

LUCAS PAMPLONA CARDOZO COSTA

APR E FMEA EM TROCADOR DE CALOR E BOMBA

Guaratinguetá

2015

LUCAS PAMPLONA CARDOZO COSTA
APR E FMEA EM TROCADOR DE CALOR E BOMBA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

Guaratinguetá

2015

C837a	Costa, Lucas Pamplona Cardozo APR e FMEA em trocador de calor de bomba./ Lucas Pamplona Cardozo Costa – Guaratinguetá, 2015. 66 f. : il. Bibliografia : f. 49-50 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho 1. Confiabilidade (Engenharia) 2. Falha de sistema (Engenharia) 3. Bombas de calor I. Título
-------	--

CDU 658.56

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

Lucas Pamplona Cardozo Costa

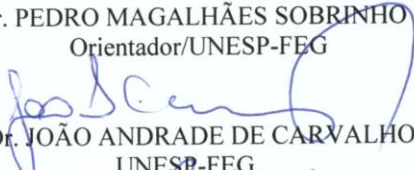
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
UNESP-FEG


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP-FEG

Janeiro de 2016

DADOS CURRICULARES

LUCAS PAMPLONA CARDOZO COSTA

FILIAÇÃO

Francisco de Assis Costa

Simone Pamplona Cardozo Costa

2009/2015

Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço pela oportunidade de ingressar na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, cursando Engenharia Mecânica, um dos sonhos de minha vida.

Agradeço também a minha família, em especial meu pai, Francisco de Assis, pela sua fibra, a minha mãe, Simone, pelo seu afeto e ao meu avô, Francisco de Assis Filho, pelo exemplo de vida e hombridade.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Pedro Magalhães Sobrinho, pela oportunidade de realização do meu trabalho de graduação, pelos ensinamentos dentro e fora de sala e por sua paciência.

Agradeço a República estudantil Mocó, pelos cinco anos de abrigo, ensinamentos, amizades e direcionamentos.

Agradeço a todos os amigos, companheiros e professores pelas oportunidades dadas.

E, em muito especial, a minha namorada, Kenya Stanco, por me dar a felicidade e a oportunidade de sorrir novamente.

“Quis custodiet ipsos custodes?”

Poeta romano Juvenal

COSTA, L. **APR e FMEA em trocador de calor e bomba**. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

A modernização do mundo fez com que a velocidade, precisão e confiabilidade de todos os processos existentes se tornassem cada vez mais necessários. Para que esta evolução ocorresse e ocorra a cada dia, a evolução dos equipamentos foi estratégica, porém não suficiente. É preciso que tais equipamentos garantam que sua função será exercida e, em caso de falha, que ela seja antecipada, para evitar danos e perdas. Portanto a evolução da manutenibilidade e confiança em um equipamento é também primordial. Com isso, o crescimento de formas de manutenção foi impulsionado por esse cenário, formando filosofias de manutenção. Dentre tantas, destaca-se o MCC, que tem seu foco voltado para a identificação, desenvolvimento de parâmetros e atuação prévia. Uma das formas desenvolvidas dessa ideia é o FMEA, processo que foi estudado e implementado nesse trabalho, visando a antecipação de modos de falha e orientação para a utilização de um trocador de calor e uma bomba. Esta implementação teve o auxílio de outro processo de MCC, o APR, que também foi mostrado e implementado, sendo tais resultados usados para iniciar o processo de FMEA. Os resultados apresentam as atividades com maior chance de falha, apresentando, também, as medidas a serem tomadas para evita-las ou minimiza-las. É mostrado, neste trabalho, uma grande preocupação com as válvulas, pois elas fazem o controle e a segurança do sistema, tendo suas falhas relacionadas a acidentes com possibilidade de perigo a pessoas e a todo o sistema, evidenciando a prioridade de atuação.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de falhas. Manutenção. Prevenção.

COSTA, L. **PHA and FMEA in heat exchanged and pump**. Undergraduate Work Mechanical Engineering – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

The modernization of the world made the speed, accuracy and reliability of all existing processes become increasingly necessary. For this evolution to occur every day, the evolution of the equipment was strategic, but not as much as needed. It is necessary for such equipment to ensure its function and, in case of failure, an early diagnosis to prevent loss. Therefore the evolution of maintainability and reliability in equipment is also paramount. Thus, the growth of forms of maintenance was driven by this scenario, forming maintenance philosophies. Among many, there is the RCM, which have its focus on the identification, parameters development and performance preview. One of those methodologies from this idea is the FMEA, process that has been studied and implemented this work, aiming the anticipation of failure modes and guidance for the use of a heat exchanger and a pump. This implementation has the aid of another process of RCM, the PHA, which was also shown and implemented, these results being used to start the FMEA process. The results show the activities with the highest chance of failure, presenting also the measures to be taken to avoid or minimize them. It is shown, in this paper, concern with the valves because they maintain control and system security, and its flaws related to accidents with possible danger to people and the whole system, emphasizing the priority of action.

KEYWORDS: Failure Analysis. Maintenance. Prevention.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formulário padrão de FMEA	23
---	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critério de avaliação de severidade	26
Tabela 2 – Critério de avaliação de ocorrência	29
Tabela 3 – Critério de avaliação de detecção	31
Tabela 4 – Procedimento de Análise Preliminar de Risco	49
Tabela 5 – Procedimento de FMEA para trocador de calor	50
Tabela 6 – Procedimento de FMEA para bomba	52
Tabela 7 – Procedimento de FMEA para subsistema trocador de calor e bomba	58

LISTA DE ABREVIACES

APQP	Programas Avançados de Planejamento da Qualidade em Projetos e Processos
APR	Análise Preliminar de Risco
DFMEA	Análise de Modos e Efeitos de Falhas de Processo (<i>Design Failure Mode and Effect Analysis</i>)
FMEA	Análise de Modos e Efeitos de Falhas (<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>)
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NPR	Número de Prioridade de Risco
PFMEA	Análise de Modos e Efeitos de Falhas de Produto (<i>Product Failure Mode and Effect Analysis</i>)
PHA	<i>Preliminary Hazard Analysis</i>
RBM	<i>Risk Based Maintenance</i>
RBI	<i>Risk Based Inspection</i>
RCM	<i>Reability Centred Maintenance</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
1.2	OBJETIVO.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC)	15
2.2	<i>FAILURE MODE AND EFFECTIVE ANALYSIS</i> (FMEA)	16
2.3	ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO (APR)	33
3	CASO ESTUDADO.....	35
3.1	CARACTERÍSTICAS	35
3.2	TROCADOR DE CALOR	35
3.3	BOMBA	36
4	PROJETO PRELIMINAR.....	37
4.1	APLICAÇÃO DA ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO	37
4.2	APLICAÇÃO DE FMEA NO TROCADOR DE CALOR	37
4.3	APLICAÇÃO DE FMEA NA BOMBA	38
4.4	APLICAÇÃO DE FMEA NO SUBSISTEMA TROCADOR DE CALOR – BOMBA.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40

5.1	DISCUSSÃO DA ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO	40
5.2	DISCUSSÃO DO FMEA NO TROCADOR DE CALOR	41
5.3	DISCUSSÃO DO FMEA NA BOMBA	42
5.4	DISCUSSÃO DO FMEA NO SUBSISTEMA TROCADOR DE CALOR – BOMBA.....	43
6	CONCLUSÃO.....	46
	REFERÊNCIAS.....	47
	APÊNDICE A.....	49
	APÊNDICE B.....	50
	APÊNDICE C.....	52
	APÊNDICE D.....	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No mundo moderno, marcado pela velocidade de inovações e movimentos trabalhistas, a necessidade de uma melhor produção se mostra cada vez maior. Com o desenvolvimento tecnológico as máquinas foram se tornando cada vez mais rápidas, mais complexas, mais leves e com as consequentes deficiências, tais como fator de segurança menos, necessidade de matéria prima com padrão de qualidade mais elevado, operadores melhor preparados e mais uma série de fatores que tornam tais máquinas cada vez mais dependentes de manutenção eficiente e adequada (NEPOMUCENO, 2008).

A manutenção, por definição, é o conjunto de conhecimentos e habilidades para reestabelecer ou melhorar as condições de ideais da função requerida. Para a realização em grandes sistemas, a manutenção se torna muito complexa e trabalhosa, lançando mão de ferramentas que a viabilizam.

Vista como “um mal necessário” devido aos seus custos diretos e indiretos, a manutenção tem se mostrado cada vez mais importante para a indústria. Sabe-se que, através de estudos e análises, o custo total de uma operação de manutenção pode ser menor do que o custo devido à substituição de equipamento, considerando todo o custo direto e indireto que é acarretado por essa ação.

Para uma sistematização complexa de manutenção existem diversos métodos de política de manutenção, todas com bastante embasamento e vasta literatura. Dentre tais, destaca-se a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC ou RCM, do inglês, *Reability Centred Maintenance*), cuja filosofia é a utilização de critérios de seleção de acordo com o tipo de falha que o sistema apresentar. Após a identificação da falha, ou possibilidade de falha, determina-se a prática básica de manutenção, sendo esta corretiva, preditiva ou preventiva, considerando os critérios de avaliação, sendo auxiliado por diagramas de decisão, visando o retardo ou evitar

a falha. É preferível que a prática básica de manutenção seja a preditiva, apesar de mais complexa e relativamente mais cara. Com isso, o trabalho irá visar o auxílio na tomada de decisão, baseando-se em análise de riscos do processo, na confiabilidade e na segurança.

Este trabalho apresentará no capítulo 2, Revisão Bibliográfica, toda a parte teórica necessária para a implementação, descrevendo conceitos e aplicações de MCC e de duas técnicas de MCC, APR e FMEA, explicando detalhadamente a execução de tais procedimentos. No capítulo 3, Estudo de Caso, será descrita a proposta do estudo, quais equipamentos serão utilizados e em que condições de trabalho. Capítulo 4, Aplicações da Metodologias, apresentará a implementação das técnicas conceituadas nos equipamentos propostos. No capítulo 5 são apresentadas as Discussões e Resultados, será analisado todos os procedimentos, todas as decisões e orientações tomadas, descrevendo todo o conceito usado. No capítulo 6 é apresentada a Conclusão, onde serão mostradas as considerações finais, resultados finais e diretrizes a serem tomadas.

1.2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como propósito apresentar uma formatação de MCC, mais especificamente FMEA (Análise de Modo e efeito de Falha, do inglês, *Failure Mode and Effect Analysis*), e a APR (Análise Preliminar de Risco) como auxílio ao FMEA, que serão aplicados em equipamentos separados e, posteriormente, em um sistema contendo os equipamentos, visando mostrar a abordagem de tais métodos e aplicabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC)

A muitos anos a manutenção teve um sinônimo de conserto, ato de reconstituir o defeituoso, e era dada como “um mal necessário”, pois tinha um custo muito elevado para reativar a produção. Porém, ao longo das duas últimas décadas, a manutenção vem demonstrando outro viés, mais voltado para a etimologia da palavra, que é definida por Editora Melhoramentos (2015) como ato ou efeito de manter, sustento, mostrando a mudança da perspectiva da atividade.

