



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



MARCOS RAFAEL DA SILVA

ESTUDO DE CONFIABILIDADE APLICADO À MANUTENÇÃO DE PÁS-CARREGADEIRAS: O CASO DE UMA EMPRESA DE MINERAÇÃO

**OURO PRETO - MG
2018**

MARCOS RAFAEL DA SILVA
colegio.mrsilva@gmail.com

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE APLICADO À MANUTENÇÃO DE PÁS-
CARREGADEIRAS: O CASO DE UMA EMPRESA DE MINERAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Washington Luís Vieira da Silva

OURO PRETO – MG
2018

S586e Silva, Marcos Rafael da.
Estudo de confiabilidade aplicado à manutenção de pás-carregadeiras
[manuscrito]: o caso de uma empresa de mineração / Marcos Rafael da Silva. -
2018.

129f.: il.: color; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Washington Luis Vieira da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Manutenção. 2. Disponibilidade Física. 3. Confiabilidade. 4. Manutenção
Centrada em Confiabilidade. 5. pás-carregadeiras. I. Silva, Washington Luis
Vieira da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos 29 dias do mês de Novembro de 2018, às 18h 00min, na sala 15, localizada na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa da Monografia do aluno Marcos Rafael da Silva, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. DSc. Washington Luis Vieira da Silva, Prof^o DSc. Zirlene Alves da Silva Santos e Prof. MSc. Savio Sade Tayer. O candidato apresentou o trabalho intitulado: “ **Estudo de Confiabilidade aplicado a Manutenção de Pás-Carregadeiras: o caso de uma empresa de mineração**”, sob orientação do Prof. DSc. Washington Luis Vieira da Silva. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o(a) aluno(a) APROVADO.

Ouro Preto, 29 de Novembro de 2018.

Prof. DSc. Washington Luis Vieira da Silva
Professor Orientador

Prof. MSc. Savio Sade Tayer
Professor Avaliador

Prof. DSc. Zirlene Alves da Silva Santos
Professor Avaliador

Marcos Rafael da Silva
Aluno(a)

A minha mãe, que sempre esteve presente em meus pensamentos com sua força, determinação e amor. Agradeço pelos ensinamentos, foram eles que me guiaram diante de cada dificuldade e escolha.

AGRADECIMENTO

Há pessoas das quais quero me lembrar quando ler esse trabalho no futuro, por isso às coloco nesse texto. Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho, em especial:

A Deus pela proteção, sabedoria e força para atingir essa conquista.

A minha mãe e aos meus irmãos por todos os ensinamentos, princípios, conquistas e por acreditar nesse sonho, sempre estando ao meu lado com todo o apoio e carinho necessário. Vocês são os principais responsáveis pela pessoa que me tornei.

A minha namorada Larissa da Silva, por todo carinho, respeito, preocupação e amor dedicado a mim através do seu apoio e companheirismo. Agradeço por sempre estar ao meu lado, me confortando nos momentos ruins e comemorando junto a mim as vitórias.

Aos meus amigos que contribuíram de alguma forma para a essa conquista, em especial a Valber (Capaxão), Jean (Oncêvai), Lucas (Dimas), Rodrigo (Kuririn), Tiago (Doido), e Marcelo Henrique.

A Washington Luis, pela amizade, momentos de conversas, conselhos, ensinamentos e pela orientação e voto de confiança na realização desse trabalho. Você é uma excelente pessoa.

Aos professores da Escola de Minas por todo auxílio e motivação pela busca constante do conhecimento, em especialmente aos professores Luis Bortolaia, Margarida Márcia, Sávio Sade e Washington Luis que, de forma direta ou indireta, marcaram fortemente a minha formação.

A Fundação Gorceix, não só pelo apoio financeiro fornecido quando cheguei à universidade, possibilitando que eu tivesse as condições mínimas necessárias para o meu desenvolvimento profissional, mas também por auxiliar na minha formação através de todos os cursos e oportunidades oferecidas.

A todos vocês meu sincero e singelo obrigado.

*“Não existe um caminho para a felicidade.
A felicidade é o caminho.”*

Thich Nhat Hanh

RESUMO

SILVA, Marcos Rafael: **Estudo de confiabilidade aplicado à manutenção de pás-carregadeiras: o caso de uma empresa de mineração**, 2018. (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto.

Este estudo tem como objetivo aplicar o programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) para o sistema de pás-carregadeiras de uma empresa do setor de mineração. A MCC é um programa que reúne técnicas de engenharia que buscam assegurar que o equipamento continuará desempenhando adequadamente o seu propósito específico por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas. Dessa maneira, o estudo contempla: (i) revisão bibliográfica com o intuito de esclarecer e justificar o problema de estudo, além de orientar quanto a metodologia mais adequada para os procedimentos de análise e coleta de dados, (ii) caracterização da empresa com a finalidade de conhecer as condições ambientais predeterminadas e as funções específicas do ativo dentro da organização, (iii) descrição do equipamento segundo seus sistemas, conjuntos e componentes mecânicos com o propósito de identificar as falhas funcionais, e (iv) análise estatística Weibull das falhas com o intuito de hierarquizar os sistemas mais críticos, analisar os modos e efeitos de suas falhas, além de selecionar atividades de manutenções que eliminem ou minimizem as causas fundamentais dessas ocorrências. Durante o trabalho, por meio da curva de confiabilidade, foi possível constatar que os ativos poderiam ser beneficiados por atividades preventivas de troca e reforma. A análise das falhas possibilitou concluir que, embora os sistemas de menor confiabilidade fossem de naturezas diferentes e possuíssem componentes distintos, as causas fundamentais de suas falhas eram semelhantes e possivelmente tinham relação com fatores tais como: erros do operador, manutenções mal executadas, falta de planejamento voltado para ações preventivas de manutenção e/ou ao uso de produtos de má qualidade. Dessa forma, o procedimento metodológico elaborado possibilitou aplicar o programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade no estudo dos modos e efeitos das falhas, assim como propor contramedidas que podem tratar as causas fundamentais dessas ocorrências, de modo que os resultados obtidos evidenciam a importância do programa MCC no desenvolvimento de planos de manutenção sistematizada, minimizando assim os custos por meio da escolha do método de manutenção mais adequado a cada modo e efeito das falhas.

Palavras-chave: *Manutenção, Disponibilidade Física, Confiabilidade, Manutenção Centrada em Confiabilidade, pás-carregadeiras.*

ABSTRACT

This study aims to apply the Reliability Centered Maintenance (MCC) program to the loader system of a mining company. MCC is a program that brings together engineering techniques that seek to ensure that the equipment will continue to perform its specific purpose for a certain period of time and under predetermined environmental conditions. In this way, the study contemplates: (i) bibliographic review with the purpose of clarifying and justifying the study problem, besides guiding the most appropriate methodology for the analysis and data collection procedures, (ii) characterization of the company with the (iii) description of the equipment according to its systems, assemblies and mechanical components for the purpose of identifying functional failures, and (iv) Weibull statistical analysis of failures with the purpose of hierarchizing the most critical systems, analyzing the modes and effects of their failures, and selecting maintenance activities that eliminate or minimize the root causes of these occurrences. During the work, through the reliability curve, it was possible to verify that the assets could be benefited by preventive exchange and reform activities. Failure analysis made it possible to conclude that although the systems with the lowest reliability were of different natures and had different components, the fundamental causes of their failures were similar and possibly related to factors such as: operator errors, poorly executed maintenance, lack of planning aimed at preventive maintenance actions and / or the use of poor quality products. Thus, the methodological procedure elaborated made it possible to apply the Reliability Centered Maintenance program in the study of the modes and effects of failures, as well as to propose countermeasures that can treat the root causes of these occurrences, so that the results obtained evidenced the importance of the MCC program in the development of systematized maintenance plans, thus minimizing costs by choosing the most appropriate maintenance method for each mode and effect of the failures.

Keywords: Maintenance, Physical Availability, Reliability, Reliability Centered Maintenance, Loaders.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva da Banheira.....	14
Figura 2: Função Densidade de Falhas $f(t)$	17
Figura 3: Função Confiabilidade $R(t)$	18
Figura 4: Função de risco $h(t)$	19
Figura 5: Curva linearizada e reta ajustada para os dados x	20
Figura 6: Representações de confiabilidade da distribuição exponencial.....	23
Figura 7: Densidade de probabilidade da distribuição lognormal.	25
Figura 8: Densidade de probabilidade da distribuição lognormal.	26
Figura 9: Diagrama de etapas do programa MCC.	32
Figura 10: Tipos de curvas de falhas.	34
Figura 11: Formulário FMEA sugerido pela norma ISO 9004.	37
Figura 12: Sugestão de escala para avaliação dos efeitos dos modos de falhas.....	38
Figura 13: Sugestão de escala para avaliação da ocorrência da causa de falhas.	39
Figura 14: Sugestão de escala para avaliação da detecção.....	40
Figura 15: Atividades pró-ativas.	44
Figura 16: Tipo de atividade recomendada.	45
Figura 17: Materiais e Métodos.....	52
Figura 18: Pás-carregadeiras sobre pneus. Figura 19: Pás-carregadeiras sobre esteiras.....	57
Figura 20: Componentes do sistema de válvulas.....	58
Figura 21: Princípio de funcionamento do motor diesel.	59
Figura 22: Circuito de combustível do motor diesel.....	60
Figura 23: Circuito de ar do motor diesel.	61
Figura 24: Sistema hidráulico de pás-carregadeiras.	63
Figura 25: Representação de um sistema hidráulico.....	63
Figura 26: Conjunto de Arrefecimento ar-água.....	65

Figura 27: Representação esquemática do sistema de lubrificação.....	66
Figura 28: Simbologia universal do painel de instrumentos de uma pá-carregadeira.	67
Figura 29: Simbologia universal do painel de instrumentos de uma pá-carregadeira.	68
Figura 30: Ilustração da planilha Excel disponibilizada pela empresa – parte 1.....	69
Figura 31: Ilustração da planilha Excel disponibilizada pela empresa – parte 2.....	69
Figura 32: Ilustração da planilha Excel disponibilizada pela empresa – parte 3.....	69
Figura 33: Porcentagem de ocorrência de falhas em função das Frotas.	71
Figura 34: Diagrama de Pareto para o número de ocorrências em função das Frotas.....	71
Figura 35: Número de ocorrências em função dos sistemas para a Frota CAT 994 D.....	72
Figura 36: Número de ocorrências em função dos sistemas para a Frota CAT 990 II.	72
Figura 37: Número de ocorrência dos equipamentos pertencentes à frota CAT 994 D.	73
Figura 38: Número de ocorrência dos equipamentos pertencentes à frota CAT 990 II.	74
Figura 39: Ocorrências nos sistemas do equipamento PM3112 da Frota CAT 994 D.	74
Figura 40: Ocorrências nos sistemas do equipamento PM6519 da Frota CAT 990 II.	75
Figura 41: Curva de confiabilidade para o Equipamento PM3112.	78
Figura 42: Curva de Confiabilidade para o Equipamento PM6519.....	79
Figura 43: Confiabilidade dos sistemas motor de combustão e hidráulico para 200 horas de operação nas condições originais de operação.	81
Figura 44: Metodologia adotada na investigação das falhas nos sistemas.....	82
Figura 45: Metodologia adotada na investigação das falhas nos conjuntos.....	85
Figura 46: Porcentagem de falhas em função dos componentes - conjunto arrefecimento - sistema motor de combustão.	85
Figura 47: Porcentagem de falhas em função dos componentes - conjunto motor de combustão - sistema m. de combustão.	86
Figura 48: Porcentagem de falhas em função dos componentes - conjunto combustível - sistema motor de combustão.....	86

Figura 49: Porcentagem de falhas em função dos componentes - conjunto tanque de óleo - sistema hidráulico.	87
Figura 50: Porcentagem de falhas em função dos componentes - conjunto bomba hidráulica - sistema hidráulico.	87
Figura 51: Metodologia adotada na investigação das falhas.	88
Figura 52: Diagrama dos Porquês para o conjunto de arrefecimento pertencente ao sistema Motor de Combustão.....	90
Figura 53: Diagrama dos Porquês para o conjunto Motor de Combustão, pertencente ao sistema Motor de Combustão.....	92
Figura 54: Diagrama dos Porquês para o conjunto Combustível, pertencente ao sistema Motor de Combustão.	93
Figura 55: Diagrama dos Porquês para o conjunto Tanque de óleo, pertencente ao sistema Hidráulico.	96
Figura 56: Diagrama dos Porquês para o conjunto Bomba Hidráulica, pertencente ao sistema Hidráulico.	97
Figura 57: Resumo das causas fundamentais das falhas dos dois sistemas.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Planilha ampliada para a condução da FMEA e detalhamento das atividades de manutenção.....	47
Tabela 2: Variáveis e Indicadores.....	53
Tabela 3: Tempo de operação e número de ocorrências de cada frota.	70
Tabela 4: Dados disponíveis na planilha sobre os equipamentos.....	76
Tabela 5: Registro da planilha sobre os dois equipamentos selecionados para o estudo.....	77
Tabela 6: Confiabilidade dos Equipamentos para alguns intervalos de tempo de operação....	80
Tabela 7: Confiabilidade dos Sistemas em função do equipamento.	81
Tabela 8: Número e porcentagem de ocorrências relacionadas aos conjuntos do motor de combustão.....	83
Tabela 9: Número e porcentagem de ocorrências relacionadas aos conjuntos do sistema hidráulico.....	84
Tabela 10: Causas Fundamentais e Contramedidas.....	99
Tabela 11: Ações preventivas sugeridas.	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Geral.....	4
1.3.2	Específicos	5
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	Manutenção Mecânica: uma abordagem geral.....	6
2.2	Estatística amostral e análise de dados	9
2.2.1	Seleção da amostra	9
2.2.2	Histograma	10
2.2.3	Análise do modo de falha e causa raiz.....	10
2.2.4	Diagrama de Pareto.....	10
2.2.5	Gráfico de Setores.....	11
2.3	Confiabilidade	11
2.3.1	Abordagem quantitativa sobre a Confiabilidade	12
2.3.2	Modelos Estatísticos aplicados a confiabilidade	16
2.4	Disponibilidade	26
2.5	Mantenabilidade (ou Manutenibilidade).....	28
2.6	Manutenção Centrada em Confiabilidade.....	29
2.6.1	Questões básicas do programa MCC	30
2.6.2	Estabelecimento da base de dados e de critérios confiabilidade	33
2.6.3	Análise das falhas	33
2.6.4	FMEA (<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>).....	36
2.6.5	Classificação dos componentes e seleção de atividades de manutenção pertinentes 42	
2.6.6	Planilha de apoio à implantação do programa MCC	46
2.7	Considerações finais do capítulo	48
3	METODOLOGIA	50

3.1	Caracterização da pesquisa	50
3.2	Materiais e métodos.....	51
3.3	Variáveis e Indicadores.....	53
3.4	Coleta de dados	53
3.5	Tabulações de Dados	54
3.6	Considerações finais do capítulo.....	54
4	RESULTADOS.....	55
4.1	Delimitação do trabalho.....	55
4.2	Características da empresa no processo de extração do minério	55
4.3	Descrição do equipamento.....	57
4.3.1	Sistema de válvulas.....	58
4.3.2	Sistema elétrico	59
4.3.3	Sistema de alimentação.....	60
4.3.4	Sistema hidráulico	62
4.3.5	Sistema de arrefecimento	64
4.3.6	Sistema de Lubrificação.....	65
4.4	Aplicação do Programa MCC nas pás-carregadeiras	68
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	103
5.1	Conclusões	103
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	107
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

O alto nível de competitividade das empresas exige que elas possuam métodos de manutenção adequados que maximizem a disponibilidade dos equipamentos, pois a falha de um componente importante na operação pode levar a interrupção de uma linha inteira de produção e prejudicar o fluxo de trabalho, o que pode resultar, entre outras coisas, em atrasos e aumento dos custos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5462-1994) define a manutenção como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. Xenos (2004) relata que as atividades de manutenção de equipamentos em qualquer empresa podem ser divididas em: (i) atividades de manutenção; e (ii) atividades de melhorias.

As atividades de manutenção visam manter as condições originais de operação e desempenho através do restabelecimento de eventuais deteriorações, enquanto as atividades de melhorias visam melhorar suas condições originais de operação, desempenho e confiabilidade intrínseca. Segundo o mesmo autor, “por definição, nenhuma atividade de manutenção aumentará a capacidade funcional do equipamento ou sua confiabilidade intrínseca. Por isso, as atividades de melhoria também são essenciais (XENOS, 2004, p. 22).” Xenos (2004, p.26) afirma ainda que “é preciso melhorar continuamente os equipamentos alterando conforme necessário seu projeto, seus padrões de operação e manutenção. Para isso, é importante investigar exaustivamente as causas fundamentais da falha.”

