

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE DE FALHAS DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA

João Victor Abdallah Jardim, joaovictoraj@hotmail.com¹

Douglas Bressan Riffel, dbr.ufs@gmail.com¹

André Luiz de Moraes Costa, andrekostab@bol.com.br¹

¹Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, s/n, São Cristóvão-SE

Resumo: Este trabalho consiste na elaboração de uma Análise de Modos de Falha e Efeitos – FMEA – aplicada a uma bomba centrífuga do modelo Mission, tipo W. Notando-se que essa máquina é de extrema importância e muito usual nas indústrias, o objetivo principal do trabalho é reunir um conjunto de medidas preventivas que antecipem os diversos modos de falha que podem provocar paradas não planejadas desse equipamento, aumentando, portanto, sua confiabilidade e disponibilidade. Através de uma revisão bibliográfica, foi possível obter um total de 77% de referências diretas sobre medidas preventivas para os modos de falha levantados em bombas centrífugas; para os modos de falha sem referências diretas de ações preventivas, contou-se com a experiência técnica adquirida com a manutenção e montagem de bombas durante passagem pela empresa Sigmarhoh do Brasil, bem como da interpretação das informações disponíveis na literatura.

Palavras-chave: bombas centrífugas, FMEA, confiabilidade, disponibilidade

1. INTRODUÇÃO

Um sistema adequado e eficiente de manutenção resulta na conservação do equipamento em condições satisfatórias e vida útil prolongada. Quando existe entrosamento entre a Produção e a Manutenção, as paradas das máquinas são programadas, com benefícios de redução dos custos elevados das paradas não programadas (Nepomuceno, 1989, p. 3 e p. 4).

A crescente conscientização de quanto uma falha de um equipamento afeta a segurança e o meio ambiente, a qualidade do produto, a disponibilidade da instalação e os custos envolvidos tem exigido novas atitudes e habilidades das pessoas da manutenção, desde os gerentes até os executantes (Pinto e Xavier, 1998, p. 3).

Um equipamento muito importante e usual é a bomba centrífuga. Esse tipo de bomba é usado no bombeamento de água limpa, água do mar, condensados, óleos, lixívias, para pressões de até 16 kgf/cm² e temperaturas de até 140 °C. Há bombas centrífugas também para a indústria química e petroquímica, refinarias, indústria açucareira, para água quente até 300 °C e pressões que chegam até 25 kgf/cm² (Macintyre, 2013, p. 46).

Visto a importância das bombas centrífugas e da área da Manutenção para o sistema produtivo de uma indústria, surgiu-se o interesse de realizar um trabalho aplicado à manutenção desse tipo de bomba. O objetivo principal é identificar os possíveis modos de falha da máquina, além de reunir um conjunto de ações preventivas, fundamentadas pela literatura, que possa efetivamente aumentar a confiabilidade e a disponibilidade do equipamento. Segundo Palady (1997, p. 5), a FMEA é uma das técnicas mais eficientes para a prevenção e correção de problemas.

A Análise de Modos de Falha e Efeitos – FMEA – será aplicada à bomba centrífuga modelo Mission, tipo W. Trabalhos científicos referentes a análises de falha de bombas centrífugas mostram que é possível aumentar a qualidade desse produto utilizando a FMEA. Segundo Arunkumar e Rajeev (2014, p. 275) atenção especial deve ser dada aos elementos rotor, eixo, mancais de rolamentos e caixa de engastamento da bomba centrífuga, já que o risco de falha é elevado para esses. De acordo com Azadeh et al. (2009, p. 44), a aplicação da Análise de Modos de Falha e Efeitos em bombas centrífugas permite que ações de manutenção preventiva possam ser agendadas, o tempo de reparo reduzido, erros humanos evitados dentre outros benefícios que levam ao aumento da confiabilidade da máquina.

2. A BOMBA CENTRÍFUGA

Uma máquina de fluxo tem a finalidade de, como máquina motriz, transformar um tipo de energia que a natureza nos oferece em trabalho mecânico, ou, como máquina operadora, fornecer energia a um fluido para, por exemplo, transportá-lo de um local de baixa pressão para outro de alta pressão. Quando uma máquina de fluxo trabalha como motriz, é chamada turbina e, quando trabalha como operadora, de bomba (Pfleiderer e Petermann, 1979, p. 1).

Segundo Macintyre (2013, p. 38), o modo pelo qual é feita a transformação do trabalho em energia hidráulica e o recurso para cedê-la ao líquido aumentando sua pressão e/ou sua velocidade permitem classificar as bombas em: bombas de deslocamento positivo, turbobombas e bombas especiais.

