

APLICAÇÃO DA FERRAMENTA FMEA COMO MÉTODO DE DIANÓSTICO DE FALHAS EM CAMINHÕES FORA DE ESTRADA

Zeferino, Fernanda Maciel⁽¹⁾ (fernandamzeferino@gmail.com), Franco, Luciano José Vieira⁽²⁾ (lucianov_franco@hotmail.com), Leite, Jussara Fernandes⁽³⁾ (leite.jussara@yahoo.com.br), Resende, Alex Roberto Nogueira de⁽⁴⁾ (alexresendepsi@yahoo.com.br), Oliveira, Marcelo Augusto Pereira de⁽⁵⁾ (marceloperoli@live.com).

⁽¹⁾ Fundação Presidente Antônio Carlos (FUPAC); Engenharia Mecânica

⁽²⁾ Fundação Presidente Antônio Carlos (FUPAC); Engenharia Mecânica

⁽³⁾ Fundação Presidente Antônio Carlos (FUPAC); Engenharia Mecânica

⁽⁴⁾ Fundação Presidente Antônio Carlos (FUPAC); Engenharia Mecânica

⁽⁵⁾ Fundação Presidente Antônio Carlos (FUPAC); Engenharia Mecânica

RESUMO: *A busca constante por melhorias nos processos fazem com que as empresas utilizem metodologias a fim de aumentar a disponibilidade de seus equipamentos e sua produtividade. Uma das alternativas encontradas pelas empresas é a utilização da metodologia Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA), como forma de redução de ocorrência de falhas por meio do reconhecimento e avaliação de falhas potenciais. Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de aplicar a metodologia FMEA como forma de detecção e classificação das falhas críticas que ocorrem e caminhões fora de estrada atuantes em uma empresa mineradora. Para alcançar o objetivo, utilizou-se a pesquisa qualitativa e quantitativa combinadas como forma de investigar o problema. No desenvolvimento deste estudo, foi possível identificar as falhas que ocorrem em oito subsistemas dos caminhões fora de estrada e o grau de criticidade de cada uma delas. Acrescenta ainda, que sugestões foram apresentadas para solucionar as falhas. Este estudo se apresentou eficiente quanto à utilização da metodologia FMEA para classificação de falhas críticas e proporcionou a identificação de falhas que demandam mais atenção da manutenção em caminhões fora de estrada.*

PALAVRAS-CHAVE: FMEA. Falhas. Criticidade. Caminhões Fora de Estrada.

APPLICATION OF THE FMEA TOOL AS A FAULT DIALOGUE METHOD ON TRUCK OFF ROADS

ABSTRACT: *The constant search for improvements in the processes cause companies to use methodologies in order to increase the availability of their equipment and their productivity. One of the alternatives found by the companies is the use of the Mode Analysis and Failure Effect (FMEA) methodology, as a way of reducing the occurrence of failures through the recognition and evaluation of potential failures. In this sense, this work has the objective of applying the FMEA methodology as a way of detecting and classifying the critical failures that occur in off-road trucks operating in a mining company. To reach the objective, the combined qualitative and quantitative research was used as a way to investigate the problem. In the development of this study, it was possible to identify the faults occurring in eight subsystems of off-road trucks and the degree of criticality of each one. It also adds that suggestions have been presented to solve the flaws. This study was efficient in the use of the FMEA methodology to classify critical faults and provided the identification of faults that demand more attention from maintenance on off-road trucks.*

KEY WORDS: FMEA. Failures. Criticity. Off-Highway Trucks.

1. INTRODUÇÃO

O homem tem na sua natureza intrínseca a busca constante pela previsão do futuro, e conseqüentemente, sempre vai de encontro às incertezas que, para quem almeja controlar as ocorrências futuras, não podem ser consideradas como algo que acontece ao acaso. Neste sentido, houve a necessidade de criar o gerenciamento de riscos para que haja possibilidade de controlar as incertezas, tornando-as algo mensuráveis através da probabilidade (SALLES JR *et al*, 2006).

Conforme *Project Management Institute* (PMI, 2004), o gerenciamento de riscos e a capacidade de prever falhas dentro de seus processos são algumas das formas de dimensionar a competitividade de uma empresa. Para tanto, as organizações estão, cada vez mais, em busca de técnicas, ferramentas e metodologias que reduzam as perdas por falhas eminentes.

Guachalla (2012) expõe nos seus estudos que a busca incessante pelo aumento da produção para alimentar as necessidades do mercado força cada vez mais as empresas a levarem seus ativos ao limite de operação. Desta forma, é essencial a otimização e assertividade na identificação de falhas para a redução ou eliminação dos gargalos operacionais, obtendo assim uma maior disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos.

Para aumentar a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, no setor de manutenção há uma forte necessidade de planejamento, prevenção e controle de falhas. Isso para evitar a ocorrência de paradas advindas de falhas inesperadas que conseqüentemente, reduzem a disponibilidade do equipamento e diminui a capacidade produtiva do processo.