De acordo com Xenos (2004), as atividades de manutenção compreendem alguns métodos de manutenção, tais como manutenção corretiva, preventiva, preditiva, entre outros. A aplicação adequada desses métodos pode levar ao aperfeiçoamento dos fatores econômicos da produção, garantindo a melhor utilização e a maior produtividade dos equipamentos, com o menor custo. Porém, para selecionar o método mais adequado ao tipo de falha do ativo ou promover atividades de melhorias é necessário uma investigação criteriosa de como a falha ocorre e as consequências da sua ocorrência.

Segundo Xenos (2004), os estudos das falhas dos equipamentos podem ser realizados através de métodos gerenciais específicos, tais como o programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade. Para o autor, a metodologia proposta pelo programa MCC possibilita identificar

o que causou a parada do equipamento, os efeitos da sua interrupção e quais atividades de manutenção são mais adequados para o ativo.

O programa Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) estuda as diversas formas de como um componente pode vir a falhar com o objetivo de adotar ações de bloqueios pertinentes, ou seja, essa metodologia visa aumentar a vida útil dos itens físicos e reduzir os custos das atividades de manutenção, uma vez que ela estabelece a melhor estratégia para gerenciamento das falhas e propõe meios para aumentar a confiabilidade de um sistema (VIANA, 2002; MARCORIN & LIMA, 2003 *apud* COSTA, 2013). De acordo com a NBR 5462 (1994), o termo “confiabilidade” é usado como uma medida de desempenho e representa a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob determinadas condições e em um dado intervalo de tempo.

Portanto, o programa MCC pode ser um bom programa para que as empresas consigam reduzir os custos de produção e garantir a sua competitividade no mercado (XENOS, 2004). Nesse contexto, as empresas de mineração enfrentam grandes desafios devido às quedas no preço do minério de ferro no mercado internacional e a retração no consumo brasileiro de bens minerais, conforme apresenta os relatórios anuais de atividades do Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2017). Essas circunstâncias fazem com que as empresas desse setor busquem estratégias que garantam confiabilidade, segurança e redução de custos, de modo que os ativos utilizados possibilitem extrair um minério de boa qualidade e baixo custo por tonelada.

Dessa forma, o setor de manutenção dessas empresas tem a responsabilidade de combater as paradas não programadas dos ativos, uma vez que as interrupções das linhas de produção podem conduzir a uma baixa competitividade no mercado devido aos possíveis aumentos no preço final do produto que a falha pode causar e aos atrasos em relação aos prazos de entrega.

Dentre os equipamentos mais utilizados na mineração, verifica-se uma elevada taxa de falhas nas pás-carregadeiras. Na tentativa de aumentar a disponibilidade física desses equipamentos, será desenvolvido um trabalho baseado no Método de Manutenção Centrada na Confiabilidade, ou seja, a partir de ferramentas de confiabilidade, os principais pontos de falhas dos equipamentos serão rastreados com o objetivo de apresentar soluções e/ou ações efetivas para tratá-los ou amenizá-los. Segundo a NBR 5462 (1994) a Disponibilidade Física é definida como a capacidade de um item estar em condições de executar uma função atribuída a ele em um determinado instante de tempo ou durante um intervalo de tempo determinado.

Sabendo que uma manutenção adequada tem efeitos nos custos finais do produto vendido e diante da necessidade de aperfeiçoar o programa de manutenção das carregadeiras no setor da mineração, questiona-se:

Como aplicar o Programa de Manutenção Centrada na Confiabilidade para o sistema de pás-carregadeiras de uma empresa do setor de mineração?

1.2 Justificativa

Segundo Xenos (2004), do ponto de vista dos clientes, os produtos ou serviços são percebidos por meio de três dimensões básicas: qualidade intrínseca, custo e entrega. Desta forma, quanto mais favorável for à combinação das três dimensões, maior será o valor agregado ao produto ou serviço. O mesmo autor ressalta que “na maioria das vezes, o valor aumenta na proporção direta da qualidade intrínseca (melhor qualidade) e da entrega (entrega mais rápida), e na proporção inversa do custo (mais barato) (XENOS, 2004, p. 40).”

Para o mesmo autor, os produtos e serviços têm a sua qualidade cada vez mais dependente do bom funcionamento dos instrumentos de produção. Conseqüentemente, as falhas desses equipamentos e instalações causam impactos diretos que ameaçam a satisfação, o conforto e, principalmente, a segurança das pessoas.

Entretanto, a manutenção adequada das máquinas e instalações da empresa aumenta o valor agregado de seus produtos e serviços, colocando cada vez mais qualidade (*output*) a custos mais baixos (*input*). “Se a empresa for capaz de agregar muito valor por um baixo custo, ela dominará o mercado, pois os consumidores, evidentemente, sempre procurarão ao máximo VALOR pelo seu dinheiro (FALCONI, 1992 *apud* XENOS, 2004, p. 43).”

O crescente entendimento da influência que as falhas dos equipamentos têm nas várias dimensões da qualidade e satisfação das pessoas faz com que as organizações busquem estratégias que definam quais métodos de manutenção são mais adequados para cada ativo, a fim de garantir sua competitividade no mercado. Entre esses métodos, destaca-se a Manutenção Centrada na Confiabilidade.

A abordagem racional e sistemática utilizada em programas como a MCC permite o bom gerenciamento das atividades de manutenção, resultando na ampliação da disponibilidade e redução dos custos associados a acidentes, defeitos, reparos e substituições (MENDES, 2011).

Segundo Viana (2002), a MCC se tornou um importante programa no planejamento e controle da manutenção, pois a presença de sofisticados equipamentos de alta produtividade fez

a exigência da disponibilidade física subir devido aos altos custos das falhas não programadas. Desse modo, a aplicação do método de Manutenção Centrada na Confiabilidade para empresas de mineração é adequada devido à presença de equipamentos de grande porte e que necessitam de elevada confiabilidade em virtude dos elevados custos referentes a qualquer indisponibilidade dos mesmos (TAVARES, 2015).

Entre os equipamentos de grande porte que estão presentes na mineração, destacam-se as pás-carregadeiras. Esses ativos serão o foco deste estudo, pois estão alocados nas frentes das lavras e são responsáveis por retirar e carregar os equipamentos de transporte com o minério para que o mesmo seja transportado até o local de descarga (RACIA, 2016).

As pás-carregadeiras são formadas por um grande trator com uma caçamba frontal, que é acionada por meio de um sistema de braços articulados. Esses equipamentos podem realizar terraplenagem, escavação, mas são especializadas no carregamento de caminhões. Os principais componentes desse ativo são: (i) sistema elétrico, formado por baterias, gerador, componentes do painel e lâmpadas; (ii) sistema de alimentação, no qual um conjunto de peças fornecem e dosam o combustível utilizado na alimentação do motor de combustão interna; (iii) sistema hidráulico, que movimenta o óleo com a pressão necessária para elevar e inclinar a caçamba; (iv) transmissão, que permite a mudança das marchas através de controles; e o (v) motor, sendo este a força motriz do veículo e responsável por movimentar as bombas hidráulicas (QUEVEDO, 2009).

As perdas de produção causadas por paradas não programadas dessas pás-carregadeiras podem acarretar no descumprimento dos prazos, perdas econômicas devido à interrupção da produção, riscos de acidentes de trabalho, redução na produtividade, baixa satisfação dos clientes e, conseqüentemente, baixa competitividade no mercado.

Diante desse cenário, faz-se necessário um estudo de confiabilidade para identificar e, possivelmente, tratar as falhas do equipamento estudado na tentativa de aumentar a disponibilidade física do mesmo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Aplicar o método de manutenção centrada na confiabilidade para o sistema de pás-carregadeiras de uma empresa do setor de mineração.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo bibliográfico sobre: Manutenção, Confiabilidade e Manutenção Centrada em Confiabilidade;
- Utilizar o banco de dados da empresa estudada para verificar quais sistemas, conjuntos e componentes das pás-carregadeiras apresentam falhas repetitivas;
- Elaborar um procedimento metodológico para estudar o sistema de pás-carregadeiras;
- Comparar os resultados obtidos com a base teórica para verificar o programa MCC aplicado ao sistema de pás-carregadeiras.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho será dividido em cinco capítulos de modo que o capítulo 1 será uma introdução apresentando a formulação do problema, a justificativa, e os objetivos para este trabalho. O capítulo 2 apresentará uma revisão bibliográfica, com os conceitos de manutenção, métodos de manutenção, confiabilidade e o método de manutenção centrada na confiabilidade. No capítulo 3 será apresentada a metodologia adotada no estudo, os processos de planejamento e controle da manutenção das pás-carregadeiras, assim como os dados necessários para a aplicação do programa MCC para os equipamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manutenção Mecânica: uma abordagem geral

Segundo Tavares (1987) *apud* Costa (2013), a história da manutenção caminhou de acordo com o desenvolvimento técnico-industrial da humanidade. Desse modo, é comum encontrar autores apresentando uma evolução do histórico de manutenção em função das características de produção de cada período.

Entre esses autores, destacam-se Moubray (1997), Kardec e Nascif (2009). Moubray (1997) apresenta uma evolução do histórico de manutenção marcado por três gerações, enquanto Kardec e Nascif (2009) acrescentam a esse histórico uma quarta geração.

A primeira geração, segundo Moubray (1997), abrange o período até a segunda guerra mundial. O perfil industrial dessa geração era formado por empresas pouco mecanizadas, com equipamentos simples e superdimensionados. Esse super dimensionamento os tornavam confiáveis e fáceis de consertar, sendo desnecessárias manutenções sistemáticas de qualquer tipo que não fosse simples limpeza, assistência e lubrificação.

Durante esse período, acreditava-se que as falhas eram algo natural e que ocorriam devido aos desgastes do equipamento com a idade. Dessa maneira, somente após a ocorrência da falha os responsáveis buscavam soluções e empregavam o método de manutenção corretiva, que tem suas habilidades voltadas para o reparo do ativo (KARDEC & NASCIF, 2009).

Portanto, ao fim da primeira geração, as paradas não programadas ainda não eram um fator de preocupação, uma vez que elas não causavam grandes impactos devido ao sistema de produção (MOUBRAY, 1997; KARDEC & NASCIF, 2009).

A segunda geração teve início após a segunda guerra mundial e vai até os anos 70. Durante esse período a produção industrial mundial atingiu níveis sem precedentes, com o crescimento da produção muito mais rápido do que o crescimento da população, resultando no aumento do bem estar material e do padrão de vida das pessoas. Porém, as guerras provocaram uma redução significativa no número de pessoas qualificadas para atuar nas indústrias, obrigando essas últimas a buscar e pensar em novos meios de produção (CABRERA, 2014; WADA, 2017).

Diante desse cenário, as empresas foram forçadas a investir em uma maior mecanização da produção com o objetivo de substituir a escassez de mão de obra. Desse modo, passaram a empregar máquinas mais complexas e de todos os tipos e funções. A partir desse momento,

devido ao crescimento do consumo e do número de maquinários no meio produtivo, o bom funcionamento desses equipamentos tornou-se algo extremamente necessário, de modo que as consequências à produção devido as paradas não programadas conduziram as empresas a buscar meios de evitar as falhas (FREITAS, 2016).

Diante disso, houve o reconhecimento por parte das organizações da importância de ações preventivas de manutenção em intervalos pré-definidos. Tais ações teriam a finalidade de reduzir ou evitar as falhas e a queda de desempenho dos ativos. Surgem então os métodos de manutenção preventiva (KARDEC & NASCIF, 2009).

Freitas (2016) relata que o método de manutenção preventiva é capaz de reduzir a ocorrência de falhas e interrupções inesperadas da produção, aumentando assim a confiabilidade e a disponibilidade física dos ativos. Porém, durante sua execução o equipamento ou sistema deve ser retirado de operação, ou seja, algumas paradas devem ser programadas para que a manutenção ocorra.

Consequentemente, ao final da segunda geração, apensar da manutenção preventiva apresentar bons resultados, os responsáveis pela manutenção ainda se encontravam desafiados a buscar o melhor momento para realizar suas atividades, interrompendo o mínimo possível a produção. Outro ponto relevante é que embora os métodos de manutenção apresentassem evoluções significativas, a crescente automação também levou a falhas cada vez mais complexas e frequentes.

Paralelamente, houve um crescimento das exigências quanto à segurança do meio ambiente, de forma que se as plantas não atendessem aos padrões estabelecidos eram impedidas de funcionar, ou seja, as falhas passaram a ser vistas como algo que, além de prejudicar a produção, afetavam a capacidade das empresas de manter padrões de qualidade estabelecidos e provocavam sérias consequências na segurança e no meio ambiente, podendo até mesmo excluir as empresas do mercado (WADA, 2017).

Diante desse cenário desafiador, Kardec e Nascif (2009) relatam que a terceira geração da manutenção surgiu marcada pela utilização de computadores pessoais velozes, com *softwares* potentes, que permitiam o planejamento, controle e acompanhamento dos serviços.

Além disso, a evolução tecnológica desse período permitiu o reforço do uso de técnicas de manutenção preditiva. Neste tipo de manutenção, utilizam-se computadores e *softwares* para monitoramento das condições dos equipamentos em tempo real. Os dados obtidos possibilitam detectar antecipadamente uma anomalia e obter um diagnóstico precoce da falha através da

leitura e comparação de parâmetros previamente definidos (GARG & DESHMUKH, 2006, *apud* TOAZZA & SELLITO, 2015, *apud* FREITAS, 2016; OTANI & MACHADO, 2008 *apud* COSTA, 2013).

Outro marco importante nessa geração foi que o conceito de confiabilidade começou a ser cada vez mais aplicado na Manutenção. Surgem, dessa forma, processos de manutenção centrada em confiabilidade que estabeleciam a melhor estratégia de manutenção ao realizar uma análise sistemática a fim de garantir confiabilidade e segurança na operação do equipamento, com o menor custo e maior benefício (KARDEC & NASCIF, 2009; FOGLIATO & RIBEIRO, 2009).

Apesar de todo avanço da terceira geração, Kardec e Nascif (2009) ressaltam que os equipamentos ainda apresentavam uma elevada taxa de falha no seu estágio inicial de operação e isso ocorria devido à falta de interação entre as áreas de engenharia, manutenção e operação. Logo, ao fim da terceira geração, ainda havia a necessidade de promover uma interação entre as áreas para melhorar ainda mais os resultados.

Diante disso, Kardec e Nascif (2009, p. 4) acrescentam a essa evolução uma quarta geração, que se inicia em meados dos anos 90 e vai até os dias de hoje. Segundo os mesmos autores:

Algumas expectativas em relação à Manutenção existentes na terceira geração continuam a existir na Quarta Geração. A disponibilidade é uma das medidas de performance dos equipamentos mais importantes da manutenção, senão a mais importante. A confiabilidade dos equipamentos é um fator de constante busca pela Manutenção. A consolidação das atividades de Engenharia da Manutenção, dentro da estrutura organizacional da Manutenção, tem na garantia da Disponibilidade, da Confiabilidade e da Manutenibilidade as três maiores justificativas de sua existência.

Para Kardec e Nascif (2009), a minimização das falhas prematuras (mortalidade infantil) é um dos desafios da quarta geração. Segundo os autores, para que essas falhas sejam minimizadas é importante que os setores envolvidos no processo produtivo tenham ampla comunicação entre si e participem ativamente do processo de produção. Segundo Xenos (2004), inúmeras vezes o mau desempenho dos equipamentos se deve ao relacionamento ruim e conflitos entre os departamentos de produção e manutenção, uma vez que a operação dos equipamentos pelo pessoal da produção influencia diretamente na manutenção.

Desse modo, Kardec e Nascif (2009) relatam que as empresas de classe mundial buscam cada vez mais enturmar os setores, para que eles colaborem entre si e não prejudiquem o sistema produtivo devido à falta de comunicação.

Xenos (2004) também evidencia que, além da interação entre áreas, as empresas estão adotando novas estratégias para minimizar as falhas prematuras, entre as quais o autor destaca o Método de Prevenção da Manutenção, que consiste em atividades conduzidas juntamente com o fabricante, desde a fase de projeto do equipamento, com o objetivo de reduzir o volume de serviços de manutenção exigidos durante a sua operação.

Kardec e Nascif (2009) ainda acrescentam que práticas de manutenção preditiva e monitoramento das condições do equipamento e processos se tornaram cada vez mais presentes no dia a dia das empresas, uma vez que tais ações reduzem o número de paralisações da produção exigidas pelas manutenções preventivas, resultando em maior disponibilidade física. Para esses autores os novos projetos de equipamentos na quarta geração privilegiam os aspectos de confiabilidade, disponibilidade e Custo de Ciclo de Vida da Instalação, obtendo como retorno um elevado resultado econômico para toda a empresa.

Nesse sentido, Fogliatto e Ribeiro (2009) acrescentam que muitas indústrias vêm adotando programas de manutenção centrados em confiabilidade para reduzir os custos e aperfeiçoar a manutenção, promovendo assim melhorias na disponibilidade física e segurança dos equipamentos.