As bombas centrífugas estão dentro da classificação de turbobombas, as quais apresentam duas partes essenciais que as caracterizam: o rotor e o difusor. O rotor é um componente rotatório dotado de pás que exercem forças sobre o líquido, promovendo sua aceleração. Ocorre aí a transformação da energia mecânica, da qual o rotor está dotado, em energia cinética para o fluido. O difusor, por sua vez, tem a função de transformar progressivamente e continuamente a energia cinética do líquido em energia potencial de pressão. Isto é necessário para que o líquido atinja o bocal de saída da bomba com uma velocidade razoável e pressão adequada para o escoamento; para o caso das bombas centrífugas, o difusor apresenta-se sob a forma de voluta (Macintyre, 2013, p. 43). A Fig. 1 ilustra a bomba centrífuga.

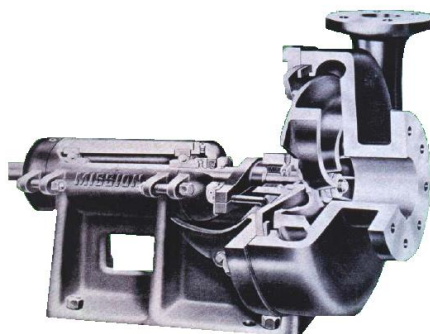


Figura 1. Bomba centrífuga, modelo Mission, tipo W.

Fonte: PRW Mission, 2006.

3. VISÃO GERAL SOBRE FMEA

A FMEA é uma técnica indutiva, estruturada e lógica para identificar e/ou antecipar as causas e efeitos de cada modo de falha de um sistema ou produto (Lafraia, 2001, p. 101). Além disso, essa ferramenta é capaz de hierarquizar as falhas potenciais e fornecer as recomendações para as ações preventivas (Pinto E Xavier, 1998, p. 92). Por vezes, a FMEA pode ser usada como parte de um programa de qualidade, tal como a ISO 9000, QS 9000 e o Planejamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP – Advanced Product Quality Planning) (Borror, 2008, p. 158).

O resultado da FMEA é um formulário que contém os componentes do equipamento (ou etapas do processo/sistema); a função de cada componente; os modos de falha possíveis; os efeitos e as causas dos modos de falha; os índices de severidade, de ocorrência e de detecção; o fator de risco RPN e, por fim, as ações corretivas e preventivas a serem tomadas. Observar a Tabela 1.

Tabela 1. Formulário FMEA

Cabeçalho											
Componente	Função	Modo de Falha	Efeito	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN	Ações Corretivas	Ações Preventivas

Cabeçalho: campo para informações que identifiquem do que se trata a FMEA, quem está envolvido no desenvolvimento e outras informações que se julguem necessárias. **Componente:** é um elemento que constitui o equipamento. **Função:** é toda e qualquer atividade que o componente desempenha sob o ponto de vista operacional. **Modo de falha:** representa a negação da função. **Efeitos:** descrevem as consequências dos modos de falha. **Índice de severidade (S):** representa a gravidade do efeito do modo de falha. **Causas:** são as razões possíveis que poderiam resultar no modo de falha. **Índice de ocorrência (O):** é a frequência com que o modo de falha ocorre; outra abordagem diz que é a frequência com que a causa do modo de falha ocorre. **Meios de detecção:** são os meios pelos quais se pode

perceber os modos de falha; planos de controle e inspeção são formas de se detectar um modo de falha. **Índice de detecção (D)**: é a facilidade de detectar o modo de falha ou as causas que resultam nesse modo de falha. **RPN**: o Risk Priority Number ou Grau de Prioridade de Risco é o produto dos três índices e indica o risco que cada modo de falha representa. **Ações corretivas e preventivas**: são as ações que corrigem e antecipam, respectivamente, os modos de falha.

4. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo deste trabalho, a sequência de ações foram realizadas: (1) listar os componentes da bomba centrífuga e indicar as funções de cada um; (2) estabelecer os modos de falha de cada componente; (3) determinar as causas para cada modo de falha; (4) determinar os efeitos para cada modo de falha; (5) determinar os efeitos para cada modo de falha; (6) indicar os meios de detecção; (7) estabelecer ações corretivas e preventivas para cada modo de falha; (8) estabelecer os índices de severidade, ocorrência e detecção; (8) preencher a FMEA.

5. DESENVOLVIMENTO

5.1. Componentes da Bomba Centrífuga

Existem vários elementos que compõem uma bomba centrífuga, desde elementos secundários, como anel lanterna e placa de desgaste, até os componentes essenciais, como rotor e difusor. Para uma análise de falhas eficiente do equipamento é necessário levar em conta todos os seus componentes. A fim de demonstrar a metodologia aplicada, este artigo apresentada a análise de falhas para quatro partes: o rotor, o difusor, o eixo e os mancais.

5.2. Análise de Falhas

5.2.1. Rotor

- **Função**: fornecer energia cinética ao fluido;
- **Modo de falha**: fornecimento insuficiente de energia.

