima, o que quer dizer vida mais longa para esses itens, e para o selo mecânico que enfrentará deflexões mínimas do eixo e terá assim também vida mais longa.

Fig-7_ Força Radial resultante (F)

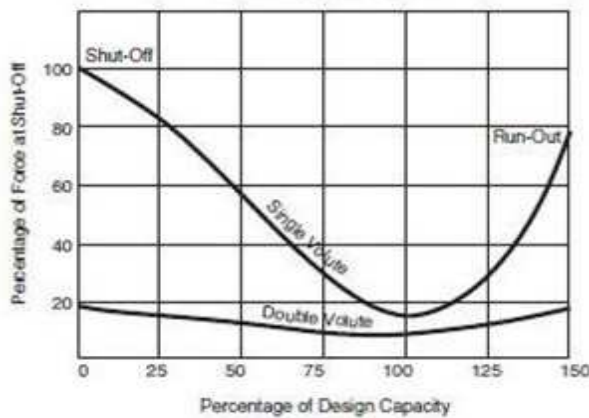


Fig-8_ Força Radial resultante (F)

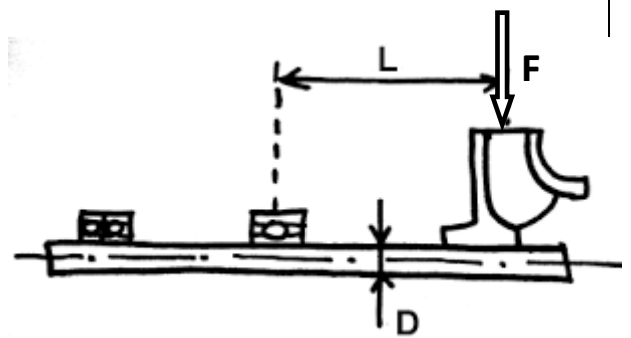


Fig-8a _ Forças radiais dupla voluta

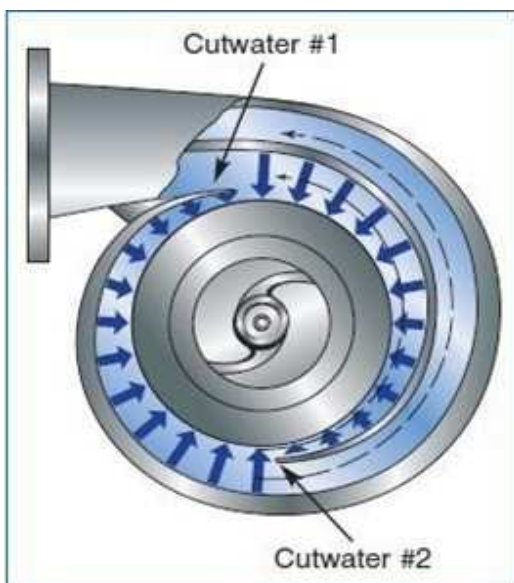
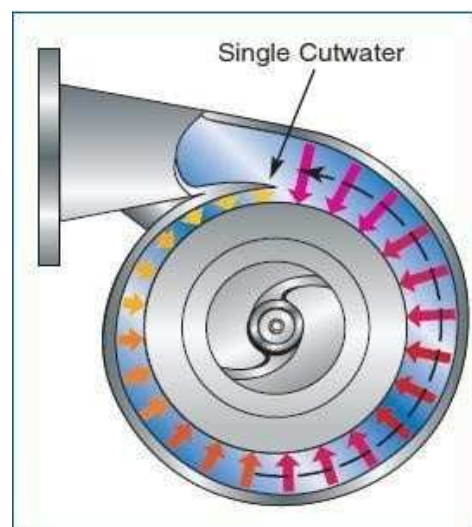


Fig-8b _ Forças radiais voluta simples



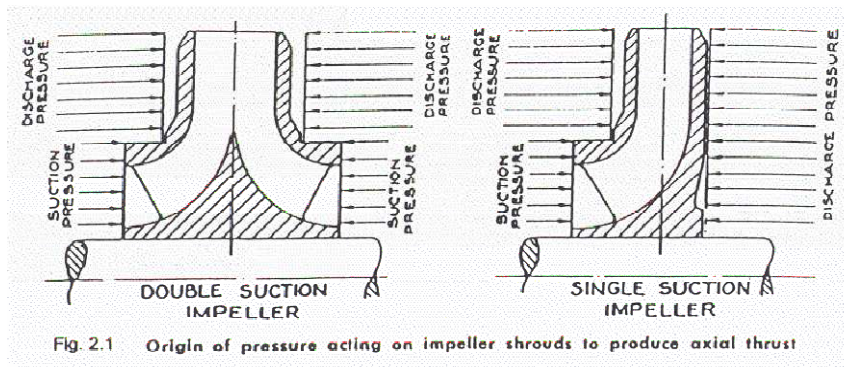
4.2. Força axial

Todas as bombas centrífugas desenvolvem em seu eixo uma força axial resultante, que é função da diferença de pressão entre a sucção e a descarga e das dimensões do impelidor.