Antes muito custosa, direta e indiretamente, a manutenção, antes apenas corretiva, gerava parada de máquina sem previsão, gerando transtornos a linha de produção e troca mais frequente de equipamentos. Com o avanço dos estudos e formas de aplicação, a manutenção vem se tornando cerne da produção, determinando paradas de máquinas estratégicas, uso de materiais mais adequados para aquela atividade, trocas antes de falhas e melhor eficiência média ao longo do tempo de vida útil de um equipamento, tornando-se cada vez mais eficaz e menos custosa.

Com isso, diversas filosofias de seleção de política de manutenção vêm se desenvolvendo, sendo tradicionalmente utilizadas a filosofia de Manutenção da Produtividade Total (TPM, do inglês *Total Productive Maintenance*) e a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC ou RCM, do inglês *Reliability Centred Maintenance*). Atualmente também são citadas modernas filosofias de análise de risco, como a Inspeção Baseada em Risco (RBI, do inglês *Risk Based Inspection*) e a Manutenção Baseada em Risco (RBM, do inglês *Risk Based Maintenance*).

Nascida no Japão por volta de 1970, a TPM visava o aumento de desempenho e produtividade através de uma série de atividades de manutenção, tendo como principal

necessidade o envolvimento de toda a linha de produção da empresa nas atividades, mostrando a complexidade de implementação desta filosofia, sendo está apenas operacional.

Já na filosofia do MCC teve seu início na década de 60, devido a necessidades de uma nova geração de aeronaves comerciais. Tal filosofia tem como intenção a determinação do tipo de falha que pode ocorrer, analisando e avaliando-as, segundo um critério estudado. Seus objetivos visam garantir níveis de desempenho necessários em todo o sistema, mostrando a necessidade de elaboração de uma análise funcional do sistema, e analisar a confiabilidade do sistema, determinando assim o momento de atuação da manutenção, reduzindo atividades desnecessárias.

Para Carazas, 2006, a filosofia do MCC considera que um item está em estado de falha quando este desempenha sua função de forma insatisfatória. Assim, a diferença entre um desempenho satisfatório ou insatisfatório estará relacionada com a função do componente e também com o tipo e contexto operacional do sistema.

Uma falha só é detectada com a habilidade de um operador em verificar uma anomalia na operação do sistema. Em sistemas mais complexos, sensores e técnicas de monitoramento auxiliam na detecção, com informativos sonoros, escritos e/ou luminosos. Porém, algumas falhas podem ocorrer em componentes não observáveis, gerando transtornos sem detecção. Com isso, da mesma forma que as falhas, a ocorrência e a detecção das falhas também tem que ser classificadas, para melhor orientar as tomadas de decisão da manutenção ou mudanças do sistema.

2.2 FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)

2.2.1 Histórico do FMEA

Os primeiros registros conceituais de uma Análise do Modo e Efeito de Falha é datado de 1949, quando o exército americano a desenvolveu para identificar ocorrências de falhas em seus sistemas e equipamentos. Na década de 60, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) desenvolve um método para a identificação de falhas potenciais, a partir de suas causas e efeitos, no projeto aeroespacial Apollo. No final dos anos 60 e início dos anos 70, foram publicados livros de diretrizes para a aplicação da FMEA.

Nos anos 80, o FMEA se torna referência para projetos, na parte de identificação prévia de falhas, principalmente por vasto uso na indústria aeroespacial, sendo em 1988, o desenvolvimento e publicação do manual de instruções do FMEA, onde este foi dividido em FMEA de Processo (*Process FMEA* ou *PFMEA*) e em FMEA de projeto (*Design FMEA* ou *DFMEA*), pela empresa Ford Motor Company, visando a distinção exata de ambos, tornando recorrente seu uso na indústria automobilística. Com isso, a indústria automobilística faz com que seus fornecedores padronizem seus produtos, através de normas instituídas, gerando mais qualidade ao produto requerido. Sendo assim, a Chrysler Corporation e a Ford Motor Company criam em 1994 a Norma QS-9000, visando a criação de critérios de pontuação, através do Programas Avançados de Planejamento da Qualidade em Projetos e Processos (APQP).

2.2.2 CONCEITUAÇÃO DO FMEA

O FMEA é uma ferramenta na qual se analisa cada modo de falha de um determinado sistema buscando determinar as consequências ou efeitos destes em um outro sistema subsequente, classificando cada modo de falha potencial de acordo com sua severidade e

recomendando-se ações para eliminar ou compensar efeitos inaceitáveis (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2002).

Reparos em produtos já entregues ou retrabalhos são grandes motivos de perda financeira e de insatisfação, mesmo que prontamente identificados e consertados. Dependendo do produto, pode também ser gerada uma situação de risco ao cliente, podendo ter consequências drásticas. O método FMEA, ao buscar a eliminação ou diminuição de tais possíveis falhas, faz com que um fator de qualidade, já muito importante ao mercado, aumente consideravelmente: confiabilidade.

Conforme Layzell e Ledbatter (1998), o FMEA é uma ferramenta de planejamento sistemático e analítico da qualidade que tem a finalidade de identificar e endereçar o que poderia dar errado no decorrer de um determinado processo. O método FMEA traz uma sequência lógica e sistemática de avaliar as formas possíveis de um sistema ou processo está sujeito às falhas.

Desde de 1988, o FMEA foi dividido em duas vertentes, a partir do manual estabelecido pela Ford Motor Company, FMEA de projeto e FMEA de produto.

- FMEA de projeto ou DFMEA

Tendo seu melhor desempenho antes da finalização do conceito de projeto, o DFMEA é uma ferramenta de auxílio na avaliação objetiva do projeto, atuando no projeto inicial para a fabricação, montagem, serviço e requisitos necessários. Com isso, aumenta a probabilidade de detecção dos modos de falha potencial, tornando o projeto mais seguro e confiável, mesmo antes da execução do tal.

Por se antecipar ao projeto, podem ser previstas informações adicionais para o desenvolvimento mais cuidadoso e eficiente. Também são previstas análises de validação ou teste, para aprimoramento do projeto, através da ordenação dos modos de falha potencial. Por

ser um documento completo, o DFMEA pode ser a base de monitoramento e recomendações do projeto, em um formato aberto, mantendo-o sempre atualizado e renovado conforme ocorrências de alterações.

O projeto de produção não pode ser iniciado antes do término de um DFMEA, para obter os melhores desempenhos.

O DFMEA não se baseia nos controles de processo para superar eventuais deficiências de projeto, mas ele leva em consideração os limites técnicos e físicos de um processo de fabricação e montagem, como necessidade de conicidade de moldes, limitação na capacidade de acabamento superficial, espaço, tolerâncias e desempenho.

Para a sua realização, um DFMEA tem que definir os requisitos necessários e características funcionais do projeto, se ele tem interação com outros projetos, se o produto a ser fabricado depende da prevenção de um modo de falha de um sistema associado.

- FMEA de processo ou PFMEA

Dando suporte ao processo de fabricação, o PFMEA tem como função identificação e avaliação das funções e requisitos do processo, identificando as causas potenciais e variáveis de controles de processos, para a redução da ocorrência ou mais fácil detecção dos modos de falha potencial.

Podendo ter seu início antes ou durante o estágio de viabilidade do processo, é preferencial que seja considerado também o fator de preparo do ferramental para a produção, sendo iniciado antes do tal, para um melhor controle. Em um PFMEA são necessárias as considerações de todas as operações de fabricação e a inclusão de todos os processos que, dentro da planta, possam impactar as operações.

O PFMEA prevê que o produto atenderá ao objetivo do projeto, podendo ter modos de falha potencial devido a fraqueza de projeto podendo ser inclusos. Seus efeitos e prevenções

são cobertos pela DFMEA. Com isso, não há dependência de alteração no projeto do produto para superação de limitações no processo, porém, este é levado em consideração, para garantir resultados. Portanto, ocasionalmente pode ser identificado uma oportunidade de um projeto para a eliminação ou redução da ocorrência de um modo de falha potencial do processo.

2.2.3 Execução do FMEA

O FMEA é uma metodologia analítica visando a consideração e abordagem de todos os problemas em potencial que podem ocorrer ao longo do processo. É importante neste método a discussão sobre revisões e alterações de projeto para diminuição do risco, sendo priorizados processos críticos e relacionados a segurança do operador ou do equipamento. Por ser uma análise preventiva, sua maior eficiência é obtida quando confeccionada antes do evento, e não após a falha ter ocorrido. Se assim feito, haverá uma diminuição no custo da manutenção e uma maior segurança na operação. Este é um processo dinâmico, evoluindo a cada etapa realizada e ampliando sua abrangência. O FMEA também pode ser utilizado em processos administrativos ou de validação de segurança.

Um FMEA é desenvolvido por uma equipe multifuncional, para obter um maior número de possibilidade de falhas. O tamanho desta equipe depende da complexidade do projeto e do tamanho da empresa, porém sempre liderado por um engenheiro responsável envolvido no desenvolvimento do projeto. É interessante que o cliente, final ou intermediário, participe da realização. Treinamentos para todos os envolvidos tem que ser fornecido pela gerencia do processo.

O FMEA é registrado em um formulário padrão, cujo qual obtém todos os itens necessários para a verificação prévia de falhas associadas a causa, efeitos e ações corretivas de cada componente, subsistema e sistema. A figura 1 mostra a versão atual de tal formulário, especificamente o formulário de um DFMEA, que pode ser visualmente dividido em cabeçalho e corpo do formulário.

Sistema		ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL						Número FMEA _____											
Subsistema		(FMEA)						Página _____ de _____											
Componente		Responsável pelo projeto _____						Elaborado por: _____											
Ano(s) Modelo(s) / Programa(s)		Data-chave _____						Data FMEA (Original) _____											
Equipe Central																			
Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações						
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção			NPR	Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR	

Figura 1: Formulário padrão de FMEA

O cabeçalho é feito para a mais fácil identificação de qual FMEA está sendo considerado naquele formulário, qual tipo de abordagem, quem são os responsáveis pelo projeto, datas e numeração para a diferenciação dos demais formulários. Como geralmente são usados vários formulários de mesmo formato em uma planta, esta etapa é essencial para a organização.

Em seguida ao cabeçalho, tem uma sequência de colunas que formam o corpo do trabalho. Cada coluna tem que ser preenchida com atenção, de preferência com uma equipe pré-determinada, na presença de um especialista. Cada coluna tem uma orientação específica, sendo determinada conforme manual.