Em relação à preocupação com o meio ambiente, Fogliatto e Ribeiro (2009) relatam que estudos de confiabilidade também podem ser utilizados na melhoria de projetos ou em programas que trazem benefícios ambientais, tais como a melhoria da operação de sistemas inibidores de poluição.

Por fim, durante a quarta geração, a confiabilidade se tornou uma importante característica de qualidade a ser considerada no processo de manutenção. Desse modo, Kardec e Nascif (2009) relatam que a manutenção passou a ser definida como uma função da Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade, uma vez que é comum se deparar com estas palavras no seu dia a dia. Cada um desses parâmetros será apresentado adiante.

2.2 Estatística amostral e análise de dados

2.2.1 Seleção da amostra

Uma população alvo representa todos os elementos sobre os quais se deseja obter um determinado conjunto de informações, enquanto uma amostra é formada por alguns elementos representativos dessa população sobre as quais as medidas de interesse serão observadas a fim de estimar uma ou mais características com determinada precisão.

A seleção da amostra pode ser realizada por dois métodos, sendo eles: método aleatório e método não aleatório ou intencional. No método aleatório todos os membros da população têm a mesma probabilidade de serem incluídos na amostra, enquanto no método não aleatório há uma escolha dos elementos da população segundo critérios do pesquisador.

O método não aleatório é amplamente utilizado, pois possibilita a seleção de uma amostra de forma mais rápida e com menos custos, uma vez que a seleção é realizada em elementos aos quais se tem acesso. Existem alguns tipos de amostras não aleatórias, entre os quais estão: (i) amostragem intencional, composta por elementos da população selecionados intencionalmente pelo investigador, de acordo com critérios ou filtros estabelecidos; (ii) amostra por conveniência, na qual os elementos são escolhidos por conveniência ou por facilidade; e (iii) amostra por quotas, obtidas dividindo a população em categorias para selecionar certo número de elementos de cada quota (BOLFARINE, 2005).

2.2.2 Histograma

O histograma é uma representação gráfica da distribuição de frequências de uma variável. Trata-se de um gráfico de barras verticais construídos a partir de uma tabela de frequências, de modo que o número de ocorrências é dado pela altura das barras. É utilizado para visualização da forma da distribuição para grandes conjuntos de dados (TRIVELLATO, 2010).

2.2.3 Análise do modo de falha e causa raiz

Analisar o modo de falha e a causa raiz consiste em estudar um problema buscando entender o que ocorreu, por que ocorreu e o que fazer para evitar a reincidência do problema. Como essa análise é um processo que envolve várias etapas e que demanda tempo, geralmente os problemas a serem analisados são priorizados com base na sua frequência de ocorrência (AGUIAR, 2014).

Existem diversas ferramentas para realizar tal análise, entre as quais estão os Diagramas dos “Por quês”. Essa ferramenta de resolução de problemas consiste em formular a pergunta “por que” até compreender a causa raiz das ocorrências (TRIVELLATO, 2010).

2.2.4 Diagrama de Pareto

O Diagrama de Pareto é uma técnica estatística que permite selecionar prioridades quando há um grande número de problemas. Esse diagrama consiste num gráfico de barras que

ordena as frequências de ocorrências da maior para a menor e uma curva de porcentagem acumulada que permite definir quantos tipos de defeitos devem ser atacados para atingir certo resultado (MAGRI, 2009).

2.2.5 Gráfico de Setores

O Gráfico de Setores é um diagrama circular dividido em fatias proporcionais às frequências de cada categoria. Esse gráfico é vantajoso quando há a necessidade de comparar vários grupos com relação às variáveis que possuem muitos grupos (REIS, 2001).

2.3 Confiabilidade

Leemis (1995) *apud* Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 02) define que “a confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito específico, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas”.

Tendo como base essa definição, Fogliatto e Ribeiro (2009) reforçam que a confiabilidade de um item requer a especificação de três variáveis: (i) o propósito ou uso pretendido; (ii) o período de tempo e (iii) condições ambientais predeterminadas.

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), o propósito ou uso pretendido deve ser especificado por que produtos que apresentam funções idênticas podem apresentar diferentes confiabilidades, pois foram projetados para cargas de uso diferentes. Desse modo, um liquidificador que foi projetado para uso doméstico certamente não apresentará a mesma confiabilidade de outro que foi projetado para área industrial. Isso por que, embora sejam produtos com funções idênticas, as cargas de uso são distintas.

Do mesmo modo, Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 3) destacam que, por ser uma função de um período de tempo, a análise da confiabilidade implica em cinco conseqüências:

- (i) o analista deve definir uma unidade de tempo (por exemplo, minutos, horas ou anos) para a realização das análises;
- (ii) os modelos que descrevem os tempos até falha utilizam a variável aleatória T (em vez de X , como é comum na estatística clássica) para descrever o tempo até falha de um item;
- (iii) o termo tempo não deve ser interpretado literalmente, já que em muitos contextos o número de milhas ou o número de ciclos pode representar o tempo até falha de um item;
- (iv) o conceito de confiabilidade deve ser associado a um período de tempo ou duração de missão (não faz sentido afirmar que um item apresenta confiabilidade de 0,7, por exemplo, sem especificar durante qual período de tempo a análise do item foi realizada), e
- (v) a determinação do que deveria ser usado para medir a vida de um item nem sempre é óbvia; por exemplo, o tempo até falha de uma lâmpada elétrica pode ser definido

como o número contínuo de horas até a falha ou como o número somado de horas até a falha, considerando o número típico de acionamentos a que a lâmpada é submetida.

Por fim, sobre as condições ambientais predeterminadas, Fogliatto e Ribeiro (2009) apresentam que produtos iguais, submetidos a condições ambientais diferentes, podem apresentar desempenhos distintos. Dessa maneira, uma máquina que opera em um ambiente empoeirado pode apresentar confiabilidade diferente de outra idêntica, mas que atua em um ambiente limpo. Kardec e Nascif (2009) evidenciam ainda que a má operação do equipamento também é um fator a ser analisado, pois traz impactos negativos sobre a confiabilidade do equipamento.

Portanto, os autores destacam que é necessário definir quantitativamente a confiabilidade. Essa definição deve levar em consideração as especificações das três variáveis apresentadas e aproximar as situações problemas a modelos probabilísticos.

2.3.1 Abordagem quantitativa sobre a Confiabilidade

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009) o cálculo da confiabilidade para uma unidade pode ser realizado ao interpretar o período de tempo transcorrido desde o momento em que um equipamento é colocado em operação até a sua primeira falha (tempo entre falhas) como uma variável que se altera aleatoriamente no tempo e/ou espaço.

Dessa maneira, Fogliatto e Ribeiro (2009) definem a **probabilidade de falha $F(t)$** como uma medida da probabilidade de que uma unidade venha a falhar em uma missão de duração menor ou igual ao tempo “ t ”, dada pela equação 02 na qual **$f(t)$** representa a **densidade de probabilidade de falha** e informa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (02)$$

Raposo (2004) relata que, em um intervalo de tempo e ambiente pré-determinado, a soma da probabilidade de que a unidade venha a falhar em uma missão $F(t)$ e da probabilidade de que ela desempenhe adequadamente seu propósito $R(t)$ corresponde a um, uma vez que esses eventos são exclusivos e complementares. Desse modo, a **função confiabilidade $R(t)$** pode representada pela equação 03:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (03)$$

Substituindo a equação 02 na equação 03, encontra-se a confiabilidade $R(t)$ em função da densidade de probabilidade de falha $f(t)$, conforme equação 04:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{+\infty} f(t)dt \quad (04)$$

A equação 04 pode ser manipulada a fim de que a função densidade de probabilidade de falha $f(t)$ seja representada pela equação 05:

$$\int_0^t f(t)dt = 1 - R(t)$$

$$f(t) = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (05)$$

Seguindo o raciocínio, Fogliatto e Ribeiro (2009) destacam que, além da função densidade de probabilidade de falha e da confiabilidade, outra função bastante difundida na prática é a **taxa de risco ou função de riscos $h(t)$** . Segundo os mesmos autores, provavelmente essa é a função mais utilizada das medidas de confiabilidade, podendo ser definida como a razão entre a função densidade de probabilidade de falha $f(t)$ e a função confiabilidade $R(t)$, conforme equação 06:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (06)$$

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), a função de risco $h(t)$ representa a relação entre a quantidade de componentes que apresentaram falhas e o número de componentes que sobreviveram em um determinado instante.

Fogliatto e Ribeiro (2009) ainda abordam três classificações básicas para essa função de risco, sendo elas a função de risco crescente (FRC), que descreve o caso em que a incidência de riscos cresce com o tempo, a função de risco decrescente (FRD), na qual a incidência de riscos decresce com o tempo e a função de risco estacionária ou constante (FRE), que é o caso limite entre FRC e FRD, pertencendo a ambas as categorias.

A combinação dessas categorias é conhecida como curva da banheira devido ao seu formato, conforme ilustrado na Figura 1.

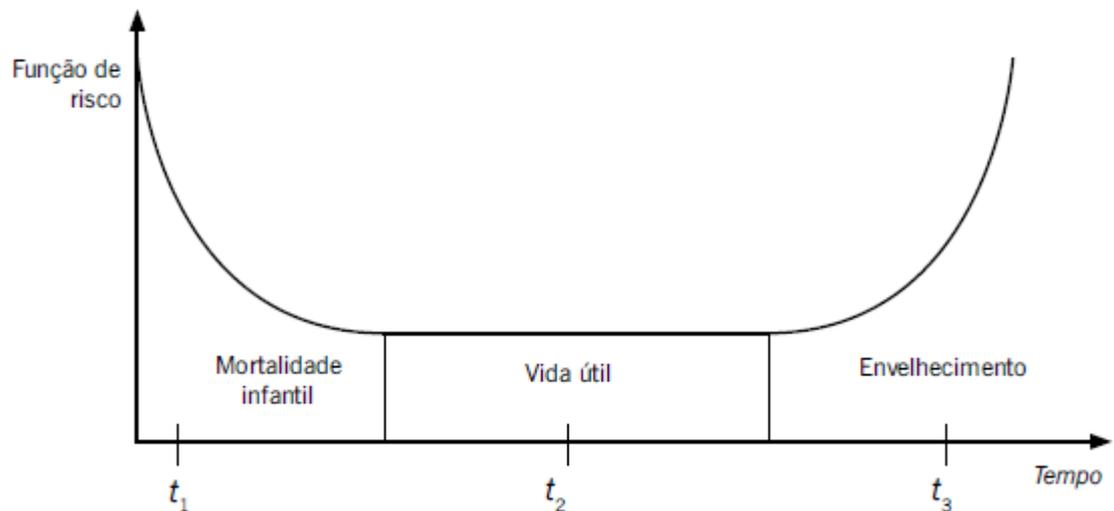


Figura 1: Curva da Banheira
Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2009)

Verifica-se pela Figura 1 que a vida operacional de uma unidade é dividida em três estágios: (a) mortalidade infantil; (b) vida útil; e (c) envelhecimento. As características desses estágios são:

a) Mortalidade Infantil

Segundo Kardec e Nascif (2009), na Mortalidade Infantil há uma grande incidência de falhas causadas por deficiências de projeto ou componentes defeituosos, assim como falhas provenientes de problemas de instalação. Para Xenos (2004) esta etapa corresponde ao momento em que o equipamento é colocado para operar e os operadores ainda estão conhecendo adequadamente o ativo. Assim, à medida que o equipamento entra em operação e suas peças ou sistemas são substituídos por outros mais confiáveis, a ocorrência de falhas diminui.

b) Vida Útil

A função de risco reduz sensivelmente durante a vida útil, tornando-se relativamente constante ao longo do tempo. Segundo Xenos (2004) essa frequência constante de falhas caracteriza equipamentos cujas falhas são causadas por eventos aleatórios, resultando de esforços que excedem a resistência intrínseca do equipamento.

c) Envelhecimento ou Degradação.

O último período apresentado na curva da banheira é conhecido como Envelhecimento ou Degradação. Nessa etapa o desgaste natural leva a um aumento da função de risco, que será tanto maior quanto mais passar o tempo. Fogliatto e Ribeiro (2009) relatam que exemplos de falhas por envelhecimento são corrosão e trincas por fadiga, de modo que o aumento da função

de risco normalmente indica a necessidade de reposição de peças no produto. Os mesmos autores ainda ressaltam que as alternativas para amenizar a intensidade do envelhecimento incluem o projeto de produtos com componentes e materiais mais duráveis, assim como práticas de manutenção preventiva e corretiva, além de práticas de controle de fatores ambientais de estresse. Nessa etapa também é importante avaliar a viabilidade da troca do ativo (FOGLIATTO E RIBEIRO, 2009).

Conforme apresentado, a função de risco $h(t)$ é umas das medidas de confiabilidade mais utilizadas. Dessa maneira, a fim de obter a relação entre a função de risco $h(t)$ e a função confiabilidade $R(t)$, as equações 05 e 06 foram manipuladas, encontrando-se a equação 07:

$$h(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (07)$$

Integrando em ambos os lados da equação 07, encontra-se a **expressão geral da confiabilidade**, dada pela equação 08.

$$\begin{aligned} \int_0^t h(t) dt &= \int_0^t -\frac{dR(t)}{R(t)} \\ \int_0^t h(t) dt &= -\ln R(t) \\ R(t) &= \exp \left[-\int_0^t h(t) dt \right] \end{aligned} \quad (08)$$

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), outro parâmetro importante a ser determinado em análises de confiabilidade é o **Tempo Médio Entre Falhas (MTTF)**, que é a medida do intervalo médio de tempo em que o sistema, conjunto ou componente tem um desempenho como o especificado antes que uma falha ocorra. Os autores definem o MTTF pela equação 09:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (09)$$

Assim, a partir das equações apresentadas é possível encontrar as medidas de confiabilidade de interesse para cada modelo estatístico aplicado a confiabilidade, com o propósito de descrever o tempo entre falhas.

2.3.2 Modelos Estatísticos aplicados a confiabilidade

Matos e Zotti (2010) apresentam que existem diversas distribuições de probabilidade para descrever o tempo até a falha de componentes e sistemas, entre as quais estão a Exponencial, Weibull, Gama, Normal e Lognormal. Nesse contexto, Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 23) destacam que “conhecendo-se a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta a esses tempos é possível estimar a probabilidade de sobrevivência da unidade para qualquer tempo t , bem como outras medidas de confiabilidade”.

Fogliatto e Ribeiro (2009) destacam ainda que para cada caso, existe uma distribuição que melhor se aplica, sendo a exponencial mais usada para modelagem de falhas durante a vida útil do equipamento, a Weibull aplicada a falhas aleatórias, a Gama aplicada para cálculo do tempo de falhas onde o reparo é ideal e a Lognormal para o cálculo do tempo de falhas onde a manutenção é normal.

Esse trabalho utiliza uma distribuição Weibull para ajustar a densidade de probabilidade de falhas, embora também apresente algumas características das outras distribuições. A escolha desse modelo está associada ao fato de que a distribuição Weibull, devido à sua flexibilidade em acomodar diferentes formas da função de risco apenas variando os valores de seus parâmetros, é uma das mais importantes no estudo da confiabilidade. Essa distribuição pode apresentar funções de risco constante, estritamente crescente ou estritamente decrescente e é comumente utilizada para representar falhas típicas de partida, falhas aleatórias, análise de sobrevivência e engenharia da confiabilidade (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009, MATOS & ZOTTI, 2010, MARTINS 2013).

2.3.2.1 Modelagem Weibull dos tempos de falhas

Fogliatto e Ribeiro (2009) apresentam que para a distribuição Weibull com dois parâmetros, a função densidade de falha é dada por $f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-t^\gamma/\theta}$, sendo γ e θ parâmetros associados à forma e escala, respectivamente ($\gamma > 0$ e $\theta > 0$).

O parâmetro de escala (θ), segundo os autores, é frequentemente designado como a vida característica da unidade modelada por essa distribuição, enquanto o parâmetro de forma (γ) é conhecido como a inclinação da distribuição e indica a forma da curva e as características de falha. O método usado para calcular tais parâmetros será apresentado logo após deduzir as medidas de confiabilidade de interesse para esse modelo.

Através da Figura 2 é possível verificar graficamente a função densidade de falha $f(t)$ da distribuição Weibull para alguns valores do parâmetro de forma (γ), fixado o parâmetro de escala (θ) como um.