Essa força precisa ser minimizada, e também varia ao longo da curva característica. Em geral, tal como a força radial, tem seu ponto mínimo em torno do BEP e máximo no ponto de vazão zero (*shut off*). A solução de engenharia tem sido a instalação de furos de balanceamento no impelidor para bombas simples estágio, e adição de tambor de balanceamento em bombas multi-estágio.

Observa-se que, durante uma campanha operacional, é comum que as folgas impelidor /carcaça aumentem por roçamentos e erosão devido a fuga de fluidos. Nesta situação, com o aumento da fuga de fluidos, o empuxo axial tende a aumentar, representado maior sollicitação aos mancais axiais.

Quanto à especificação, a atenção aqui é ter uma bomba hidráulicamente bem balanceada e com mancais axiais bem dimensionados. O API 610, 11a ed. tem um anexo específico quanto ao dimensionamento de mancais. A figura 2.1 abaixo, dá uma ideia da atuação destas forças no rotor.



4.3. Cavitação

Ao passar pelo impelidor, devido a centrifugação recebida pelo fluido, gera-se no centro, ou olho do impelidor, uma zona de baixa pressão, estabelecendo-se o fluxo entrando no bomba.

Esta baixa pressão no olho do impelidor será tanto menor quanto menor for a energia disponível no fluido ao entrar do mesmo. Esta energia é medida em termos absolutos.

O projeto de bomba centrífuga tem que lidar com este problema: Fluidos vaporizam, quando baixamos sua pressão absoluta abaixo de determinado valor, chamada de pressão de vapor do fluido, e nas bombas centrífugas, sempre haverá abaixamento de pressão no olho do impelidor.

O fenômeno da vaporização do fluido, e posterior implosão das bolhas, no olho dos impelidores das bombas, zona de menor pressão, chama-se "Cavitação", e ocorre quando a pressão do fluido no olho do impelidor iguala a pressão de vapor do mesmo. Esta pressão é teoricamente a pressão mínima requerida pelo equipamento para trabalhar.

Cada projeto de bomba, pelas características do rotor, tais como o ângulo de entrada das pás, diâmetro no olho, largura, etc., dita a energia mínima requerida para estabelecer-se o bombeio centrífugo sem cavitação.

Essa é uma importante característica das bombas centrífugas, a capacidade de receber e impulsionar fluidos de menor energia sem cavitatar. Quanto menor a energia absoluta requerida do fluido na sucção, melhor é projeto na bomba.

O nível de energia requerido por cada tipo de impelidor para bombear sem cavitatar, chama-se, em língua inglesa, Net Positive Suction Head 3% (NPSH3). Este requisito individual de cada equipamento, depende de seu projeto.

O valor deste NPSH3 estimado pelo projeto, e que consta nos catálogos das bombas, devem ser medidos em teste de bancada, em especial para as bombas em serviços mais críticos. O API 610_11Ed., define que todos equipamentos adquiridos, segundo essa norma, devem ter a determinação do NPSH3 em bancada.

Observar que, é de fundamental importância que o sistema em que a bomba vai operar supra com sobra esse NPSH3. Caso contrário a bomba não vai operar bem, e não debitar a vazão requerida.

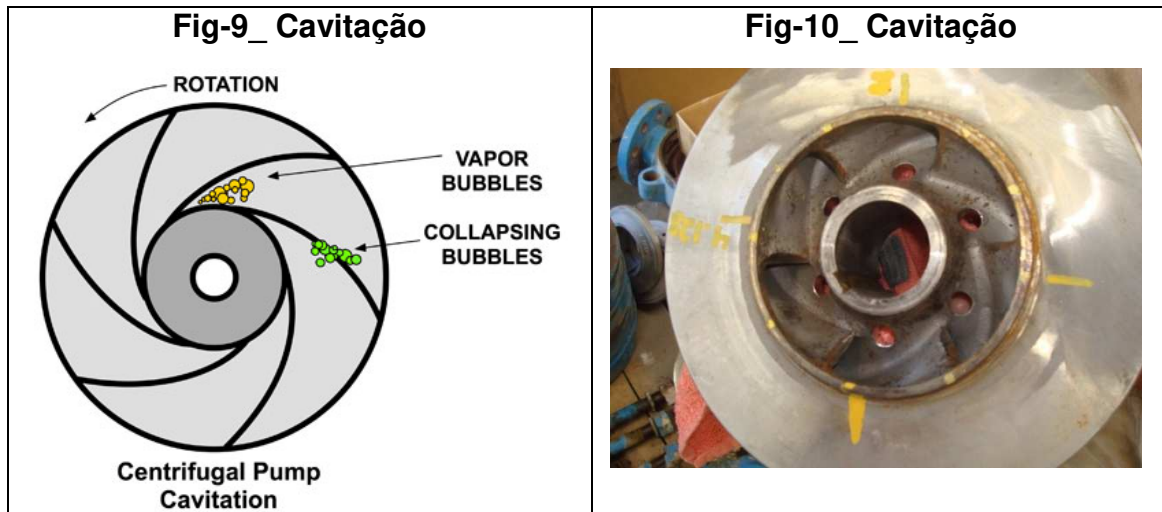
O principal problema da ocorrência da cavitação é a perda de geração da pressão requerida em dada vazão. Veja-se que o teste de bancada NPSH3, preconizado pelo Hydraulic Institute, consiste em medir-se a perda de head em relação ao esperado em dada vazão, conforme a curva característica.