Causa 1: cavitação

A cavitação é o fenômeno em que ocorre a formação e o subsequente colapso de bolhas de vapor do líquido quando o fluxo de fluido sofre variações de pressão ou de temperatura no seu trajeto (Affonso, 2006, p. 85). O processo de vaporização, formando-se as bolhas de vapor, inicia-se quando a pressão absoluta atinge a pressão de vapor do líquido na temperatura em que esse se encontra (Macintyre, 2013, p. 206). A Fig. 2 ilustra esse fenômeno.

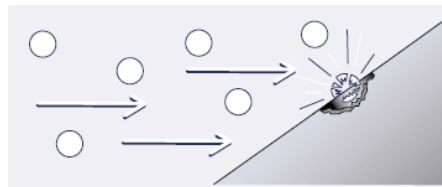


Figura 2. Ilustração da cavitação.
Fonte: Grundfos Industry, 2004.

Os lugares mais propícios à cavitação são aqueles localizados no interior dos canais das pás, zonas de menor pressão e maior velocidade. Quando as bolhas de ar atingem a superfície metálica nessas condições e entram em colapso, altas solicitações mecânicas são impostas nessa superfície. Provoca-se aí o desgaste do rotor por esse fenômeno (Pfleiderer e Petermann, 1979, p. 75 e p. 76). A Fig. 3 ilustra a principal região afetada pela cavitação.

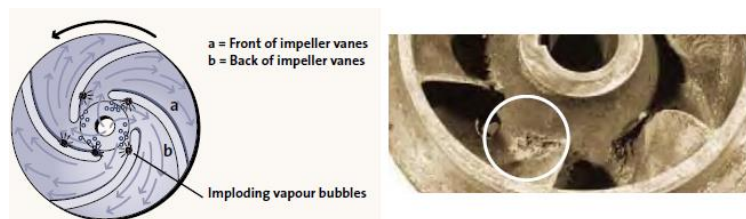


Figura 3. Cavitação em um rotor.
Fonte: Grundfos Industry, 2004.

Efeitos:

- Queda do rendimento e da potência útil da máquina, devido à redução da conversão de energia cinética em energia potencial de pressão (Pfleiderer e Petermann, 1979, p. 76; Macintyre, 2013, p. 207);
- Vibração da máquina pelo desbalanceamento que acarreta (Macintyre 2013, p. 208);
- Ruído provocado pelo fenômeno da implosão (Macintyre, 2013, p. 208).

Meios de detecção:

- Barulho comparável ao de um martelo batendo intermitentemente nas paredes da máquina (Pfleiderer e Petermann, 1979, p. 76; Macintyre 2013, p. 206);
- Oscilação no manômetro da sucção (Sigmarhoh do Brasil, [200-], p.31);
- A superfície do material que sofre cavitação fica com aspecto esponjoso, rendilhado e corroído (Macintyre, 2013, p. 206).

Ações corretivas:

- Preencher nos locais gastos solda elétrica adequada ao material, esmerilhando em seguida. Outra forma é aplicar uma ou mais camadas de neoprene, um tipo de elastômero (Macintyre, 2013, p. 208);
- Caso necessário, substituir rotor.

Ações preventivas:

- Trabalhar sempre com o NPSH disponível maior que o NPSH requerido;
- Irregularidades da superfície do rotor acentuam o efeito destrutivo da cavitação. Caso seja necessária boa resistência à cavitação, é indispensável assegurar um perfeito polimento das superfícies (Pfleiderer e Petermann, 1979, p. 75 e 76);
- Selecionar materiais com melhores propriedades à cavitação. A ordem crescente de materiais resistentes à corrosão são ferro fundido, alumínio, bronze, aço fundido, aço doce laminado, bronze fosforoso, bronze manganês, aço Siemens-Martin, aço níquel, aço cromo (12Cr), ligas de aço inoxidável especiais (18 Cr-8Ni) (Macintyre, 2013, p. 208);
- O emprego de revestimento de elastômeros, tal como o neoprene, poliuretano e o estireno-butadieno, aumenta a resistência à cavitação. Os dois primeiros podem ser aplicados sob a forma líquida e apresentam grande aderência ao metal (Macintyre, 2013, p. 208);
- Utilizar rotor com um número suficientemente grande de pás (Macintyre, 2013, p. 209);
- Pequeno valor para o ângulo de inclinação das pás na entrada β_1 (Macintyre, 2013, p. 209), que deve estar compreendido entre 15° e 30° (Macintyre, 2013, p. 237).