- Item/ Função / Requisitos

Coluna de identificação de qual item ou função será analisada pelo método, podendo ser preenchido por uma peça, componente, secção de sistema, subsistema, o sistema completo ou alguma função específica. A equipe deveria considerar o desempenho aplicável em termos de material, processo, meio ambiente e padrões de segurança. (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2002)

- Modo de falha potencial

Modo de falha potencial é definido como a maneira pela qual o componente, subsistema ou sistema poderia potencialmente falhar em atender ou entregar a função intencionada (pretendida) descrita na coluna item. (FORD, 2008)

Com isso, devem ser descritas todas as falhas possíveis do item a ser analisado. Para um melhor desempenho, é recomendado que a técnica de Brainstorming seja utilizada, com base em eventos já ocorridos e possíveis preocupações. Deve ser descrito em termos técnicos e não necessariamente como um sintoma perceptível ao cliente.

Cada item ou função analisada pode ter mais de uma falha potencial, sendo todos descritos. Um grande número de modos de falhas pode representar a má definição de uma função a ser analisada. Alguns modos de falhas descritos podem ser causa de um modo de falha potencial de um subsistema ou sistema adjacentes ou superiores, ou podem acarretar modos de falha em outros equipamentos.

- Efeito (s) potencial (s) de falha

Efeitos potenciais de falha são as consequências que podem ser causadas por um modo de falha em um item ou função. A descrição do modo de falha tem que ser feita de forma que o usuário note ou experimente, mostrando se o modo de falha gera risco, impactando na segurança dele ou do equipamento em questão. Efeitos de modos de falha é a forma cuja qual o usuário identifica a falha, sendo a melhor forma de utilização desta ferramenta caso ocorra uma falha.

- Severidade

Severidade é a valoração de um efeito para um dado modo de falha, qualificando o possível risco que pode ser gerado. Para uma melhor padronização na classificação da severidade, estabeleceu-se um critério para a atribuição de valores, fazendo do valor 1 de representação de menor risco e 10 a de maior risco. Os critérios podem ser revistos antes do início do FMEA, não sendo recomendada a mudança dos critérios de valor 9 e 10, por definirem a situação de maior risco.

A tabulação de critérios pode ser vista na tabela 1, onde são listados efeitos potenciais de falha e os valores recomendados a serem atribuídos a eles.

Tabela 1: Critérios de avaliação de severidade

Efeito	Critérios: Severidade do Efeito do Produto (Efeito no cliente)	Classificação
Falha em atender a requisitos de segurança e/ou regulatório	Modo de falha potencial afeta a operação segura do veículo e/ou não envolve não-conformidade com regulamentação governamental, sem prévio aviso.	10
	Modo de falha potencial afeta a operação segura do veículo e/ou não envolve não-conformidade com regulamentação governamental, com prévio aviso.	9
Perda ou degradação da função primária	Perda de função primária (veículo inoperável, não afeta a operação segura do veículo).	8
	Degradação da função primária (veículo operável, mas com um nível reduzido de desempenho).	7
Perda ou degradação da função secundária	Perda de função secundária (veículo operável, mas funções de conforto/conveniência estão inoperáveis).	6
	Degradação de função secundária (veículo operável, mas as funções de conforto/conveniência apresentam um nível reduzido de desempenho).	5
Incômodo	Aparência ou ruído audível, veículo operável, item não conforme e percebido pela maioria dos clientes (>75%)	4
	Aparência ou ruído audível, veículo operável, item não conforme e percebido por muitos clientes (>55%)	3
	Aparência ou ruído audível, veículo operável, item não conforme e percebido por clientes observadores (<25%)	2
Nenhum efeito	Nenhum efeito perceptível	1

(Fonte: FORD et. al., 2008)

- Classificação

Esta coluna deve ser utilizada para um maior destaque de uma falha potencial, tornando-a prioritária. Uma característica designada como especial sem associação ao modo de falha de projeto é indicada como fragilidade no processo do projeto.

Causa potencial da falha é o processo físico, químico, elétrico, térmico, ou outro, que resulta em um modo de falha potencial. Descrita de forma a um processo corrigido ou controlado, a causa potencial de falha pode representar um fenômeno real por trás do modo de falha ou um possível processo de degradação, ou até mesmo uma cadeia de eventos que conduziram o modo de falha.

Um produto ou processo pode ter diversos modos de falha que sejam correlacionados uns aos outros, devido a um mecanismo de falha comum por trás deles. (FORD, 2008)

Esta coluna é considerada a mais importante de toda a ferramenta, devido a identificação da origem da falha, onde deve atuar o processo preventivo.

- Controle (s) atual (s) de projeto (s)

Controle atual de projeto são as atividades que tem que ser realizadas para assegurar a adequação do projeto aos requisitos funcionais e de confiabilidade, estabelecidos no processo do projeto. Para tal controle, são designadas duas colunas no formulário, Controle de Prevenção e Controle de Detecção, diferenciando as atividades a serem estabelecidas.

- Controle de Prevenção

Usado para a eliminação ou prevenção da ocorrência da causa do mecanismo de falha, ou modo de falha. São recomendadas atividades para a prevenção da causa ou modo de falha:

- Estudos comparativos;
- Projetos à prova de falhas;
- Padrões de projetos de materiais;
- Documentação
- Estudos de simulação
- Verificação à prova de erros

- Controle de Detecção

Desenvolvimento de atividades que possibilitam a identificação de uma possível causa ou modo de falha, por métodos físicos ou analíticos, antes da produção. Da mesma forma que o Controle de Prevenção, há recomendações para a atividade de detecção:

- Revisões de projeto;
- Testes em protótipos;
- Testes de validação;
- Estudos de simulação;
- Projetos de experimentos, incluindo testes de confiabilidade

- Prototipagem em escala real, uso de peças similares
- Ocorrência

Demonstra a probabilidade de uma determinada causa potencial de falha ocorrer, resultando em uma falha, durante o tempo de vida do projeto. São recomendadas atribuição de valores para cada causa de falha, sendo necessário um estudo prévio de situações similares, para se ter uma base de avaliação. A valoração da ocorrência é recomendada na tabela 2, baseando-se no tipo de projeto a ser desenvolvido e em ocorrências similares, podendo ser alterada previamente. A ocorrência é uma classificação relativa e não deve refletir a real probabilidade.

Tabela 2: Critérios de avaliação de ocorrência

(continua)

Probabilidade de falha	Critérios: Ocorrência de causa (Vida Útil / confiabilidade do item/veículo)	Critérios: Ocorrência de causa	Classificação
Muito Alta	Nova tecnologia/novo projeto, sem histórico.	≥ 100 por mil; ≥ 1 em 10.	10
Alta	Falha é inevitável, com novos projetos/nova aplicação, ou alteração no ciclo de trabalho/condições operacionais	50 por mil; 1 por 20	9
	Falha é provável, com novos projetos/nova aplicação, ou alteração no ciclo de trabalho/condições operacionais	20 por mil; 1 em 50	8
	Falha é incerta, com novos projetos/nova aplicação, ou alteração no ciclo de trabalho/condições operacionais	10 por mil; 1 em 100	7
Moderado	Falhas frequentes associadas, a projetos similares, ou em simulação e testes de projetos	3 por mil; 1 por 500	6

Tabela 2: Critérios de avaliação de ocorrência

(conclusão)

Probabilidade de falha	Critérios: Ocorrência de causa (Vida Útil / confiabilidade do item/veículo)	Critérios: Ocorrência de causa	Classificação
Moderada	Falhas ocasionadas, associadas a projetos similares, ou em simulação e testes de projetos	0,5 por mil; 1 em 2.000	5
	Falhas isoladas, associadas a projetos similares, ou em simulação e testes de projetos	0,1 por mil; 1 em 10.000	4
Baixa	Somente falhas isoladas, associadas a projeto praticamente idêntico, ou em simulação e testes de projeto.	0,01 por mil; 1 em 100.000	3
	Falhas não observadas, associadas a projeto praticamente idêntico, ou em simulação e testes de projeto.	$\leq 0,001$ por mil; 1 em 1.000.000	2
Muito baixa	A falha é eliminada por controle preventivo	Eliminada	1

(Fonte: FORD et. al., 2008)

Para uma melhor avaliação devem ser consideradas questões como histórico, se é evolução do item anterior, se é um item completamente novo, aplicação e se foram implementados controles preventivos.

- Detecção

É a classificação associada ao Controle de Detecção, mostrando a dificuldade de percepção da falha. Para isso, assume-se que a falha tenha ocorrido e avalia-se a capacidade de

dos controles de detectar esse modo de falha. A detecção também é uma classificação relativa, fazendo uma classificação cada vez menor se o controle do projeto for aprimorado, sendo mostrado na tabela 3 a classificação recomendada, evidenciando o valor 1 como o de mais fácil detecção e 10 como a mais difícil. Esses valores podem ser modificados se em consenso com a equipe de trabalho.

Tabela 3: Critérios de avaliação de detecção

(continua)

Oportunidade para detecção	Critérios: Probabilidade de detecção através do controle de Projeto	Classificação	Probabilidade de detecção
Nenhuma oportunidade de detecção	Nenhum controle de projeto atual. Não pode detectar ou não está analisado.	10	Praticamente impossível
Improvável detectar em qualquer estágio	Os controles de análise/detecção de projeto têm uma fraca capacidade de detecção. Análise virtual não está relacionada às condições operacionais reais esperadas.	9	Muito remota
Após o “Congelamento” do projeto (momento a partir do qual não se deve mais modificar o projeto) e antes do lançamento	Verificação/validação do produto, após “Congelamento” do projeto e antes do lançamento, com ensaios passa/falha (testes de subsistemas ou sistemas, com critérios de aceitação tais como condução e manuseio, avaliação de transporte, etc.).	8	Remota
	Verificação/validação do produto, após “Congelamento” do projeto e antes do lançamento, com ensaios de teste para falhar (testes de subsistemas ou sistemas, até que a falha ocorra, antes de interações com o sistema).	7	Muito baixa
	Verificação/validação do produto, após “Congelamento” do projeto e antes do lançamento, com ensaios de degradação (testes de subsistemas ou sistemas após testes de durabilidade).	6	Baixa

Tabela 3: Critérios de avaliação de detecção

(conclusão)

Oportunidade para detecção	Critérios: Probabilidade de detecção através do controle de Projeto	Classificação	Probabilidade de detecção
Antes do “Congelamento” do projeto	Validação do produto (ensaio de confiabilidade, testes de desenvolvimento ou validação), antes do “Congelamento” do projeto, usando ensaios passa/falha.	5	Moderada
	Validação do produto (ensaio de confiabilidade, testes de desenvolvimento ou validação), antes do “Congelamento” do projeto, usando teste para falhar.	4	Moderadamente alta
	Validação do produto (ensaio de confiabilidade, testes de desenvolvimento ou validação), antes do “Congelamento” do projeto, usando ensaios de degradação	3	Alta
Análise virtual correlacionada	Os controles de análise/detecção de projeto têm uma forte capacidade de detecção. Análise Virtual está altamente correlacionada às condições operacionais reais esperados antes do “Congelamento” do projeto	2	Muito alta
Detecção não aplicável. Prevenção de falha	A causa de falha ou modo de falha não pode ocorrer porque foi totalmente prevenida através de soluções de projeto	1	Praticamente certa

(Fonte: FORD et.al, 2008)

- Número de Prioridade de Risco (NPR)

O Número de Prioridade de Risco (NPR) é um fator calculado a partir do produto entre os três fatores de valoração do modo de falha, severidade, ocorrência e detecção, sendo representado na equação 1.

$$\text{NPR} = \text{Severidade (S)} \times \text{Ocorrência (O)} \times \text{Detecção (D)} \quad (1)$$

Por se mostrar a interação dos três fatores de valoração do FMEA, o NPR é um fator de direcionamento de ações, podendo ser previamente delimitado valores máximos para o mesmo, visando uma melhor e mais fácil interação. Porém, estabelecer tais limites pode gerar um comportamento errado no momento da execução do FMEA, devido à redução intencional dos valores de ocorrência e detecção, para a redução do valor do NPR.