Neste teste, conclui-se que a energia mínima do fluido no olho do impelidor, que permite bombeio, chamada NPSH3, é aquela quando a perda de head chega a 3%.

Mas, em geral, para as bombas de alta vazão e baixos heads, é possível acontecer o que se conhece como **cavitação incipiente**, quando o número de bolhas de vapores formadas ainda não é suficiente para baixar o head, mas já é capaz de ao implodir, na fase seguinte à formação das mesmas, arrancar materiais das pás e paredes do impelidor formando pittings, que uma vez formados tendem a aumentar ainda mais o volume da cavitação. Ver fig. 9 e 10.

Quando a cavitação incipiente ocorre, em geral não há ainda problema de entrega de pressão e vazão, mas os rotores seguem degradando, ver figura 9. Neste caso, se o sistema não conseguir disponibilizar mais NPSH, conforme o que seja de menor custo, deve-se trocar a bomba por outra com menor NPSH3, ou os materiais dos impelidores devem ser melhorados, adotando-se ligas mais resistentes.

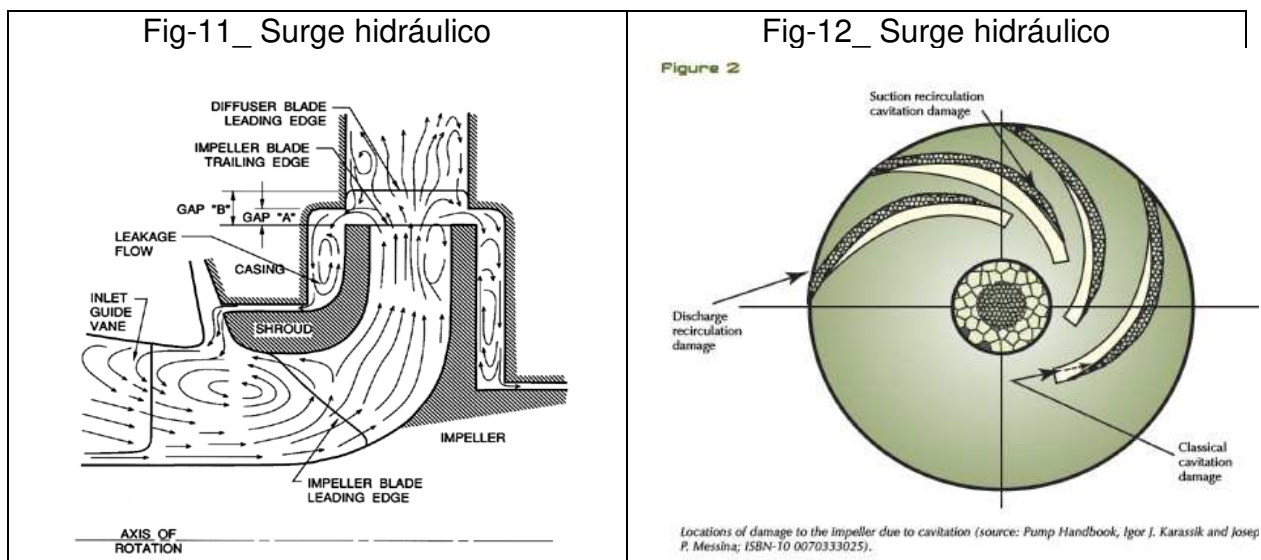
O movimento de bolhas formando e colapsando tende a gerar ruído característico, crepitante, e também alguma vibração.



4.4. Surge hidráulico

O surge hidráulico é o fenômeno que ocorre quando o fluxo na sucção saindo para a descarga se descola e retorna criando vórtices na sucção. O mesmo pode acontecer também na descarga, onde o fluxo saindo na ponta da pá retorna formando redemoinhos.