Uma das formas de se realizar o gerenciamento e prevenção de falhas é por meio da metodologia de Análise de modo e Efeito de Falha, conhecida como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*). Segundo Dailey (2004), essa ferramenta é advinda do setor automobilístico, onde foi utilizada como forma de evitar que problemas ocorridos nas linhas produtivas chegassem até o consumidor final.

Hodiernamente, a FMEA é empregada pelas organizações como método para reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas em processos, projetos e equipamentos. Fogliatto e Ribeiro (2009) esclarecem que é uma ferramenta de confiabilidade, que tem como enfoque o reconhecimento e avaliação de falhas potenciais advindas de um produto ou processo. Os autores comentam ainda que esta ferramenta permite a identificação de ações que mitiguem ou extingam a possibilidade de ocorrência dessas falhas.

A partir disso e considerando a manutenção de ativos de transporte um cenário crítico dentro das empresas, o presente trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia FMEA, como ferramenta para detecção e mitigação de falhas em caminhões fora de estrada em uma empresa de manutenção de caminhões atuante no setor de mineração, do interior do estado de Minas Gerais.

1.1 Conceitos de Manutenção

A manutenção de ativos de transporte de carga no setor de mineração é um cenário dedicado a produtividade do processo. Para o bom funcionamento e equilíbrio do sistema de produção na mineração, a manutenção dos caminhões fora de estrada deve ser feita da forma mais rápida e eficiente possível.

Segundo Comitti (2004), em todos os segmentos industriais é evidente a busca constante das empresas pela excelência de mercado, ou seja, todas as grandes empresas se preocupam em serem referências mundiais. Para tanto, todos os setores da organização precisam ir de encontro aos objetivos das mesmas, buscando a excelência, pois a empresa somente consegue alcançar seus objetivos quando todos seus setores estão engajados. Não obstante, a área de manutenção deve sempre aplicar formas de melhoria continuamente, utilizando as melhores práticas disponíveis.

Na Norma Brasileira Regulamentadora, NBR 5462, (ABNT, 1994), que discorre sobre a confiabilidade e manutenibilidade, é encontrado o conceito de manutenção como um conjunto de ações técnicas e administrativas, inclusive as de supervisão, com objetivo de conservar ou transferir um item em um estado no qual possa realizar sua função. No dicionário Ferreira (2010), pode-se encontrar a definição de manutenção da seguinte forma: medidas necessárias para a conservação ou permanência de alguma coisa ou de uma situação e ainda os cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de motores e máquinas.

Todos os tipos de equipamentos, desde o mais simples ao mais complexo, apresentam falhas causadas por defeitos de fabricação, operação incorreta ou insuficiência de manutenção, durante seu período de vida útil. Ainda que esses problemas sejam considerados pequenos, quando não há resolução dos mesmos no devido momento, as conseqüências podem ser muito graves, trazendo prejuízos para as empresas.

1.1.1 Engenharia de Manutenção

Araújo e Santos (2008) ressaltam que a Engenharia de Manutenção é um conceito inovador na área de manutenção, pois implementa a prática de procurar as causas básicas das falhas, evitar situações constantes de mau desempenho, trazer melhorias dos padrões e sistemáticas, aplicar a manutenibilidade e técnicas modernas, interferir tecnicamente nas compras, e com isso, deixa para trás as práticas de conserto permanente de equipamentos e convivência com problemas crônicos.

Na visão de Kardec e Nascif (2009), a engenharia de manutenção é considerada uma mudança cultural, sendo a segunda quebra de paradigma na manutenção. Esses dois autores caracterizam a engenharia de manutenção pela análise de dados, estudos e melhorias na operação

e manutenção dos equipamentos, através da utilização de técnicas modernas, transpondo, assim, obstáculos na cultura das empresas.

Kardec e Nascif (2009) ainda comentam que a utilização da engenharia de manutenção pelas empresas possibilita a elas não somente realizar um acompanhamento preditivo, mas também incorporar uma estrutura de dados e informações sobre manutenção dentro dos setores, que ao serem analisados e estudados, darão condições para melhorias futuras na atividade de manutenção.

1.2 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)

Rodrigues *et al.* (2009) explicam que a sigla FMEA é o acrônimo de “*Failure Mode and Effect Analysis*”, traduzida para o português como “Análise de Modo e Efeito de Falha Potencial”. A FMEA pode ser conceituada como uma ferramenta de identificação de riscos inerentes a projetos e processos e definição da gravidade dos mesmos.

Fogliatto e Ribeiro (2009) informam que a FMEA tem como objetivo básico a detecção de falhas anterior à produção de um produto. Com isso, pode-se dizer que é possível aumentar a prevenção de falhas e a confiabilidade dos processos. Além disso, com a utilização da FMEA busca-se reconhecer e avaliar as potenciais falhas que eventualmente ocorram em um produto ou processo, apontar ações que eliminem ou reduzam as possibilidades de ocorrência dessas falhas e documentar o estudo, criando assim, um embasamento técnico que auxilie em revisões e desenvolvimento posteriores do projeto ou processo.