Causa 2: corrosão-erosão

A corrosão-erosão é a ação combinada de um ataque químico e do desgaste mecânico como consequência do movimento de um fluido. A natureza desse fluido pode ter uma forte influência sobre o comportamento da corrosão; além disso, a presença de bolhas e sólidos particulados em suspensão intensifica esse fenômeno. Outro fator importante é a velocidade de escoamento, a qual intensifica o fenômeno de desgaste quando aumentada. Todas as ligas metálicas, em maior ou menor grau, são susceptíveis a esse mecanismo de falha e, quando ocorre, esse ataque pode ser identificado através de ranhuras e ondulações superficiais, com contornos característicos do escoamento de um fluido (Callister, 2008, p. 473). A Fig. 4 ilustra o fenômeno.

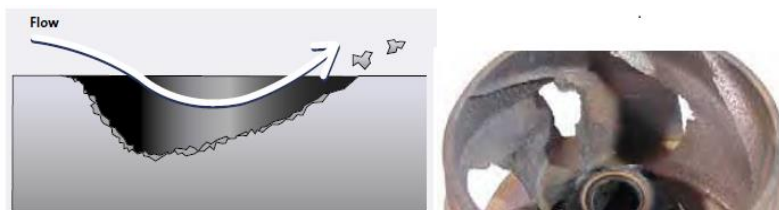


Figura 4. Ilustração da corrosão-erosão.

Fonte: Grundfos Industry, 2004.

A corrosão-erosão é encontrada com frequência em tubulações, principalmente em curvas e em mudanças bruscas de diâmetro. Contudo, rotores, assim como outros componentes hidráulicos, também estão susceptíveis a este tipo de corrosão. Um dos melhores meios para reduzir esse mecanismo de falha consiste em modificar o projeto, a fim de minimizar os efeitos de turbulência e de colisão do fluido. Outros meios são utilizar materiais resistentes à corrosão e remover particulados e bolhas no fluido (Callister, 2008, p. 473).

Esse fenômeno é muitas vezes encontrado no interior de bombas centrífugas que trabalham com fluidos corrosivos, como hidrocarbonetos contendo enxofre. Este processo vem sendo encontrado na indústria petroquímica à medida que petróleos de qualidade inferior vêm sendo utilizados. Normalmente, esse tipo de corrosão é encontrado em regiões sujeitas a alta velocidade de escoamento do fluido, como difusor e rotor (Affonso, 2006, p. 98).

Efeitos:

Já que ocorre desgaste do rotor, tal como na cavitação, os efeitos são:

- Queda do rendimento e da potência útil da máquina devido à redução da conversão de energia cinética em energia potencial de pressão (Pfleiderer e Petermann, 1979, p. 76; Macintyre, 2013, p. 207);
- Vibração da máquina pelo desbalanceamento que acarreta (Macintyre, 2013, p. 208);
- Ruído provocado pelo choque das bolhas de ar e das partículas em suspensão sobre a superfície do rotor.

Meios de detecção:

- Ranhuras e ondulações na superfície com contornos característicos do escoamento de um fluido (Callister, 2008, p. 473).

Ações corretivas:

- Preencher nos locais gastos solda elétrica adequada ao material, esmerilhando em seguida (Macintyre, 2013, p. 208);
- Caso necessário, substituir rotor.

Ações preventivas:

- A presença de bolhas intensifica o fenômeno da corrosão-erosão (Callister, 2008, p. 473). Dois meios de favorecer o surgimento de bolhas de ar na sucção do fluido são a tubulação de sucção não está suficientemente submersa (Sigmarhoh do Brasil, [200-], p.30) e a redução usada na entrada da bomba não ser excêntrica (EH Bombas Hidráulicas, [199-?], p. 6). Logo, verificar se a tubulação de sucção está suficientemente submersa e utilizar redução excêntrica na entrada da bomba são duas ações preventivas contra um acentuado ataque da corrosão-erosão no rotor da máquina;
- Utilizar rotores de materiais resistentes à combinação corrosão-erosão. Um material utilizado na construção de rotores e que é resistente a esse mecanismo de falha é o aço inoxidável duplex (Karassik et al., 2001 p. 5.27). Considerar sempre o fluido bombeado na escolha do material;
- Esse tipo de corrosão é encontrado em regiões sujeitas à alta velocidade de escoamento do fluido, tal como o impelidor (Affonso, 2006, p. 98). Operar a bomba, logo, a uma rotação moderada.

Causa 3: Desgaste por recirculação

Segundo as Centrais Elétricas Brasileiras (2005, p. 165), tem-se a recirculação quando o líquido da região de alta pressão da bomba recircula para a região de baixa pressão.

Efeitos:

- Baixo rendimento da bomba (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005 p. 165);
- Vibração da máquina (Karassik et al., 2001, p. 2.4).

Meios de detecção:

- Observar se a máquina está trabalhando a uma vazão muito baixa. Caso esteja, a vibração e o baixo rendimento da bomba provavelmente são consequências de recirculação (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005, p. 165);
- O barulho causado pela recirculação assemelha-se àquele causado pela cavitação (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005, p. 165).