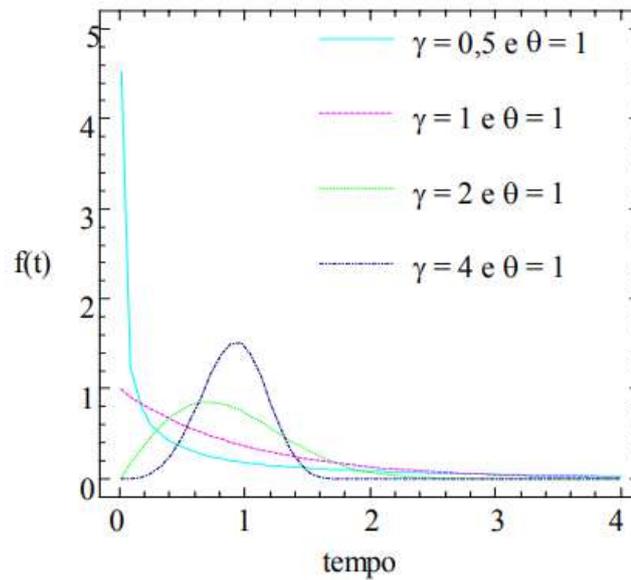


Figura 2: Função Densidade de Falhas $f(t)$
Fonte: adaptado de Werner (96)

Observa-se pela Figura 2 que a distribuição Weibull acomoda diferentes formas da função de risco à medida que diferentes valores são atribuídos ao parâmetro de forma (γ).

A partir da função densidade de probabilidade de falhas $f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-t^\gamma/\theta}$ e da equação 04 é possível encontrar a função confiabilidade para a distribuição Weibull:

$$R(t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt = \int_t^{+\infty} \left[\frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-t^\gamma/\theta} \right] dt = \left[-e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \right]_t^{+\infty}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad (10)$$

A representação gráfica da função confiabilidade $R(t)$, dada pela equação 10, é apresentada por meio da Figura 3.

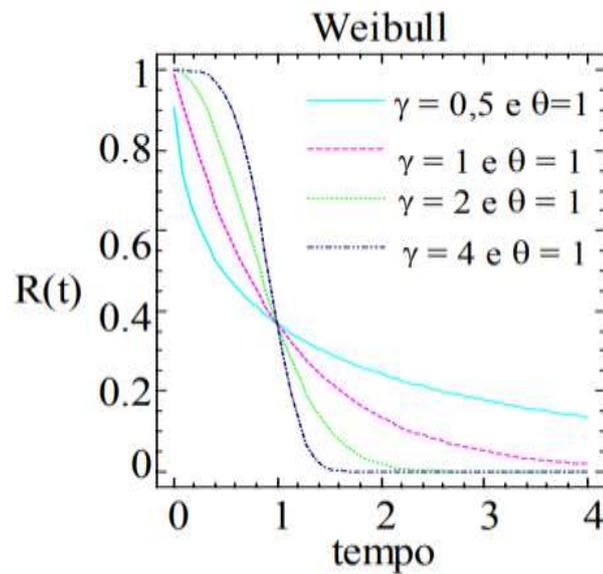


Figura 3: Função Confiabilidade R(t)
Fonte: Adaptado de Werner (96)

Observa-se pela Figura 3 que os parâmetros usados são os mesmos que foram utilizados para representar a função densidade de falhas. Além disso, também é possível verificar que as funções de confiabilidade R(t) possuem um ponto comum. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), todas as funções confiabilidade R(t) da distribuição Weibull se encontram no ponto (θ, e^{-1}) , independente do valor do parâmetro γ .

Seguindo o mesmo raciocínio, a função de risco h(t) para a distribuição Weibull pode ser obtida ao substituir a equação 10 na equação 07.

$$h(t) = -\frac{1}{e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma}} \frac{d\left[e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma}\right]}{dt}$$

$$h(t) = -\frac{1}{e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma}} \left[-\frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma}\right]$$

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} \quad (11)$$

A equação 11 representa a função de risco ou taxa de falhas para a distribuição Weibull. Sua representação gráfica, para os parâmetros fixados anteriormente, está representada na Figura 4.

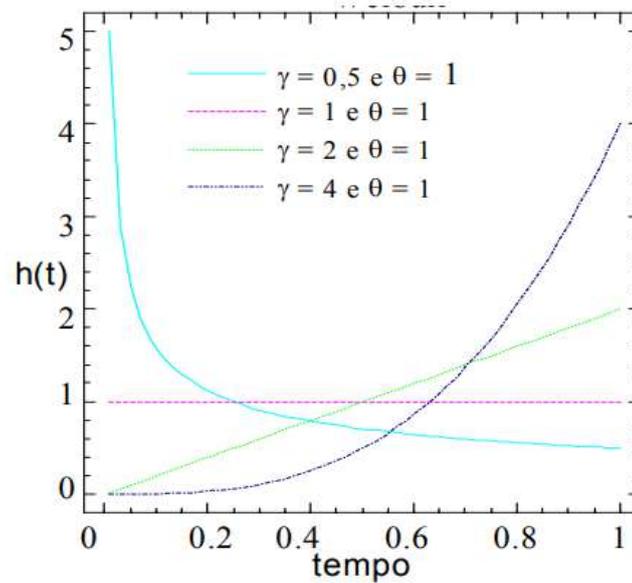


Figura 4: Função de risco $h(t)$
 Fonte: Adaptado de Werner (96)

Por meio da Figura 4 é possível constatar que para $\gamma = 1$ a função $h(t)$ da distribuição Weibull fica constante. Verifica-se ainda que para $\gamma > 1$ a função $h(t)$ é estritamente crescente, representando assim o envelhecimento ou as falhas por desgaste e para $\gamma < 1$ a função $h(t)$ é estritamente decrescente, representando a mortalidade infantil (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

O tempo médio de vida (MTTF) para uma distribuição Weibull, segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), é dado pela equação 12:

$$MTTF = \theta \Gamma(1 + 1/\delta) \quad (12)$$

onde $\Gamma(x)$ representa a função gama, que é uma integral indefinida, dada pela equação 13 ou representada por meio de tabelas.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} u^{x-1} e^{-u} du, x \geq 0 \quad (13)$$

Dessa maneira, as principais medidas da confiabilidade para a distribuição Weibull foram estabelecidas pelas equações 10, 11 e 12. Verifica-se através dessas equações e dos gráficos apresentados que todas essas funções se relacionam com os parâmetros de forma (δ) e de escala (θ). Desse modo, é necessário definir meios que possibilitem determinar os valores desses parâmetros que até aqui foram fixados para viabilizar uma análise qualitativa dos gráficos de cada função.

Carneiro (2013) apresenta que entre os vários métodos existentes para estimar esses parâmetros a partir de um conjunto de dados pré-determinados, destacam-se: (a) método do momento; (b) método gráfico; (c) método da máxima verossimilhança; e o (d) método da energia equivalente.

a) Método Gráfico

Segundo Rocha (2011) *apud* Carneiro (2013), através do método gráfico os parâmetros da distribuição Weibull são calculados a partir da regressão linear da função acumulada de distribuição, apresentada na equação 14:

$$\ln\{-\ln[1 - F(t)]\} = \gamma \ln(t) - \gamma \ln(\theta) \quad (14)$$

A equação 14 pode ser ajustada à $y(x) = k_0 + c_0x$ através do método dos mínimos quadrados, de modo que $y(x)$ é tomado como $\ln\{-\ln[1 - F(t)]\}$ e x é tomado como $\ln(t)$. A comparação entre uma curva linearizada para uma distribuição x e a reta ajustada está apresentada na Figura 5.

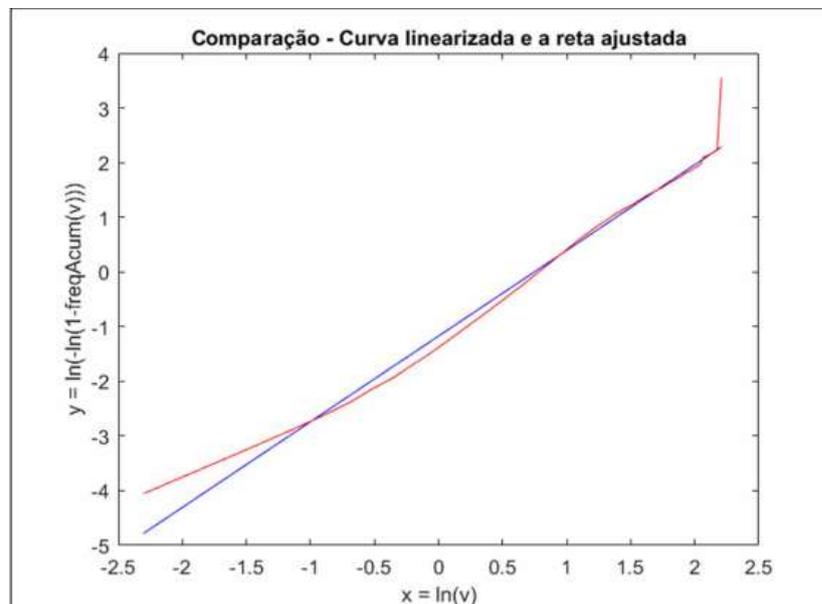


Figura 5: Curva linearizada e reta ajustada para os dados x .
Fonte: Adaptado de Ozawa (2017)

Através das constantes obtidas pela regressão linear apresentada na Figura 5, o parâmetro de forma (γ) é obtido pelo valor do coeficiente angular da reta (c_0), enquanto a constante k_0 se iguala à $-\gamma \ln(\theta)$, de modo que o parâmetro de escala pode ser calculado por $\theta = e^{-k_0/\gamma}$.

b) Método de Máxima Verossimilhança

Carneiro (2013) relata que o método de máxima verossimilhança visa apontar os valores γ e θ que melhor se encaixam na aplicação quando os valores de x da distribuição Weibull são fornecidos. Segundo Rocha (2011) *apud* Carneiro (2013) os parâmetros Weibull são calculados através de interações numéricas, sendo as equações fornecidas pelas equações 15 e 16:

$$\delta = \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i^\gamma \ln(x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^\gamma} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(x_i)}{n} \right]^{-1} \quad (15)$$

$$\theta = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^\gamma \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (16)$$

Onde n indica o número de observações e x_i o valor de x no intervalo i .

c) Método Padrão do Fator de energia

Carneiro (2013) relata que esse método utiliza um procedimento iterativo para determinar o parâmetro de forma de Weibull e satisfazer o critério de convergência. Inicialmente calcula-se um valor para o fator padrão de energia (E_{pf}), que é dado pela relação entre a média dos cubos dos valores de x_i da distribuição e o cubo da média dos valores de x_i , conforme apresentado na equação 17:

$$E_{pf} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^3} \quad (17)$$

Uma vez calculada a E_{pf} , Ozawa (2017) relata que os parâmetros de forma (γ) e escala (θ) Weibull podem ser estimados pelas equações 18 e 19:

$$\gamma = 1 + \frac{3,69}{(E_{pf})^2} \quad (18)$$

$$\theta = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i}{\Gamma(1 + 1/\gamma)} \quad (19)$$

Onde $\Gamma(x)$ é a função gama definida pela equação 13, n indica o número de observações e x_i o valor de x no intervalo i .

d) Método dos Momentos

Segundo Ozawa (2017) o método dos momentos é o mais difundido no campo de estimativa dos parâmetros Weibull. Carneiro (2013) afirma que esse método pode ser usado como um modo alternativo do Método da Máxima Verossimilhança, onde os parâmetros de forma e escala são calculados através da média e do desvio padrão. A média e o desvio padrão podem ser calculados a partir das equações 20 e 21:

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (20)$$

$$\sigma = \left\{ \left[1 / (n - 1) \right] \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \right\}^{1/2} \quad (21)$$

Onde n indica o número de observações, x_i o valor de x no intervalo i , x_m o valor médio e σ o desvio padrão da distribuição.

Segundo Ozawa (2017), após calcular a média e o desvio padrão, os parâmetros de forma (γ) e escala (θ) Weibull podem ser calculados pelas equações 22 e 23:

$$\gamma = [(0,9874 / (\sigma / x_m))]^{1,0983} \quad (22)$$

$$\theta = x_m / \Gamma(1 + 1/\gamma) \quad (23)$$

Onde

$\Gamma(x)$ indica a função gama, definida pela expressão 13;

x_m é o valor médio da amostra, obtido pela expressão 20;

σ é o desvio padrão da amostra, dado pela expressão 21.

2.3.2.2 Modelagem Exponencial dos tempos de falhas

A função densidade de falha na distribuição exponencial é dada por $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, na qual λ representa uma constante. Por aplicação direta dessa equação às equações (04), (07) e (09) torna-se possível obter as medidas de Confiabilidade $R(t)$, Função de risco $h(t)$ e Tempo Médio Entre Falhas (MTTF), respectivamente, para essa distribuição. Essas representações de confiabilidade estão apresentadas nas equações (24) a (26).

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (24)$$

$$h(t) = \lambda \quad (25)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (26)$$

A representação gráfica dessas distribuições são apresentadas na Figura 6.

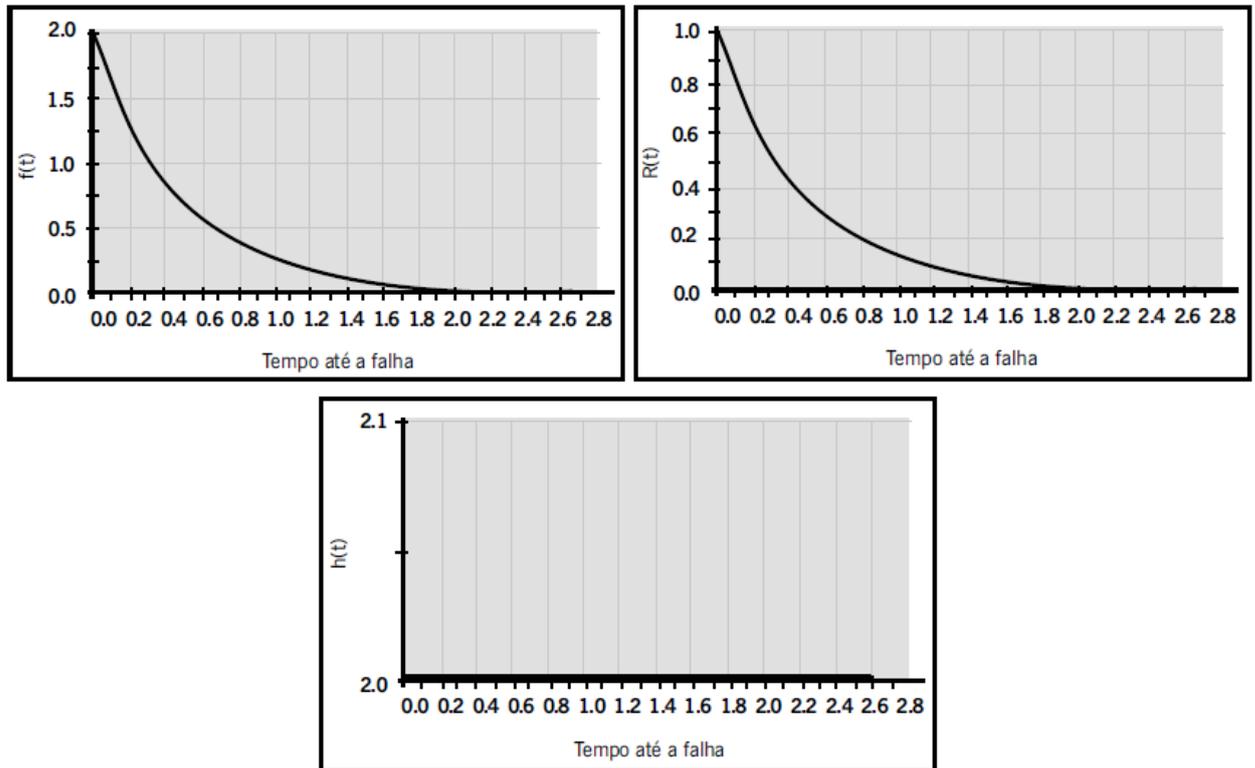


Figura 6: Representações de confiabilidade da distribuição exponencial.
Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 29)

Verifica-se por meio da Figura 6 e das equações 25 e 26 que na distribuição exponencial a função taxa de falha $h(t)$ e o tempo médio entre falhas (MTTF) são constantes. Isso significa que para essa distribuição, tanto uma unidade que opera por 20 horas quanto outra que opera por 50 horas apresentam a mesma probabilidade de falharem em um mesmo intervalo de tempo futuro e que as falhas sempre ocorrerão com o mesmo tempo médio entre elas (KARDEC & NASCIF, 2009).