Carpinetti (2012) complementa as ideias apresentadas por Fogliatto e Ribeiro, ao esclarecer que a FMEA pode ser aplicada tanto na fase de desenvolvimento e melhoria de produto, quanto na melhoria de processo, no caso de desenvolvimento de produto ou processo. A prática do FMEA pode minimizar chances de ocorrência de possíveis falhas. Deste modo, as empresas têm a possibilidade de priorizar os riscos mais graves e investir corretamente em seus processos, podendo minimizá-los ou eliminá-los.

Em relação à aplicação da FMEA, Villemeur (1992) informa que para sua execução é necessário realizar quatro passos, que são: definição do sistema, suas funções e componentes; identificação dos modos de falha do componente e suas causas; estudo dos efeitos dos modos de falha; conclusões e recomendações.

Para Carpinetti (2012), as etapas de um método servem para auxiliar na eficiência de sua utilização, dando um direcionamento para seu executor e a aplicação do FMEA deve ser feita considerando a árvore do produto e o fluxograma de processos de fabricação do produto.

1.2.1 Formulário FMEA

De acordo com Capaldo, Guerrero e Rozenfeld (2003), independentemente do tipo e aplicação da FMEA, (produto, processo, ou procedimento; novo ou em operação), o princípio da metodologia será o mesmo. O estudo é caracterizado basicamente pela formação de um grupo de pessoas que apontam para determinado produto/processo, suas funções, eventuais falhas, os efeitos e as possíveis causas desta falha. Posteriormente, os riscos de cada causa de falha são analisados por meio de índices e, com base nesta avaliação, são tomadas as ações necessárias para mitigação destes riscos, aumentando a confiabilidade do produto/processo.

A aplicação da FMEA, segundo Carpinetti (2012), pode ser realizada por meio do preenchimento do formulário apresentado no Quadro 1.

QUADRO 1. Formulário FMEA

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN

Fonte: Carpinetti (2012). Adaptado pelo autor

O primeiro campo, função do produto ou requisitos do processo deve ser preenchido com a especificação do item. Carpinetti (2012) salienta que é importante que este campo seja o mais específico possível, por exemplo, se algum item tiver mais de uma função, associados a diferentes modos de falha, então devem ser citadas individualmente.

No campo modo de falha potencial, Carpinetti (2012) esclarece que devem ser listados os modos de falhas. Os fenômenos são causas de uma diminuição da capacidade funcional do produto ou processo e seus níveis de desempenho são caracterizados como modos de falhas. No caso do produto, os modos de falhas são os defeitos, as avarias que ele apresenta. No caso de processos, são as não conformidades apresentadas no mesmo. Os modos de falha podem ser definidos de cinco maneiras: falha completa; falha parcial; falha intermitente; falha devido ao excesso da função; e falha indesejada.

De acordo com Carpinetti (2012), no campo efeito potencial da falha, deve-se descrever os efeitos que os modos de falha causam nos níveis de desempenho do produto ou resultados dos processos. Com isso, pode-se dizer que este campo está diretamente ligado ao consumidor final. Neste campo fazem-se as seguintes perguntas: qual consequência esta falha pode gerar se ela ocorrer?, O que isso pode acarretar para o cliente? Caracterizam os efeitos: segurança/ corpo regulador; cliente final; clientes internos - manufatura, montagem e serviços.

Em relação ao campo causa potencial da falha, neste item devem ser registradas todas as causas possíveis para ocorrências de falhas. Pode-se dizer que é uma das fases mais importantes do estudo, pois busca as causas raízes do problema. A causa potencial de falha pode ser caracterizada por uma deficiência no projeto, que tem como consequência o modo da falha (CARPINETTI, 2012).

No campo controles atuais do processo, para Carpinetti (2012), devem ser descritos os mecanismos de controle atuais que podem potencialmente, detectar as falhas geradas pelas causas identificadas. Em outras palavras, é o controle, o modo de diminuir as ocorrências das falhas.

Para o preenchimento do campo severidade ou gravidade, conforme Carpinetti (2012) deve-se avaliar a gravidade da consequência da falha para o cliente. A severidade ou gravidade da falha deve ser descrita em uma escala de 1 a 5, onde 1 significa efeito pouco severo e 5, efeito muito severo. A severidade está ligada somente ao efeito. Palady (2002) sugere em seus trabalhos o uso do critério apresentado no Quadro 2.

QUADRO 2. Escala para Severidade ou Gravidade

Categoria	Severidade	Valor	Danos		
			Ambiental	Pessoal	Econômico
I	Muito alta	5	Grande	Mortal	Total
II	Alta	4	Significante	Grave	Parcial
III	Moderada	3	Leve	Leve	Leve
IV	Baixa	2	Insignificante	Insignificante	Aceitável
V	Mínima	1	Inexistente	Inexistente	Inexistente

Fonte: Palady (2002)

Verifica-se por meio do Quadro 2 que conforme o nível da severidade repercute em uma categoria para dano ambiental, pessoal e econômico.