Com isso, embora o NPR seja uma boa orientação para a tomada de decisão, prioridades e ações, ele não pode ser o único nem o principal, por ser calculado com dois fatores relativos, ocorrência e detecção, mostrando-se também um número relativo, gerando uma queda na confiabilidade se usado unicamente. Para o não uso exclusivo desse fator, a tomada de decisão deve ser feita visando os maiores valores de severidade e os maiores valores de NPR.

- Ações recomendadas

Após a análise do modo de falha potencial, são listadas as ações recomendadas para a extinção ou diminuição da chance da falha. Portanto, ações recomendadas visam a prevenção, tendo maior influência na probabilidade de ocorrência e detecção. Uma ação recomendada pode também mudar o valor de severidade, mas, para isso, são necessárias, geralmente,

mudanças profundas no projeto, sendo recomendadas apenas para casos de altos níveis de severidade (nível 9 ou 10).

Recomenda-se que as datas de efetivação das ações tomadas sejam registradas para um melhor controle e determinação das próximas ações.

- Responsabilidades e data de conclusão pretendida

Para cada ação que deve ser tomada para o controle dos modos potenciais de falha, deve-se ter a designação de um responsável pela tal, determinando prazos e responsabilidades. O engenheiro responsável tem a obrigação de verificação e assegurar que todas as ações foram concluídas com sucesso.

- Resultados de ações

Com todas as medidas tomadas, todas as ações em andamento, os métodos de prevenção estabelecidos e a análise inteiramente estruturada, o último bloco de cinco colunas mostra quais serão os valores dos índices do FMEA, severidade, ocorrência, detecção e NPR, caso tudo transcorra como previsto. A coluna ação realizada descreve brevemente a ação que foi desenvolvida para diminuição dos índices.

2.3 ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO (APR)

2.3.1 Conceituação da APR

Tendo também a denominação de PHA (*Preliminary Hazard Analysis*) e criação pelas Forças armadas dos Estados Unidos, este modo de análise consiste em um levantamento de todas as possibilidades de falhas de um projeto, listando as possíveis soluções para sanar ou amenizar a falha. A APR é uma técnica profunda de análise de risco, tendo o seu maior potencial de uso em ambientes com pouco ou nenhum conhecimento de experiências de risco, mostrando-se muito importante em operações de alta inovação. Quando usada em ambientes de domínio público, ou seja, já usualmente realizados, seu uso é limitado como auxiliar para outras técnicas mais apuradas e detalhadas, como HAZOP, Gretener ou FMEA, sendo seu objetivo principal a determinação dos riscos e as medidas preventivas antes da fase operacional.

O principal objetivo deste método é identificar os “perigos”, produtos perigosos (líquido e gases inflamáveis, por exemplo), ou os componentes críticos dentro do sistema e revisar os pontos nos quais seja possível acontecer uma liberação de energia de forma descontrolada. Desta forma, são analisados materiais perigosos que operam no sistema, os equipamentos e os componentes, assim como processos, operações e equipamentos de segurança. O resultado da análise proporciona recomendações para reduzir ou eliminar estes perigos (SÁNCHEZ, 2005)

2.3.2 Execução da APR

Para realizar uma APR, determina-se o equipamento ou sistema a ser desenvolvido e faz-se um levantamento de possíveis falhas. Esse levantamento pode ser feito através de um *brainstorming* com funcionários de diversas áreas, para abranger um maior número de

experiências possível, também pode ser feita por similaridade, com projetos próximos ou parecidos, ou até mesmo estabelecer os limites de atuação e estudar possíveis erros na parte do sistema que realiza tal operação.

Posteriormente, determina-se quais são os principais riscos, que são aqueles que põe em evidência a possibilidade de dano ao operador, perda ou dano ao equipamento ou perda de função. Tais falhas tem que ser combatidas prioritariamente para minimizar perdas. Feito a identificação dos riscos principais, determina-se os riscos iniciais e contribuintes de cada risco principal, sendo esses os fatores iniciais ou que intensificam a ocorrência de um risco.

Após tais identificações, estuda-se formas de soluções dos riscos que sejam compatíveis com o sistema e viável financeiramente. Algumas falhas podem não ter solução, fazendo-se necessário um controle da operação, sendo possível uma manutenção preditiva, tornando a operação mais segura, porém gerando atraso de máquina, podendo ser muito prejudicial a produção. Ao término da determinação das soluções, mostra-se interessante a realização de métodos de restrição de dano, sendo este o estudo de métodos de redução de danos causados se ocorrer uma perda de controle das falhas.

3 ESTUDO DE CASO

A seguir será estudado um caso hipotético de uso de FMEA, aplicado em dois equipamentos, trocador de calor e bomba, e posteriormente em um subsistema formado pelos mesmos equipamentos, sendo auxiliado pela execução de uma APR prévia, tendo a intenção de se aproximar ao máximo da realidade.

3.1 CARACTERÍSTICAS

Será implementado nesse trabalho um DFMEA para uma composição entre um trocador de calor e uma bomba e posteriormente, um DFMEA de subsistema, mostrando a interação da composição caso haja algum tipo de falha em algum dos componentes, as possíveis consequências no outro. A ferramenta da APR será utilizada para o levantamento de dados que serão posteriormente usados, como o modo de falha, consequências e soluções.

É importante ressaltar que é fundamental a determinação dos equipamentos conforme realidade de uso, para maior veracidade e confiabilidade nos resultados.

3.2 TROCADOR DE CALOR

Com a existência de uma enorme gama de trocadores de calor a serem utilizados, se faz necessária de determinação de apenas um tipo de trocador de calor para ser analisado.

Portanto, será determinado um trocador de calor casco tubo, com chicanas de aço inoxidável, por ser um trocador de calor mais comum, com maior aplicabilidade e boa resistência física e a corrosão. O fluido de trabalho é óleo diesel, que se deseja diminuir a sua

temperatura para que seja possível o seu bombeamento, visto que quanto maior a temperatura do líquido a ser bombeado, menor a viscosidade, e, dentro de limites previamente determinados, impossibilita o bombeamento. O fluido refrigerante será água, devido a abundância e facilidade de obtenção de tal recurso. Com isso, é preferível que a tubulação interna ao trocador seja feita de aço inoxidável, evitando corrosão e suportando a temperatura de trabalho, com vedações feitas por borrachas de alta resistência.

3.3 BOMBA

Para ser mantida a mesma proposta de escolha de equipamento, visando a iteração final entre eles e é sabido a vasta gama de bombas no mercado, a escolha deste equipamento há de ser compatível com a escolha do trocador de calor.

Com isso, será considerada uma bomba com volume de deslocamento constante, com dados baseados na bomba da fabricante Rexroth Bosch Group, tipo PGH, tamanho construtivo 2, faixa de rotação de 600 a 3000 rpm, volume deslocado de 8,2 cm³, vazão de 11,8 l/min, pressão de entrada de operação de 0,8 a 2 bar e pressão máxima de operação de 315 bar.

Como pode ser observado, é uma bomba de pequeno porte, porém podendo satisfazer as condições estabelecidas para o estudo.

4 APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS

O início do projeto é dado com a execução da Análise Preliminar de Risco e definição das prováveis falhas de cada equipamento, mostrando as possíveis consequências e formas de solução de cada uma delas. Com essa visão geral dada por esse método, é iniciado o FMEA, para cada equipamento, a partir dos modos de falha mostrados. É importante ressaltar que todos os dados obtidos e valores dados serão atribuídos conforme literatura e estudo de casos reais, com intenção de maior aproximação com a realidade.

4.1 APLICAÇÃO DA ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO

Para a aplicação da Análise Preliminar de Risco, serão levados em consideração fatores de possíveis falhas em cada equipamento considerado. Serão também inclusos componentes como tubulação, válvulas e filtros, por serem necessários para o funcionamento do sistema, podendo reutilizar as conclusões tomadas nas aplicações do FMEA. Por não ter um formulário pré-determinado, o APR exige uma sensibilidade para o seu formato, determinação de avaliações e valores.

No Apêndice A, tabela 4, pode ser vista a APR. Vale ressaltar que as medidas avaliadas e as recomendações feitas têm seu foco na preservação do equipamento e da continuidade da produção. É válido também atenção as notas dadas no fator risco, mostrando qual o mais danoso pode ser o modo de falha, tendo o de maior número como principal atuação.

4.2 APLICAÇÃO DE FMEA NO TROCADOR DE CALOR

Focado na prevenção de modos de falha do equipamento trocador de calor, a aplicação de FMEA no trocador de calor ignorará os efeitos ao redor do foco, mostrando apenas possíveis erros internos. Baseado na APR citada em 4.1, este FMEA poderá mostrar toda a influência de um modo de falha no equipamento, fazendo a previsão de atos de manutenção, visando principalmente a integridade do equipamento e um melhor desempenho no resfriamento do fluido de trabalho, neste caso, óleo diesel.

No Apêndice B, tabela 5 pode ser visto o procedimento de FMEA no trocador de calor. A abordagem será totalmente feita nos padrões determinados.

4.3 APLICAÇÃO DE FMEA NA BOMBA

Focado na prevenção de modos de falha do equipamento bomba, a aplicação de FMEA na bomba ignora os efeitos ao redor, mostrando somente erros internos. Baseado na APR feita previamente, o FMEA na bomba poderá mostrar toda a influência de um modo de falha no equipamento, fazendo a previsão de atos de manutenção, visando principalmente a integridade do equipamento e um melhor desempenho no bombeamento do fluido de trabalho, neste caso, óleo diesel.