Este fenômeno também é chamado de recirculação de sucção ou recirculação de descarga dependendo em que região do impelidor ele se forma. Ver Fig-11, e Fig-12 abaixo.



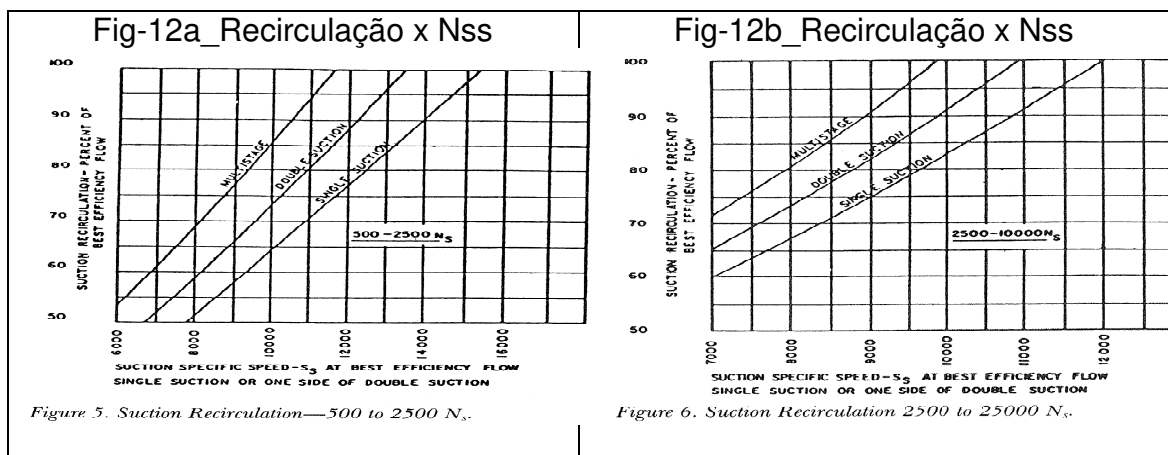
Não são fenômenos frequentes pois tendem a ocorrer apenas em bombas com rotores de alta energia por estágio e ou, altas vazões.

A recirculação de sucção, em bombas de média para altas vazões, não necessariamente de alto head, é a mais frequente.

A recirculação de descarga é mais rara, pois tende apenas a ocorrer em rotores de alto head por estágio, e vazões médias, em equipamentos com curvas mais planas de baixa velocidade específica (N_s), e quando as bombas estão operando muito a esquerda, digamos abaixo de 50% do BEP. Entretanto, bombas centrífugas com todas estas características, tendem a ter um ponto de início de recirculação mais próximo do BEP.

Para bombas centrífugas pequenas, a recirculação é mais rara, acontecendo, sempre em operação em pontos bem a esquerda do BEP (<30%).

Para bombas de vazões mais altas, com alta velocidade específica de sucção ($N_{ss} = \text{rpm} \cdot Q^{0,5} / \text{NPSH}^{0,75}$), quando a relação entre o diâmetro do olho do impelidor e o diâmetro externo tende a crescer, o início da recirculação de sucção se aproxima perigosamente do BEP. Ver figura 12a e 12b abaixo. Por isso, ouve-se muito de usuários, que bombas de alto N_{ss} tendem a ter baixa confiabilidade, com recirculação de sucção quase sempre presente.



Em ambos os casos, parece haver certa correlação entre o aparecimento desses fenômenos e uma alta relação entre o diâmetro do olho do impelidor e o diâmetro externo. Neste caso, distúrbios como vórtices já vindos da tubulação de sucção são mais fáceis de serem admitidos pelos rotores, assim induzindo a recirculação;

Esses dois fenômenos podem, em certas situações, não causar perda de head e vazão, mas em geral causam danos mecânicos reduzindo a vida útil de componentes, reduzindo o TMEF do equipamento. A recirculação de sucção perturba mais pela erosão de impelidores, e a recirculação de descarga, mais severa, além da erosão tende a causar desequilíbrio de forças radiais e axiais levando a quebra de eixos, e a redução da vida útil de mancais e selos.

Em ambos os casos observam-se ruídos característicos e pulsação nas pressões de sucção e descarga.

