



**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNO ARAÚJO MOREIRA
GUILHERME SOBRAL SANTOS
PEDRO AUGUSTO LEAL DOS SANTOS
PÉROLA DE CARVALHO PARANAGUÁ SILVA
THIAGO AMADOR MATOS SOUSA
VICTOR SANTOS GIRON MARGALHO**

**PROJETO CONCEITUAL
ESTUDO DA CONFIABILIDADE DA METODOLOGIA N-1 APLICADA
AS BOMBAS DE BFW DA BRASKEM**

SALVADOR

2019

BRUNO ARAÚJO MOREIRA
GUILHERME SOBRAL SANTOS
PEDRO AUGUSTO LEAL DOS SANTOS
PÉROLA DE CARVALHO PARANAGUÁ SILVA
THIAGO AMADOR MATOS SOUSA
VICTOR SANTOS GIRON MARGALHO

**ESTUDO DA CONFIABILIDADE DA METODOLOGIA N-1 APLICADA
AS BOMBAS DE BFW DA BRASKEM**

Este relatório foi desenvolvido como uma etapa parcial do Theoprax, cuja disciplina é Técnicas de Projeto do curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário SENAI CIMATEC.
Orientador: Profº. Dantani Jorge

SALVADOR

2019

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Custo x Classificações de Manutenção	2
Figura 2 - Lucro x Disponibilidade	3
Figura 3 - Distribuição das Forças Radiais de acordo com a voluta.....	4
Figura 4 - Variação da Força Radial de acordo com a vazão de uma bomba centrífuga	5
Figura 5 - Comparação entre simples e dupla voluta	6
Figura 6 - Comparação entre simples e dupla voluta	6
Figura 7 - Bomba com furos de alívio.....	7
Figura 8 - Distribuição de forças em uma bomba com palhetas traseiras	8
Figura 9 - Fenômeno de recirculação do fluido	8
Figura 10 - RCA - Árvore dos porquês simplificada.	13
Figura 11 - Maneiras de se reduzir os riscos.....	24
Figura 12 - Demanda de Vapor da UTE	26
Figura 13 - Combinações operacionais.....	26
Figura 14 - Testes de possíveis soluções	27
Figura 15 - Estimativa de Curvas reduzidas.....	27
Figura 16 - Escolha da configuração dos Ativos	28
Figura 17 - Causas de Falha Reais encontradas no Registro de Falhas da Braskem	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de Probabilidade de Ocorrência	21
Tabela 2 - Tabela de Severidade	22

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Algumas causas de falhas de componentes mecânicos	18
Quadro 2 - Efeito das falhas em uma parte.....	18
Quadro 3 - Efeito da falha	19
Quadro 4 - Probabilidade de Detecção	23

SUMÁRIO

1. OBJETIVO DO PROJETO	1
2. OBJETIVO DO DOCUMENTO	1
3. GESTÃO ESTRATÉGICA E CONFIABILIDADE	1
3.1 CUSTO X CONFIABILIDADE	2
4. CARGAS MECÂNICAS ATUANTES QUE IMPACTAM NA CONFIABILIDADE	3
5. REQUISITOS PARA BOMBAS DE ALTA CONFIABILIDADE.....	10
6. ANÁLISES DE FALHA DAS BOMBAS	12
6.1 CONCEITOS DA ANÁLISE DE CAUSA RAIZ (RCA).....	12
6.2 ANÁLISE DO MODO DE FALHA (FMEA).....	14
6.2.1 Conceito da técnica FMEA.....	14
6.2.2 Objetivo da aplicação do fmea	15
6.2.3 Etapas para aplicação do fmea.....	16
6.2.4 Dados de registro	16
6.2.5 Identificação dos modos de falha	17
6.2.6 Identificação das causas básicas de falhas	17
6.2.7 Identificação dos efeitos de falha.....	18
6.2.8 Meios de detecção.....	19
6.2.9 Análise de criticidade.....	19
6.2.10 Probabilidade de ocorrências.....	20
6.2.11 Severidade dos efeitos.....	22
6.2.12 Probabilidade de detecção	23
6.2.13 Índice de risco.....	23
6.2.14 Ações preventivas recomendadas	24
7. ELABORAÇÃO INICIAL DO RCA E FMEA DAS BOMBAS DE BFW	25
7.1 ANÁLISE OPERACIONAL	25
7.2 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS PARA A CONSTRUÇÃO DO FMEA	
DAS BOMBAS DE BFW	28
8. REFERÊNCIAS	33

1. OBJETIVO DO PROJETO

Desenvolver um estudo de confiabilidade da metodologia N-1 aplicada às bombas de BFW da unidade de insumos básicos (Q1) da Braskem SA. Espera-se com esse projeto garantir uma maior disponibilidade por maior tempo de operação e a confiabilidade destes equipamentos.

2. OBJETIVO DO DOCUMENTO

Este documento tem por objetivo definir o conceito a ser aplicado no Projeto de Estudo da Confiabilidade da Metodologia N-1 Aplicada as bombas de BFW da Braskem, que se iniciou após a entrega dos templates em 26/02/2019. Neste documento estão descritos todos os sistemas e conceitos e análises aplicadas ao projeto. Após aprovação deste documento, daremos início a fase de desenvolvimento de projeto básico e detalhado.

3. GESTÃO ESTRATÉGICA E CONFIABILIDADE NA ATUALIDADE

As indústrias de processo contínuo, como indústrias petrolíferas e petroquímicas, por possuírem alta demanda de produção, exigem maquinários de alto custo de forma a supri-la. Estes maquinários por muitas vezes são complexos e representam altos custos fixos operacionais para uma planta. De forma a viabilizar o processo, é necessário que esses equipamentos atuem sempre próximos às condições estabelecidas em projeto. Para isso é importante que seja estudada a confiabilidade desses equipamentos.

A Confiabilidade é diretamente relacionada com o quanto um equipamento ou sistema opere sem falha, e em seu sentido mais amplo, está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas. Em análises de engenharia, todavia, é necessária uma definição do conceito de confiabilidade, em termos de probabilidade. Tal definição, proposta por Leemis (1995), é apresentada da seguinte forma:

“A confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas.”

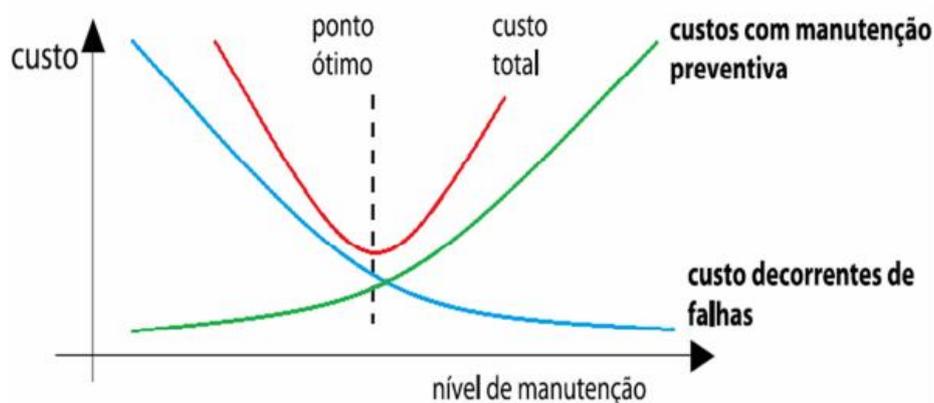
Este conceito também remete a ideia da confiabilidade como premissa para definição de uma margem de segurança operacional, ou seja, o estabelecimento de um limite que garantirá a não ocorrência de falhas por determinado período de tempo previsto para sua vida.

3.1 CUSTO X CONFIABILIDADE

Todas as características de um produto/processo que podem mudar com o tempo ou apresentar não conformidades após certo período estão atrelados à confiabilidade, que assim como a qualidade é determinada pelo desempenho do equipamento. Esses aspectos também apontam para uma relação proporcionalmente direta para os custos ligados à indisponibilidade e deterioração dos equipamentos como consequência da falta de manutenção, causando reflexos nos parâmetros de qualidade. Essa relação entre custo de manutenção, custo da indisponibilidade e produtividade, traz conclusões sobre uma melhor relação custo-benefício, quando a manutenção é vista com o olhar de prevenção, ao invés de situações de descontrole do processo produtivo pela falta de manutenção.

Tomando a manutenção como premissa para a redução dos custos da produção, deve-se definir a melhor política a ser adotada para a otimização dos custos.