No campo ocorrência, devem ser designadas notas de 1 a 6, após a identificação das possíveis causas que geraram a ocorrência das falhas. Este item está relacionado com a probabilidade da ocorrência de falhas, e deve ser muito criterioso para assegurar os estudos

seguintes. Warren (2002) sugere a utilização da Tabela 1, que apresenta o critério de avaliação de ocorrência.

TABELA 1. Escala para avaliação da ocorrência da causa da falha

Nível	Frequência	Descrição	Valor
1	Frequente	Falha ocorrerá continuamente	6
2	Provável	Falha ocorrerá com frequência	5
3	Ocasional	Falha esperada de ocorrer ocasionalmente	4
4	Remoto	Falha razoavelmente esperada	3
5	Improvável	Falha ocorrerá excepcionalmente	2
6	Imprevisível	Falha praticamente não ocorrerá	1

Fonte: Warren (2002)

A detecção é o penúltimo campo do formulário da FMEA, e se refere à chance dos controles atuais detectarem a falha antes da sua ocorrência. Carpinette (2012) esclarece que isto só é possível após a identificação do tipo de controle em uso. Para isso, segundo Maddox (2005), é utilizada uma escala de 0 a 5, onde 1 indica que o modo de falha será detectado e 5 indica uma situação em que o modo de falha, caso exista, não será detectado. A Tabela 2 a seguir apresenta a escala para avaliação da detecção de falhas proposta por Maddox (2005).

TABELA 2. Escala para avaliação da detecção de falhas

Nível	Deteção	Descrição	Valor
1	Fácil	Falha detectável por procedimento operacional	1
2	Razoável	Falha detectável por inspeção operacional	2
3	Difícil	Falha detectável por ensaio funcional	3
4	Muito Difícil	Falha detectável apenas por desligamento	4
5	Impossível	Falha totalmente oculta	5

Fonte: Maddox (2005)

O último campo do formulário FMEA é o RPN, que o resultado da multiplicação dos itens: severidade, ocorrência e detecção. Assim, é o local onde é apresentado o risco, para que se possa priorizar as ações de solução e otimizar as melhorias no projeto. Desta maneira, o risco é calculado através da fórmula ($RPN = S \times O \times D$). O resultado obtido do risco pode variar entre 1 e 150, sendo os maiores valores os que necessitam de maior atenção.

De acordo com os valores RPN, são elaboradas ações corretivas para os maiores índices de risco. As ações devem ter o objetivo de diminuir a severidade do efeito e a probabilidade de ocorrência das falhas ou de não detecção das mesmas.

1.2.2 Benefícios da FMEA

Carpinetti (2010) esclarece que a efetividade da FMEA depende do comprometimento da equipe com a qualidade e realização de identificação mais crítica e precisa das falhas de processos e produtos. Na visão de Palady (2007), os benefícios gerados pela aplicação eficiente do FMEA são:

- Economia nos custos e tempo de desenvolvimento de manutenção;
- Traça um caminho para o planejamento de teste mais eficientes;
- Oferece uma referência rápida para a solução de problemáticas;
- Reduz alterações de engenharia;
- Aumenta a satisfação dos clientes;
- Obtém e conserva os conhecimentos do produto e do processo na organização;
- Diminui a ocorrência de eventos não previstos no planejamento de um processo;
- Aponta preocupações de segurança a serem abordadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é um estudo de caso de natureza descritiva, explicativa, documental e exploratória. Tem como objetivo aplicar a metodologia FMEA, como ferramenta para detecção e mitigação de falhas em caminhões fora de estrada em uma empresa de manutenção de caminhões atuante no setor de mineração, do interior do estado de Minas Gerais. Como forma de alcançar os objetivos da pesquisa, determinou-se, então, a implementação da metodologia FMEA como técnica para identificação de riscos inerentes ao processo e definição da gravidade dos mesmos.

Desta forma, o estudo ocorreu em uma empresa representante no Brasil, de uma das maiores produtoras de equipamentos que atendem aos mercados de Construção, Mineração, Energia, Petróleo & Marítimo, Movimentação de Materiais, entre outros. A empresa promove soluções customizadas, produtos, sistemas e suporte realizado por técnicos especializados e qualificados nos equipamentos. O desenvolvimento desta pesquisa ocorreu no período de fevereiro a maio de 2017.

Mais precisamente, a análise FMEA foi implementada em caminhões fora de estrada, atuantes em uma mineradora, localizada no interior de Minas Gerais, onde a empresa oferece suporte técnico aos equipamentos ativos do cliente. Assim, foram analisados com a aplicação da

ferramenta FMEA oito subsistemas dos caminhões fora de estrada, sendo eles: mangueira e vedações, trem de força, cabine, elétrico, chassi e caçamba, freios, suspensão e direção.