No Apêndice C, tabela 6, pode ser visto o procedimento de FMEA na bomba. A abordagem será totalmente feita nos padrões determinados.

4.4 APLICAÇÃO DE FMEA NO SUBSISTEMA TROCADOR DE CALOR - BOMBA

Focado na visão geral do sistema, a aplicação de FMEA no subsistema mostrará a interação entre os dois equipamentos e equipamentos de conexão entre ambos. Baseado em todo o APR feito, a prevenção de modos de falha e manutenibilidade geral do sistema é a intenção desta aplicação. Serão ponderadas situações de proteção do sistema e condução do fluido de trabalho.

No Apêndice D, tabela 7, pode ser visto o procedimento de FMEA no subsistema trocador de calor – bomba.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os procedimentos realizados de APR e FMEA tiveram como base procedimentos reais e levaram em consideração os dados dos equipamentos determinados, tendo em vista que são equipamentos de pequeno porte e parâmetros razoavelmente baixos. Levou-se em conta que tanto a APR quanto o FMEA são documentos dinâmicos, podendo haver mudanças, melhoras, aumento ou diminuição de valores, adição de modos ou causas de falhas potenciais.

5.1 DISCUSSÃO DA ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO

Para o processo de APR foi considerado cada equipamento e suas possíveis falhas, causas e soluções. O fator risco qualificava o modo de falha avaliado. Esse modelo foi proposto para uma mais fácil adequação desse procedimento ao procedimento de FMEA, visto que os parâmetros Tipo, Função, Modo de Falha, Consequências e Recomendações se assemelham, respectivamente, a Item/Função, Requisitos, Modo de Falha Potencial, Efeitos Potenciais de Falha e Ações Recomendadas.

No trocador de calor a abordagem de falhas mostrou-se mais voltada para conexões, vedação e limpeza, tendo em vista que as precauções tomadas têm intenção de não mistura do fluido de trabalho com o fluido refrigerante, maior eficiência da transmissão de calor, propriedades do fluido de trabalho e na conservação do equipamento. A simplicidade do equipamento é refletida no fator de risco dos modos de falha, onde todos têm um valor médio de 4 ou 5 e precauções simples como verificação, medição, limpeza e adição de reagentes. Porém essa análise e a execução das recomendações tem que ser executadas devidamente, pois este é o primeiro equipamento do sistema, e se apresentar falhas, pode comprometer os equipamentos subsequentes.

Para a análise da bomba a quantidade de modos de falha foi superior às do trocador de calor, também mostrando a maior complexidade do equipamento. Modos de falhas como “Vazamento pelo selo mecânico”, “Danificação do acoplamento”, “Corrosão” e “Cavitação” demonstram possíveis danos ao equipamento, podendo gerar perda de peças, diminuição ou parada de produção, acarretando prejuízo financeiro. Com isso, níveis consideráveis do fator de risco deste equipamento foram atribuídos, visando uma maior atenção para este equipamento. As recomendações demonstram preocupações prévias com o equipamento, como ensaios funcionais e de estanqueidade, e medidas operacionais de segurança, como lubrificação e treinamento operacional.

Como complemento da APR, foi realizada uma análise dos elementos de interação entre os dois equipamentos do subsistema. Foram estudados os modos de falha de válvulas, tubulação e filtragem. A tubulação apresentou modos de falhas relacionados com estanqueidade e integridade da tubulação, essenciais para um bom transporte do fluido de trabalho, sendo suas recomendações também voltadas para tal entendimento. Os filtros, utilizados para a diminuição das impurezas levadas pelos fluidos, estiveram em um modo de falha relacionado com sua conservação e qualidade do fluido após a filtragem.

Com tudo, as válvulas se mostraram as peças mais importantes de todo o subsistema. Relacionadas a proteção, limitação, controle e isolamento, seus modos de falha podem gerar sobrecarga ou falta de controle, podendo acarretar acidentes, riscos de vida e ao sistema. Sendo assim, seu fator de risco foram os mais altos do procedimento, evidenciando assim a necessidade de maior controle sobre tais peças.

5.2 DISCUSSÃO DO FMEA NO TROCADOR DE CALOR

Para o procedimento de FMEA no trocador de calor, cada modo de falha previsto na APR foi considerado e analisado separadamente. Todos os modos de falha potenciais do trocador de calor tiveram uma severidade variando de 4 até 6, fatores considerados moderados,

não necessitando de alterações no projeto do equipamento, mostrando-se necessárias apenas manutenção preditiva, limpeza e programação para parada de máquina e troca de peças.

Os modos de falha que visam a estanqueidade do sistema, sendo estes “Desgaste nas borrachas de vedação” e “Folgas nas conexões da tubulação”, apresentaram níveis mais altos de NPR, demonstrando uma necessidade de manutenção e foco nestes critérios. O modo “Incrustação das placas” refere-se apenas a limpeza e conservação do equipamento, que tem forte influência para os cálculos de transmissão de calor em um trocador de calor, porém pouco risco de acidente ou danos ao equipamento, baixos valores de severidade e NPR, demonstrando uma menor necessidade de prioridade em uma tomada de decisão.

Com isso, ficou determinado que a verificação deste equipamento deve ser mensal, com parada de máquina e limpeza interna anual. É de suma importância que todos os medidores estejam calibrados conforme normas e que as aferições sejam feitas por mais de um colaborador, evitando equívocos ou falta de habilidade. Na montagem do equipamento, a supervisão deverá acompanhar, controlando a instalação ou remontagem pós manutenção com check list.

5.3 DISCUSSÃO DO FMEA NA BOMBA

À exemplo do procedimento de FMEA no trocador de calor, o procedimento FMEA na bomba utiliza os modos de falha da bomba previstos na APR, também analisando individualmente cada um. Ao verificar cada modo de falha, foi observado um índice de severidade levemente mais alto que os níveis no trocador de calor, o que demonstra um maior dano na possível ocorrência de uma falha neste equipamento. Portanto, uma maior prioridade na tomada de decisão deverá ser à bomba, em comparação com o trocador de calor.

Modos de falha de danos ao equipamento, como “Danificação do acoplamento”, “Cavitação” e “Corrosão”, e modos de falha que se associam a prejuízos no fluido de trabalho e na operação, como “Vazamento pelo selo mecânico” e “Atrito provocado por afrouxamento

de peças internas”, são os que deveram ter um maior foco nas tomadas de decisão. Contudo, o modo de falha “Defeito elétrico” obteve o maior índice de NPR, por representar um fato recorrente e de difícil detecção, sendo necessárias medidas de segurança e estudo de proteção prévios.

Com isso, ficou determinado que, do mesmo modo que o trocador de calor, a verificação do equipamento deve ser mensal, parada de máquina e limpeza anual. O controle de parâmetros de entrada e saída, como pressão e vazão, devem ser verificados diariamente, por mais de um colaborador, para evitar erros ou inabilidades, certificando-se de uma maior confiança nos valores medidos. Medidores devidamente aferidos conforme norma. Na montagem e remontagem após a manutenção, a supervisão, com auxílio de check list, foi prevista para um melhor controle e diminuição de possíveis erros. Teste de estanqueidade, *run out* e em amostras para a determinação da pureza do fluido de trabalho também foram previstos.

5.4 DISCUSSÃO DO FMEA DE SUBSISTEMA TROCADOR DE CALOR - BOMBA

Como última análise, foi proposto um procedimento de FMEA de subsistema, tendo em vista a interação entre trocador de calor e bomba, mostrado pelas peças que fazem tal interação. Portanto, as peças de interação do subsistema, que tem a função de transporte e limpeza de fluido de trabalho e proteção dos equipamentos, podem evidenciar um possível modo de falha dos equipamentos.

Para tal análise foi feita a mesma consideração que nos itens 5.3 e 5.4 de uso dos modos de falha listados na APR, porém, por se tratar de três itens a serem analisado, foram ponderados separadamente, refinando o procedimento.

Por ser um sistema puxado, ou seja, a atuação da bomba que move o fluido de trabalho do trocador, o estudo da tubulação pode indicar algum tipo de modo de falha no equipamento motor, nesse caso, a bomba. Mudanças de vazão ou pressão na leitura da tubulação podem indicar queda de rendimento de tal equipamento. Em contrapartida, uma oscilação na

temperatura de saída do trocador de calor ou na tubulação podem indicar modos de falha no trocador de calor. Portanto, a conservação e a estanqueidade têm que estar em boas condições para que tal avaliação seja possível. Possivelmente modos de falha da própria tubulação são ocasionados por modos de falha dos outros equipamentos, como “Fadiga térmica” que pode ser causada por falha no trocador de calor.

Em uma avaliação geral, os níveis de severidade de “Tubulação” se mostraram moderado ou levemente alto, entre 6 e 7, devido a possibilidade de perda do fluido de trabalho, de propriedades ou da própria tubulação. Mesmo assim, os níveis de ocorrência se mostraram altos em algumas situações, como “Dilatação térmica” e “Amassados ou arranhões”, evidenciando uma maior exposição a falhas. Com isso, medidas de proteção da tubulação, como pintura e revestimento, e monitoramento dos parâmetros do fluido de trabalho são de alto prioridade. Testes de estanqueidade, em amostras de fluido e procedimento de “caça vazamento” são recomendados. Troca de conexões e tubulação podem ser estudadas, porém só sendo realizadas com extrema necessidade ou por obsolescência.

Como já mostrado no item 5.1, as válvulas têm uma função de controle e proteção do sistema, sendo que seus modos de falha podem gerar risco de acidente pessoal ou no equipamento, tendo, portanto, os mais altos níveis de severidade de toda a análise. Sendo assim, mesmo que os valores de NPR de algum dos itens não sejam altos, toda essa análise será a prioritária. Para este caso, um estudo de mudança de projeto, uso de um material mais adequado ou medidas mais cautelosas foram recomendadas, visando uma maior segurança do sistema, antecipação da ocorrência do modo de falha e tentativa de diminuição dos valores da severidade.

Procedimentos estabelecidos nas demais análises como manutenção, troca de peças e limpeza tiveram o intervalo de tempo entre um procedimento e outro reduzido para uma melhor detecção e aumento de confiabilidade de operação. Testes prévios e verificação de parâmetros deveram ser realizados por mais de um colaborador. Lubrificação das válvulas que tem essa necessidade deve ser feita e verificada com constância.