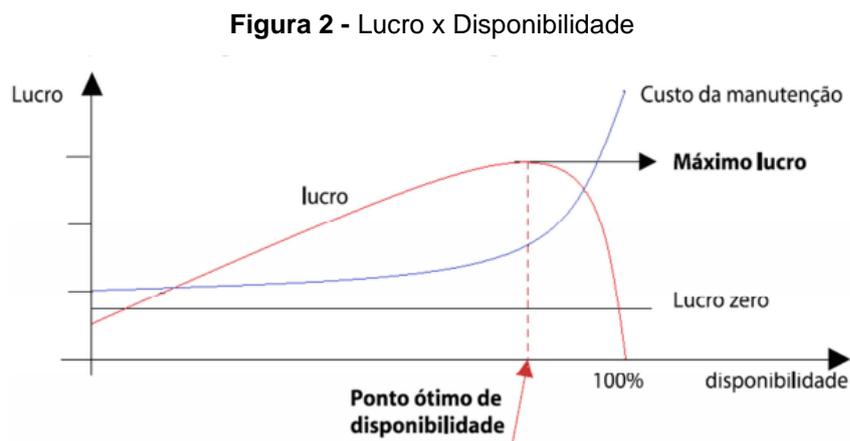
Figura 1 - Custo x Classificações de Manutenção



Fonte: Mirshawa & Olmedo, 1993.

Através da análise do gráfico acima podemos ver a influência positiva do investimento em manutenções preventivas, que impactam para a redução dos custos inerentes a falhas. Como consequências, a diminuição do custo total da

manutenção se torna notório se somarmos custos de manutenção preventiva com os custos de falha. Apesar disso, o gráfico também nos traz a informação de que a partir de um ponto - ponto ótimo- os custos com manutenção preventiva deixam de ser a melhor abordagem no que diz respeito a custo, pois o investimento não se torna mais tão atrativo devido à elevação do custo total. Esta interpretação nos remete aos estudos feitos por Murty & Naikan (1995), que discorrem sobre os limites da disponibilidade e apresentam um modelo matemático para o cálculo do ponto ótimo de disponibilidade, conforme ilustrado no gráfico da figura abaixo.



Fonte: Murty & Naikan, 1995.

4. CARGAS MECÂNICAS ATUANTES QUE IMPACTAM NA CONFIABILIDADE

A confiabilidade em máquinas rotativas, especialmente bombas centrífugas, é definida com base na taxa de desgaste dos componentes e durabilidade dos mancais. Um dos parâmetros mais importantes para qualquer bomba centrífuga é a vida do mancal. Para obter o menor custo de manutenção e reparos, a vida do mancal de qualquer bomba centrífuga deve ser prolongada pelo maior tempo possível. Particularmente em casos de bombas que operam em plantas de processos, com alta pressão e aplicações salubres, a vida do mancal torna-se ainda mais relevante para a confiabilidade das bombas.

Durante a operação e funcionamento de bombas centrífugas, a energia cinética do fluido é convertida em energia de pressão. Essa alta pressão do líquido flui continuamente por toda a circunferência do impelidor e parte do

fluido prende-se nas folgas entre o impelidor e a carcaça. O fluido exerce alta pressão nas saídas e pás do impelidor, resultando em na geração de duas forças, uma lateral e outra longitudinal, na direção do eixo. A força lateral gerada é devido a diferença de pressão gerada dentro da voluta é chamada de força radial enquanto a força gerada longitudinalmente devido a diferentes áreas do impelidor expostas a parte presa do líquido em alta pressão e a diferença de pressão entre a descarga e a sucção é chamada de força axial.

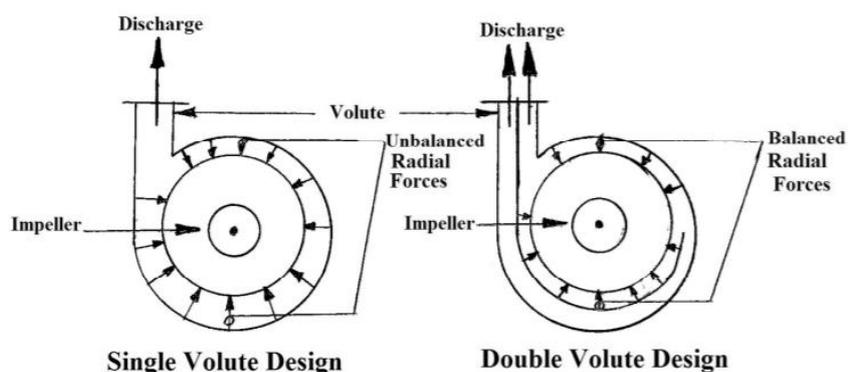
A vida útil de um mancal depende principalmente das forças axiais e radiais. A predição de forças radiais pode ser feita de facilmente e com o auxílio de métodos disponíveis na literatura. Entretanto, a predição de forças axiais não possui um método definido com uma confiabilidade aceitável, visto que o número de parâmetros que influenciam forças axiais são maiores que aqueles que impactam na força radial, tornando por muitas vezes o processo experimental.

Essas forças devem ser devidamente compensadas ou reduzidas, de forma que se tenha uma vida útil maior do equipamento e principalmente dos mancais das bombas.

4.1 FORÇAS RADIAIS EM BOMBAS

A força gerada na direção vertical devido a diferença de pressão gerada na voluta é chamada de força radial. Essa força ocorre devido à velocidade desigual do fluido escoando pela casca da bomba, resultando em uma distribuição não uniforme da pressão atuante na circunferência do impelidor, conforme exemplificado na figura 3.

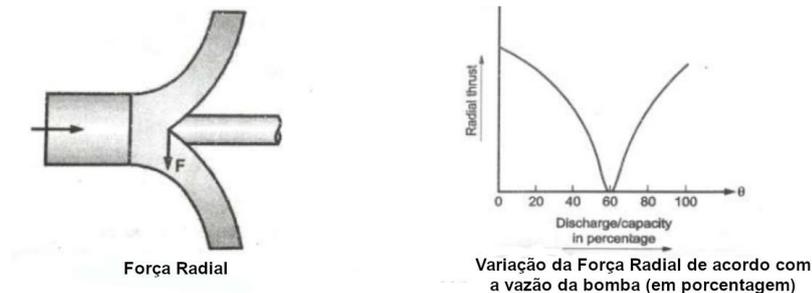
Figura 3 - Distribuição das Forças Radiais de acordo com a voluta



Fonte: Vasant, Rajashri & Gavade (2017).

A força radial é influenciada principalmente pelo formato e desenho do casco da bomba. Em teoria, na situação de máxima eficiência da bomba (Best Efficiency Point - BEP), a voluta tem uma distribuição de velocidade de pressão uniforme ao redor das extremidades do impelidor, sendo este o ponto de mínima força resultante. Entretanto, é impossível minimizar essa força em todos os pontos da curva característica de vazão e pressão da bomba, resultando assim em uma força resultante para cada ponto de operação na curva.

Figura 4 - Variação da Força Radial de acordo com a vazão de uma bomba centrífuga



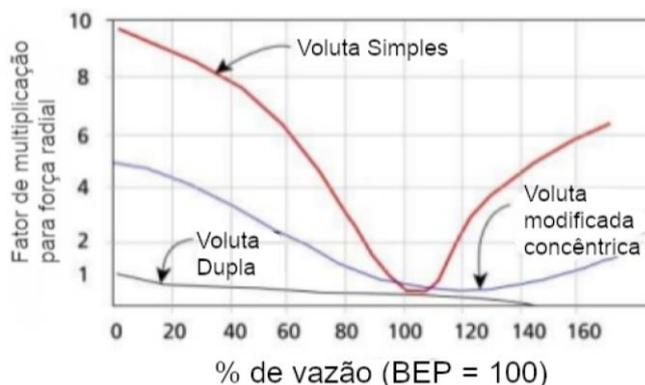
Fonte: Adaptado de AlphaEM, 2017.

No caso de bombas centrífugas que trabalham em plantas de processo com grande variação na demanda, como é o caso das bombas analisadas no estudo, a escolha do ponto operacional da bomba coincidia com o BEP inicial. Todavia, devido a diminuição da demanda, as bombas passaram a trabalhar com valores bem abaixo do ideal, resultando na geração de forças radiais consideráveis.