Este estudo ocorreu, devido aos equipamentos virem apresentando diversas anomalias que demandavam longo tempo de manutenção, e conseqüentemente, uma queda significativa na disponibilidade de máquina, gerando custo e perda de produtividade para o cliente. Isso fez com que surgisse a necessidade de se entender melhor estes problemas, e buscar possibilidades de diminuição da ocorrência dos mesmos.

Assim, com o objetivo de aplicar a metodologia FMEA, como forma de diagnosticar e classificar as principais falhas nos caminhões fora de estrada em um setor de mineração, o estudo de caso obedeceu às seguintes etapas, nesta ordem: acompanhamento do processo de manutenção; coleta de dados do processo e análise dos mesmos; implementação da metodologia FMEA, realizando as etapas propostas na literatura e em seguida a apresentação dos resultados obtidos.

Os dados foram coletados de um banco de dados fornecido pela empresa, no período de janeiro e fevereiro de 2017. Os dados possuem natureza qualitativa e foram tratados por meio de análise de conteúdo e estatística aplicada.

3. ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

Como dito anteriormente, para realização deste estudo de caso utilizou-se um banco de dados fornecido pela empresa, no período de janeiro e fevereiro de 2017. Os dados referem-se às atividades de manutenção realizadas nos caminhões fora de estrada.

De acordo com as informações extraídas do banco de dados, considerou-se que o sistema caminhão fora de estrada é composto por 8 subsistemas para realizar a análise FMEA, sendo eles: mangueira ou vedações, trem de força, cabine, elétrico, chassi e báscula, freios, suspensão e direção.

É importante esclarecer que para análise de severidade/gravidade utilizou-se a metodologia do autor Carpinetti (2012). Acrescenta-se ainda que foi analisado somente um dano para cada falha, por exemplo, falhas que acarretavam em maiores danos econômicos foram analisadas somente por este critério, isso fica exposto em cada tabela, na coluna “severidade”, com a letra (A) para o critério ambiental, (P) para pessoal e (E) para econômico.

3.1 Mangueiras e Vedações

O primeiro subsistema analisado dos caminhões fora de estrada foi mangueiras e vedações. Assim, os dados foram coletados do banco de dados da empresa e a análise FMEA desse subsistema foi realizada. Os resultados podem ser observados na Tabela 3.

TABELA 3. Análise FMEA subsistema mangueiras/vedações

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Transporte de material seja ele sólido, líquido ou gasoso	Vazamento de óleo ou ELC	Baixa do nível dos líquidos dos sistemas	Mangueiras ou anéis de vedação danificados	Substituir mangueira ou anel danificado	4 (A)	4	2	32

Fonte: Dados de Pesquisa (2017)

Observa-se por meio da Tabela 3, que o subsistema mangueiras e vedações apresentou somente uma falha, porém, é notório que ela é uma falha crítica, pois apresenta um valor de risco (RPN) alto, 32.

Uma maneira de diminuir a ocorrência dessa falha é aumentar a atenção à mesma em manutenções preventivas, atuando na substituição de mangueiras e vedações que apresentem algum tipo de desgaste.

3.2 Trem de força

Os segundo subsistema analisado foi o trem de força dos caminhões fora de estrada. A partir dos dados coletados do banco de dados da empresa, a análise FMEA foi desenvolvida e os resultados podem ser verificados na Tabela 4.

TABELA 4. Análise FMEA subsistema trem de força

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Geração e transmissão de força até o solo para que o equipamento seja tracionado.	Perda de potência do motor	Equipamento com baixo rendimento e cortando a aceleração	Falha no sistema diesel	Reparar/ Substituir filtros e bomba de distribuição	2 (E)	3	3	18
	Aumento de temperatura do motor	Danos aos componentes físicos do motor	Falha no sistema de arrefecimento do motor	Avaliar o sistema e componentes de arrefecimento	4 (E)	2	1	8

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Geração e transmissão de força até o solo para que o equipamento seja tracionado.	Quebra ou empeno das válvulas de admissão e exaustão do motor	Inoperância do motor	Calço hidráulico ou erro de regulagem das folgas das válvulas	Substituir válvulas e demais componentes danificados e regular folga das válvulas do motor	4 (E)	3	2	24
	Baixa pressão de lubrificação do diferencial	Danos aos componentes físico do diferencial	Filtro de lubrificação entupido, falha na solenoide de acionamento ou quebra da bomba de lubrificação do diferencial	Testar funcionamento da solenoide de acionamento ou na bomba de lubrificação do diferencial	4 (E)	4	1	16

Fonte: Dados de Pesquisa (2017)

Percebe-se por meio da Tabela 4, que o subsistema trem de força apresentou 4 falhas, com os valores de risco 24, 18, 16 e 8. As falhas identificadas foram de quebra ou empeno de válvulas de admissão e exaustão do motor e baixa pressão de lubrificação do diferencial.

Algumas formas de diminuir a frequência dessas falhas são: regular as válvulas, realizar análise de óleo e inspeção do bujão magnético do diferencial, a fim de detectar a existência de partículas provenientes de desgaste de componentes do motor e diferencial e substituir subcomponentes periodicamente, seguindo corretamente o plano de manutenção preventiva indicado pelo fabricante.