Ações corretivas:

- Rever o projeto do sistema; o ponto de operação da bomba não deve estar a uma vazão muito baixa (Affonso, 2006, p. 9);
- Preencher nos locais gastos solda elétrica adequada ao material, esmerilhando em seguida (Macintyre, 2013, p. 208);
- Caso necessário, substituir o rotor.

Ações preventivas:

- O projeto do sistema deve definir um ponto de operação em que a vazão não seja muito baixa (Affonso, 2006, p. 9).

5.2.2. Difusor

- **Função:** transforma a energia cinética do fluido fornecida pelo rotor em energia de pressão;
- **Modo de falha:** ineficiência da transformação de energia.

Causa 1: corrosão-erosão

Efeitos:

- O efeito da corrosão-erosão sobre a voluta provoca o desgaste do material desse componente. Logo, a energia potencial de pressão fornecida ao líquido bombeado será reduzida e ocorre uma queda do rendimento da bomba.

Meios de detecção:

- A superfície interior da voluta fica com aparência lisa e com sulcos rasos na direção do escoamento do fluido (Affonso, 2006, p. 98).

Ações corretivas:

- Recuperar a área da carcaça que sofreu corrosão-erosão através de enchimento de solda e posterior usinagem, caso a carcaça seja de aço. Se a carcaça for de ferro fundido as dificuldades técnicas geralmente levam a substituição do componente (Karassik et al., 2001, p. 2.28).

Ações preventivas:

- Para bombas de um estágio, carcaça de ferro fundido são utilizadas, já que o custo é barato em relação a de outros materiais. No entanto, para fluidos corrosivos e abrasivos como produtos petrolíferos, é necessário especificar algum tipo de aço adequado a essa condição de trabalho, e não utilizar mais o ferro fundido. Carcaça em aço fundido inoxidável pode ser utilizada nesses casos (Karassik et al., 2001, p. 5.28). Aços austeníticos inoxidáveis CF-8M e CF-3M são aplicados em serviços corrosivos, adequados para lidar com uma vasta gama de pH, resistentes à erosão por alta velocidade e podem ser reparados com facilidade (Karassik et al., 2001, p. 5.29).

Causa 2: trinca

Efeitos:

- Assim como a corrosão-erosão, trincas na carcaça reduzirão o rendimento da bomba, uma vez que será entregue uma energia potencial de pressão menor ao líquido bombeado, quando comparada à energia entregue por uma carcaça em perfeito estado.

Meios de detecção:

- Inspeção visual da carcaça;
- Ensaio por líquido penetrante.

Ações corretivas:

- Avaliar o reparo da carcaça. Caso não seja viável, substituir o componente.

Ações preventivas:

- A tubulação de sucção nunca deve se apoiar na bomba. Isso pode trincar ou quebrar a carcaça, além de desalinhar o conjunto e causar outras avarias (EH Bombas Hidráulicas, [199-?], p. 6). Observar a Fig. 5.

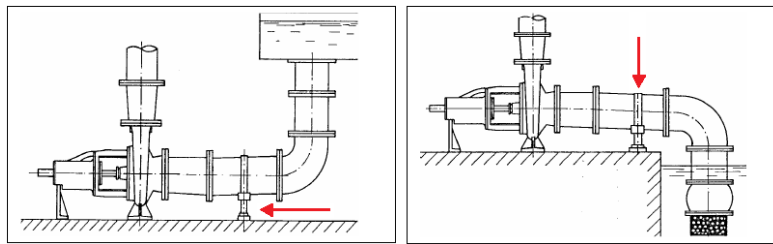


Figura 5. Apoios para a tubulação de sucção.

Fonte: EH Bombas Hidráulicas, [199-?].

5.2.3. Mancais de rolamento

- **Função:** dar suporte a eixos rotativos;
- **Modo de falha:** não dá suporte adequado ao eixo devido à redução da vida útil.

É importante conhecer um rolamento que trabalhou em condições normais e apresenta um bom estado. Marcas de trabalho são modificações que ocorrem na superfície do rolamento em função de um ligeiro desgaste ocasionado pelos elementos rodantes. Tais marcas não comprometem a vida útil do rolamento e indicam como ele estava se comportando. Um exemplo de marca de trabalho normal de um rolamento que trabalha suportando somente carga radial é mostrada na Fig. 6.

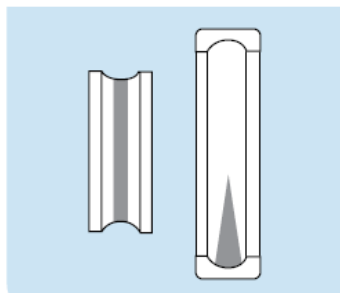


Figura 6. Marcas normais de trabalho de um rolamento.

Fonte: SKF, 2012.