As forças radiais podem ser consideravelmente reduzidas a valores aceitáveis através da adoção de dois métodos eficazes para diminuir as forças radiais em uma bomba centrífuga:

- Dupla Voluta;
- Carcaça do tipo difusa (Diffuser Type Casing).

Figura 5 - Comparação entre simples e dupla voluta



Fonte: Adaptado de AlphaEM, 2017.

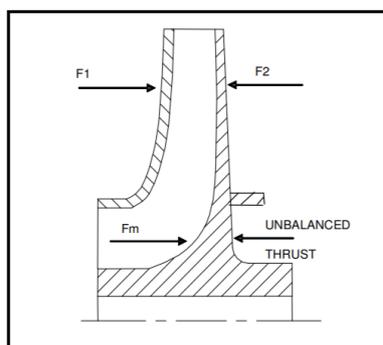
4.2 FORÇAS AXIAIS EM BOMBAS

As forças axiais dependem de diversos aspectos da bomba, a citar: folgas das pás com a carcaça, geometria do impelidor, velocidade periférica das pás, pressão desenvolvida pela bomba, entre outros. Por essa razão, a força teórica calculada e o experienciado pela bomba na prática não são iguais, principalmente quando levado em consideração as limitações de fabricação e variações na montagem.

Os métodos existentes não podem ser empregados na prática para estimar o valor correto da força axial atuante ou mesmo estimar a variação da força aceitável. As medições de forças axiais disponíveis na literatura indicam a falta de experimentos precisos e adequados de resultados experimentais.

As forças axiais em bombas centrífugas são incrementadas principalmente devido à assimetria das bombas. Como a parte de trás das pás do impelidor tem uma área superior que a frente, uma força na direção oposta a de vazão do fluido surge.

Figura 6 - Comparação entre simples e dupla voluta



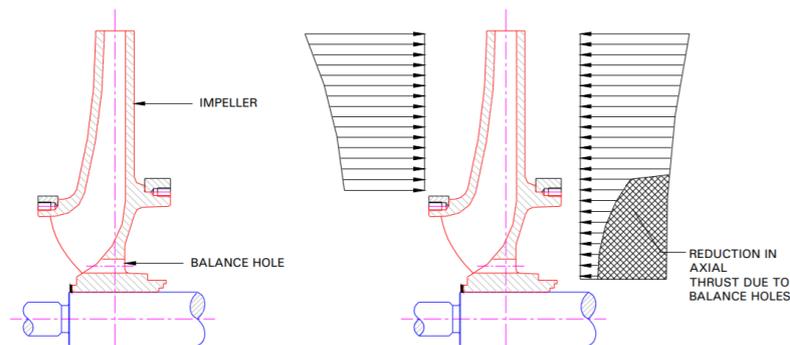
Fonte: Adaptado de AlphaEM, 2017.

Como mostrado na Figura 6, a resultante das forças axiais desbalanceadas é devido às seguintes forças:

- F1: Força atuante sobre a parte frontal das palhetas devido a pressão do líquido preso entre a carcaça e a parte frontal do impelidor.
- F2: Força atuante sobre a parte traseira das palhetas devido a pressão do líquido preso entre a carcaça e a parte traseira do impelidor.
- Fm: Força devido a mudança de momento no sentido do fluido devido a sua mudança de direção.

Uma das maneiras mais usuais em bombas centrífugas para reduzir a ação da força axial é a utilização de rotores com furos de alívio. Através destes furos cria-se uma pressão entre anel de desgaste e cubo do rotor, próximo a pressão de sucção, objetivando uma equalização das pressões em ambos os lados do rotor. Entretanto, esse método pode gerar turbulência pelo retorno de fluido pelos orifícios em oposição ao fluxo principal.

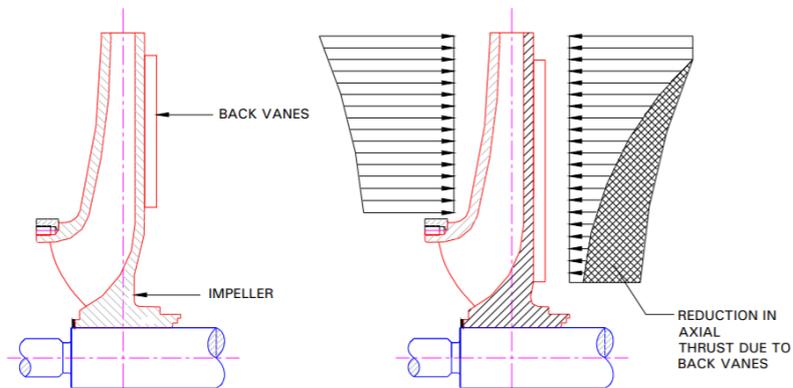
Figura 7 - Bomba com furos de alívio



Fonte: Vasant, Rajashri & Gavade (2017).

Outro método é a utilização de palhetas alocadas na parte posterior do rotor de forma a induzir o equilíbrio das forças axiais. Uma das principais vantagens desse método é em aplicações no bombeamento de fluidos com sujões com matérias em suspensão, pois ele produz o efeito adicional de manter as costas do rotor e a carcaça livre de impurezas.

Figura 8 - Distribuição de forças em uma bomba com palhetas traseiras

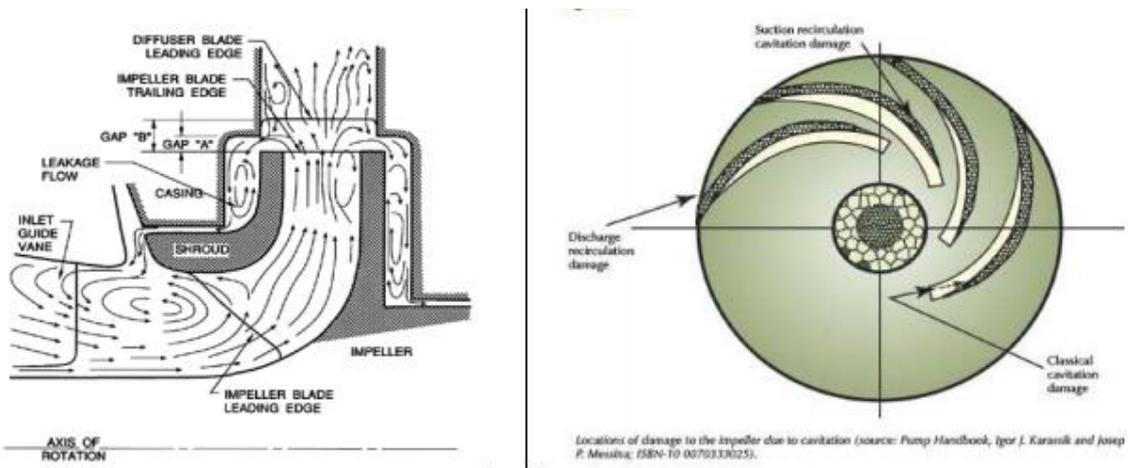


Fonte: Vasant, Rajashri & Gavade (2017).

4.3 SURGE HIDRÁULICO

O surge ocorre quando o fluxo na entrada da bomba é reduzido a tal ponto que o head desenvolvido pela mesma é insuficiente para ultrapassar a pressão na descarga. – Nessa condição a pressão de saída da bomba é drasticamente reduzida, resultando em um fluxo reverso dentro da bomba, denominado de surge.

Figura 9 - Fenômeno de recirculação do fluido



Fonte: AlphaEM, 2017.

O fluxo reverso pode resultar em sérios danos no sistema:

- Grandes esforços dinâmicos no impelidor, nas palhetas, mancais, carcaça e tubulações conectados à carcaça,
- Presença de gás comprimido quente retornando para entrada assim que a situação se normalize.
- Problemas de processo que levam a parada da planta. – O projeto da bomba deve estar adequado com sistemas de controle e instrumentação para prevenir ocorrência do surge.

Para prevenir instabilidades que causariam os danos na bomba, o sistema deve constar de uma válvula anti-surge, com dimensionamento e condicionamento necessário para operar em condições de evitar o surge.

5. REQUISITOS PARA BOMBAS DE ALTA CONFIABILIDADE

Bombas centrífugas, como todo equipamento mecânico, estão sujeitas a enfrentar falhas oriundas do projeto do equipamento, do seu modo de operação e por falta de manutenção adequada.