3.3 Cabine

Em sequência, os dados sobre o subsistema cabine foram coletados do banco de dados e a análise FMEA foi realizada, conforme se pode verificar na Tabela 5.

TABELA 5. Análise FMEA subsistema Cabine

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Acomodar o operador	Banco não infla	Impossibilidade do operador se sentar	Vazamento no balão ou mangueira de ar	Substituir balão ou mangueira de ar comprimido	3 (P)	3	2	18
	Ar condicionado não refrigera	Má refrigeração da cabine/ desconforto do operador.	Correia do compressor rompida, baixo nível de refrigeração ou avaria em algum componente do sistema.	Substituir correia, completar nível do fluido refrigerante e avaliar substituir componentes avariados.	3 (P)	5	3	45

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Acomodar o operador	Encosto do banco não trava	Impossibilidade do operador se sentar	Desgaste da trava	Reparar/ trocar trava	3 (P)	3	2	18

Fonte: Dados de Pesquisa (2017)

De acordo com a análise do subsistema cabine, Tabela 5, pode-se concluir que a falha crítica que ocorre e que requer maior atenção é a não refrigeração do ar condicionado. A verificação periódica do funcionamento e estado dos componentes é essencial para evitar este tipo de falha.

3.4 Elétrico

Outro subsistema analisado foi o elétrico, para isso, dados sobre as manutenções desse subsistema foram coletados do banco de dados da empresa e a análise FMEA desenvolvida, conforme a Tabela 6 apresenta.

TABELA 6. Análise FMEA subsistema Elétrico

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Fornecer energia elétrica aos componentes dos sistemas	Alarmando balsa alta	Redução na velocidade do equipamento	Erro de leitura ou ausência de corrente elétrica no sensor de posição da balsa	Reposicionar sensor ou reparar fios de alimentação do sistema	3 (E)	2	1	6
	Baixa voltagem do sistema	Falhas diversas e pane elétrica no sistema	Alternador ou correia avariados	Reparar/ substituir alternador ou correia	3 (E)	3	1	9
	Falha de sensores	Erro nos dados registrados pelos sensor	Avaria no sensor ou ausência de corrente elétrica	Reparar/ substituir sensor ou fios d alimentação do sistema	3 (E)	5	1	15
	Lâmpadas dos faróis queimadas	Falta de iluminação impossibilitando a operação	Curto circuito ou fim da vida útil da lâmpada	Avaliar/ reparar circuito e substituir lâmpada	3 (P)	2	2	12

Fonte: Dados de Pesquisa (2017)

A partir da análise FMEA para o subsistema elétrico, foi verificado que a falha nos sensores é a mais crítica, seguida das lâmpadas dos faróis queimadas, que, apesar de não ter grandes impactos ambientais e econômicos, acarreta em um risco para o operador.

Uma forma de diminuir a ocorrência de falhas nos sensores é reposicionar os chicotes elétricos de alimentação dos sensores e adaptar proteções anti-atrito dos mesmos com o chassi e demais partes.

3.5 Chassi e Caçamba (Báscula)

A análise FMEA do subsistema chassi e caçamba foi desenvolvida com os dados coletados do banco de dados da empresa. A partir dessa análise a pesquisa identificou três modos de falha, conforme podem ser verificadas na Tabela 7.

TABELA 7. Análise FMEA subsistema Chassi e Caçamba (Báscula)

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Suporte para outros componentes / Transporte de carga	Báscula batendo no chassi	Trinca no chassi e danos ao equipamentos	Falha do sensor de posição ou báscula não totalmente apoiada no chassi	Reparar/ substituir sensor de posição da báscula ou regular apoio da báscula	2 (E)	2	2	12
	Trinca no chassi	Ruptura do chassi ou componentes	Sobrecarga do equipamento ou folga nas buchas de articulação das partes	Não sobrecarregar o equipamento ou substituir buchas avariadas	3 (E)	4	2	24
	Báscula não apoia no chassi	Torção e colisão entre báscula e chassi	Regulagem dos calços incorreta	Realizar regulagem dos calços	2 (E)	2	2	8

Fonte: Dados de Pesquisa (2017)

Na análise do subsistema chassi e caçamba, a pesquisa identificou as falhas trinca no chassi e caçamba (báscula) batendo no chassi. Essas falhas são comuns dentro de um setor com processos agressivos, como é a mineração. Uma forma de evitar esses problemas é não ultrapassar o limite de carga indicado pelo fabricante, atentar-se para a marcação da balança de carga e atuar preventivamente na eliminação de folgas provenientes de buchas avariadas.

3.6 Freio

Em continuidade, dados do subsistema freio foram coletados do banco de dados e a análise FMEA realizada para identificar as falhas. A partir dos resultados, foi observada três modos de falha nesse subsistema, conforme se pode verificar na Tabela 8.