Os dois tipos de recirculação, via de regra, estabelecem-se mais quando opera-se em vazões bem à esquerda do BEP, digamos, abaixo de 50%, à exceção das bombas de alto Nss, que recirculam na sucção em vazões bem mais próximas do BEP

Estes fenômenos serão prevenidos com:

- 1) Operar bombas próximas ao BEP (+/- 90 a 105%)_ Ambas;
- 2) Evitar bombas de alto head por impelidor. Na necessidade de altos heads, dar preferência a bombas multi-estágio _ Recirculação de descarga;
- 3) Evitar bombas de alto Nss _ Recirculação de sucção;
- 4) Evitar bombas de baixas velocidades específicas (Ns)_ Recirculação de descarga;
- 5) Projetar as tubulações de sucção de modo a garantir-se um fluxo de entrada sem vórtices e o mais linear possível _ Ambas
- 6) Para as bombas de médias vazões em diante, em aplicação de adutoras, por exemplo, usar nos impelidores, materiais que sejam mais resistente à cavitação gerada pela recirculação de sucção.

5. Robustez mecânica

Com descrevemos acima, todos esses fenômenos físicos geram, de uma forma ou de outra, forças que estressam os componentes vitais, como eixos, rotores, selos e mancais.

O torque e a força radial são equilibradas no projeto, mas o melhor equilíbrio, onde se tem o maior coeficiente de segurança entre a resistência dos materiais e as forças atuantes são em pontos operacionais bem próximos do BEP. Vide Fig.-7 abaixo. Quanto maior este coeficiente de segurança, maior será a confiabilidade.

As figuras abaixo dão uma boa ideia de como o eixo é solicitado. Observa-se que são diversas forças que torcem e flexionam ao mesmo tempo. Como mostrado anteriormente forças radiais e axiais, e as forças oriundas do surge hidráulico, quando ocorrem, tem magnitude não só para danificar selos e mancais, mas até para quebrar eixos.

Fig-7_ Força Radial resultante (F)

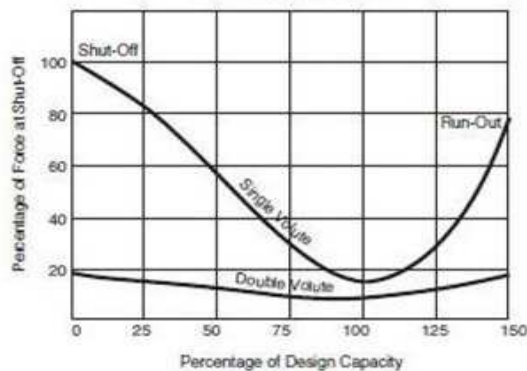
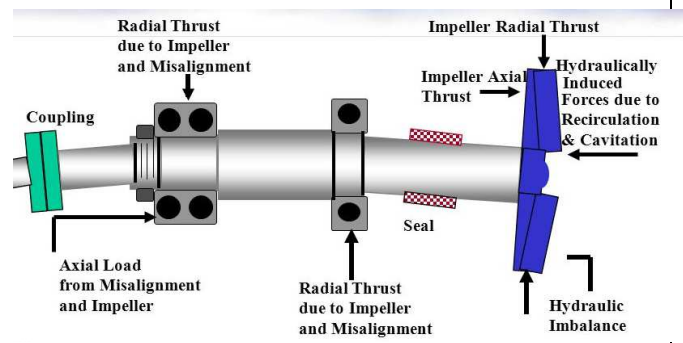


Fig-13_ Tipos de forças atuantes no rotor



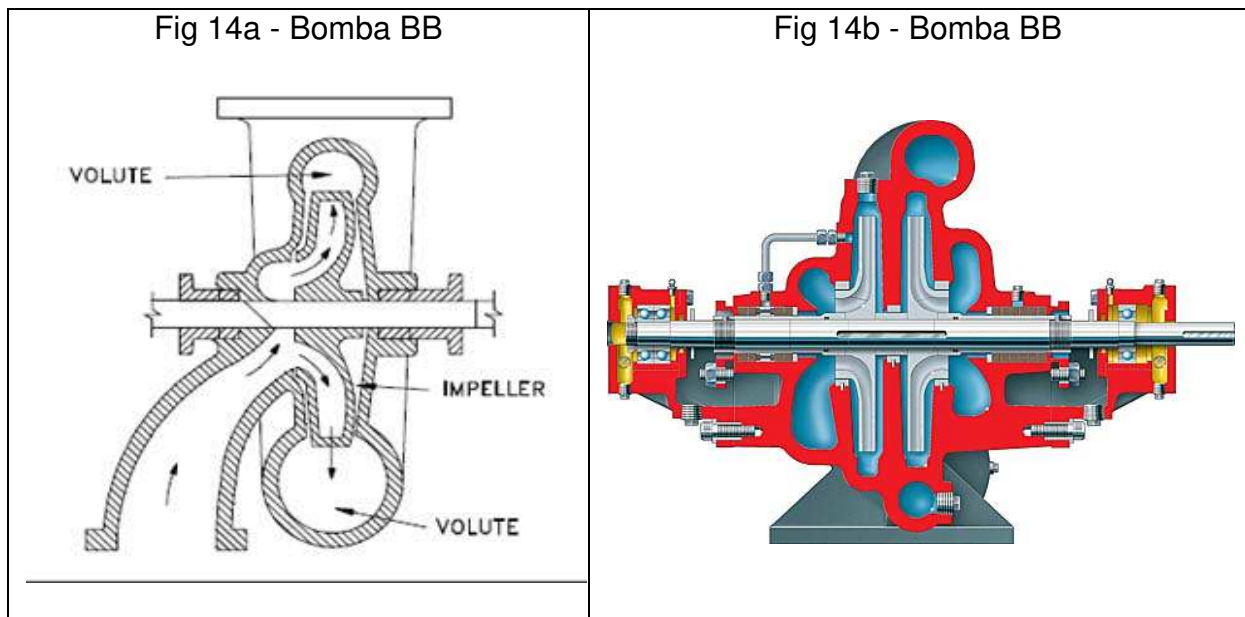
Dito isto passa-se a entender do porque, bombas para alta confiabilidade, além da adequação hidráulica, em ter o ponto de operação próximo ao BEP, deve ter uma boa robustez mecânica expressa em eixos mais rígidos e mancais mais robustos conforme exigências do anexo K, secções k1 e k2 do API 610, 11Ed.