O estudo da confiabilidade do equipamento e/ou sistema, permite-nos adotar medidas de gestão que nos direciona a mitigar as possíveis falhas que possam ocorrer. Indicadores como MTBF (*Mean Time Between Failures* ou Tempo Médio Entre Falhas) e MTTR (*Mean Time to Repair* ou Tempo Médio Para Reparo) auxiliam na obtenção de informações inerentes ao equipamento ou sistema, que possibilita a tomada de decisão referente, por exemplo, ao tipo de manutenção mais apropriada que deve ser efetuada. Todavia, outros fatores como custo, tipo de material utilizado nos componentes do equipamento, parâmetros de processo, dentre outros, devem ser levados em consideração na hora da seleção e gestão das bombas.

Medidas de gestão como a utilização de componentes com confiabilidade extremamente altas e a aplicação de metodologia de redundância paralela (metodologia n-1), tornam a operação das bombas centrífugas mais confiáveis. Entretanto, a não observância de alguns parâmetros necessários para o aumento da confiabilidade das bombas podem fazer com que o sistema atue de maneira não conforme.

A alta confiabilidade das bombas pode ser atingida levando-se em consideração parâmetros como: ponto de projeto (*Rated Point*), velocidade de rotação, selagem da caixa de mancais, dimensão máxima do(s) impelidor(es), dimensão da caixa de selos, robustez de eixos e rolamentos, forma como é exercido o controle de vazão, materiais dos impelidores para bombas de média e altas vazões, dentre outras. Alguns parâmetros apontados, destacam-se a mais que os demais por impactar muito na confiabilidade, e por esse motivo serão descritos abaixo.

O ponto de projeto ou ponto de operação deve ser calculado para que seja o mais próximo possível do ponto ótimo de operação da bomba (BEP) obtido através da interseção entre as curvas da bomba (fornecida pelo fabricante) e sistema. Para que a bomba selecionada atue em uma situação ótima, o ponto de projeto deve se situar entre 90 e 105% do BEP. De todos os

parâmetros supracitados, o ponto de projeto escolhido de maneira correta é o que mais efetivamente auxiliará na confiabilidade da bomba evitando que fenômenos como surge hidráulico (recirculação interna), forças axiais e radiais em excesso, que ampliam a solicitação de selos, mancais e eixos, se constituam. É pertinente ressaltar que, incertezas de processo e falta de conhecimento das necessidades operacionais podem levar ao superdimensionamento da bomba necessária para o sistema. Isto acarretará, na aquisição de bombas maiores não condizentes às exigências do processo, direcionando a um BEP muito à direita do ponto operacional real.

O controle da vazão, é outro parâmetro de extrema importância para o aumento da confiabilidade da bomba. Através da forma como o controle é exercido pode-se, além de aumentar a confiabilidade, diminuir os custos operacionais. Por exemplo, ao se substituir válvulas de controle de vazão, que tem por finalidade, bloquear o fluxo na descarga da bomba (promovendo o afastamento do ponto de operação do BEP), pelo controle de rotação com a utilização de inversores de frequência nos motores elétricos, pode-se ajustar o BEP da bomba, aproximando-o do ponto operacional exigido pelo sistema, pois haverá a alteração da frequência do motor elétrico.

A rotação do motor, influencia diretamente na solicitação mecânica de eixo, mancais e selo da bomba. Para uma melhor relação custo-benefício e combate a formação do surge hidráulico, recomenda-se, operar com rotação de 1800 rpm ou próximas a esse valor. Porém, menores rotações, exigirá um maior rotor e carcaça do equipamento, o que implicará em uma maior área física para aporá-lo estreitando a relação custo-benefício.

Outra medida pertinente é a utilização de caixa de mancais seladas com *bearing guard*, pois protegem a lubrificação dos rolamentos contra contaminações de líquidos e particulados que impactam na capacidade de lubrificação dos óleos lubrificantes.

Por fim, o último fator destacado e que se deve atentar é o diâmetro do impelidor. Não se deve utilizar o impelidor máximo fornecido pelo catálogo do fabricante, pois quanto maior a folga existente entre o impelidor e a voluta no menor ponto de passagem do fluido entre eles, menores serão as forças exercidas sobre os componentes em cada passagem de pá do impelidor pelo ponto. Em contrapartida, é certo, que a eficiência máxima de uma bomba

ocorre com a utilização de impelidor de diâmetro máximo, por esse motivo, reduções de 3 e 8% no tamanho máximo deste representam uma boa relação custo-benefício.

6. ANÁLISES DE FALHA DAS BOMBAS

6.1 CONCEITOS DA ANÁLISE DE CAUSA RAIZ (RCA)

A Análise de Causa Raiz (RCA) é um processo sistemático para “identificação de causa raiz” de um problema. A análise tem como base a ideia de que o gerenciamento eficaz vai além da resolução do problema, e aponta que é possível evitar falhas futuras a partir da identificação e análise da origem da falha. (*Washington State Department of Enterprise Services*).

Ao comparar diversas referências em seu trabalho, Schmitt (2013) mostra que a RCA é utilizada de modo investigativo na identificação da causa raiz de um evento e pode ser aplicada em diversas áreas com saúde, meio ambiente, qualidade e impactos na produção. A RCA é composta de uma sequência de passos que permitem o isolamento dos fatos que caracterizam um evento ou falha. A RCA permite se aprofundar nos modos de falha ao nível do componente com maior probabilidade de acerto da causa do evento. A proposição de ações corretivas para a prevenir falhas futuras depende da determinação da causa da falha por meio das evidências disponíveis.

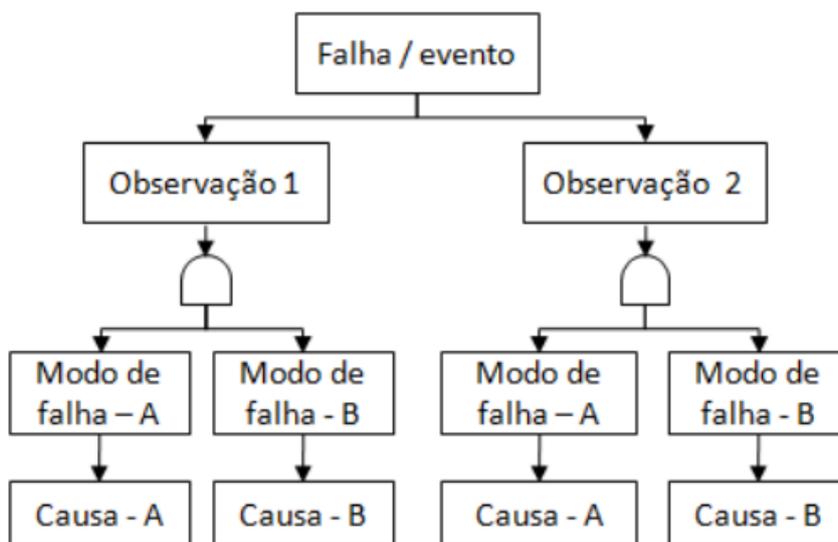
Schmitt (2013) também cita em seu trabalho um exemplo de aplicação na qual a RCA foi utilizada para determinação do evento responsável pela ocorrência de uma falha catastrófica em um sistema de exaustão em uma indústria petroquímica. Através do método RCA, a reconstituição da sequência do evento e identificação do fator físico que iniciou a falha, se torna possível baseado nas evidências encontradas no evento e nas informações levantadas nos históricos das intervenções.

A utilização da RCA ajuda a evitar o tratamento de sintomas, em vez de problemas subjacentes verdadeiros que influenciam em um evento. Essa ferramenta deve ser vista como um processo contínuo que busca a melhoria contínua. O processo de análise compreende etapas que permitem identificar o que aconteceu, como aconteceu, por que/para que aconteceu, além de propor

ações para prevenir recorrência. (*Washington State Department of Enterprise Services*).

A estruturação dos eventos em forma de “árvore dos porquês” é uma grande vantagem da RCA, uma vez que permite ao analista do processo melhor visualização da cadeia de eventos, como mostra a figura 09 a seguir.

Figura 10 - RCA - Árvore dos porquês simplificada.



Fonte: Schmitt, 2013.

O analista deve validar cada etapa da cadeia de eventos com dados técnicos ou relatórios de análises, comprovando se a hipótese é verdadeira e o quanto ela contribui para o evento.

A implementação dessa ferramenta traz benefícios como: a identificação de barreiras e as causas das falhas, para que soluções permanentes possam ser encontradas; desenvolvimento de uma abordagem lógica para a solução de problemas, usando dados que já existem na agência; identificação que as necessidades atuais e futuras de melhoria organizacional; estabelecimento de processos repetitivos, passo a passo, nos quais um processo possa confirmar os resultados de outro. (*Washington State Department of Enterprise Services*).