Segundo Kardec e Nascif (2009), a taxa de falha $h(t)$ para essa distribuição pode ser calculada como o número de falhas por unidade de tempo, conforme equação 27:

$$h(t) = \lambda = \frac{\text{Número de falhas}}{\text{Número de horas de operação}} \quad (27)$$

Verifica-se ainda pelas Figuras 4 e 6 que a distribuição exponencial é um caso específico da distribuição Weibull, que também apresenta taxa de falhas quando o parâmetro de forma (γ) é igual a um (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

2.3.2.3 Modelagem Gama dos tempos de falhas

Segundo Carneiro (2013), a distribuição gama tem dois parâmetros de cálculo, sendo um parâmetro de forma (γ) e outro parâmetro de escala (λ). As medidas de confiabilidade de interesse para essa distribuição são ($t \geq 0, \gamma > 0, \lambda > 0$):

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\gamma)} (\lambda t)^{\gamma-1} e^{-\lambda t} \quad (28)$$

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^{\lambda t} x^{\gamma-1} e^{-x} dx \quad (29)$$

$$h(t) = f(t) / R(t) \quad (30)$$

$$MTTF = \gamma / \lambda \quad (31)$$

Fogliatto e Ribeiro (2009) relatam que a distribuição gama é uma generalização da distribuição exponencial. Carneiro (2013) aborda que algumas das aplicações mais comuns dessa distribuição são a análise de vida dos produtos e a análise da velocidade dos ventos.

Fogliatto e Ribeiro (2009) ainda destacam que os formatos assumidos por essa distribuição são bastante similares aos da distribuição Weibull, sendo difícil diferenciar as distribuições a partir de seus gráficos de densidade de probabilidade. Acrescentam ainda que a função de risco é estritamente decrescente quando $\gamma < 1$, constante quando $\gamma = 1$ e crescente quando $\gamma > 1$, analogamente à distribuição Weibull.

2.3.2.4 Modelagem Normal dos tempos de falhas

Para Matos e Zotti (2010), a distribuição normal geralmente é usada na análise de confiabilidade para tempos de falhas de componentes eletrônicos e mecânicos. Segundo os autores, a função densidade de probabilidade de falha para essa distribuição é dada por $f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{(t-\mu)}{\sigma}\right]^2\right\}$, sendo μ a média dos tempos de falhas, σ o desvio padrão e t os tempos de falhas. A Figura 7 ilustra a densidade de probabilidade de falha para essa distribuição.

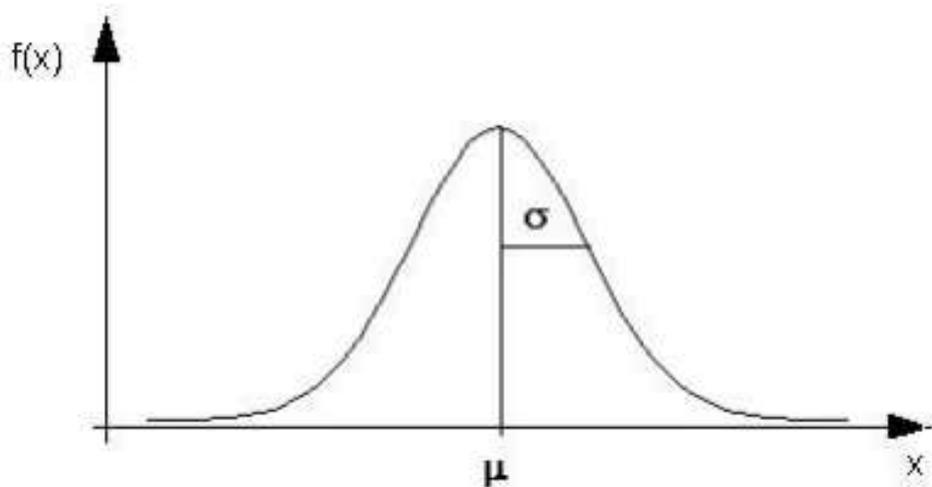


Figura 7: Densidade de probabilidade da distribuição lognormal.
Fonte: UFPA (2018)

Verifica-se pela Figura 7 que função densidade de probabilidade de falha dessa distribuição descreve a forma de um sino, sendo simétrica em torno da média μ . Desse modo, a curva apresenta maior área central em torno da média (onde se localizam pontos de maior densidade) e áreas menores mais próximos de ambas as extremidades. Essa distribuição é frequentemente chamada de distribuição de Gauss e sua densidade de probabilidade de falha também pode ser aplicada às expressões 04, 07 e 09 caso seja necessário obter as medidas de confiabilidade para ela.

2.3.2.5 Modelagem Lognormal dos tempos de falhas

Segundo Matos e Zotti (2010), a distribuição lognormal é comumente utilizada na análise da confiabilidade em ciclos de vida até a falha por fadiga, resistência dos materiais e no projeto probabilístico com cargas variáveis. A Figura 8 ilustra um gráfico da densidade de probabilidade de falha para a distribuição lognormal, dada pela equação $f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{(\ln t - \mu)}{\sigma}\right]^2\right\}$, em que μ é a média do logaritmo do tempo de falha, σ é o desvio padrão desse mesmo logaritmo e t é o tempo.

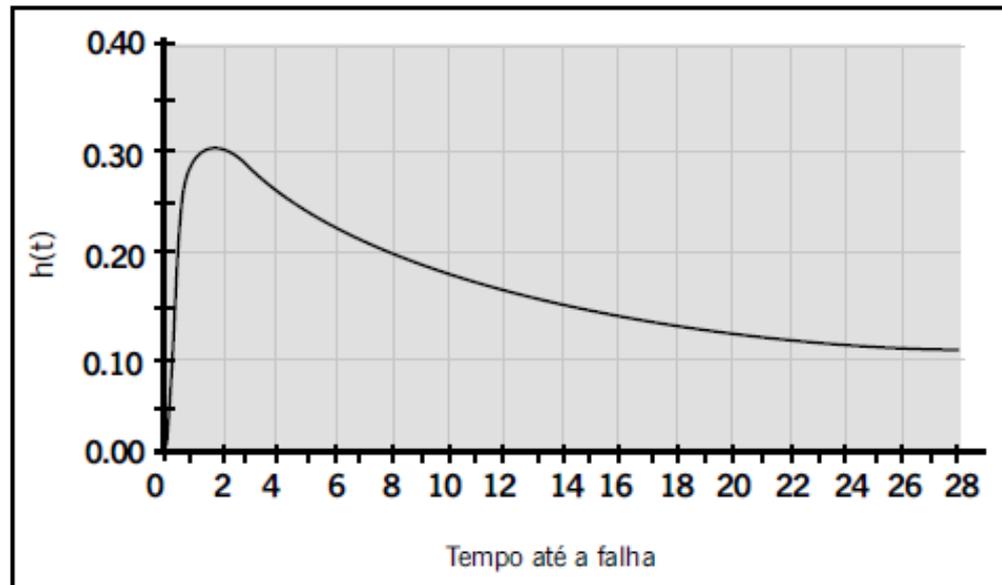


Figura 8: Densidade de probabilidade da distribuição lognormal.
Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2009)

Fogliatto e Ribeiro (2009) relatam que a função de risco da lognormal apresenta o formato de uma curva da banheira invertida, com $h(t)$ crescente inicialmente e, após, decrescente, conforme pode ser observado através da Figura 8. Ainda segundo os autores, por ser uma distribuição limitada à esquerda, ela não é centrada em μ , como é o caso da normal.

Do mesmo modo que as outras, as medidas de confiabilidade para essa distribuição podem ser obtidas a partir das expressões 04, 07 e 09.

2.4 Disponibilidade

Para Kardec e Nascif (2009) a Disponibilidade mede a capacidade de um item estar em condições de uso em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta sua Confiabilidade, Manutenibilidade e suporte técnico. O autor relata que esta grandeza pode ser classificada em: (i) Disponibilidade Inerente, (ii) Disponibilidade Técnica e (iii) Disponibilidade Operacional.

A principal diferença entre essas classificações está na contabilidade do tempo médio gasto para deixar o ativo disponível. Tanto a Disponibilidade Inerente quanto a Técnica, não levam em consideração os tempos adicionais com logística, esperas, atrasos e outros tempos durante a manutenção, ou seja, essas disponibilidades refletem o percentual de tempo que o ativo estaria disponível se não houvesse atrasos ou perda de tempo. Por outro lado, a Disponibilidade Inerente leva em consideração apenas o tempo gasto com manutenções corretivas, enquanto a Técnica inclui as manutenções corretivas e as preventivas.

Kardec e Nascif (2009) ressaltam que a Disponibilidade Operacional é a de maior importância para uma empresa, pois ela representa a avaliação real da situação. Essa disponibilidade leva em consideração o Tempo Médio Entre Manutenções (TMEM) e o Tempo Médio de Paralisações (TMP), que contabiliza tanto o Tempo Médio de Reparos (TMPR) quanto os demais tempos: esperas, atrasos, paradas de manutenção preventiva ou inspeções e outros que contribuam para a indisponibilidade do equipamento. O valor da Disponibilidade Operacional pode ser calculado pela equação 32:

$$\text{Disponibilidade Operacional (\%)} = \frac{TMEM}{TMEM + TMP} \times 100 \quad (32)$$

Kardec e Nascif (2009) ainda ressaltam que o tempo médio para reparo (TMPR) é um importante indicador para a manutenção. Esse indicador depende da facilidade do equipamento ou sistema ser mantido ou consertado (Mantenabilidade), da capacitação profissional de quem faz a intervenção e do modo como foi organizado e executado o planejamento da manutenção. Segundo Raposo (2004), o TMPR é definido pela equação 33:

$$TMPR = \frac{\{\sum_{j=1}^k t_j \lambda_j\}}{\sum_{j=1}^k \lambda_j} \quad (33)$$

onde:

λ_j é a taxa de falha constante do j-ésimo componente reparável do sistema;

t_j é o tempo requerido para o reparo do sistema ou equipamento em caso de falha do j-ésimo componente;

k representa o número de componentes reparáveis.

Kardec e Nascif (2009) definem o TMPR para uma taxa de reparos constante pela equação 34:

$$TMPR = \frac{1}{\mu} \quad (34)$$

onde μ representa a taxa de reparos ou número de reparos efetuados em relação ao total de horas de reparo do equipamento.

2.5 Manutenibilidade (ou Manutenibilidade)

Kardec e Nascif (2009) apresentam a Manutenibilidade como a característica do equipamento ou instalação permitir um maior ou menor grau de facilidade na execução dos serviços de manutenção, ou seja, é a probabilidade de que um equipamento com falha seja restaurado dentro de certo número de horas.

Raposo (2004) define a **Mantenabilidade M(t)** pela equação 35:

$$M(t) = \int_0^t g(t)dt = 1 - \int_t^{\infty} g(t)dt = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t)dt} \quad (35)$$

Onde:

M(t) é a Função Manutenibilidade;

g(t) é a Função Densidade de Probabilidade de Tempo de Reparo;

e é a base dos logaritmos neperianos (e=2,718);

$\mu(t)$ é a Taxa de Reparos ou número de reparos efetuados em relação ao total de horas de reparo do equipamento;

t é o Tempo Previsto de Reparo.

Para uma densidade de probabilidade de tempo de reparo dado por uma distribuição exponencial, a manutenibilidade pode ser obtida pela equação 36 (KARDEC & NASCIF, 2009):

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (36)$$

onde:

$\mu = 1/\text{TMPR}$ (taxa de reparos constante)

Do mesmo modo, as densidades de probabilidade das distribuições Weibull, Gama, Lognormal e as outras também podem ser utilizadas para encontrar a Função Manutenibilidade de cada distribuição.

Kardec e Nascif (2009) relatam que as características do projeto atuam diretamente no valor da Manutenibilidade. Por isso é fundamental buscar um suporte com o fabricante, desde a fase de projeto do equipamento, visando reduzir o volume de serviços de manutenção exigido

no seu nascedouro. Segundo os autores, sempre há maneiras de melhorar a Manutenibilidade de uma unidade, sendo uma dessas maneiras a ação de encurtar o tempo de manutenção, uma vez que o Tempo Médio para Reparos está associado a esse indicador da manutenção. Os autores afirmam que ações ou ocorrências como a falta de informação sobre a unidade, problemas de planejamento, falta de capacitação pessoal, entre outros fatores podem dificultar as ações de manutenção e reduzir a Manutenibilidade da unidade.

Para Kardec e Nascif (2009), a análise de Manutenibilidade de um equipamento ou de uma instalação deve levar em conta: (i) requisitos qualitativos, (ii) requisitos quantitativos, (iii) suporte lógico, e (iv) capacitação do pessoal de manutenção.

Entre os requisitos qualitativos é possível destacar a acessibilidade ao equipamento, padronizações através de procedimentos operacionais padrões, possibilidade de regulagem e ajuste, simplicidade de operação, visibilidade das partes que terão manutenção e a disponibilidade de peças e componentes em estoque.

Para os requisitos quantitativos pode-se destacar o tempo médio gasto durante as intervenções do tipo corretiva, preventiva e preditiva; os recursos técnicos necessários em cada intervenção típica de manutenção; a indisponibilidade do equipamento (histórico/comparativo); entre outros.

Por fim, Kardec e Nascif (2009) alegam que a capacitação pessoal é um dos itens mais importantes na manutenção. Um profissional despreparado gasta um tempo maior para executar o serviço, além de ser possível que ele provoque uma série de problemas pela falta de qualificação para executar o serviço. Os profissionais de manutenção devem conhecer detalhadamente os equipamentos, os sistemas e o seu funcionamento, assim como detalhes de operação para que possa executar uma boa manutenção.

2.6 Manutenção Centrada em Confiabilidade

Fogliatto e Ribeiro (2009) relatam que a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) pode ser definida como um programa que reúne técnicas de engenharia a fim de garantir a disponibilidade de um equipamento na linha de produção, ou seja, visa assegurar que o ativo continuará realizando as funções especificadas.

Kardec e Nascif (2009) relatam que o programa MCC estuda o equipamento ou sistema em detalhes, analisa como ele pode falhar e define a melhor forma de fazer a manutenção a fim de minimizar ou prevenir as perdas decorrentes dessa falha. Corroborando com essas idéias,

Siqueira (2005) *apud* Kersten (2014) afirma que a metodologia do programa MCC é capaz atribuir metas precisas aos objetivos de manutenção, para que ela atue de acordo com os modos de falha e restaure a confiabilidade e segurança após a deterioração do ativo. Ou seja, esse método auxilia na seleção de atividades de manutenção úteis e condizentes com a realidade vivenciada pela organização.

Fogliatto e Ribeiro (2009) relatam que a eficácia do programa MCC depende de alguns pilares, entre os quais os autores destacam cinco:

- i) Amplo envolvimento dos engenheiros, operadores e técnicos de manutenção, de modo que a comunicação entre os setores seja eficiente e que haja colaboração entre eles;
- ii) Ênfase no estudo e entendimento das consequências das falhas, de modo que as tarefas de manutenção sejam direcionadas pelo estudo das causas fundamentais das falhas, suas consequências e meios de evitá-las;
- iii) Abrangência das análises, que consideram questões associadas à segurança, meio ambiente, operação e custo, uma vez que esses são cuidados cada vez mais exigidos pelo mercado;
- iv) Priorizar atividades de manutenções que envolvam tarefas preditivas e preventivas;
- v) Procurar e combater as falhas escondidas, que reduzem a confiabilidade do sistema.

Uma vez que esses pilares estejam consolidados, a execução do programa MCC contemplará algumas questões básicas que conduzirão ao entendimento dos modos e efeitos das falhas dos equipamentos a fim de determinar a melhor estratégia de manutenção para o ativo.

2.6.1 Questões básicas do programa MCC

Moubray (1997) *apud* Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 218) relata que existem sete questões básicas a serem contempladas pelos programas MCC. Essas questões são:

- (1) Quais as funções e padrões de desempenho esperados para os equipamentos fabris?
- (2) De que modo os equipamentos podem falhar em cumprir suas funções?

- (3) O que causa a falha funcional?
- (4) O que acontece quando cada falha ocorre?
- (5) De que forma cada falha interessa?
- (6) O que pode ser feito para prevenir ou impedir a falha?
- (7) O que deveria ser feito quando não pode ser estabelecida uma atividade pró-ativa pertinente?

Segundo Kersten (2014), a efetivação do programa MCC tem seu sucesso relacionado diretamente com o nível de clareza e objetividade aplicada durante o tratamento dessas questões, pois elas estão vinculadas às etapas que compõe a estratégia.

Raposo (2004) relata que as três primeiras questões a serem contempladas abordam a importância de se conhecer as funções de cada item e os padrões de desempenho desejado ou requerido. Para o autor, somente o conhecimento dessas características possibilitarão identificar e analisar as falhas do equipamento ao cumprir sua função (falhas funcionais) ou conhecer as causas fundamentais que levam à falha.

As questões de número quatro e cinco evidenciam a importância de listar os efeitos provocados por cada modo de falha. Essas informações serão fundamentais para avaliar as consequências das falhas (RAPOSO, 2004). Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), esse levantamento é importante por que algumas falhas não possuam impacto imediato, mas podem expor a organização a falhas mais graves. Desse modo, Fogliatto e Ribeiro (2009) evidenciam que a análise dos efeitos das falhas deve envolver muito além das falhas que interrompem a produção e prejudicam a produtividade e sim no registro e análise das consequências de todas as falhas.