A análise de filtros teve que ser cuidadosamente desenvolvida, pois a filtragem influencia na pureza do fluido trabalho, a lubrificação e diminui a vazão do sistema. Portanto,

a filtragem é importante para a maioria das etapas de manutenção e verificação do sistema. Por essa influência direta em todo o sistema, foi levemente elevado o valor de severidade de todos os modos de falha, pelos modos de falha que podem ocorrer em subsequência. Esta análise pode indicar possíveis modos de falha dos outros equipamentos, como “Excesso de impureza no elemento filtrante”, se corriqueiro, pode indicar detritos no trocador de calor ou alta vazão do sistema.

Ficou determinado que a manutenção e limpeza dos filtros serão mensais e as trocas de elementos filtrantes a cada três meses. Supervisão da montagem e remontagem, com verificação por check list, e testes de estanqueidade. Uso de sequência de filtros, visando uma melhor filtragem e manutenção. As borrachas de vedação do filtro terão o mesmo regime de manutenção e trocas dos elementos filtrantes.

6 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido neste trabalho utilizou métodos de prevenção e previsão de manutenção. Para isso, foi necessário um aprofundamento nos métodos propostos, APR e FMEA, suas funcionalidades e formas de atuação. Foi também necessário um estudo e aprofundamento nos equipamentos utilizados para o estudo e na forma de interação de ambos.

O procedimento de APR se mostrou mais prático e objetivo. Com uma abordagem direta, a determinação dos modos de falhas e seus níveis de risco ao operador e ao sistema são claras e as recomendações foram usadas de forma generalizada, porém é um método base de avaliação, que apresentou grande valia quando usado de auxílio para outro método. Através dessa análise, já se evidenciava os potenciais modos de falha críticos, neste caso, as válvulas, e formas de ameniza-los.

Para a aplicação do método de FMEA, foi importante o estudo aprofundado de cada etapa, demonstrando como seria realizado todo o procedimento. A determinação dos valores de severidade, ocorrência e detecção, e conseqüentemente o NPR, se mostrou a etapa mais trabalhosa, pois tais considerações direcionam as tomadas de decisão do projeto. No desenvolvimento dos três procedimentos, o auxílio da APR determinou o direcionamento das considerações e estudos realizados. Ao fim, pode ser evidenciada a prioridade na atuação das válvulas, como previsto na APR, por serem peças de controle e proteção do sistema, podendo gerar danos ao operador e ao sistema.

Com isso, estima-se que, se seguidas as recomendações previstas nos procedimentos, os níveis de confiabilidade do sistema serão elevados e a as paradas de manutenção previstas não prejudicaram a produção. Situações não previstas podem ser inclusas nos procedimentos, refinando ainda mais o estudo. A proposta de estudo foi realizada com sucesso e os resultados obtidos se mostraram dentro da realidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31000**: gestão de risco – princípios e diretrizes. São Paulo, 2009.

FORD MOTOR COMPANY, CHRYSLER LLC, GENERAL MOTORS CORPORATION, **Análise de modo e efeitos de falha potencial (FMEA)** – Manual de Referência. 4.ed São Paulo. Instituto de Qualidade Automotiva. 2008. 141p.

GUEVARA F. J. C., **Decisões baseadas em risco: método aplicado na indústria de geração de energia para a seleção de equipamentos críticos e políticas de manutenção**. 2011. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual da confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro. Impressos no Brasil. 2001, 374p.

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva**. v. 1. São Paulo. Edgard Blücher, 1989, 501p.

PALADY, P. **FMEA: análise dos modos de falha e efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram.** São Paulo. Ed. IMAM, 1997, 270p.

PASSOS, L. **Desenvolvimento de uma metodologia para análise de confiabilidade de sistemas de um UHe.** 2015. 136f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2015.

SAE THE SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS 1739. **Potencial failure mode and effects analysis.** Warrendale: SAE International, 2002. 57p.

EDITORA MELHORAMENTOS. Michaelis: dicionário online. Disponível em: <http://michaelis.uol.com.br/moderno/portugues/index.php?lingua=portugues-portugues&palavra=manuten%E7%E3o>> Acesso em: 21 dez. 2015

APÊNDICE A

Tabela 4: Procedimento de Análise Preliminar de Risco

Tipo	Função	Modo de falha	Consequências	Risco	Recomendações
Trocador de calor	Resfriamento do fluido de trabalho	Desgaste nas borrachas de vedação	Risco de contaminação; perda das características físicoquímicas do óleo; distúrbio no funcionamento do sistema	5	Verificar estado de funcionalidade dos instrumentos de medição (temperatura e vazão); Inspeccionar as placas conforme manual do fabricante; estudar a necessidade de aditivo químico no refrigerante
		Folgas nas conexões das placas		4	
		Folgas nas conexões da tubulação	Distúrbio no funcionamento do sistema	4	
		Incrustação das placas	Perda das características físicoquímicas do óleo; má formação do filme fluido	4	
Bomba	Bombeamento do fluido de trabalho	Vazamento pelo selo mecânico	Distúrbio no funcionamento do sistema; desligamento da bomba e possível acionamento de bomba secundária de menor pressão	6	Verificar ajuste do pressostato de alta pressão das bombas; realizar ensaios funcionais nas bombas; verificar estanquidade das vedações e conservação dos acoplamentos; Lubrificar o acoplamento; Verificar a fixação das bombas às bases; Lubrificar rolamentos e bombas; Treinamento operacional
		Danificação do acoplamento		5	
		Cavitação		6	
		Corrosão		7	
		Defeito elétrico		5	
		Atrito provocado por afrouxamento de peças internas		7	
		Falha de lubrificação		5	
		Falha no rolamento	Risco de queda da bomba	6	
Falha de ajuste (pressão ou vazão)	Distúrbio no funcionamento do sistema; desligamento da bomba e possível acionamento de bomba secundária de menor pressão; risco de queda da bomba; risco de rompimento de vedações e conexões	7			
Tubulação	Condução do fluido de trabalho	Folgas de conexão	Distúrbio no funcionamento do sistema; comprometimento na reposição ao sistema	4	Verificação geral: estanqueidade, limpeza e pintura; Efetuar purga para retirada do ar
		Desgaste nas borrachas de vedação		4	
		Danos na tubulação		4	
Válvulas	Isolar componentes do sistema e acessórios de supervisão e controle	Travamento de haste	Impossibilidade de executar manutenção; risco de acidente pessoal	6	Verificação geral: estanqueidade, limpeza, conservação
		Deteriorização da sede ou contra sede		6	
		Falha no fechamento		7	
	Limitar a pressão caso haja obstrução	Falha no ajuste da válvula	Risco de rompimento das tubulações e vedações; risco de quebra da bomba; Possibilidade de contaminação do ambiente; risco de acidente pessoal	8	
		Travamento da válvula		8	
		Falha no mecanismo		8	
Filtros	Filtragem do fluido de trabalho	Rompimento da malha do filtro	Risco de contaminação do fluido com resíduos	4	Verificar condições gerais; acompanhamento e troca periódica do filtro
		Desgaste nas borrachas de vedação		4	
		Excesso de impureza no elemento filtrante	Comprometimento da lubrificação do sistema	7	

APÊNDICE B

Tabela 5: Procedimento de FMEA para trocador de calor

(continua)

Sistema _____
 Subsistema _____
 X Componente _____ Trocador de calor _____ Responsável pelo projeto Lucas Pamplona Cardozo Costa
 Ano(s) Modelo(s) / Programa(s) _____ Data-chave _____
 Equipe Central _____

ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL (FMEA)

Número FMEA 01
 Página 01 de 02
 Elaborado por: Equipe de manutenção e planejamento
 Data FMEA (Original) _____

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				NPR	Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações				
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção				Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
Trocador de calor	Resfriamento do fluido de trabalho	Desgaste nas borrachas de vedação	Risco de contaminação	6		Desgaste por atrito	Troca da vedação quando apresentar defeito	5	Verificação de presença de água no óleo	6	180	Verificação regular no equipamento, seguindo recomendação do fabricante.	Engenheiro de operações	Verificação mensal do equipamento, com parada de máquina anual	6	4	5	120
			Perda das características físico-químicas do óleo			Má regulagem da vazão e/ou temperatura	Verificação dos aparelhos de medição	4	Não normalidade na vazão e sensação de quente ou de frio	4	96	Aferição dos instrumentos de medição, com maior controle sobre os mesmos. Inspeção regular na entrada e na saída de ambos os fluidos.	Equipe de calibração e manutenção	Aferição de termômetros e medidores de vazão trimestral	6	3	3	54
			Distúrbio no funcionamento do sistema			Reação química do fluido com o material da borracha	Verificação por testes	5	Verificação de presença de detritos no óleo	5	150	Estudo de troca do material ou revestimento. Estudo da necessidade de aditivos químicos no fluido de trabalho	Engenheiro de operações	Uso de borracha de vedação com nitrato. Uso de aditivos químicos no fluido de trabalho	6	4	4	96
						Erro de instalação da borracha	Monitoramento da instalação	4	Som indevido, mistura de água e óleo	3	72	Verificação do cumprimento do protocolo de instalação.	Supervisor	Controle de instalação por lista de check up com supervisionamento constante	6	2	3	36
	Folgas nas conexões das placas	Perda das características físico-químicas do óleo	6	Afrouxamento das placas por uso	Inspeção conforme manual do fabricante	5	Som indevido, erro na temperatura da água	4	120	Inspeção regular, maior controle na vazão de entrada e parâmetros de saída	Engenheiro de operações	Vazão média de entrada controlada em	6	4	3	72		
					Verificação conforme manual do fabricante	4	Som indevido, erro nas temperaturas de saída	4	96	Verificação do cumprimento do protocolo de instalação. Execução de testes previamente	Supervisor	Controle de instalação por lista de check up com supervisionamento constante	6	3	3	54		
					Verificação prévia por testes	4	Som indevido, movimento involuntário do equipamento	3	72	Controle na vazão de entrada	Supervisor	Controle da vazão de entrada do fluido de trabalho, verificado por mais de um colaborador. Testes acústicos.	6	3	2	36		

Tabela 5: Procedimento de FMEA para trocador de calor

(conclusão)

Sistema _____
 Subsistema _____
 X Componente _____
 Ano(s) Modelo(s) / Programa(s) _____
 Equipe Central _____

ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL (FMEA)

Número FMEA _____ 01 _____
 Página _____ 02 _____ de _____ 02 _____
 Elaborado por: Equipe de manutenção e planejamento
 Data FMEA (Original) _____

Trocador de calor Responsável pelo projeto Lucas Pamplona Cardozo Costa
 Data-chave _____