A tabela 1, abaixo, mostra um case de três refinarias de petróleo, que fizeram conversões da parte mecânica de certo numero de suas bombas para atender ao anexo K do API acima citado. Observa-se que as bombas convertidas de cada uma dessas três refinarias apresentaram um grande incremento no TMEF.

Refinaria	No. de conversões	No. falhas antes conversões	No. falhas pós conversões	TMEF (meses) antes conversões	TMEF (meses) pós conversões
A	16	129	11	16	46
B	9	73	3	20	88
C	19	143	10	21	47
Total	44	351	24	19	52

Ainda, quando o posto de trabalho requer confiabilidade máxima, nas aplicações críticas de processo, as bombas BB (between bearing), Figs.- 14a e 14b abaixo, são uma alternativa muito usual. São projetadas para que as forças sejam suportadas em um arranjo de viga bi-apoiada, o que para um mesmo span de eixo necessário para suportar os rotores requeridos, reduz bastante os momentos atuantes, e assim as respectivas forças resultantes.

Entretanto é possível observar que é uma alternativa bem mais onerosa que as bomba com rotor em balanço *back pull out*.



Finalizando esta discussão, pode-se dizer que esta posta apenas uma questão de engenharia, que é escolher o melhor custo benefício entre capital empregado (bombas mais robustas são mais caras) e o nível de confiabilidade desejado (mais confiabilidade implica em mais lucros operacionais). Em geral os gastos de capital são amplamente pagos pelo ganho no TMEF destes equipamento.

6. Requisitos para bombas de alta confiabilidade

A seguir descreve-se as exigências, que conforme nossa experiência, uma vez aplicadas, levarão a aquisição de equipamentos de alta confiabilidade, com TMEF de pelo menos 4 anos.

Vale destacar, que na dificuldade de implantar todos esses itens abaixo recomendados, persiga-se pelo menos a aplicação dos 4 (quatro) primeiros. Os resultados já serão muito bons.

6.1. O ponto de projeto (rated point) deve estar o mais próximo possível do BEP. Recomenda-se que esteja, na situação ótima, entre 90 e 105% do BEP do equipamento comprado. Esta talvez seja a providencia mais efetiva, pois evitará o surgimento de fenômenos como surge hidráulico, e forças radiais e axiais em excesso, que incrementam a sollicitação de eixos, mancais e selos.

Observar que o ponto de projeto deve ser definido de forma bem acurada. Super-dimensionamentos devidos a incertezas de processo e falta de conhecimento das necessidades operacionais são muito frequentes. Evite-se isto, porque redundante na aquisição de bombas, em geral, bem maiores que o realmente necessário, levando a um BEP adquirido muito à direita do ponto operacional real, e ai, falha-se na aplicação desta recomendação.

6.2. Usar rotações menores possíveis. Isto diminui fortemente a solicitação de eixo, mancais e selo. Como visto no item 4.4, acima, a rotações menores implicam em Nss menores, o que é salutar em relação ao aparecimento de surge hidráulico.

1800 rpm parece um valor ideal em custo benefício. É certo que quanto menor a rotação maiores serão rotor e carcaça, mas a confiabilidade, só com a aplicação deste item, aumenta fabulosamente.

6.3. Caixa de mancais seladas com bearing guard_ Esta exigência preserva a lubrificação dos rolamentos contra contaminações de líquido e poeiras. Estudos mostram que porções mínimas de umidade, destroem a capacidade de lubrificação dos óleos lubrificantes.