Princípios da Análise de Causa Raiz

- Concentrar-se nas medidas corretivas das causas-raiz é mais eficaz do que simplesmente tratar os sintomas de um problema ou evento;
- A ACR é realizada de maneira mais eficaz quando realizada por meio de um processo sistemático com conclusões apoiadas em evidências;
- Geralmente, há mais de uma causa raiz para um problema ou evento;
- O foco da investigação e análise através da identificação de problemas é POR QUE o evento ocorreu, e não quem cometeu o erro;

A RCA é aplicada em diversas áreas empresariais através de ferramentas, processos e filosofias diferentes. Dentre as áreas de aplicação da RCA, pode-se citar: Análise de acidentes e segurança e saúde no trabalho, Controle de qualidade, Análise de falha de engenharia e manutenção, gerenciamento de mudanças e gerenciamento de riscos.

Método básico para aplicação da RCA:

- Definição do problema;
- Coleta de informações, dados e evidências;
- Identificação de todos os problemas e eventos que contribuíram para a falha.
- Determinação das causas principais;
- Elaboração de recomendações para eliminar ou atenuar a recorrência de problemas ou eventos.
- Implementação das soluções identificadas.

6.2 ANÁLISE DO MODO DE FALHA (FMEA)

6.2.1 Conceito da técnica FMEA

O FMEA é uma técnica indutiva, estruturada e lógica que auxilia na identificação ou antecipação das causas e efeitos de cada modo de falha de um sistema ou produto. A análise resulta em ações corretivas, classificadas de

acordo com sua criticidade, para eliminar ou compensar os modos de falhas e seus efeitos. Os seus benefícios são:

- Redução do tempo de ciclo de um produto;
- Redução do custo global de projetos;
- Melhora do programa de testes de produtos;
- Redução de falhas potenciais em serviço;
- Redução dos riscos do produto para o consumidor (responsabilidade civil pelo produto);
- Desenvolvimento de uma metodologia para a prevenção de defeitos ao invés de detecção e correção;

Uma das principais características do FMEA é ser um processo indutivo, “de baixo para cima” (*bottom-up process*) e sua aplicação requer:

- Conhecimento da técnica da FMEA;
- Conhecimento do produto ou sistema;
- Conhecimento das funções do produto;
- Conhecimento do meio de aplicação do produto;
- Conhecimento do processo de fabricação;
- Conhecimento dos requisitos dos clientes;
- Conhecimento dos requisitos dos clientes quanto a suas falhas;

6.2.2 Objetivo da aplicação do fmea

O objetivo do FMEA é antecipar modos de falhas conhecidos ou potenciais e recomendar ações corretivas para eliminar ou compensar os efeitos das falhas. Um possível pré-requisito para a análise do objetivo da aplicação do FMEA é a determinação das premissas do cliente, através, por exemplo, da técnica do QFD (*Quality Function Deployment* - Desdobramento da Função Qualidade) que levam em consideração:

- O ambiente de serviço;
- Funções do Produto;
- Análise funcional;
- Requisitos de desempenho;

- Hierarquia;
- Confiabilidade;

6.2.3 Etapas para aplicação do fmea

A primeira etapa para aplicação do FMEA é identificar se o objeto de estudo será um produto ou um processo. Essa distinção é muito importante para nortear a análise que será conduzida, visto que, o produto pode estar em falha quando em operação, tendo como causa uma falha mecânica. Se tratando do processo, uma falha pode ser justificada por um erro durante uma etapa deste processo.

6.2.4 Dados de registro

Essas informações podem facilitar a identificação do produto/processo e conseqüentemente o desenvolvimento do FMEA. Os dados que devem ser coletados são:

- Nome do produto e número de série;
- Identificação da etapa do processo, se for o caso;
- Data da liberação do projeto;
- Data da revisão;
- Data da confecção do FMEA;
- Número da versão do FMEA;
- Data da versão anterior, se existir;
- Setores responsáveis pela execução;
- Coordenador e responsáveis.

O próximo passo é definir o subsistema, sistema ou equipamento que pode ser considerado separadamente. Recomenda-se utilizar a mesma nomenclatura utilizada para identificá-los, independentemente desta, não ser tecnicamente a mais correta. Em seguida deve-se definir a função do componente ou processo, relacionada a toda e qualquer atividade que o item desempenha, sob ponto de vista operacional.

6.2.5 Identificação dos modos de falha

Para a elaboração da FMEA, deve-se identificar os modos de falhas que podem levar à falha funcional. Não se deve tentar listar todos os modos de falhas possíveis considerando-se então, sua probabilidade de ocorrência.

Exemplos de falhas a serem consideradas:

- Falhas já ocorridas antes em itens similares;
- Falhas já observadas na falta de manutenção preventiva;
- Falhas não ocorridas e que podem ocorrer de fato;
- Falhas improváveis com consequências catastróficas.

Os modos de falha mais usuais são:

A - Falha em operar no instante prescrito;

B - Falha em cessar de operar no instante prescrito;

C - Operação prematura;

D - Falha em operação.

Os modos de falhas A, B e C ocorrem quando o item funciona de modo intermitente. Já o modo D ocorre em operação contínua. Muitas vezes o modo D pode ser melhor detalhado.

- Observação 1: Deve-se evitar descrições genéricas, que não acrescentem nenhuma informação aos técnicos envolvidos na análise ou não auxiliem na identificação do tipo de falha.
- Observação 2: A probabilidade da falha não deve ser levada em consideração neste campo. O esforço deve concentrar-se na forma como o processo pode falhar.

6.2.6 Identificação das causas básicas de falhas

Causas básicas de falhas estão relacionadas ao processo, podendo estas serem químicas ou físicas, por defeito de projeto, defeito de qualidade, uso indevido ou outro processo que seja a razão básica para a falha ou que inicie o processo físico que precede a falha. Evitar informações genéricas e buscar a causa fundamental é essencial para que as ações preventivas (contramedidas) ou corretivas sejam eficazes.

Quadro 1 - Algumas causas de falhas de componentes mecânicos

Impacto	Falha de adesão
Impacto fadiga	Amolecimento
Dimensão imprópria	Fratura frágil
Falha de lubrificação	Fluência
Alteração de propriedades de materiais	Corrosão; Corrosão fadiga
Dano devido à radiação	Corrosão erosão
Agarramento	Fluência Fadiga
Lascamento	Flambagem
Corrosão sob tensão	Delaminação
Relaxação térmica	Deformação elástica
Desgaste	Fadiga
Deformação plástica	Fretting

Fonte: Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, 2001.

6.2.7 Identificação dos efeitos de falha

Efeito da falha é a consequência que o modo de falha tem sobre a operação, função ou estado de um item. Os efeitos da falha podem ser classificados como local, sobre nível superior ou sobre o sistema total. Ao descrever os efeitos de falha deve-se descrever a evidência de como a falha se manifesta. O efeito deve ser descrito como se nenhuma medida de manutenção/projeto fosse feita para prevenir a falha.

- Observação: Tomar cuidado para não confundir o efeito com o modo da falha. Lembrar-se que um modo de falha pode ter mais de um efeito. O relacionamento efeito, modo de falhas e sua causa em função do nível de análise é importante para se determinar a que nível a análise de causa básica será efetuada.

Em nível de sistema é necessário fazer uma análise efeito, modo de falha e causa várias vezes até achar todas as causas responsáveis.

Quadro 2 - Efeito das falhas em uma parte

Função	Modo de falha	Efeitos da Falha		
		Parte	Equipamento	Cliente

Fonte: Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, 2011.

Quadro 3 - Efeito da falha

Sistema	Subsistema	Componente	Parte	Processo de Fabricação
Efeito				
Modo	Efeito			
Causa	Modo	Efeito		
	Causa	Modo	Efeito	
		Causa	Modo	Efeito
			Causa	Modo
				Causa

Fonte: Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, 2001.

6.2.8 Meios de detecção

Registre as medidas de controle implementadas durante a elaboração do projeto ou no acompanhamento do processo que o objetivam.

- Prevenir a ocorrência de falhas
- Detectar falhas ocorridas e impedir que cheguem ao cliente
- Podem ser citados como exemplos:
- Sistemas padronizados de verificação de projeto
- Procedimentos de revisão de projetos e desenhos (conferência)
- Confrontação com normas técnicas
- Técnicas de inspeção e ensaios
- Procedimentos de controle estatístico do processo (gráficos de controle, etc.)