TABELA 8. Análise FMEA subsistema Chassi e Caçamba (Báscula)

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Reduzir a velocidade da roda até a imobilização do caminhão	Alta temperatura do óleo de freio	Desgaste dos componentes internos do freio	Sensor de temperatura avariado ou trocador de calor ineficiente	Reparar/ substituir sensor ou trocador de calor	4 (E)	3	1	12
	Freio de serviço ineficiente	Risco ao operador	Desgaste das placas e discos ou baixa pressão de aplicação dos freios de serviços	Substituir placas e discos de freio ou ajustar pressão do sistema	5 (P)	3	1	15
	Freio travado	O equipamento não se locomove	Baixa pressão de liberação dos freios de estacionamento	Avaliar componentes do sistema e corrigir a pressão de liberação do freio	2 (E)	2	1	4

Fonte: Dados de Pesquisa (2017)

A análise de falha por meio da ferramenta FMEA no subsistema freio apontou duas falhas com maiores valores de criticidade, alta temperatura do óleo de freio e freio de serviço ineficiente, sendo esta última um problema que apresenta um valor de severidade máximo, pois pode provocar a morte do operador em casos extremos.

Uma proposta de melhoria para prevenção deste tipo de falha é implementar, em procedimento operacional, um teste para verificar a eficiência dos freios de serviço antes de colocar o equipamento em operação.

3.7 Suspensão

O subsistema suspensão foi analisado após o chassi e caçamba. Isto posto, os dados sobre o subsistema suspensão foram coletados e a análise FMEA foi realizada. A Tabela 9 apresenta os resultados deste estudo.

TABELA 9. Análise FMEA subsistema Suspensão

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Absorver todas as irregularidades do solo, estabilizando o equipamento.	Vazamento de óleo na haste da suspensão	Descalibragem da suspensão	Avaria no retentor da haste	Substituir suspensão	3 (A)	2	2	12
	Bucha do cilindro da suspensão quebrada	Folga na fixação da suspensão	Desgaste por fadiga da bucha	Substituir bucha	2 (E)	3	2	12

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Absorver todas as irregularidades do solo, estabilizando o equipamento.	Suspensão descalibrada	Balança descalibrada	Perda de pressão em função do tempo ou vazamento na haste da suspensão	Calibrar suspensão	4 (E)	4	1	16
	Balança descalibrada	Balança não registra o peso do material	Suspensões descalibradas	Calibrar pressão e altura das suspensões	4 (E)	4	1	16

Fonte: Dados de Pesquisa (2017)

Nesta análise FMEA do subsistema suspensão, pode-se notar que duas falhas se destacam quanto ao valor de risco, suspensão descalibrada e balança descalibrada. Essas falhas têm características diferenciadas, por estarem diretamente relacionadas entre si, pois se a suspensão estiver descalibrada, logo a balança também estará, portanto, neste caso, é necessário demandar uma maior atenção ao problema de descalibração da suspensão.

Como sugestão de melhoria, pode-se inserir no plano de manutenção preventiva a verificação da necessidade de calibração da suspensão.

3.8 Direção

Por fim, dados do subsistema direção foram coletados e a análise FMEA foi realizada para identificar as falhas. Os resultados da análise FMEA desse que podem ser verificada na Tabela 10.

TABELA 10. Análise FMEA subsistema Direção

Função do Produto ou Requisitos do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial de Falha	Causa/ Mecanismo Potencial de Falha	Controles Atuais do Processo	Severidade/ Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN D x O x S
Fazer com que o movimento de giro do volante seja transferido para as rodas, permitindo a manobra do equipamento	Alta temperatura do óleo de direção	Desgaste dos componentes internos da direção	Baixa refrigeração, vazamento ou baixo nível de óleo	Avaliar refrigeração, reparar vazamento e completar nível de óleo	4 (E)	4	1	16
	Baixa pressão do sistema de direção	Mau funcionamento, direção pesada	Acumulador descalibrado ou avaria na bomba de direção	Calibrar pressão de trabalho do acumulador ou reparar/ substituir bomba	2 (E)	4	1	8
	Filtro de direção obstruído	Baixa pressão do sistema de direção	Limalhas no sistema ou erro de leitura do sensor de pressão	Substituir filtro de direção ou reparar/ substituir sensor	4 (E)	3	1	12

Fonte: Dados de Pesquisa (2017)

Na análise do subsistema direção, foi identificada a alta temperatura do óleo de direção como a falha mais crítica do sistema de direção, seguida do filtro de direção obstruído. Para esses casos, a manutenção preventiva, para detectar possíveis anomalias no sistema é a forma mais eficiente de se evitar que essas falhas venham a ocorrer.

3.9 Resultados

Neste trabalho, foram identificadas várias falhas ocorridas nos oito subsistemas dos caminhões fora de estrada analisados a partir da utilização da ferramenta FMEA. Por meio dos resultados, a média dos valores do RPN de cada subsistema foi calculada e pode ser observada na Tabela 11.