6.4. Não usar o impelidor máximo oferecido pelos catálogos dos fabricantes. Esses impelidores máximos diminuem a folga impelidor /voluta no ponto A das fig-1 e Fig-2 do Item (2) deste trabalho, enrijecendo a massa fluida, incrementando a força oriunda dos choques fluido/impelidor em cada passagem de pá naquele ponto A. Choques minimizados implicam em menos roçamentos e solicitações dos componentes vitais.

Entretanto, é certo, que a eficiência máxima de uma bomba ocorre com o impelidor no tamanho máximo, por isso, reduções de 3 e 8% no tamanho máximo são um bom custo benefício.

6.5. As caixas de selos devem ser volumosas e serem providas de ventos. Selos tem faces que dependem muito de refrigeração para performar bem.

6.6. Eixos e Rolamentos devem ter alta robustez. Em principio, deve-se seguir o especificado pelo API 610 _ 11a. Ed. para estes itens. Isto garante, que mesmo que não acertemos no item 5.1 acima, não haverá deflexão excessiva de eixo que causa roçamento de anéis, o que incrementa ainda mais a solicitação de selos e mancais.

6.7. Nas bombas de médias para altas vazões, ter atenção especial com a especificação dos materiais dos impelidores para prevenir danos por cavitação incipiente.

6.8. Para controle de vazão, em vez de válvulas de controle, que bloqueiam o fluxo na descarga das bombas distanciando o ponto de operação do BEP, usar variadores de frequência nos motores elétricos, de modo que, por controle de rotação, se ajuste o BEP da bomba, aproximando-se este do ponto operacional requerido naquele momento. Esta ação, pelo que se descreveu neste trabalho, além de ser muito boa medida em incremento de confiabilidade, resultará em um ganho extra com a redução do custo operacional (energia gasta).

Importante: Observa-se aqui, que as recomendações deste item (6), não representam todas as preocupações relativas a obtenção de uma alta performance, porem, são de longe aquelas mais fortes, até porque, as demais questões tem sido bem resolvidas pela engenharia de fabricantes e empresas

de engenharia, como é o caso da cavitação clássica por falta de NPSH, das margens de potência, e da inspeção de fabricação, por exemplo.

7. Casos representativos da aplicação dos requisitos para alta confiabilidade recomendados neste trabalho

7.1. Bomba de recuperação de condensado

7.1.1. Características

São bombas centrífugas de processo em planta petroquímica, instaladas ao tempo, bombeando condensado de processo quente. São simples estágio, tipo back pull out, assim com rotor em balanço. O equipamento tem as seguintes características de projeto:

Q_Vazão (m3/h)	Pressão de sucção(Kg/cm2)	Pressão de descarga(Kg/cm2)	Fluído	Head (m)	Potencia (CV)	N (rpm)
22,5	0,115	12,46	Condensado	129,17	22,5	3490

NPSH3 (m)	NPSHd (m)	Pressão vapor (Kg/cm2 abs)	Test NPSH3	Rendi_ mento (%)	Fabricante	Curva do Fab.	Q_Vazão % BEP
1,3	4,0	0,715	Sim	41	Sulzer Weise	D. 1700. 14.03/2	70%

TB (oC)	Ns	Nss	Diâmetro rotor de projeto (mm)	Diâmetro rotor Máximo (mm)	Q_recirculação de sucção e desc. (m3/h)	Instalação
90	351	4.750	249	259	6,2	Ao tempo

7.1.2. Histórico operacional

Este equipamento entrou em operação em 1999, em um regime operacional de planta de processo, ou seja, ininterrupto.

Recebeu sua primeira intervenção corretiva somente em 2013. Parou apenas durante as paradas gerais de manutenção da planta, a cada 2 ou 3 anos, mas sem receber intervenção, pois trata-se de um equipamento pertencente ao plano de manutenção preditiva da planta.

Esta bomba centrífuga recebeu neste período, apenas o acompanhamento preditivo de vibrações, temperatura, ruídos e vazamentos. Portanto foram-se mais de 14 anos até a primeira intervenção de manutenção.

7.1.3. Aplicação das recomendações deste trabalho

Nesta bomba foram aplicadas, apenas as recomendações (6.1), (6.3) e (6.4). Nesta época, as exigências de rigidez de eixo e mais robustez de mancais exigidas, pelo API 610, 11 Ed., ainda não existiam, mas, a bomba já foi construída com uma boa relação das dimensões do eixo, D/L, pois o conceito de eixos mais rígidos, propiciaram mais confiabilidade já era conhecido pelos fabricantes.

A aplicação do item 6.1 não foi dentro do ótimo, mas um bom valor, sendo no caso a vazão de projeto em 70% do BEP.