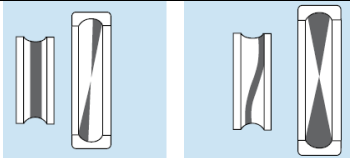
Causa: fratura/desgaste do rolamento**Efeitos:**

- Se os mancais de rolamento, sendo os responsáveis pelo suporte do eixo da bomba, sofrerem fratura durante a operação, então o eixo, e consequentemente outros componentes da máquina como o engaxetamento, podem sofrer danos. A bomba fica inoperável até a manutenção corretiva.
- O desgaste do rolamento causa vibração excessiva e danos no engaxetamento (EH Bombas Hidráulicas, [199-?], p. 14). Por isso, também pode ser o primeiro responsável do vazamento excessivo na caixa de engaxetamento, por danos em outros componentes da bomba, como o eixo, e pela redução do rendimento da bomba, já que há muitas perdas energéticas envolvidas.

Meios de detecção:

- Vibração excessiva (EH Bombas Hidráulicas, [199-?], p. 14);
- Rolamentos desgastados possuem um chiado característicos. Além disso, em uma inspeção visual do rolamento, a superfície da gaiola do rolamento rugosa é o primeiro sinal de falta de lubrificação (Affonso, 2006, p. 162).
- Inspeção visual; desgastes/marcas de trabalho anormais. Observar Tabela 2.

Tabela 2. Identificação de danos em mancais

Danos na pista de rolamento pelo uso de impactos durante montagem.	
À esquerda são apresentadas marcas típicas de desalinhamento da pista externa do rolamento em relação ao eixo; à direita, quando a pista interna está desalinhada em relação ao eixo.	
Desgaste da pista de rolamento devido à lubrificação deficiente.	
A aparência lisa e com descoloração indica sobreaquecimento da pista.	

Fonte: SKF, 2012.**Ações corretivas:**

- Substituir rolamentos e inspecionar outros componentes da bomba que possam ter sido danificados pela fratura do mancal (eixo, rotor, carcaça, etc.) para realizar a manutenção necessária.

Ações preventivas:

- Partículas estranhas podem ser prensadas entre os elementos rodantes e a pista, causando indentações, locais de início de trincas. Uso de impacto e força excessiva também podem gerar trincas (Affonso, 2006, p. 158). Treinamento de pessoal para montagem correta reduz os riscos de falhas desse componente devido à fadiga.
- Aferir a excentricidade entre os mancais, aferir a perpendicularidade entre os mancais e o eixo e verificar se o eixo está empenado (Affonso, 2006, p. 156);
- Verificar os limites ao desalinhamento do tipo de rolamento utilizado (Affonso, 2006, p. 158).
- Seguir as orientações de lubrificação que se encontram no manual da bomba. Usar sempre o óleo ou a graxa indicados pelo fabricante da bomba (Sigmarhoh do Brasil, [200-], p.36).

5.2.4. Eixo

- **Função:** transmitir rotação para o rotor;
- **Modo de falha:** não transmite rotação.

Causa: fratura

Efeitos:

- Com uma fratura do eixo, a bomba é impossibilitada de exercer sua função básica, que é a de recalcar o líquido.

Meios de detecção:

- A bomba para de funcionar;
- Realizar inspeção visual.

Ações corretivas:

- Inspecionar outros componentes da bomba que possam ter sido danificados pela fratura do eixo (mancais, rotor, carcaça, etc.) e realizar a manutenção necessária.

Ações preventivas:

- Não operar a bomba sob condições de cavitação, recirculação ou outros meios de vibração, pois favorecem a falha por fadiga do eixo. Em paradas para manutenção, observar sinais de corrosão, a qual também favorece a falha por fadiga. O acoplamento – entre eixo e rotor – deve estar sem folgas, evitando impactos que favoreçam a falha por fadiga; cuidado especial na fabricação de chavetas, atentando para suas tolerâncias e na sua dureza, que deve ser sempre menor que a dureza do eixo (Affonso, 2006, p. 123).

5.3. Índices de Severidade, Detecção e Ocorrência

Os índices de severidade, de ocorrência e de detecção foram baseados nas Tabelas 4, 5 e 6, respectivamente. Essas tabelas foram adaptadas daquelas trazidas por Lafraia (2001, p. 112), a fim de melhor se adequar aos objetivos deste trabalho.

Tabela 2. Índices de severidade.

<i>Severidade das Consequências</i>	<i>Ranking</i>
Muito baixa: A falha não teria efeito real no sistema. O cliente provavelmente nem notaria a falha.	1
Baixa: A falha causa apenas pequenos transtornos ao cliente. O cliente notará provavelmente leves variações no desempenho do sistema.	2
Moderada: A falha ocasiona razoável insatisfação ao cliente. O cliente ficará desconfortável e irritado com a falha. O cliente notará razoável deterioração no desempenho do sistema.	3
Alta: Alto grau de insatisfação do cliente. O sistema se torna inoperável. A falha não envolve riscos à segurança operacional ou no descumprimento de requisitos legais.	4
Muito Alta: A falha envolve riscos à operação segura do sistema e/ou descumprimento de requisitos legais.	5

Tabela 3. Índices de ocorrência.