6.2.9 Análise de criticidade

O modo de falha tem efeito sobre a segurança se a perda da função ou outro dano que possa ferir ou matar alguém ou se algum requisito ambiental não for atingido. Quando falamos de segurança, é importante fazer a distinção entre o perigo e o risco. O risco é composto de duas partes:

- O perigo provável, iminente
- Chance de ocorrer perdas ou danos

Figurativamente a relação entre perigo e risco pode ser expressa pela relação:

$$Risco = \frac{Perigo}{Medidas\ de\ controle}$$

Matematicamente o risco é expresso pela relação:

$$Risco = Prob. Ocorrência \times Detecção \times Severidade\ das\ Consequências$$

6.2.10 Probabilidade de ocorrências

É uma estimativa das probabilidades combinadas de ocorrência de uma causa de falha, e dela resultar o tipo de falha no produto/processo. Estabelecer um índice de ocorrência (nota) para cada causa de falha. Veja na tabela 1 a probabilidade de ocorrência e os critérios para estabelecimentos desse índice.

A atribuição desse índice dependerá do momento em que se está conduzindo a FMEA. Por ocasião do projeto do produto ou processo, não se dispõe de dados estatísticos, uma vez que o produto ou processo ainda não existe. Baseie sua análise em:

- Dados estatísticos ou relatórios de falhas de componentes similares ou etapas similares de um processo
- Dados obtidos de fornecedores
- Dados da literatura técnica

Se a FMEA estiver sendo feita por ocasião de uma revisão do projeto do produto ou processo, então poderão ser utilizados:

- Relatório de falhas (íntimos ou de Assistência técnica autorizada);
- Históricos de manutenção, quando for o caso;
- Gráficos de controle;
- Outros dados obtidos do controle estatístico do processo;
- Dados obtidos de fornecedores;
- Dados obtidos de literatura técnica;

A probabilidade de ocorrência pode ser classificada de 1 a 10 conforme tabela abaixo:

Tabela 1 - Tabela de Probabilidade de Ocorrência

Probabilidade de Falha	Ranking	Taxa de Falhas
Remota: A falha é improvável	1	< 1 em 10 ⁶
Baixa: Relativamente poucas falhas	2	1 em 20.000
	3	1 em 4.000
Moderada: Falhas ocasionais	4	1 em 1.000
	5	1 em 400
	6	1 em 80
Alta: Falhas repetitivas	7	1 em 40
	8	1 em 20
Muito Alta: Falhas quase que inevitáveis	9	1 em 8
	10	1 em 2

Fonte: Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, 2001.

6.2.11 Severidade dos efeitos

É o índice que deve refletir a gravidade do efeito da falha sobre o cliente, assumindo que o tipo da falha ocorra.

A atribuição do índice de gravidade deve ser feita olhando para o efeito da falha, e avaliando o “quanto” ele pode incomodar o cliente.

Uma falha poderá ter tantos índices de gravidade quantos forem os seus efeitos. Veja a tabela de severidade da ocorrência critérios para o estabelecimento desses índices.

Tabela 2 - Tabela de Severidade

Severidade das consequências	Ranking
Marginal: 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
	3
Moderada: A falha ocasiona razoável insatisfação no cliente. O cliente ficará desconfortável e irritado com a falha. O cliente notará razoável deterioração no desempenho do sistema	4
	5
	6
Alta: Alto grau de insatisfação do cliente. O sistema se torna inoperável. A falha não envolve riscos à segurança operacional ou o descumprimento de requisitos legais	7
	8
Muito Alto: A Falha envolve riscos à operação segura do sistema e/ou descumprimento de requisitos legais	9
	10

Fonte: Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, 2001.

6.2.12 Probabilidade de detecção

É o índice que avalia a probabilidade de a falha ser detectada antes que o produto chegue ao cliente ou as falhas afetam o sistema externamente. O índice de detecção deve ser atribuído olhando-se para o conjunto modo de “falha-efeito” e para os controles atuais exercícios.

A probabilidade de detecção pode ser classificada de 1 a 10 conforme o quadro descrita na próxima página.

Quadro 4 - Probabilidade de Detecção

Probabilidade de Detecção	Ranking
Muita Alta: A falha será certamente detectada durante o processo de projeto/fabricação/montagem/operação	1
	2
Alta: Boa chance de determinar a falha	3
	4
Moderada: 50% de chance de determinar a falha	5
	6
Baixa: Não é provável que a falha seja detectável	7
	8
Muito baixa: A falha é muito improvavelmente detectável	9
	10
Absolutamente indetectável: A falha não será detectável	

Fonte: Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, 2011.

6.2.13 Índice de risco

Os riscos em uma FMECA (*Failure Mode and Effect and Critical Analysis*) pode ser quantificado através do conceito do RPN (*Risk Priority Number* - Número de prioridade de risco).

O RPN pode ser obtido pela multiplicação conforme equação abaixo:

$$RPN = Ocorrência \times Detecção \times Severidade$$

$$\text{Índice de Risco} = Gravidade \times Ocorrência \times Detecção$$

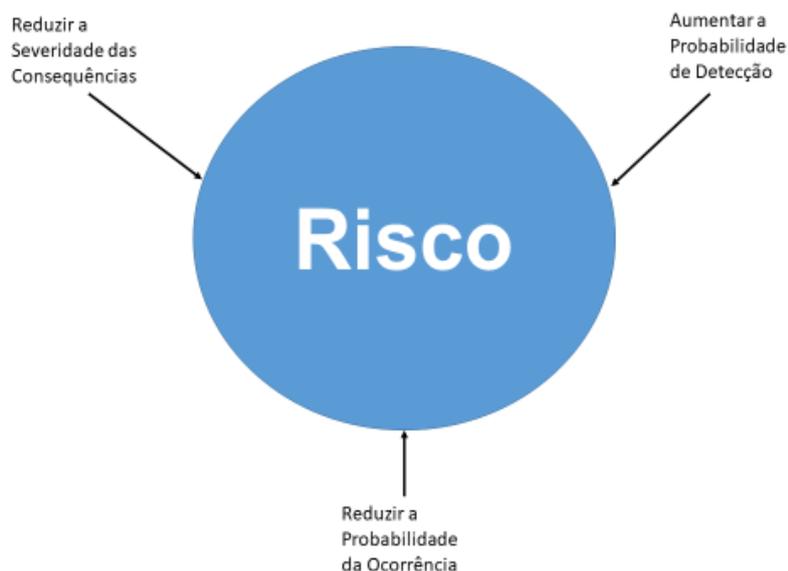
Importante ressaltar que as falhas com maior índice de risco deverão ser tratadas prioritariamente, e sobre elas deve ser feito um plano de ação para o estabelecimento de contramedidas

O índice de risco é uma maneira mais precisa de hierarquizar as falhas. Uma falha pode ocorrer frequentemente, mas ter pequena importância e ser facilmente detectável nesse caso, não apresentará grandes problemas (baixo risco). Seguindo o mesmo raciocínio, uma falha que tenha baixíssima probabilidade de ocorrer, mas que seja extremamente grave merecerá uma grande atenção, e deverão ser redimensionados os equipamentos de segurança e sistemas de detecção e alarme.

6.2.14 Ações preventivas recomendadas

As maneiras para se reduzirem os riscos podem ser observadas na figura abaixo:

Figura 11 - Maneiras de se reduzir os riscos



Fonte: Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, 2011.

Maneira para reduzir a severidade do risco:

- Adicionar dispositivos de segurança
- Limitar a capacidade
- Usar tecnologias diferentes

Maneiras para prevenção do risco:

- Fatores de segurança maiores;
- Sistemas em paralelo ou *stand-by*;
- Análise de tensões;

Maneira para detecção do risco:

- Mais testes no produto;
- Mais inspeção;

Registre as ações que devem ser conduzidas para bloqueio da causa da falha ou diminuição da sua gravidade ou ocorrência, de modo concisa e objetiva.