7.2. Bombas de solução de uréia

7.2.1. Características

São bombas centrífugas de processo em planta petroquímica, instaladas ao tempo, bombeando solução de uréia quente. São simples estágio, tipo back pull out, assim com rotor em balanço.

Neste posto de trabalho, para o atendimento da vazão requerida, operam duas bombas em paralelo não havendo equipamento reserva. O equipamento reserva não é recomendado porque, apesar do aquecimento aplicado, o fluido solidifica, entupindo o equipamentos, a caixa de gaxetas, etc.

Desta forma o posto de trabalho requisita bombas de alta confiabilidade, pois não havendo equipamento reserva, e na falha de um deles, a capacidade da planta seria reduzida à cerca de 65%.

As bombas tem as seguintes características de projeto:

Q_ Vazão (m3/h)	Pressão de sucção(Kg/cm2)	Pressão de descarga(Kg/cm2)	Fluído	Head (m)	Potencia (CV)	N (rpm)
382	0,0	1,2	Uréia	12,0	33	1150

NPSH3 (m)	NPSHd (m)	Pressão vapor (Kg/cm2 abs)	Test NPSH3	Rendi_ mento (%)	Fabricante	Curva do Fab.	Q_ Vazão % BEP
2,7	7,0	0,1	Sim	76	Worthington	K6. 1200. 068/1	85%

TB (oC)	Ns	Nss	Diâmetro rotor de projeto (mm)	Diâmetro rotor Máximo (mm)	Q_ recirculação de sucção e desc. (m3/h)	Instalação
66	3003	9193	278	324	50	Ao tempo

7.2.2. Histórico operacional

Este equipamento entrou em operação em 1982, em um regime operacional de planta de processo, ou seja, ininterrupto, com paradas para manutenção a cada 3 anos.

Apesar destas bombas serem acompanhadas pela manutenção preditiva, com registros de temperatura, vibração e ruídos, não há registro de manutenção corretiva durante uma campanha operacional. Todos os registros são de manutenção preventivas exatamente nas paradas programadas gerais da planta.

Os dados acima nos confirmam uma excelente confiabilidade deste par de equipamento, que embora sem reserva, nunca foi responsável por perda de produção da planta na qual está instalada. Temos, portanto, um TMEF destas bombas de pelo menos 48 meses.

7.2.3. Aplicação das recomendações deste trabalho

Nesta bomba foram aplicadas, apenas as recomendações (6.1), (6.2) e (6.4). Nesta época, as exigências de rigidez de eixo e mais robustez de mancais exigidas, pelo API 610, 11 Ed., ainda não existiam.

Nota-se que, conforme calcula-se por nossa referência bibliográfica (8.2), E. P. Sabini e W. H. Fraser que trabalhavam, à época deste paper, para Worthington pumps, esta bomba tem um ponto de recirculação muito alto, cerca de 75% do BEP, função de seu alto $N_{ss} = 9190$ e alto $N_s = 3003$;

Observa-se então que estas bombas, por esse alto N_{ss} , se o item (6.1), recomendado neste trabalho, não tivesse sido atendido, e pela ausência de equipamento reserva, elas certamente teriam causado muita perda de produção na planta onde estão instaladas.

Observa-se também neste caso, a grande contribuição do item (6.2), de se operar na mais baixa rotação possível. No campo as medições de vibrações registram 1,5/2,0 mm/s, no máximo, que são valores muito baixos, denotando uma operação muito suave.

Estas bombas confirmam o que afirmamos no corpo do item (6) deste trabalho, que aqui transcreve-se: "**Vale destacar, que na dificuldade de implantar todos esses itens abaixo recomendados, persiga-se pelo menos a aplicação dos 4 (quatro) primeiros. Os resultados já serão muito bons.**"

8. Referências bibliográficas

8.1. Igor J. Karassik; Joseph P. Messina; Paul Cooper; Charles C. Heald_ Pump Handbook, 4th. Edition; McGraw-Hill - New York;

8.2. Eugene P. Sabini; Warren H. Fraser; Worthington Pumps_ The effect of design feature on centrifugal pump efficiency_ Proceedings of the fourth international pump symposium, Turbomachinery Laboratories, Department of Mechanical Engineering, Texas A & M Univ., May 1987;

8.3. F. Korkowsky - Flowserve; R. L. Jones- Consultant; J. D. Sanders- Fluor_ What is new in API 610 11 Ed.(ISO 13709 2nd. Ed.)?; Hydrocarbon Processing Magazine, Dec. 2010

8.4. Kyle Schoenheit - Americas for Xylem's Applied Water Systems business unit_ Detecting pump cavitation_ Modern Pumping Today Magazine, July 2013;

8.5. Kelair Pumps, Austrália; Clinic Pump 12;