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				Ação Recomendada	Responsabilidade e e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações					
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção			NPR	Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
Trocador de calor	Resfriamento do fluido de trabalho	Folgas nas conexões da tubulação	Distúrbio no funcionamento do sistema	5		Afrouxamento por uso	Verificação conforme fabricante	5	Som indevido, erro nas temperaturas e vazões de saída	4	100	Inspeção regular; teste de estanqueidade na tubulação interna; execução de testes previamente	Supervisor	Vazão média de entrada controlada em 11,8 l/min, inspeção mensal, parada de máquina anual	5	3	3	45
						Vibração	Verificação prévia por testes	4	Som indevido, movimento involuntário do equipamento	3	60	Controle na vazão de entrada, verificação das conexões.	Supervisor	Controle da vazão de fluido de trabalho, verificado por mais de um colaborador. Verificação das conexões por check list.	5	3	2	30
		Incrustação das placas	Perda das características físico-químicas do óleo	4	Presença de alguma deformidade	Inspeção visual	4	Ponto de início de acúmulo de impurezas; descontinuidade na placa	5	80	Verificação prévia de rugosidade da placa, verificação de presença de furo ou elevação indevida nas placas	Equipe de manutenção	Testes de rugosidade feitos na chegada no equipamento e testes de vibração acústica anual	4	3	3	36	
		Má formação do filme			Falta de limpeza	Verificação da pureza do fluido na entrada; limpeza regularmente	3	Descontinuidade da camada limite ou descontinuidade no filme de óleo	4	48	Controle de amostras do fluido na saída, verificação da vazão	Equipe de manutenção	Filtragem dos fluidos, uso de aditivos nos fluidos e limpeza anual (durante parada de máquina)	4	2	3	24	

APÊNDICE C

Tabela 6: Procedimento de FMEA para bomba

(continua)

Sistema _____
 Subsistema _____
 X Componente Bomba
 Ano(s) Modelo(s) / Programa(s) 2015
 Equipe Central _____

ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL (FMEA)

Número FMEA 02
 Página 01 de 06
 Elaborado por: Equipe de manutenção e planejamento
 Data FMEA (Original) _____

Responsável pelo projeto Lucas Pamplona Cardozo Costa
 Data-chave _____

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				NPR	Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações				
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção				Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
Bomba	Bombeamento do fluido de trabalho	Vazamento pelo selo mecânico	Distúrbio do funcionamento do equipamento	6		Desgaste por atrito	Lubrificação e limpeza periódica	6	Diminuição das dimensões, vazamento médio do selo mecânico, diminuição sensível da pressão de saída	6	216	Lubrificação constante, limpeza periódica, verificação periódica de parâmetros	Uso de lubrificante constante, limpeza anua, verificação diária de parâmetros	6	4	4	96	
			Queda de rendimento do equipamento			Deformação plástica na mola	Troca do equipamento quando falha	6	Diminuição das dimensões da mola, vazamento alto do selo mecânico, grande diminuição da pressão de saída	5	180	Estudo da constante elástica da mola e cálculo de parâmetros para utilização apenas de deformações elásticas, verificação do desgaste e estudo para a troca antes do colapso	Determinação do limite elástico da mola, uso de 70% do limite. Troca conforme prazo determinado pelo fabricante	5	5	5	125	
						Deslocamento do selo mecânico	Alinhamento com o eixo, testes prévios	4	Selo mecânico fora do eixo, rompimento total do selo mecânico	4	96	Verificação do alinhamento com o eixo. Verificação do acoplamento do selo mecânico através de check list.	Verificação por check list da remontagem após manutenção, com supervisão	5	3	3	45	

Tabela 6: Procedimento de FMEA para bomba

(continuação)

_____ Sistema
 _____ Substema
X _____ Componente
 Ano(s) Modelo(s) / Programa(s) _____
 Equipe Central _____

ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL (FMEA)

Número FMEA _____ 02 _____
 Página _____ 02 _____ de _____ 06 _____
 Responsável pelo projeto _____ Lucas Pamplona Cardozo Costa _____
 Data-chave _____
 Elaborado por: _____ Equipe de manutenção e planejamento _____
 Data FMEA (Original) _____

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				NPR	Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações			
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção				Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção
Bomba	Bombeamento do fluido de trabalho	Danificação do acoplamento	Distúrbio do funcionamento do equipamento	6		Desgaste por atrito	Lubrificação e limpeza periódica	6	Diminuição das dimensões	6	216	Verificação periódica, lubrificação constante e estudo de troca e manutenção programada	Manutenção semestral, troca conforme recomendação do fabricante. Lubrificação constante.	5	4	4	80
							Verificação periódica, controle na remontagem após manutenção	5	Ruídos de atrito metal com metal, possível descolamento das partes	6	180	Verificação da remontagem pós manutenção por check list, uso correto de torque na junção do acoplamento e verificação da possível perda de rosca do acoplamento	Manutenção semestral. Uso de check list para remontagem após manutenção, com supervisionamento. Troca da peça quando perda de rosca.	6	4	4	96
						Excentricidade	Controle de remontagem após manutenção	4	Diminuição do rendimento do equipamento, ruídos	4	96	Verificação da remontagem do acoplamento, através de check list. Possível teste de run out.	Teste de run out após remontagem, pós manutenção.	6	4	2	48

Tabela 6: Procedimento de FMEA para bomba

(continuação)

_____ Sistema													Número FMEA _____ 02 _____
_____ Subsistema													Página _____ 03 _____ de _____ 06 _____
<u>X</u> _____ Componente													Elaborado por: Equipe de manutenção e planejamento
Ano(s) Modelo(s) / Programa(s)													Data FMEA (Original) _____
Equipe Central													

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				NPR	Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações				
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção				Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
Bomba	Bombeamento do fluido de trabalho	Cavitação	Distúrbio do funcionamento do equipamento	7		Excesso de altura de recalque	Controle na altura de recalque, estudos e testes prévios	5	Excessos na altura de recalque, desgastes nas peças em forma de bolhas	4	140	Estudo prévio da altura máxima de recalque, trabalhando com coeficientes de segurança aceitáveis. Controle para que não se exceda tais parâmetros durante operação.	Controle rígido dos parâmetros estabelecidos de altura, não permitindo exceder.	7	3	4	84	
			Queda de rendimento do equipamento			Alta pressão de saída	Controle na leitura de pressão de saída	5	Leitura de alta pressão na saída	4	140	Controle na leitura de pressão, certificando aferição dos medidores regularmente. Leitura feita por mais de um funcionário.	Controle da pressão de saída. Leitura feita por mais de um colaborador.	7	3	3	63	
			Danos as peças do equipamento			Baixa pressão de entrada	Estudos e testes prévios	4	Leitura de baixa pressão na entrada	4	112	Controle na leitura de pressão, certificando aferição dos medidores regularmente. Leitura feita por mais de um funcionário.	Controle da pressão de entrada. Leitura feita por mais de um colaborador.	7	2	3	42	
		Corrosão	Distúrbio do funcionamento do equipamento	7		Reação química entre peças e fluido	Estudo prévio de reação de materias	4	Deteriorização acima do esperado da peça	6	168	Estudo prévio de reação, possível revestimento de peças ou troca de material das peças. Estudo de possível adição de aditivos no fluido.	Uso de materiais não reagentes ao óleo a ser bombeado. Adição de aditivos necessários.	5	3	5	75	
	Queda de rendimento do equipamento	Presença de alguma reagente não desejável	Controle do fluido de entrada			4	Controle por testes em amostras	6	168	Análise por amostras do fluido de entrada	Análise por amostras do fluido de entrada mensal	7	4	4	112			

Tabela 6: Procedimento de FMEA para bomba

(continuação)

Sistema _____

Subsistema _____

X Componente _____

Ano(s) Modelo(s) / Programa(s) _____

Equipe Central _____

ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL (FMEA)

Responsável pelo projeto Lucas Pamplona Cardozo Costa

Data-chave _____

Número FMEA 02

Página 04 de 06

Elaborado por: Equipe de manutenção e planejamento

Data FMEA (Original) _____

Bomba

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações				
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção			NPR	Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção
Bomba	Bombeamento do fluido de trabalho	Defeito elétrico	Distúrbio do funcionamento do equipamento	6		Sobrepotencia do sistema	Uso de capacitores adequados e sistemas em paralelo	6	Desligamento automático do sistema, possível degradação do aparelho	7	252	Estudo prévio para uso de sistemas de proteção à sobrecarga elétrica para o equipamento. Uso de capacitores de segurança.	Uso de disjuntores na entrada do equipamento. Uso de capacitores em paralelo.	6	4	6	14 4
			Queda de rendimento do equipamento			Erro de conexão	Averiguação por check list em todo o equipamento	4	Não funcionamento ou funcionamento parcial do equipamento	4	96	Verificação de todas as conexões por meio de check list. Averiguação por mais de um colaborador.	Verificação por check list, averiguação por mais de um colaborador	6	3	3	54
		Atrito provocado por afrouxamento de peças internas	Distúrbio do funcionamento do equipamento	7		Afrouxamento da peças internas por uso	Substituição por desgaste, controle dos parâmetros do equipamento	5	Ruído devido a atrito metal com metal	5	175	Estudo para a substituição ou manutenção periódica das peças. Evitar sobrecarga do equipamento.	Controle nos parâmetros de vazão e pressão de entrada. Manutenção semestral, com parada anual de equipamento.	7	4	4	11 2
			Queda de rendimento do equipamento			Pressão acima do limite desejável	Controle da pressão por medidores	4	Alteração nos parâmetros medidos	4	112	Controle da pressão, verificado por mais de um colaborador. Verificação para a não sobrecarga durante operação	Controle da pressão de entrada. Leitura feita por mais de um colaborador	7	3	4	84
					Excesso de vazão de entrada	Controle da vazão por medidores	4	Alteração nos parâmetros medidos	4	112	Controle da vazão, verificado por mais de um colaborador. Verificação para a não sobrecarga durante operação	Controle da vazão de entrada. Leitura feita por mais de um colaborador	7	3	4	84	

Tabela 6: Procedimento de FMEA para bomba

(continuação)

_____ Sistema
 _____ Subsistema
 X Componente

ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL (FMEA)

Número FMEA 02
 Página 05 de 06
 Elaborado por: Equipe de manutenção e planejamento
 Data FMEA (Original) _____

Ano(s) Modelo(s) / Programa(s) 2015
 Responsável pelo projeto Lucas Pamplona Cardozo Costa
 Data-chave _____