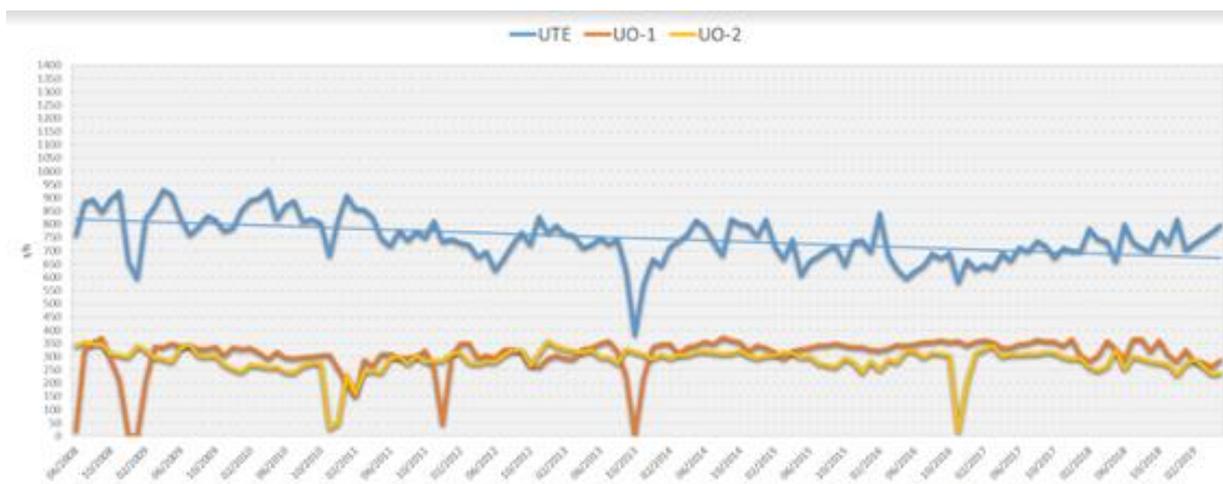
As ações recomendadas deverão fazer parte de um plano de ação para o estabelecimento das contramedidas adotadas, o plano de ação elaborado pode se utilizar da ferramenta “5W2H”.

7. ELABORAÇÃO INICIAL DO RCA E FMEA DAS BOMBAS DE BFW

7.1 ANÁLISE OPERACIONAL

Ao decorrer dos anos a demanda de vapor solicitada a planta de utilidades (UTE) reduziu consideravelmente, influenciando fortemente aos gestores pensarem em todas as combinações possíveis entre os ativos para atender primordialmente a necessidade energética da planta, mas também as melhores condições de integridade dos ativos. Em fevereiro de 2019 a demanda média de vapor foi mensurada entre 800 e 850 t/h, porém o valor médio nos últimos 11 anos se mostra abaixo deste limite, mensurado em 700 t/h.

Figura 12 - Demanda de Vapor da UTE



Fonte: Braskem, 2019.

Conhecendo os riscos de operar com as bombas fora do ponto de melhor eficiência e os impactos financeiros na manutenção, um grupo de estudo da Braskem iniciou uma avaliação partindo dos seguintes questionamentos:

- Dificuldade de estabilidade de bombeamento devido à interferência no lado IHI pelo lado CBC;
- Recirculação (3,5 kgf/cm²g) - custo estimado de 2 Milhões de reais/ano;

O arranjo mecânico do sistema de bombeamento foi então desenhado, modelado e simulado no sistema FNESS e como resultado obtivemos os cenários simulados abaixo:

Figura 13 - Combinações operacionais

CENÁRIOS	Formato	t/h	Bombas IHI	Bombas CBC
1	4+1	890	1	1
2	4+1	890	2	1
3	4+1	890	1	2
4	4+1	1290	1	2
5	4+1	1290	2	1
6	4+1	1290	2	2
7	3+1	690	1	1
8	3+1	1140	1	2
9	3+1	1140	2	1
10	3+1	690	1	1
11	3+1	1140	1	2
12	3+1	1140	2	1
13	3+1	600	1	1
14	2+1	690	1	1
15	2+1	740	1	1
16	2+1	790	1	1

RESULTADO	kgf/cm ²	t/h	kgf/cm ²	t/h					
1	139,5	139,6	139,4	139,4	139,3	140,1	412,0	140,2	477,9
2	151,3	151,4	151,2	151,2	151,1	151,7	247,5	151,9	395,0
3	153,2	155,9	155,7	155,8	155,7	153,5	200,0	156,4	295,9
4	140,5	140,6	140,5	140,6	140,6	141,1	401,8	141,5	443,9
5	138,9	138,8	139,5	139,5	139,4	140,5	408,1	140,3	473,6
6	151,2	151,3	151,1	151,2	151,1	151,6	250,7	151,9	394,5
7	149,4	149,5	149,3	-	149,3	152,5	226,9	150,1	402,8
8	147,3	147,2	147,5	-	147,8	147,7	319,0	148,6	410,4
9	144,1	144,2	144,0	-	144,0	144,6	356,7	144,9	426,5
10	149,4	-	149,3	149,3	149,2	149,9	285,7	150,1	404,2
11	147,4	-	147,3	147,4	147,4	148,0	315,8	148,3	412,0
12	144,2	-	143,7	143,7	143,7	144,7	355,9	144,5	427,9
13	152,1	152,2	152,1	-	152,0	152,5	226,9	152,8	373,8
14	149,4	-	149,3	-	149,3	149,9	286,0	150,1	403,9
15	-	146,8	146,6	-	146,6	147,3	324,5	147,5	415,1
16	143,7	-	143,7	-	143,7	144,3	362,2	144,6	427,5

Fonte: Braskem, 2019.

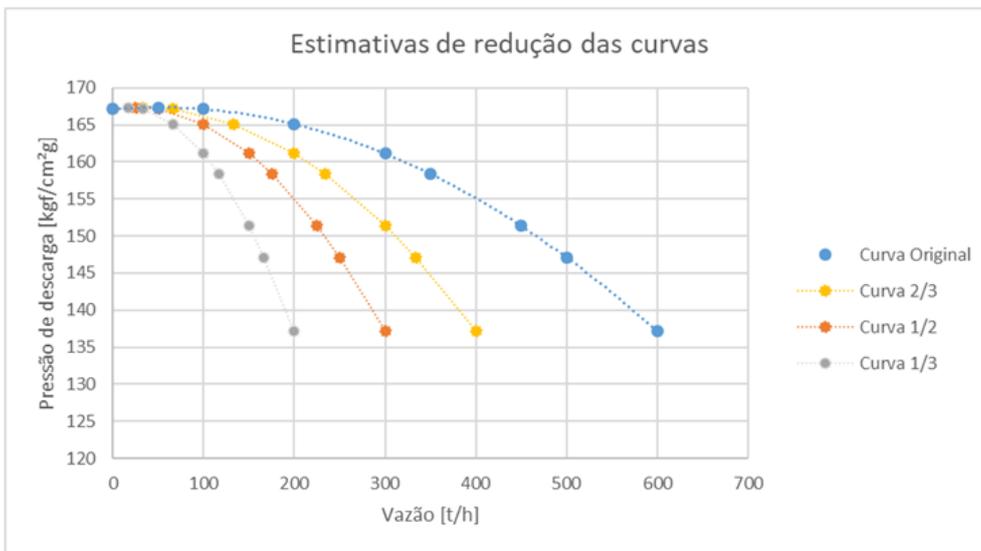
Entretanto como evidenciado nas simulações, nem todas as configurações de arranjos atendem as necessidades de pressão das caldeiras utilizando-se do ponto ótimo das bombas, porém as possíveis soluções estão elencadas na figura abaixo:

Figura 14 - Testes de possíveis soluções

	Formato	Carga	t/h	kgf/cm ²	t/h	kgf/cm ²	t/h	kgf/cm ²	t/h	kgf/cm ²	t/h	kgf/cm ²	t/h	kgf/cm ²	t/h	kgf/cm ²	t/h					
				GV-B	GV-C	GV-D	GV-E	GV-H	Bombas CBC		Bombas CBC	Bomba 1/2	Bomba 1/3	Bomba 2/3	Bomba = CBC	Bomba = IH						
Bomba CBC +1/2	2+1	690	144,2	-	144,1	-	144,1	145,0	426,1	145,0	426,1	144,7	263,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba CBC +1/3	2+1	690	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba CBC +2/3	2+1	690	149,0	-	148,9	-	-	149,8	405,3	149,8	405,3	-	-	-	-	149,5	284,6	-	-	-	-	-
Bomba CBC +2/3	3+1	690	149,2	-	149,0	149,0	149,9	149,8	405,5	149,8	405,5	-	-	-	-	149,6	284,4	-	-	-	-	-
Bomba CBC +2/3	3+1	600	153,2	153,3	153,1	-	153,1	153,9	347,8	153,9	347,8	-	-	-	-	153,6	252,2	-	-	-	-	-
Bomba CBC +1/2	3+1	600	151,4	151,5	151,4	-	151,3	152,2	392,1	152,2	392,1	151,8	207,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bombas = CBC	2+1	790	151,1	-	151,0	-	151,1	151,9	394,6	151,9	394,6	-	-	-	-	-	-	151,8	395,3	-	-	-
Bombas = IH	2+1	790	140,9	-	140,9	-	140,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	141,8	394,1

Fonte: Braskem, 2019.