TABELA 11. Média dos índices RPN dos subsistemas do caminhão fora de estrada

Subsistemas	Média RPN
Mangueiras e Vedações	32
Cabine	27
Tem de força	17
Chassis e Caçamba	15
Suspensão	14
Direção	12
Elétrico	11
Freio	9

Fonte: Dados de Pesquisa (2017)

Ao analisar as médias dos índices RPN dos subsistemas dos caminhões fora de estrada na Tabela 11, identifica-se que o subsistema Mangueiras/Vedações é o mais crítico. Vale destacar, que neste subsistema foi identificada apenas uma falha, que, devido ao seu alto índice de ocorrência e severidade, apresenta um maior índice de risco. O segundo subsistema com maior criticidade é Cabine, que tem sua média aumentada em decorrência do alto valor de RPN da falha ar condicionado não refrigera. O item Trem de força também requer uma atenção elevada, pois denota um número maior de modos de falha, o que gera uma necessidade de manutenção mais acentuada. Os demais subsistemas também carecem de cuidados do setor de manutenção, pois ainda que não apresentem um grau de risco muito alto, comparado com os outros subsistemas, também expõem falhas que causam a indisponibilidade dos equipamentos.

4. CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa é aplicar a metodologia FMEA, como ferramenta para detecção e mitigação de falhas em caminhões fora de estrada em uma empresa de manutenção de caminhões atuante no setor de mineração, do interior do estado de Minas Gerais. Por meio da implementação da ferramenta FMEA, no setor de manutenção da empresa, é possível alcançar um maior nível de produtividade, por meio do aumento da disponibilidade dos caminhões fora de estrada, uma vez que a FMEA classifica as falhas com relação à sua criticidade, otimizando o trabalho de manutenção, tanto corretiva quanto preventiva.

No desenvolvimento deste estudo, foi possível identificar as falhas que ocorrem em oito subsistemas dos caminhões fora de estrada, e o grau de criticidade de cada uma delas. Acrescenta ainda, que sugestões foram apresentadas para solucionar as falhas.

No caso da manutenção preventiva, a utilização da FMEA pode evitar a ocorrência das falhas identificadas como prioritárias, pois, por já saber qual falha demanda uma maior atenção. Logo, a equipe de manutenção dará maior ênfase para a correção de possíveis avarias nos componentes dos subsistemas.

Como limitação para este estudo encontrou-se a dificuldade para obtenção de dados do processo de manutenção, pois a empresa não disponibiliza informações de um período de tempo muito longo, e também a falta de padrão quanto à inserção de dados pelos operadores, fazendo com que a organização de informações contidas no banco de dados demandasse muito tempo.

Este trabalho proporciona a possibilidade de estudos futuros através da análise de dados em um maior período de tempo, tornando os resultados ainda mais encorpados. E também a possibilidade da aplicação efetiva desta análise no setor de manutenção da empresa, implementando as sugestões de melhoria apresentadas neste estudo, para que possa se apresentar seus respectivos resultados.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, I. M.; SANTOS, C. K. S.. **Manutenção elétrica industrial**. Disponível em: <<http://www.dee.ufrn.br/~joao/apostila/cap03.htm>> Acesso em: 03/03/2017.

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

CAPALDO, D.; GUERREIRO, V.; ROSENFELD, H. **FMEA (*Failure Model and Effect Analysis*): Conceitos básicos**. 2003. Disponível em: <http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/FMEA.htm>. Acesso em: 10/03/2017.

CARPINETTI, L. C. R. **Gestão Estratégica da Qualidade**. São Paulo: Saraiva 2010.

- CARPINETTI, L. C. R. **Gestão da Qualidade: Conceitos e Técnicas**. 2ª Edição. São Paulo: Atlas, 2012.
- COMITTI, A., **Por que Investir em Manutenção Preditiva**, Revista Mecatrônica Atual - nº 16. 2004.
- DAILEY, K. W. **The FMEA Pocket Handbook**. DW Publishing Co.: 40p., 2004.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário da língua portuguesa**. 5. ed. Curitiba: Positivo, 2222 p., 2010. ISBN 978-85-385-4198-1.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Porto Alegre: Elsevier, 2009.
- GUACHALLA, W. F. **Avaliação dos reflexos da operação do virador de vagões em produção e na fila de trens para descarga de produtos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transporte) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- MADDOX, M.E. **Error apparent**. *Industrial Engineer*, v.37, n.5, p. 40-44, 2005.
- PALADY, P. **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos**. São Paulo: IMAN, 2002.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos**. 3. ed. Newtown Square: PMI, 405p., 2004.
- RODRIGUES, C.; *et al.* **Procedimento de Manutenção: Inspeção e Manutenção de AMV**. MRS, 2009.
- SALLES JR., C. A. C; SOLER, A. M; VALLOE, J. A. S; RABECHINI JR., R. **Gerenciamento de Riscos em Projetos**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006.
- VILLEMEUR, A. **Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment**. Volume 2. John Wiley & Sons, Chichester, 1992.
- WARREN. **FMEA: Failure Mode, Effects and Analysis**. USA, 2002.