<i>Probabilidade de Falha</i>	<i>Ranking</i>
Muito baixa: A falha é improvável	1
Baixa: Relativamente poucas falhas	2
Moderada: Falhas ocasionais	3
Alta: Falhas repetitivas	4
Muito alta: Falhas quase inevitáveis	5

Tabela 4. Índices de detecção.

<i>Probabilidade de Detecção</i>	<i>Ranking</i>
Muito Alta: A falha será certamente detectada durante o processo de projeto/fabricação/montagem/operação	1
Alta: Boa chance de determinar a falha	2
Moderada: 50% de chance de determinar a falha	3
Baixa: Não é provável que a falha seja detectável	4
Muito Baixa: A falha é muito improvavelmente detectável	5

Uma análise precisa da avaliação de risco, calculado a partir dos índices mostrados acima, necessitaria de ao menos um histórico de falhas do equipamento em estudo. Contudo, foi realizado um levantamento desses índices contanto

sobretudo com a experiência dos funcionários da Sigmarhoh, com grande experiência na área fabricação e manutenção de bombas. Alguns índices de ocorrência foram levantados a partir de Macintyre (2013), que afirma que são frequentes (índice de ocorrência 4) as seguintes causas de falha:

- Causas que acarretam descarga nula ou muito baixa: cavitação, corrosão-erosão, recirculação, NPSH disponível insuficiente, falta de aperto nas gaxetas, tubulação de sucção pouco submersa e obstrução do rotor.
- Causas que acarretam ruídos e vibrações: presença de ar na bomba, desalinhamento e empeno do eixo, desgaste dos mancais, falta de lubrificação, parafusos frouxos.
- Causas que acarretam desgaste das gaxetas: anel lanterna montado fora da posição, empeno e desalinhamento do eixo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de falhas desenvolvida foi organizada em um formulário FMEA, no qual foram registradas 45 causas de modos de falha – 77% dessas causas foram associadas a ações preventivas previstas na literatura. Para os modos de falha sem referências diretas de ações preventivas, conseguiu-se sugerir medidas de prevenção de falhas a partir da experiência do autor na área de manutenção e montagem de bombas centrífugas adquirida na empresa Sigmarhoh do Brasil, bem como da interpretação das informações adquiridas através do estudo na área.

A partir do formulário observou-se que os componentes associados a modos de falha com maiores índices de RPN, e que, logo, merecem atenção especial ($RPN \geq 16$), são estes: difusor; rotor; mancais; eixo; engaxetamento e pedestal. Vale ressaltar que o RPN pode variar, seja pela faixa de valores estabelecida na severidade, detecção e ocorrência, seja pela quantificação de cada índice na avaliação do modo de falha, que pode haver ligeira diferença entre autores. Contudo, os resultados qualitativos do RPN devem convergir entre trabalhos distintos.

Os elementos que possuem modos de falha com médio risco ($10 \leq RPN \leq 15$) entre são estes: porca e arruela do rotor; parafusos e porcas da base; anel lanterna; chaveta do rotor e do acoplamento; conjunto defletor de água e graxeira. Por fim, os elementos que possuem modos de falha com baixo risco ($1 \leq RPN \leq 9$) são estes: junta e prisioneiros/porcas da carcaça; tampa, parafusos/porcas e junta da caixa de mancal; retentor de graxa; sobreposta; placa de desgaste e bujão do dreno da bandeja.

Foi notado que os índices de RPN ficaram concentrados em três valores: 9 (24%), 12 (27%) e 16 (24%), representando, portanto, 76% da frequência dos valores de RPN. Foram a partir desses valores que estabeleceram-se as faixas de valores de RPN que indicavam baixa, média ou alta prioridade, mencionadas nos parágrafos anteriores.

7. CONCLUSÕES

Foi alcançado o objetivo de construir uma Análise de Modos de Falha e Efeitos aplicada a uma bomba centrífuga. Embora a bomba tenha sido especificada, a FMEA elaborada pode ser útil a outras bombas de diferentes fabricantes. O formulário da FMEA contém listado todos os componentes da bomba e suas respectivas funções e pode ser encontrado na íntegra em Jardim et al. (2015). Portanto, o formulário ajuda na compreensão do funcionamento das partes da bomba que levam a função principal.

Os principais modos, efeitos e causas das falhas de cada componente foram definidos. Isso permite uma maior percepção do motivo por um determinado problema ter ocorrido numa bomba, sabendo-se que modos de falha, efeito e causa estão relacionados entre si.