Figura 15 - Estimativa de Curvas reduzidas



Fonte: Braskem, 2019.

As seguintes configurações foram selecionadas visando a melhor performance e confiabilidade dos ativos:

Figura 16 - Escolha da configuração dos Ativos

<input type="checkbox"/> Bomba CBC +1/2: <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Atende apenas para baixas cargas	<input type="checkbox"/> Bombas iguais ao modelo CBC: <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Atende para cargas elevadas e distribui bem a carga das bombas<input type="checkbox"/> Porém não reduz a perda energética por recirculação
<input type="checkbox"/> Bomba CBC +1/3: <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Menor flexibilidade	<input type="checkbox"/> Bombas iguais ao modelo IHI: <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Não atende para cargas elevadas, porém distribui bem a carga das bombas
<input type="checkbox"/> Bomba CBC +2/3: <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Atende para um range maior de operação	

Fonte: Braskem, 2019.

7.2 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS PARA A CONSTRUÇÃO DO FMEA DAS BOMBAS DE BFW

Para a elaboração do FMEA das bombas de BFW, inicialmente foram definidas todas as premissas a serem estabelecidas com base nos conceitos mostrados neste documento ao longo de todo o tópico 6. Além de uma extensa fundamentação teórica, foi levado em consideração também alguns dados retirados do histórico operacional dos equipamentos analisados, bem como:

- Decréscimo da demanda de vapor nos últimos anos;
- Operação das bombas abaixo do BEP;
- Teste de arranjos e combinações entre as bombas IHI e CBC;
- Análise dos eventos de falha ocorridos entre 2006 e 2019 para classificação da sua natureza de acordo com matriz GUT desenvolvida pela equipe;
- Análise de RCA's dos eventos de falha de custo elevado para identificação de itens de maior criticidade.

Para atingir os resultados esperados deste projeto, esclarecemos abaixo as etapas envolvidas na construção deste documento - Análise de Modo de Falha - sendo estas sequenciadas em: (1) definição dos componentes da bomba de BFW (2) indicação das funções de cada componente; (3) estabelecimento dos modos de falha de cada componente; (4) determinar as

causas para cada modo de falha; (5) indicação dos efeitos de cada modo de falha listado; (6) estabelecimento dos índices de criticidade, frequência e dificuldade de detecção (7) estabelecer ações corretivas e preventivas para cada modo de falha. Após a realização da coleta de informações úteis para responder com clareza aos itens citados acima, foi realizada a primeira etapa básica para a construção da Análise do Modo de Falha, que é a identificação e estabelecimento dos componentes a serem analisados. Com auxílio da literatura e com a indicação dos eventos mais frequentes, listamos os componentes considerados mais críticos para o sistema e mais comumente danificados ou propensos a falhas, sendo estes:

- Selo Mecânico;
- Mancal;
- Eixo;
- Impelidor;
- Carcaça;
- Acionamento;

Devido a diferença de acionamento entre as bombas, podendo este ser turbinado ou motorizado de acordo com o equipamento, serão elaborados 2 FMEAs, um para cada tipo de acionamento. Um descritivo da função de cada componente na bomba de BFW foi elaborado, podendo este ser verificado no quadro 1:

Quadro 1 - Componentes da bomba de BFW e suas funções no sistema

Componente	Função
Selo Mecânico	Evitar vazamento do fluido de trabalho para o ambiente externo da bomba, limitando-se à uma gota por dia
Mancal	Suportar esforços mecânicos gerados pelo eixo em 1850 rpm
Eixo	Transmitir rotação em 1850 rpm
Impelidor	Fornecer energia ao fluido à 160 Kgf/cm ²
Carcaça	Conter fluido de trabalho no interior do equipamento, pressurizado em até 160 Kgf/cm ²
Acionamento Turbinado/Motorizado	Fornecer energia para retirada da bomba do seu estado de inércia

Fonte: Própria, 2019.

Com os componentes e suas funções definidas, listamos também os principais modos de falha de cada um deles, ou seja, a forma mais frequente de detecção de falha de cada componente por meio da observação da falha, como segue abaixo:

Quadro 2 – Componentes e seus principais modos de falha

Componente	Modo de Falha
Selo Mecânico	Vazamento
Mancal	Vibração Excessiva
	Desgaste mecânico
Eixo	Sobrevelocidade
	Sobrecarga
Impelidor	Vazão insuficiente
	Alta temperatura do fluido
	Aumento do consumo energético

Componente	Modo de Falha
Carcaça	Desgaste Mecânico
	Fratura
Acionamento Turbinado	Trip por velocidade
	Ruptura dos elementos rotativos
Acionamento Motorizado	Trip por velocidade
	Desgaste físico

Fonte: Própria, 2019.

As principais causas relacionadas aos modos de falha relatados acima, foram retiradas da revisão bibliográfica feito para este projeto, porém, também estão presentes nos registros de falhas coletados pela equipe, confirmando assim uma grande similaridade entre a teoria e o real, como pode ser observado na figura 17:

Figura 17 - Causas de Falha Reais encontradas no Registro de Falhas da Braskem

BOMBA	FALHA	DATA DE INICIO	CUSTO MR\$
E	Trip da bomba de água de alimentação	13/01/2009	0,14446
D	Vazamento pelo selo mecânico	17/05/2010	331,19133
D	Vazamento selo mecanico (Bosster)	21/10/2010	64,39264
F	Vazamento Pelo Selo B-5302F	06/03/2012	183,69103
C	Bomba com ruido anormal e aquecimento	17/08/2012	90,14747
G	M-Preditiva- vibração anormal Resserviço	22/07/2013	299,87855
D	Eixo bomba priincipal desgastado	23/09/2013	0,2497
C	M-Preditiva - vibração anormal	28/03/2014	351,9057
G	M-preditiva - Vibração anormal	06/06/2016	163,37788
G	Vibração anormal	12/11/2016	86,70014
A	Deslocamento axial do eixo da Bomba	30/12/2016	17,61666
G	M-preditiva - Vibração anormal	06/07/2017	20,56205
G	M-preditiva - Vibração anormal	07/05/2018	15,09816
G	Trip por deslocamento axial	10/10/2018	179,3343

Fonte: Braskem, 2019.

A partir dos eventos de falhas e RCA's obtidos no projeto, foi possível então realizar o cálculo da frequência de ocorrência de cada um deles e finalizar o preenchimento completo do FMEA para que, com base nesta análise

possa ser desenvolvido então um Plano de Manutenção mais focado e consequentemente eficiente.

8. REFERÊNCIAS

BHATTACHARYA, M. A New Approach To Overcome of Boiler Feed Water Pump Seizures. **International Journal of Mechanical Engineering (IJME)**, v. 4, n. 3, p. 93–100, 2015. Disponível em: <http://www.iaset.us/view_archives.php?year=2015&jtype=2&id=67&details=archives>. Acesso em: 13 ago. 2019.

FALCO, R. de; MATTOS, E. E. de. **Bombas Industriais**. 1. ed. Rio de Janeiro.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. 5. ed. Rio de Janeiro.

MOTA, Leandro (Braskem). **Análise de confiabilidade: bombas 5302**.

SCHMITT, J. C.; LIMA, C. R. C. Método de Análise de Falhas utilizando a Integração das Ferramentas DMAIC, RCA, FTA e FMEA. **Espacios**, v. 37, p. 3, 2016. Disponível em: <<https://www.revistaespacios.com/a16v37n08/16370804.html>>. Acesso em: 10 out. 2019.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF ENTERPRISE SERVICES. **Root Cause Analysis**. Disponível em: <<https://des.wa.gov/services/risk-management/about-risk-management/enterprise-risk-management/root-cause-analysis>>. Acesso em: 1 out. 2019.

YOSHIKAWA, S. Boiler Feed Pump (BFP). **Ebara Corporation**, n. 251, p. 11–20, 2016. Disponível em: <https://www.ebara.co.jp/en/about/technologies/abstract/detail/1206178_4377.html>. Acesso em: 10 ago. 2019.