Equipe Central

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações				
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção			NPR	Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção
Bomba	Bombeamento do fluido de trabalho	Falha de lubrificação	Distúrbio do funcionamento do equipamento	5		Má formação do filme por deformidade em peças	Inspeção visual nas peças necessárias	5	Atrito entre peças, gerando ruídos	4	100	Inspeção por teste de som e visual. Lubrificação constante	Inspeção por som, correção de irregularidades verificadas.	5	4	3	60
			Queda de rendimento do equipamento			Falta de lubrificante	Adição controlada e constante de lubrificante	4	Atrito entre peças, gerando ruídos	4	80	Adição constante de lubrificação. Estudo de necessidade de uso de aditivos.	Adição constante de lubrificantes. Adição de aditivos no fluido de trabalho.	5	4	5	100
		Falha de rolamento	Risco de queda da bomba	5		Má instalação pós manutenção	Controle das atividades por check list	5	Vibração exagerada do equipamento	2	50	Verificação por check list, acompanhado por supervisão. Verificação por mais de um colaborador.	Verificação por check list, acompanhado por supervisão. Verificação por mais de um colaborador.	5	3	2	30
						Afrouxamento por uso	Verificação periódica	5	Ruído devido a atrito metal com metal, vibração no equipamento	5	125	Estudo de substituição e manutenção periódica.	Manutenção semestral, com parada anual de equipamento.	5	4	4	80

APÊNDICE D

Tabela 7: Procedimento de FMEA para subsistema trocador de calor e bomba

(continua)

Sistema _____
 X Subsistema _____

ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL (FMEA)

Número FMEA 03
 Página 01 de 07

Componente Trocador - bomba
 Responsável pelo projeto Lucas Pamplona Cardozo Costa
 Elaborado por: Equipe de manutenção e planejamento

Ano(s) Modelo(s) / Programa(s) 2015
 Data-chave _____
 Data FMEA (Original) _____

Equipe Central

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				NPR	Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações								
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção				Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR				
Tubulação	Condução do fluido de trabalho	Folgas de conexões	Distúrbio no funcionamento do sistema	6		Desgaste por uso	Inspeção conforme manual do fabricante	Vazamento de fluido de trabalho	5	4	120	Manutenção periódica, inspeção visual regularmente, troca em período determinado	Manutenção anual, inspeção visual mensal, "caça vazamento" trimestral, troca a cada 10 anos	6	3	2	36					
			Comprometimento na reposição ao sistema			Falha na remontagem	Monitoramento da montagem	Vazamento de fluido de trabalho	4	4	96	Monitoramento da montagem, inspeção por check list, teste de estanqueidade						Monitoramento da montagem com inspeção de check list feito por mais de um colaborador. Teste de estanqueidade sempre que manutenção feita (anual)	6	3	2	36
						Dilatação térmica	Isolamento térmico da tubulação	Uso de medidores de temperatura	9	4	216	Revestimento de tubulação com isolante térmico, controle da temperatura de saída do trocador de calor						Revestimento da tubulação com isolamento térmico, controle constante da temperatura feito por mais de um colaborador	6	7	3	126
		Desgastes nas borrachas de vedação	Distúrbio no funcionamento do sistema	6		Desgaste por uso	Inspeção conforme manual do fabricante	Índices de contaminação do fluido crescerem gradativamente	5	6	180	Inspeção conforme manual do fabricante, troca periódica, testes em amostras	Troca a cada triênio, inspeção anual, teste no fluido de trabalho amostra bimestral.	6	4	4	96					
		Comprometimento na reposição ao sistema	Falha na remontagem			Monitoramento da montagem	Ruído inapropriado, fluido contaminado	4	5	120	Monitoramento da montagem, inspeção por check list	Monitoramento da montagem com inspeção de check list feito por mais de um colaborador. Teste de estanqueidade sempre que manutenção feita (anual).	6					3	4	72		

Tabela 7: Procedimento de FMEA para subsistema trocador de calor e bomba

(continuação)

Sistema _____
 X Subsistema _____
 Componente _____ Trocador - bomba _____

ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL (FMEA)

Número FMEA _____ 03 _____
 Página _____ 02 _____ de _____ 07 _____

Responsável pelo projeto Lucas Pamplona Cardozo Costa
 Data-chave _____

Elaborado por: Equipe de manutenção e planejamento

Ano(s) Modelo(s) / Programa(s) _____ 2015 _____
 Equipe Central _____

Data FMEA (Original) _____

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				NPR	Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações				
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção				Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
Tubulação	Condução do fluido de trabalho	Danos na tubulação	Distúrbio no funcionamento do sistema	7		Fadiga térmica	Isolamento térmico da tubulação	7	Trincas e rachaduras, oscilações na leitura da temperatura do cano	6	29	Controle da temperatura de saída do trocador de calor, uso de revestimento com isolamento térmico	Controle constante da temperatura de saída do trocador de calor (evitar oscilações) verificado por mais de um colaborador, revestimento com isolante térmico na tubulação	7	5	5	17	
			Comprometimento na reposição ao sistema			Amassados ou arranhões	Pintura, possibilidade de revestimento	8	Inspeção visual	4	22	Pintura adequada e refeita periodicamente, revestimento da tubulação		Pintura bianual produto de alta resistência	7	7	3	14
			Peso do fluido de trabalho			Uso de abraçadeiras a cada metro	5	Inspeção visual	4	14	Uso de abraçadeira a cada metro, controle da vazão de saída do trocador de calor, apoio correto da tubulação	Uso de abraçadeiras a cada metro, apoios a cada vara, controle dos medidores da vazão de saída do trocador de calor, verificado por mais de um colaborador		7	3	4	84	

Tabela 7: Procedimento de FMEA para subsistema trocador de calor e bomba

(continuação)

Sistema															Número FMEA	03		
X	Subsistema														Página	03	de	07
	Componente		Trocador - bomba												Elaborado por: Equipe de manutenção e planejamento			
	Ano(s) Modelo(s) / Programa(s)		2015												Data FMEA (Original)			
	Equipe Central																	

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				NPR	Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações				
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção				Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
Válvulas	Isolar componentes do sistema e acessórios de supervisão e controle	Travamento de haste	Impossibilidade de executar manutenção	9		Travamento mecânico	Estudo da superfície das peças, lubrificação	4	Impossibilidade ou dificuldade de movimento da válvula sem motivo aparente	7	252	Estudo do material usada, da superfície da peça, tratamento na superfície, lubrificação constante	Uso de válvulas de metal com banho de nitrato, polimento prévio. Lubrificação constante.	8	3	5	120	
			Risco de acidente pessoal			Deposição de resíduos em alguma parte de estreitamento	Limpeza periódica, verificação da quantidade de particulado no fluido de trabalho	5	Dificuldade de movimento da válvula sem motivo aparente, ruído incomum	6	270	Limpeza periódica, controle da filtragem do fluido de trabalho	Limpeza semestral, verificação da filtragem do fluido de trabalho	9	4	5	180	
		Deteriorização da sede ou contra sede	Impossibilidade de executar manutenção	9		Desgaste por uso	Inspeção conforme manual do fabricante, manutenção ou troca periódica	5	Verificação visual	5	225	Limpeza periódica, manutenção periódica, troca periódica	Limpeza e manutenção bimestral, troca semestral	9	3	5	135	
		Risco de acidente pessoal			Travamento mecânico	Estudo da superfície das peças, lubrificação	5	Dificuldade na utilização da válvula	7	315	Estudo do material usado e da superfície da peça, tratamento na superfície, lubrificação constante	Uso de válvulas com polimento prévio. Lubrificação constante.	8	4	4	128		
					Deposição de resíduos	Limpeza periódica, verificação da quantidade de particulado no fluido de trabalho	5	Dificuldade de operação da válvula, verificação visual, ruído incomum	6	270	Limpeza periódica, controle da filtragem do fluido de trabalho	Limpeza bimestral, verificação da filtragem do fluido de trabalho	9	3	4	108		

Tabela 7: Procedimento de FMEA para subsistema trocador de calor e bomba

(continuação)

Sistema												Número FMEA	03		
X	Subsistema											Página	06	de	07
	Componente											Elaborado por: Equipe de manutenção e planejamento			
	Ano(s) Modelo(s) / Programa(s)											Data FMEA (Original)			
	Equipe Central														

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações				
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção			NPR	Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção
Filtros	Filtragem do fluido de trabalho	Rompimento da malha do filtro	Risco de contaminação do fluido com resíduos	7		Desgaste por uso	Inspeção conforme manual do fabricante	Índices de contaminação do fluido crescerem gradativamente	5	6	210	Manutenção periódica, troca periódica	Manutenção mensal, troca semestral.	6	4	5	120
						Excesso de pressão ou de vazão no fluido a ser filtrado	Controle de pressão e vazão na saída do trocador de calor	Índices de contaminação do fluido crescerem inesperadamente. Possível ruído de rompimento do elemento filtrante	6	5	210	Controle de pressão e vazão na saída do trocador de calor, verificação por mais de um colaborador.					
		Desgaste nas borrachas de vedação	Risco de contaminação do fluido com resíduos	7		Desgaste por uso	Inspeção conforme manual do fabricante	Índices de contaminação do fluido crescerem gradativamente	5	6	210	Manutenção periódica, troca periódica, teste de estanqueidade	Manutenção mensal, troca semestral. Testes de estanqueidade feitos sempre após troca e/ou manutenção	7	4	4	112
						Falha na remontagem	Monitoramento da remontagem	Ruído inapropriado, fluido contaminado	4	5	140	Supervisão na remontagem, verificação por mais de um colaborador, testes prévios	Monitoramento da montagem com inspeção de check list feito por mais de um colaborador. Verificação por mais de um colaborador	7	2	5	70

Tabela 7: Procedimento de FMEA para subsistema trocador de calor e bomba

(conclusão)

_____ Sistema													Número FMEA <u>03</u>
<u>X</u> Subsistema													Página <u>07</u> de <u>07</u>
_____ Componente													Elaborado por: <u>Equipe de manutenção e planejamento</u>
Ano(s) Modelo(s) / Programa(s)													Data FMEA (Original) _____
Equipe Central													

Item/Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potenciais de Falhas	Severidade	Classificação	Causa(s) Potenciais de falhas	Projeto Atual				NPR	Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Resultados de ações			
							Controles (Prevenção)	Ocorrência	Controles (Detecção)	Detecção				Ações adotadas e data efetiva	Severidade	Ocorrência	Detecção
Filtros	Filtragem do fluido de trabalho	Excesso de impureza no elemento filtrante	Comprometimento da lubrificação do sistema	7		Falta de limpeza no elemento filtrante	Limpeza periódica	5	Diminuição da vazão do fluido de trabalho	6	210	Limpeza periódica, manutenção periódica, troca periódica	Limpeza e manutenção mensal, troca semestral	7	4	4	112
						Fluido a ser filtrado com muita impureza	Uso de elementos filtrantes sequenciais, com micras decrescentes	5	Vários elementos filtrantes em sequência sobrecarregados	6	210	Verificação completa no equipamento anterior, uso de uma sequencia de filtros com micras decrescentes, verificação da limpeza dos elementos filtrantes	Manutenção anual no trocador de calor, sequênciade filtros decrescentes com limpeza programada por meses	6	4	5	120