Ações corretivas foram sugeridas para a correção das falhas. Desse modo, os envolvidos na manutenção do equipamento podem orientar-se para a solução do problema, agilizando o processo de reparo da máquina.

Uma grande porcentagem das ações preventivas foi encontrada como referência direta na literatura para as causas dos modos de falha levantadas. A aplicação da FMEA elaborada, portanto, pode contribuir diretamente para o aumento da confiabilidade e da disponibilidade de uma bomba centrífuga, tal como sugere Azadeh et al. (2009, p. 44) em seu trabalho.

Atenção especial deve ser dada ao difusor, ao rotor, aos mancais, ao eixo ao engaxetamento e ao pedestal, componentes que obtiveram modos de falha com alto grau de prioridade. Nota-se que a maioria desses componentes está contemplada dentro daqueles citados por Arunkumar e Rajeev (2014, p. 275) como elementos de alto nível de importância, no que diz respeito a falhas mecânicas, como foi mencionado na introdução deste trabalho, demonstrando coerência entre os resultados obtidos no presente estudo com os resultados de outros trabalhos sobre análise de falhas de bombas centrífugas.

8. REFERÊNCIAS

- Affonso, L.O.A., 2006, “Equipamentos Mecânicos: Análise de Falhas e Soluções de Problemas”, 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark. 336p.
- Arunkumar, S., Rajeev, V., 2014, “Centrifugal Pump - Failure Mode Effective Analysis”, International Journal of Pure and Applied Research in Engineering and Technology, Tamilnadu, India.
- Azadeh, A. et al., 2009, “A Pump FMEA Approach to Improve Reliability Centered Maintenance Procedure: The Case of Centrifugal Pumps in Onshore Industry”, International Conference on Fluid Mechanics, Tehran, Iran.
- Borrer, C.M., 2008, “The Certified Quality Engineer”, 3th ed. ASQ Quality Press.

- Callister, JR., W.D, 2008. “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução”, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Centrais Elétricas Brasileiras, Fupai/Efficientia, 2005. “Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento”. Rio de Janeiro: Eletrobrás. 272p.
- Eh Bombas Hidráulicas, [199-?], “Manual de Instalação, Operação e Manutenção de Bombas Centrífugas”.
- Grundfos Industry, 2004, “Pump Handbook”.
- Jardim, J.V.A. et al., 2015, “Formulário da FMEA”. Visualizado dia: 12/04/2016. Disponível em: http://energia.ufs.br/sites/default/files/41/anexo_i_formulario_da_fmea.pdf
- Lafraia, J.R.B., 2001, “Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade”, Rio de Janeiro: Qualitymark, 388p.
- Karassik, I.J. et al, 2001, “Pump Handbook”, 3th ed. New York et al.: McGRAW-HILL.
- Macintyre, A.J., 2013, “Bombas e Instalações de Bombeamento”, 2. ed. Rio de Janeiro: LTC. 782p.
- Palady, 1997, “FMEA: Análise de Modos de Falha e Efeitos: Prevendo e Prevenindo Problemas Antes Que Ocorram”, São Paulo: IMAM. 270p.
- Pfleiderer, C., Petermann, R., 1979, “Máquinas de Fluxo”, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 545p.
- Pinto, A.K., Xavier, J.N., 1998, “Manutenção: Função Estratégica”, Rio de Janeiro: Qualitymark, 287p.
- Sigmarhoh do Brasil, [200-], “Bombas Centrífugas Sigmarhoh”, Sergipe, 44p.
- SKF, 2012. “Bearing Installation and Maintenance Guide”.

FAILURE ANALYSIS OF A CENTRIFUGAL PUMP

João Victor Abdallah Jardim, joaovictoraj@hotmail.com¹

Douglas Bressan Riffel, dbr.ufs@gmail.com¹

André Luiz de Moraes Costa, andrekostab@bol.com.br¹

¹Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, s/n, São Cristóvão-SE

Abstract. *This work consists of a Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) applied to a Mission centrifugal pump, model W, manufactured by Sigmarhoh of Brazil, a manufacturer of products in the petroleum industry. Given that this engine is extremely important and very common in industries, our main goal was to bring together a set of preventive measures in order to anticipate the several failure modes that might cause unplanned shutdowns of the equipment, and thereby increase its reliability and availability. Through a literature review, it has been possible to achieve a total of 77% of direct references on preventive measures for failure modes surveyed in centrifugal pumps and a total of 100% when considered the essential parts of the equipment (the impeller and the volute chamber) and the main auxiliary parts (shaft, bearings and packing). For those failure modes with no direct references of preventive measures, it was taken into account the experience in maintenance and installation of centrifugal pumps as well as the interpretation of information obtained through study in this field.*

Keywords: *centrifugal pumps, FMEA, reliability, availability*