Através de todo o estudo realizado ao responder as cinco primeiras questões, Raposo (2004) relata que as duas últimas questões guiam a uma avaliação sobre a estratégia de manutenção que deve ser adotada para cada modo de falha. O diagrama apresentado na Figura 9 evidencia as etapas de aplicação do programa MCC.

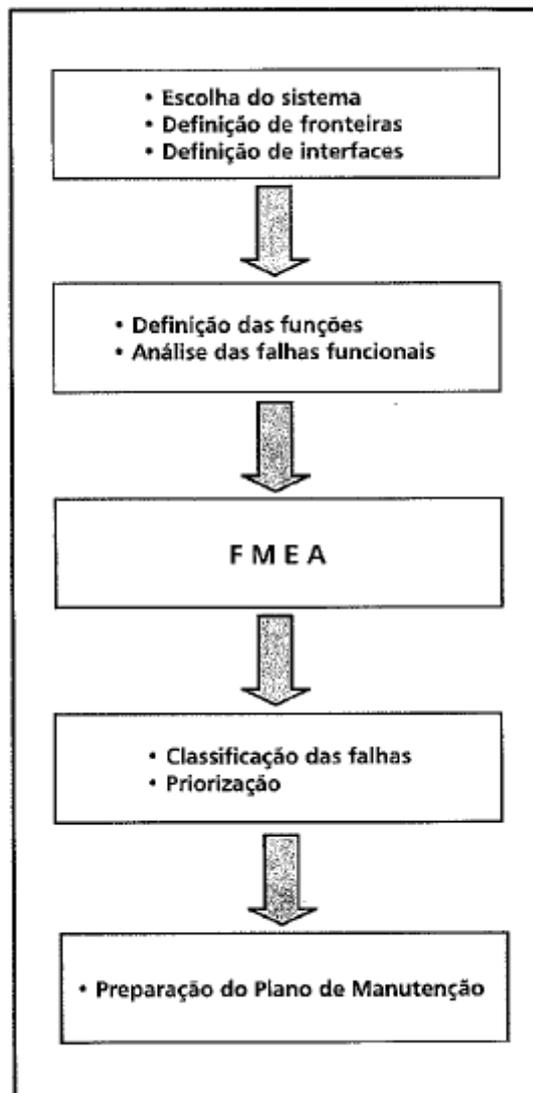


Figura 9: Diagrama de etapas do programa MCC.
Fonte: Kardec e Nascif (2009)

Observa-se através do diagrama apresentado na Figura 9 que as etapas do programa MCC contemplam desde a definição do sistema e o estudo de suas funções até a preparação de um plano de manutenção adequado aos modos de falhas que ele apresenta. Segundo Kardec e Nascif (2009) a implantação da análise pelo programa MCC gera vários resultados positivos para a empresa, entre os quais estão:

- Os participantes conhecerão melhor o funcionamento dos equipamentos ou sistemas;
- O grupo melhorará o trabalho em equipe, o que apresentará reflexos altamente produtivos na análise, solução de problemas e estabelecimento de programas de trabalho;
- Mecanismos que evitarão as falhas espontâneas ou causadas por atos das pessoas podem ser desenvolvidos através da definição das causas básicas de falhas;

- A operação de um item com desempenho desejável estará garantido pelos planos de manutenção, procedimentos operacionais padrões, lista de melhorias e modificações, entre outros.

2.6.2 Estabelecimento da base de dados e de critérios confiabilidade

Fogliatto e Ribeiro (2009) apresentam que é essencial construir um bando de dados que registre e classifique as falhas observadas na planta. Esse bando de dados, segundo os autores, deve indicar os sistemas, subsistemas, conjunto, componente, data e hora da falha, causa da falha, classificação da falha, ação corretiva, data e hora do retorno a operação, entre outros campos que a equipe de manutenção julgar necessário.

Esses dados permitirão que os estudos formais de confiabilidade, apresentados nas seções 2.2 à 2.4, sejam realizados de modo a conhecer a confiabilidade esperada para os diversos equipamentos e para a planta como um todo, que é a primeira questão básica a ser contemplada pelo programa MCC. Além disso, a base de dados conduzirá a uma estimativa da taxa de falha e possibilitará priorizar as ações em função da intensidade de ocorrência de falhas.

Fogliatto e Ribeiro (2009) ainda acrescentam que os estudos de confiabilidade desenvolvidos através dessa base de dados servirão de suporte para as atividades de manutenção, que também serão integradas a essa base de modo que seja registrado tanto as falhas como as manutenções e substituições programadas.

2.6.3 Análise das falhas

As questões dois, três e quatro do programa MCC conduzem a uma análise das falhas funcionais dos equipamentos, resultando no entendimento das causas fundamentais das mesmas e as consequências da ocorrência delas. Ao estudar essas falhas, o programa MCC adota seis tipos de curvas de probabilidade de falhas para caracterizar a vida dos equipamentos, sendo que a curva da banheira é uma delas (KARDEC & NASCIF, 2009). Essas curvas podem ser observadas na Figura 10.



Figura 10: Tipos de curvas de falhas.
Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009)

Segundo Kardec e Nascif (2009), os diferentes tipos de curva apresentados na Figura 10 levam em consideração o fato de que nem todos os ativos apresentam número crescente de probabilidade de falha com a sua idade, sendo que as características de cada padrão são:

- O padrão A representa a curva da banheira. É possível perceber pela Figura 10 uma elevada ocorrência de falhas no início de operação do equipamento, seguido de uma frequência constante e um aumento devido à degradação ou desgaste do equipamento. Esse padrão representa ativos que apresentam partes em contato, tais como bombas e correias transportadoras;
- O padrão B ocorre em equipamentos que estão em contato com o produto e fluidos de processos. É marcado por uma taxa de falhas constante seguida de uma zona de desgaste ao final da vida útil;
- O padrão C ocorre onde há erosão, corrosão e fadiga. Verifica-se que não há uma idade definida ou identificada de desgaste;
- O padrão D ocorre em sistemas complexos cuja manutenção é feita por técnicos altamente qualificados antes de serem substituídos por operadores menos qualificados. Verifica-se uma baixa taxa de falha para o início de operação do equipamento, seguido por um aumento a um patamar de taxa de falhas constante;
- O padrão E aparece em sistemas ou componentes com pouca manutenção, tais como elementos rodantes. Verifica-se uma taxa de falhas constante para qualquer idade do equipamento;

- Padrão F é comum em sistemas complexos que estão sujeitos a ciclos de partida e paradas, frequentes manutenções gerais e flutuações cíclicas da produção. A taxa de falha no início de operação é alta, porém cai para uma situação de taxa de falha constante com o envelhecimento.

Kardec e Nascif (2009) evidenciam que o conhecimento sobre a curva de probabilidade de falha permite definir a melhor estratégia de manutenção para o ativo. Corroborando com essas idéias, Xenos (2004) apresenta que é preciso saber se a probabilidade de falha do equipamento tende a aumentar, diminuir ou permanecer constante ao longo do tempo. Segundo o mesmo autor, ações preventivas de troca e reforma, quando aplicadas a ativos cuja probabilidade de falha diminui ou permanece constante, não apresentarão bons resultados, o que pode representar um investimento não vantajoso do ponto de vista econômico e de segurança.

Xenos (2004) ainda acrescenta que a equipe de manutenção deve dar ênfase em manutenções preditivas (ações baseadas na condição) para os componentes cujas falhas se enquadram nos padrões D, E e F, ou seja, para os itens cuja probabilidade de falha não aumenta à medida que a peça ou equipamento envelhece.

Dessa maneira, apesar de não ser possível estabelecer um intervalo fixo para as atividades de manutenção desses equipamentos, tendo em vista que não existe um limite de vida a partir do qual a probabilidade de ocorrência de falhas aumenta ao longo do tempo, Xenos (2004) relata que é possível inspecionar os sinais de falhas que se manifestam no ativo e identificar parâmetros mensuráveis que podem ser utilizados para prever a ocorrência da falha.

Por outro lado, Fogliatto e Ribeiro (2009) expõem que os componentes que possuem taxas de falhas crescentes, tais como os que se enquadram nos padrões A, B e C, podem ser substancialmente beneficiados pelas atividades de manutenção com tarefas programadas, pois envelhecem com o uso e são passíveis de serem recuperados à condição de novo através de ações como lubrificação, aperto de folgas, realinhamento, retífica ou substituição de partes.

Por fim, Kardec e Nascif (2009) apresentam que o conceito de que quanto mais velho, mais os equipamentos falham não é verdadeiro para todo tipo de ativo, de modo que a curva da banheira representa apenas uma entre as seis caracterizações da vida dos equipamentos. Dessa maneira, é necessário analisar criteriosamente os modos de falhas do ativo para evitar a escolha de métodos de manutenção que não trazem benefícios ao equipamento. Xenos (2004) ainda acrescenta que é preciso avaliar todos os modos de falhas e seus efeitos em termos de custo, risco à segurança, probabilidade de detecção, dentre outros. Para isso os autores propõem o uso

de ferramentas essenciais no planejamento da manutenção, como a Análise dos Modos e Efeitos das Falhas – FMEA.

2.6.4 FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*)

Segundo Kardec e Nascif (2009) a FMEA é um sistema lógico que hierarquiza as falhas que mais ocorrem e fornece as recomendações para ações preventivas. Para Fogliatto e Ribeiro (2009) a FMEA é uma técnica de confiabilidade que tem como objetivo: (i) reconhecer e avaliar as falhas potenciais que podem surgir em um produto ou processo; (ii) recomendar ações para eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dessas falhas; e (iii) criar documentos de estudos que auxiliarão em revisões e desenvolvimentos futuros do projeto ou processo.

Kersten (2014) relata que atualmente existem diversos tipos de FMEA, de modo que elas se distinguem pela área de atuação. O mesmo autor cita como exemplo a FMEA de projeto – DFMEA (*Design Failure Modes and Effects Analysis*), cuja aplicação é realizada para a busca de falhas atuantes em projetos ineficientes e a FMEA de Processo – PFMEA (*Process Failure Modes and Effects*), destinada a encontrar falhas potenciais existentes no processo a fim de manter o equipamento operando.

Tanto a FMEA de projeto, quanto a de processo são técnicas que apresentam a vantagem de sistematizarem o diagnóstico de produtos e processos e auxiliar na detecção e eliminação de possíveis ocorrências de falhas, fornecendo uma hierarquia de prioridades para as ações de manutenção (KARDEC & NASCIF, 2009, FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009). Kardec e Nascif (2009) afirmam que os responsáveis pela manutenção estão mais envolvidos na FMEA de processo, pois nessa fase os equipamentos já estão instalados e operando.

Fogliatto e Ribeiro (2009) relata que, no desenvolvimento de qualquer FMEA, o engenheiro responsável deve garantir que todas as ações recomendadas sejam implementadas de forma adequada. Para isso, ele deve montar uma equipe de trabalho que possua conhecimento das diversas áreas envolvidas (materiais, manufatura, montagem, qualidade, assistência técnica, etc.) e reunir os documentos que servirão de suporte, tais como: relatórios descrevendo demandas ou reclamações de clientes, manuais de treinamento e operação, manuais de segurança, especificações a serem atendidas, normas aplicáveis, entre outros.

Segundo Kardec e Nascif (2009), a FMEA é fundamentalmente a medida do risco de falha. Desse modo, quanto mais pessoas estiverem envolvidas na determinação da taxa de risco, mais preciso será o resultado.

Após reunir uma equipe multidisciplinar, os documentos de suporte e planejar as etapas do processo, a análise das falhas será realizada através do preenchimento do FMEA, que é um formulário padronizado que dispõe e organiza todas as informações disponíveis (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009, OHTA, 2013), conforme pode ser verificado na Figura 11.

FORMULÁRIO DE FMEA - ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHAS														
() Processo () Produto		Data de confecção da FMEA:				Versão:			Número:					
Objeto de estudo:				Coordenador:				Setor:						
Equipe de estudo:														
Equipamento	Função	Modo Potencial de falha	Efeito Potencial de Falha	S	Cla	Causa Potencial de Falha	O	Controles Atuais	D	N P R	Ação Recomendada	Responsável e data	Ação efetuada	S O D N P R

Figura 11: Formulário FMEA sugerido pela norma ISO 9004.

Fonte: IQA, 1997 *apud* Ohta (2013, p.33)

Através do formulário de FMEA, apresentado na Figura 11, é possível verificar a existência de campos básicos para o preenchimento desse tipo de documento, entre os quais Fogliatto e Ribeiro (2009) destacam:

a) Cabeçalho

O cabeçalho é particular de cada empresa, mas possui a função de identificar o número da FMEA, a identificação do processo, identificação dos itens associados ao processo, o modelo ao qual ele corresponde, o departamento responsável pelo estudo, entre outros dados (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

b) Item/função

Essa coluna identifica, de forma concisa, cada componente, subsistema ou sistema foco da análise e suas funções. Vale ressaltar que se um item tem mais de uma função, todas elas devem ser evidenciadas, pois pode haver diferentes modos de falha relacionados a elas, uma vez que as falhas estão associadas ao não cumprimento das funções especificadas (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

c) Modos Potenciais de Falha

Fogliatto e Ribeiro (2009) abordam que esse campo deve descrever o trabalho técnico propriamente dito. Para o DFMEA a equipe deve identificar as maneiras com que um item pode falhar em atender aos requisitos do projeto (modo potencial de falha). Devem ser listados todos os modos potenciais de falhas pertinentes a cada item ou função.

Para o FMEA a equipe deve analisar a primeira operação e indicar a maneira na qual um determinado processo pode falhar em atingir os requisitos ou especificações do projeto. Devem ser listados todos os modos potenciais de falhas pertinentes a cada operação (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

d) Efeitos Potenciais de Falhas

Esses efeitos são definidos como defeitos, resultantes dos modos de falhas, sendo descrito em função daquilo que o cliente observará ou experimentará (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

e) Severidade (S)

Fogliatto e Ribeiro (2009) definem a severidade em termos do impacto que o efeito do modo potencial de falha tem sobre a operação do sistema e, por conseguinte, sobre a satisfação do cliente. O autor ainda destaca que o estudo da severidade pode ser realizado mesmo sem medições ou análises matemáticas mais aprofundadas. Os critérios de avaliação sugeridos pelos autores estão apresentados na Figura 12.

Severidade do efeito		Escala
Muito alta	Quando compromete a segurança da operação ou envolve infração	10
	a regulamentos governamentais	9
Alta	Quando provoca alta insatisfação do cliente, por exemplo, um	8
	veículo ou aparelho que não opera, sem comprometer a segurança	7
Moderada	Quando provoca alguma insatisfação, devido à queda do desem-	6
	penho ou mau funcionamento de partes do sistema	5
Baixa	Quando provoca uma leve insatisfação, o cliente observa apenas	4
	uma leve deterioração ou queda no desempenho	3
Mínima	Falha que afeta minimamente o desempenho do sistema, e a	2
	maioria dos clientes talvez nem mesmo note sua ocorrência	1

Figura 12: Sugestão de escala para avaliação dos efeitos dos modos de falhas.

Fonte: Fogliatto& Ribeiro (2009, p. 179)

Verifica-se pela Figura 12 que a severidade é sinalizada através de uma escala entre 1 e 10, sendo a escala 1 atribuída ao efeito pouco severo do modo de falha e a escala 10 ao efeito muito severo.

f) Classificação

Essa coluna é utilizada para classificar as características do item ou característica de operação que possa requerer controle especial. Fogliatto e Ribeiro (2009) destacam que entre

as possíveis classificações, podem aparecer: crítico para segurança, crítico para a qualidade, entre outros.

g) Mecanismos potenciais de falhas

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), nesse ponto há uma busca pela raiz dos problemas, sendo importante que a equipe tenha um conhecimento acumulado para que se tenha qualidade na análise das causas potenciais de falhas. Para o autor, a causa potencial de falha pode ser entendida como uma deficiência de projeto ou processo que levou ao modo de falha, sendo importante listar essas causas ou mecanismos de forma concisa e completa para facilitar os esforços de correção ou melhoria do processo.

h) Ocorrência (O)

Fogliatto e Ribeiro (2009) relacionam a ocorrência com a probabilidade que uma causa/mecanismo das falhas venha a ocorrer. Assim como a severidade, a probabilidade de ocorrência de falhas é representada através de uma escala que varia de 1 a 10, conforme ilustrado na Figura 13.

Ocorrência de falha		Taxa de falha	Cpk	Escala
Muito alta	Falhas quase inevitáveis	100/1000	0,43	10
		50/1000	0,55	9
Alta	Falhas ocorrem com frequência	20/1000	0,68	8
		10/1000	0,78	7
Moderada	Falhas ocasionais	5/1000	0,86	6
		2/1000	0,96	5
		1/1000	1,03	4
Baixa	Falhas raramente ocorrem	0,5/1000	1,10	3
		0,1/1000	1,24	2
Mínima	Falhas muito improváveis	0,01/1000	1,42	1

Figura 13: Sugestão de escala para avaliação da ocorrência da causa de falhas.
Fonte: Fogliatto& Ribeiro (2009, p. 194)

Observa-se através da Figura 13 que a escala atribui 1 para a probabilidade de ocorrência de falhas muito improváveis, ou seja, que possuem probabilidade mínima de ocorrência e o valor 10 para falhas quase inevitáveis, que apresentam probabilidade muito alta de ocorrência.

Para os casos em que dados quantitativos não estão disponíveis, Fogliatto e Ribeiro (2009) evidenciam que a equipe deve realizar uma análise qualitativa para classificar a probabilidade de ocorrência de falhas, segundo a escala representada na Figura 13.

Porém, dados de campo ou resultados de análise de engenharia numérica possibilitam obter a probabilidade de ocorrência de falhas através de equações empíricas. Essas equações

reproduzem aproximadamente os valores de ocorrência de falha listados na Figura 13, isto é, as equações possibilitam encontrar um valor entre 1 e 10 para caracterizar a probabilidade de ocorrência.

Entre as equações utilizadas estão: $Ocorrência = (Taxa\ de\ falhas/0,000001)^{0,20}$ e $Ocorrência = 9,3 \times (1,5 - Cpk)$. Essas equações levam em consideração a taxa de falhas registrada ou o Cpk fornecido (também ilustrado na Figura 13).

i) Controles de prevenção e detecção

Nesse campo a equipe deve descrever os controles incorporados no processo para impedir ou detectar um modo de falha (OHTA, 2013). Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), entre os dispositivos de controle mais utilizados estão o uso de controle estatístico e o uso de inspeções finais. Os mesmos autores evidenciam que se um controle específico for necessário, embora sua utilização não seja prevista pela empresa, ele deve ser listado na coluna de ações recomendadas.

j) Detecção (D)

A detecção, segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), faz uma estimativa da habilidade dos controles atuais em detectar causas ou modos potenciais de falha antes de um componente passar para uma operação subsequente. Os critérios de avaliação da possibilidade de detecção estão apresentados na Figura 14.

Possibilidade de detecção		Escala
Muito Remota	Os controles não irão detectar esse modo de falha, ou não existem controles	10
Remota	Os controles provavelmente não irão detectar esse modo de falha	9 8
Baixa	Há uma baixa probabilidade de os controles detectarem esse modo de falha	7 6
Moderada	Os controles podem detectar o modo de falha	5 4
Alta	Há uma alta probabilidade de os controles detectarem o modo de falha	3 2
Muito Alta	É quase certo que os controles irão detectar esse modo de falha	1

Figura 14: Sugestão de escala para avaliação da detecção.

Fonte: Fogliatto & Ribeiro (2009, p. 196)

Verifica-se através da Figura 14 que na classificação da possibilidade de detecção o valor 1 representa uma situação favorável, com possibilidade de detecção muito alta enquanto o valor 10 representa uma situação desfavorável, com possibilidade de detecção muito remota.

Fogliatto e Ribeiro (2009) evidenciam que para reduzir a pontuação atribuída por essa escala é necessário melhorar os controles de prevenção e detecção presentes no processo. Os autores relatam que os valores mais baixos (1 a 3) estão associados ao uso de dispositivos ou procedimentos à prova de erro, enquanto os valores intermediários (4 a 6) estão associados ao uso de medições ou controles estatísticos e os valores mais altos (7 a 10) estão associados à inspeções visuais, inspeções aleatórias ou mesmo inexistência de controle.

k) Riscos (R) ou Número de Prioridade de Risco (NPR)

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), o risco (R) ou número de prioridade de risco (NPR) é utilizado para dar prioridade a ações de correção e melhoria do projeto. O seu cálculo leva em consideração a severidade (S), a ocorrência (O) e a detecção (D), podendo ser realizado, em geral, pela multiplicação simples desses três itens conforme a expressão $R = S \times O \times D$.

Verifica-se que o risco cresce à medida que cresce a severidade, a probabilidade de ocorrência e a probabilidade de não detecção. Ohta (2013) relata que as equipes devem deslocar sua atenção e concentrar seus esforços naqueles componentes em que o risco é maior. Para os casos em que se obtém o mesmo valor de risco, para diferentes combinações das parcelas, o foco maior deve ser dado a situações de maior severidade, seguida por situações de maior probabilidade de não detecção (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

l) Ações recomendadas

Ohta (2013) relata que as ações recomendadas constituem o principal resultado do FMEA, pois representam o que será corrigido e melhorado no projeto ou processo. Para Fogliatto e Ribeiro (2009), as ações recomendadas são destinadas aos componentes de maior risco e visam reduzir a severidade do efeito, a probabilidade de ocorrência ou a probabilidade de não detecção.

m) Responsável, Ações efetuadas e Datas

Fogliatto e Ribeiro (2009) descrevem que na coluna de responsável e data deve constar a pessoa ou o grupo encarregado de realizar as ações recomendadas, assim como a data alvo para completar as tarefas.

Quando as medidas forem executadas, um breve relato com a descrição das ações de correção e melhorias efetivamente implantadas, juntamente com a correspondente data da implantação, deve ser realizado.

n) Risco resultante (R)

Ohta (2013) relata que após identificar as ações corretivas, mas antes de executá-las, faz-se uma estimativa da situação futura para a Severidade, Ocorrência e Detecção. Essas ações devem influenciar uma ou mais parcelas, reduzindo o risco a ponto de incluir a operação na condição de risco aceitável (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Ao final do registro das ações efetivamente realizadas, os riscos resultantes devem ser novamente analisados (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Enfim, Fogliatto e Ribeiro (2009) apresentam que os campos da tabela FMEA respondem as questões 5W1H: O que, Quem, Quando, Onde, Por que e Como. O autor aborda que a coluna de ação descreve “O que” foi realizado, enquanto a coluna de responsável e data mostra “Quem” realizou e “Quando” foram realizadas as ações. A coluna que apresenta o item de análise (subsistema, conjunto, componente) especifica “Onde” o estudo foi realizado, ao passo que as colunas que apresentam a causa, o modo e o efeito de falha especificam o “por que”. Finalmente, a coluna que detalha a ação recomendada a ser feita especifica “Como” ela deve ser realizada.

Pensando no 5W2H, ou seja, acrescentando o *How much* (quanto custa) à essa análise, é possível dizer que se o FMEA for bem aplicado e monitorado, certamente produzirá bons benefícios para o cliente e a organização, pois ajudará a reduzir os custos com as falhas. Desse modo, embora os custos do desenvolvimento de ações de FMEA sejam altos, os gastos podem ser pagos pela própria economia obtida ao evitar as falhas. (KARDEC & NASCIF, 2009, KARSTEN, 2014).

2.6.5 Classificação dos componentes e seleção de atividades de manutenção pertinentes

Por meio da identificação dos modos de falhas de cada componente e seus respectivos efeitos e causas através do FMEA, os equipamentos são classificados como críticos, potencialmente críticos e não-críticos. Os equipamentos críticos e potencialmente críticos são aqueles cujas falhas são significativas e envolvem pessoas, o meio ambiente, a parada da linha de produção ou outras perdas econômicas. De maneira oposta, equipamentos não-críticos são aqueles cuja falha não apresenta graves consequências (FOGLIATTO E RIBEIRO, 2009).

Fogliatto e Ribeiro (2009) relatam que essa classificação ajuda a definir estratégias de manutenção que melhor se ajustam às características de falhas de cada dispositivo. Isso por que, embora o programa MCC priorize atividades pró-ativas, equipamentos com padrões de falhas D, E e F não são beneficiados por esse tipo de manutenção.

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), as tarefas de manutenção podem ser classificadas como:

- i) Preditivas, quando as atividades são orientadas pelo desgaste do ativo, ou seja, na sua condição;
- ii) Preventivas, quando as atividades são orientadas pelo tempo, com ações programadas de trocas e reparos;
- iii) Reativas, quando as causas das falhas são procuradas ou ocorre o funcionamento até a falha, para que então se tome ações corretivas.

Fogliatto e Ribeiro (2009) abordam que atividades conduzidas anteriormente à ocorrência de falhas são tarefas pró-ativas. Essas tarefas visam evitar que os componentes falhem através de manutenções que se baseiam no seu estado (preditiva) ou no tempo de uso (preventiva).

Por outro lado, as atividades nas quais a equipe deve lidar com componentes que já apresentaram falhas são classificadas como tarefas reativas (manutenção corretiva). Essas tarefas, segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), contemplam rodar até falhar, procurar as causas das falhas ou mesmo o redesenho de componentes ou conjuntos que apresentam falhas críticas que não são minimizadas através de ações pró-ativas.

Kardec e Nascif (2009) acrescentam que ações pró-ativas devem ser adotadas para evitar ou minimizar a ocorrência de falhas em componentes críticos e potencialmente críticos, quando esses podem ser beneficiados por esse tipo de manutenção. Desse modo, os autores relatam formas de atuação para essa situação, nas quais destacam:

- Manutenção Preditiva ou Manutenção sob Condição, na qual se analisa os avisos das falhas potenciais, as quais antecedem uma falha funcional. A falha potencial é definida pelo programa MCC como uma condição identificável e mensurável de uma falha funcional pendente ou em processo de ocorrência;
- Manutenção Preventiva com tarefas programadas de restauração, que podem incluir reforma ou a restauração de um item ou componente, seu reprojeto ou ainda sua revisão em intervalos definidos independentes da condição dele;
- Manutenção Preventiva com tarefas programadas de descarte, que inclui a substituição do item ao final da sua vida útil definida.

Kardec e Nascif (2009) ilustram a recuperação do desempenho de um equipamento através do uso dessas técnicas, conforme ilustrado por meio da Figura 15.

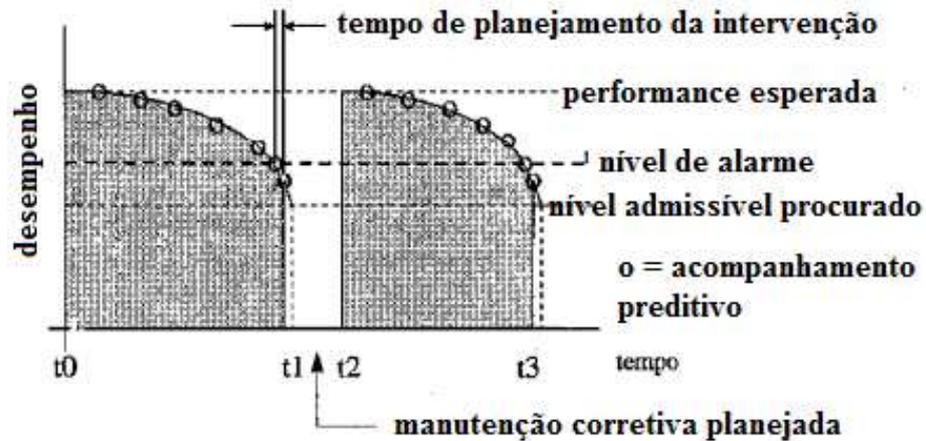


Figura 15: Atividades pró-ativas.

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2001) *apud* Ohta (2013)

Observa-se através da Figura 15 que houve análise dos avisos das falhas potenciais (acompanhamento preditivo) e que, a partir deles, planejou-se uma intervenção entre os instantes de tempo t_1 e t_2 , de modo que nesse intervalo foi executada uma manutenção corretiva planejada que restaurou o desempenho do ativo à condição inicial.

Os componentes críticos ou potencialmente críticos, cujas falhas não podem ser tratadas através das atividades pró-ativa exemplificadas na Figura 15, devem ter seu projeto redesenhado devido ao risco das suas falhas. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), o redesenho pode simplificar o sistema e eliminar a possibilidade de falha, mas deve ser utilizado apenas quando não há outras possibilidades, pois exige o conhecimento de profissionais que muitas vezes não fazem parte da equipe do programa MCC e demanda muito tempo.

Por último, para os equipamentos não-críticos cujas falhas não apresentam graves consequências e não podem ser tratadas através de atividades pró-ativas, Fogliatto e Ribeiro (2009) destacam que é possível buscar as falhas escondidas quando essas diminuem a confiabilidade do equipamento ou utilizá-lo até a ocorrência da parada não programada, para que então a confiabilidade do sistema seja restaurada ao eliminar a falha.

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), o diagrama apresentado na Figura 16 auxilia na definição da atividade de manutenção adequada a cada item e seu respectivo modo de falha.

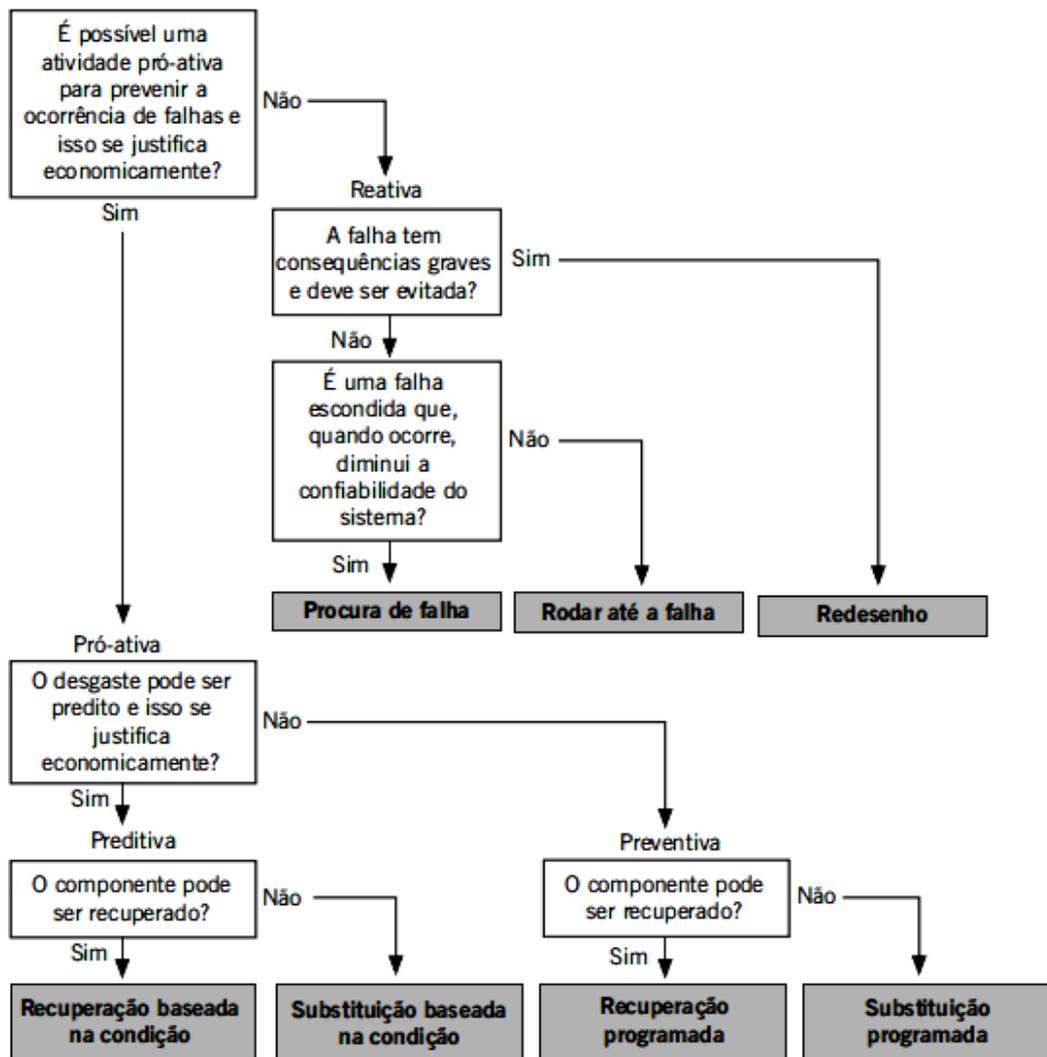


Figura 16: Tipo de atividade recomendada.
 Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 230)

Verifica-se através da Figura 16 que o programa MCC prioriza atividades pró-ativas, de modo que a primeira questão verifica a possibilidade ou não da antecipação da falha. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009, p.232), existe uma ordem preferencial para o uso das atividades de manutenção baseado no efeito das falhas e, em última instância, no custo associados a essas falhas. Essa ordem prioriza:

1. Preditiva – reparo baseado nas condições do componente.
2. Preditiva – substituição baseada nas condições do componente.
3. Preventiva – reparo baseado no tempo de uso.
4. Preventiva – substituição baseado no tempo de uso.
5. Reativa – procura de falhas.
6. Reativa – rodar até falhar.
7. Redesenho de partes do subsistema.

2.6.6 Planilha de apoio à implantação do programa MCC

Fogliatto e Ribeiro (2009) destacam que, para o controle do programa MCC, é essencial que as atividades de manutenção sejam devidamente registradas em planilhas. Nessas planilhas devem constar o sistema, subsistema, conjunto, componente, uma descrição detalhada da atividade de manutenção, a periodicidade e responsável pela execução. Os autores destacam que a periodicidade das manutenções deve ser baseada em estudos de confiabilidade sempre que houver dados quantitativos, caso contrário, ela deve ser definida pela experiência da equipe devido ao conhecimento sobre o equipamento.

Para o registro das atividades, Fogliatto e Ribeiro (2009) defendem o uso de planilhas ampliadas que apresentem, além dos estudos dos modos de falhas documentados no FMEA, as atividades de manutenção realizadas. Nesse sentido, os autores propõem a Tabela 1, na qual os campos com (*) representam campos que não estão usualmente presentes na FMEA.

Tabela 1: Planilha ampliada para a condução da FMEA e detalhamento das atividades de manutenção

Núm.	Campo da planilha	Pessoas em melhores condições para contribuir no preenchimento
1	Sistema	Engenheiros
2	Subsistema	Engenheiros
3	Conjunto	Engenheiros, operadores e técnicos de Manutenção
4	Componente	Engenheiros, operadores e técnicos de manutenção
5	Função	Engenheiros
6*	Padrão de desempenho	Operadores, Supervisores e Gerentes de Produção
7	Modo de falha	Operadores e Técnicos de Manutenção
8	Efeito: o que é observado	Operadores e Técnicos de Manutenção
9*	Tempo médio de parada	Supervisor de produção
10*	Danos pessoais/materiais/ambientais	Operadores, engenheiros e especialistas
11	Causa da falha	Operadores e técnicos de manutenção
12*	O que pode ser feito para evitar a falha	Operadores e técnicos de manutenção
13*	Classificação da consequência da falha Escondida (potencialmente crítica) Segurança (crítica) Ambiental (crítica) Operacional (crítica) Outra (não-crítica)	Operadores, engenheiros e especialistas
14	Probabilidade de ocorrência	Operadores e técnicos de manutenção
15	Severidade	Operadores, engenheiros e especialistas
16	Probabilidade de detecção	Operadores e técnicos de manutenção
17	Risco	Engenheiros
18*	Tarefa indicada: Preditiva – recuperação baseada na condição Preditiva – substituição baseada na condição Preventiva – recuperação programada Preventiva – substituição programada Reativa – rodar até a falha Reativa – Procura de falha Redesenho	Técnicos de manutenção
19*	Detalhe da tarefa	Técnicos de manutenção
20*	Responsável pela tarefa	Operadores e técnicos de manutenção
21*	Intervalo entre tarefas	Engenheiros e técnicos de manutenção
22	Probabilidade de ocorrência	Engenheiros, operadores e técnicos de Manutenção
23	Severidade	Engenheiros, operadores e técnicos de Manutenção
24	Probabilidade de detecção	Engenheiros, operadores e técnicos de Manutenção
25	Risco	Engenheiros, operadores e técnicos de manutenção

Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 227)

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), a planilha apresentada na Tabela 1 representa uma importante ferramenta na implantação do programa MCC. Essa planilha possui, além dos os passos do preenchimento da FMEA, a seleção e a documentação das atividades pró-ativas ou reativas pertinentes. Na terceira coluna, o autor apresenta sugestões de pessoas que estão aptas para realizar o registro, levando em consideração o conhecimento específico de cada profissional.

Os autores evidenciam ainda que os campos 14 e 17 devam ser preenchidos para avaliar os riscos considerando as condições de manutenção geral empregados na planta em análise e os campos 22 a 25 são preenchidos para inspecionar os riscos após a definição da tarefa de manutenção apropriada. Desse modo, as atividades de manutenção apresentadas no campo 18 devem ser pensadas de modo que conduzam os dados que serão registrados nos últimos campos a um nível de risco considerado como aceitável, uma vez que as atividades preditivas e preventivas são capazes de mudar a probabilidade de ocorrência e detecção de uma falha e o redesenho pode alterar a severidade.

2.7 Considerações finais do capítulo

A equipe de manutenção, além de conhecer bem os métodos de manutenção existentes, deve ser capaz de identificar quais métodos melhor se aplica a um determinado equipamento, de acordo com os modos de falhas, os efeitos e as causas das mesmas. Além disso, também deve ser capazes de colocar essas ações em prática com eficiência e de maneira econômica, uma vez que o melhor conjunto de ações preventivas é aquele que garante a confiabilidade e segurança inerentes a um ativo pelo menor custo (XENOS, 2004).

Existem vários métodos e ferramentas que podem ser utilizados para fornecer informações importantes para o planejamento de manutenção, entre os quais esse estudo destaca o programa MCC. A revisão bibliográfica apresentada nesse trabalho demonstra claramente que o programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade pode auxiliar a equipe de manutenção na construção de estratégias, de modo que seus esforços possam ser canalizados para onde eles são necessários, garantindo assim que os recursos investidos nas ações preventivas sejam vantajosos sob vários pontos de vista, principalmente o econômico e o de segurança (FOGLIATTO E RIBEIRO, 2009).

Portanto, os estudos formais de confiabilidade, aplicados ao programa MCC, podem auxiliar no entendimento das diversas formas como uma pá-carregadeira pode vim a falhar, o seu padrão de falhas e recomendar ações para eliminar ou reduzir a probabilidade de ocorrência

das mesmas. Desse modo, o presente trabalho é elaborado com base no programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade e a metodologia utilizada no seu desenvolvimento será abordada no próximo capítulo.

3 METODOLOGIA

Este estudo analisa o Método de Manutenção Centrada em Confiabilidade aplicada a um sistema de pás-carregadeiras de uma empresa do setor de mineração, localizada no estado de Minas Gerais. Este capítulo apresenta as características dessa pesquisa, os materiais e métodos que são utilizados na coleta, tabulação e análise dos dados.

3.1 Caracterização da pesquisa

De acordo com Castro (1976), as pesquisas científicas são classificadas, segundo seus objetivos, em: (i) descritiva; (ii) explicativa; e (iii) exploratória.

As pesquisas descritivas, segundo Gil (2002), tem como objetivo apresentar as características de determinadas populações ao levantar opiniões, atitudes e crenças, ou seja, são pesquisas mercadológicas ou de opiniões. Para o autor, o processo descritivo visa identificar, registrar e analisar as características, fatores ou variáveis que se relacionam com o fenômeno ou processo.

As pesquisas explicativas, por outro lado, são baseadas em experimentos e envolvem o registro, análise, interpretação e identificação das causas e efeitos de um determinado fenômeno, visando definir modelos teóricos e gerar hipóteses ou ideias através de deduções lógicas (GIL, 2002; LAKATOS & MARCONI, 2011).

As pesquisas exploratórias buscam registrar fatos, ideias e intuições, na tentativa de adquirir maior familiaridade com o fenômeno em estudo. Para isso, o pesquisador estabelece critérios, métodos e técnicas para a elaboração de um estudo, com o objetivo de desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e concepções. Dessa maneira, ele irá aprofundar seus conhecimentos, criar novas hipóteses ou formular pesquisas mais estruturadas sobre o fato (GIL, 2002; SELTZ *et al.*, 1965 *apud* OLIVEIRA, 2011).

Para Mattar (2001), os métodos empregados pelas pesquisas exploratórias compreendem o levantamento de dados em fontes secundárias, levantamento de experiências, estudos de casos selecionados e a observação informal do evento. O mesmo autor destaca que esse tipo de pesquisa geralmente assume a forma de pesquisa bibliográfica, seguida por um estudo de caso.

Frente às ideias apresentadas, conclui-se que o objetivo deste trabalho é exploratório, uma vez que o mesmo se baseia em revisão bibliográfica e no estudo de casos nos quais ocorreram falhas operacionais em um sistema de pás-carregadoras.

Além da classificação referente aos objetivos, as pesquisas podem ser classificadas como qualitativa ou quantitativa, sendo que essas duas classificações se diferem pelo uso ou não de instrumentos estatísticos.

A abordagem qualitativa tem como base a percepção do fenômeno dentro do seu contexto, de modo que o uso dessa descrição procura captar as essências do evento, explicar sua origem e intuir suas consequências sem a necessidade de cálculos ou interpolações numéricas. Por outro lado, o método quantitativo, como o próprio nome indica, mensura tanto a modalidade de coleta de informações, quanto o tratamento das mesmas por meio de técnicas estatísticas (OLIVEIRA, 2011; RICHARDSON, 2015).

A partir das características apresentadas, considera-se que a natureza desse trabalho é, simultaneamente, qualitativa e quantitativa, uma vez que serão analisados os modos e os efeitos das falhas, além de quantificar as medidas de confiabilidade dos equipamentos a partir de ajustes estatísticos das paradas não programadas.

Portanto, esse trabalho consiste em uma metodologia de caráter exploratório, qualitativo e quantitativo, bibliográfico e estudo de caso.

3.2 Materiais e métodos

O ponto de partida desse trabalho foi uma revisão bibliográfica a partir de livros, artigos, dissertações e outras publicações na área de manutenção, com o propósito de aprofundar os conhecimentos sobre os métodos de ajustes estatísticos para mensurar as medidas de confiabilidade de um ativo e sobre a metodologia do programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade. As próximas etapas da metodologia que são utilizadas nesse trabalho estão representadas no diagrama da Figura 17.

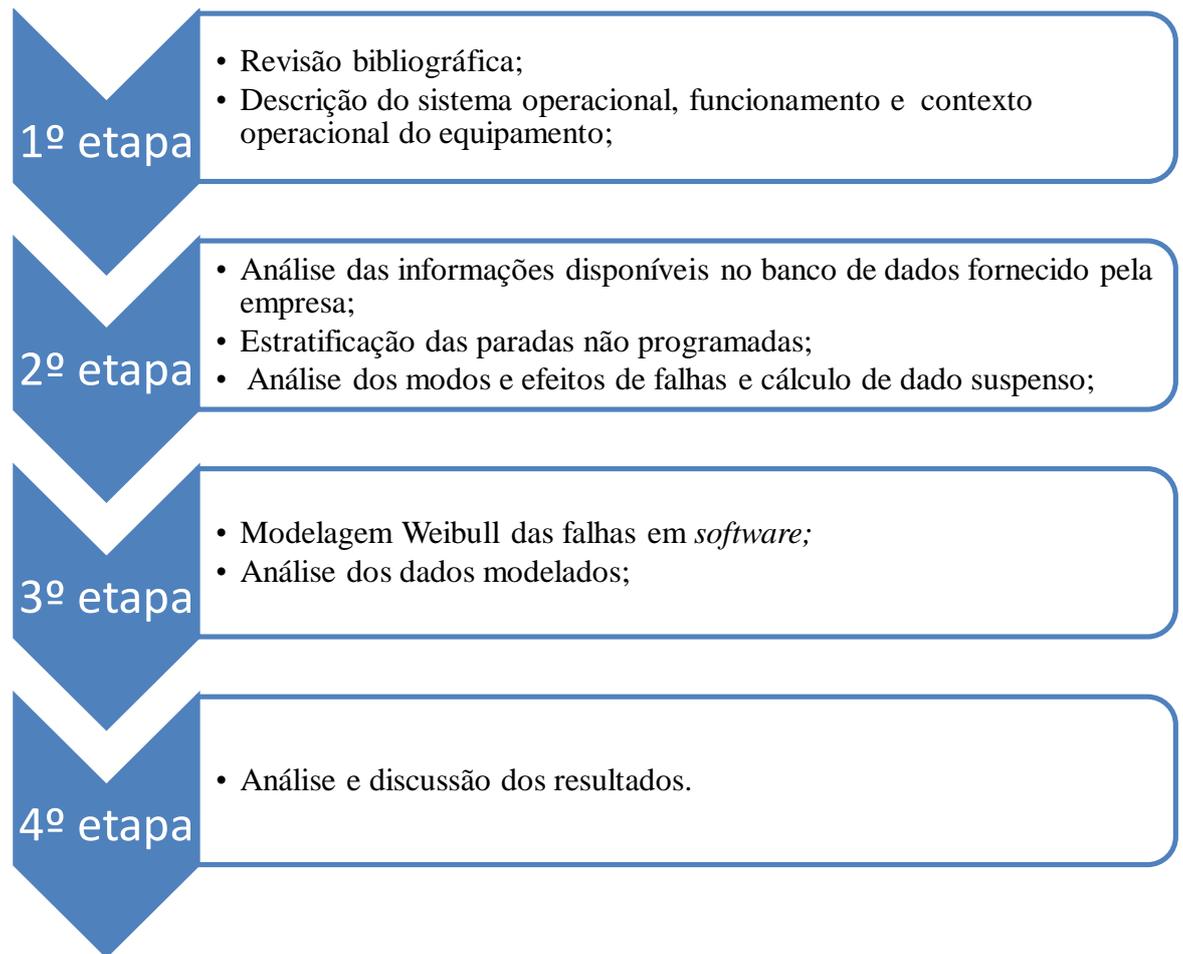


Figura 17: Materiais e Métodos
 Fonte: Pesquisa direta (2018)

Conforme apresentado no diagrama da Figura 17, logo após a revisão bibliográfica, é realizada uma descrição sobre os sistemas operacionais, funcionamento e o contexto operacional das pás-carregadeiras, a fim de obter informações essenciais sobre o equipamento a ser estudado.

A próxima etapa consiste na análise das informações disponíveis nas planilhas, de modo que as paradas não programadas dos equipamentos durante o período de estudo sejam estratificadas de acordo com os modos e efeitos de suas falhas. Essa ação tem como objetivo identificar, evidenciar e registrar as particularidades apresentadas ao longo do funcionamento dos equipamentos.

O registro dessas particularidades possibilita a classificação das intervenções corretivas, o cálculo do tempo entre as falhas e do dado suspenso (refere-se à diferença de tempo entre o dia de realização do estudo e o dia da última parada no equipamento). Além disso, é possível

realizar a modelagem estatística no *software* Weibull, obtendo assim as curvas e as medidas de confiabilidade do ativo e possibilitando uma análise e discussão dos resultados encontrados.

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), para o gerenciamento do programa MCC devem ser definidos identificadores que envolvam métricas de tempo de parada, disponibilidade de equipamentos e confiabilidade. Pensando nisso, a Tabela 2 apresenta as variáveis e indicadores utilizados nesse trabalho.

Tabela 2: Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Paradas não programadas	Taxa de falhas
	Número de ocorrências
Dado suspenso	Tempo Médio Entre Falhas (MTBF)
	Tempo de Paradas
	Disponibilidade Física (DF)
	Diagrama de Pareto
	Distribuição Weibull
	Confiabilidade

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Verifica-se pela Tabela 2 que as variáveis utilizadas são as paradas não programadas e os dados suspensos. Observa-se ainda que os identificadores adotados são a Taxa de Falhas, Número de Ocorrências, Tempo Médio Entre Falhas (MTBF), Tempo de Paradas, Disponibilidade Física (DF), Diagrama de Pareto, Distribuição Weibull e Confiabilidade.

3.4 Coleta de dados

As informações sobre as falhas dos equipamentos são obtidas por meio de planilhas de rastreamento de tempos de paradas não programadas. Essas planilhas foram disponibilizadas por uma empresa do setor de mineração e através delas será possível realizar o modelamento Weibull dos tempos de falhas.

É importante ressaltar que a escolha do ajuste Weibull para as taxas de falhas está associada ao fato de que essa distribuição é uma das mais importantes no estudo da confiabilidade, uma vez que possui a flexibilidade em acomodar diferentes formas da função de risco apenas variando os valores de seus parâmetros (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Assim, os instrumentos de coleta de dados envolvem observação direta das planilhas disponíveis e dos dados modelados.

3.5 Tabulações de Dados

Os dados são tabulados através do *software* Microsoft Excel. Essa tabulação permite uma melhor visualização das informações coletadas. Os registros dos resultados são realizados por meio do *software* Microsoft Word e a modelagem Weibull das falhas é realizada através do *software* Weibull de Reliasoft.

3.6 Considerações finais do capítulo

Este capítulo caracterizou o tipo de pesquisa que é realizada, assim como os materiais, métodos, variáveis e ferramentas escolhidas para atingir os objetivos propostos nesse trabalho. O próximo capítulo aborda o estudo de caso, no qual é realizada a apresentação dos equipamentos estudados, a aplicação da prática proposta na metodologia e a análise e discussão dos resultados obtidos.

4 RESULTADOS

A análise do Método de Manutenção Centrado em Confiabilidade para sistemas de pás-carregadeiras será apresentada nesse capítulo.

4.1 Delimitação do trabalho

Esse estudo foi desenvolvido a partir de dados relativos a pás-carregadeiras, cedidos por uma mineradora cujo nome não será exposto. O trabalho foi focado basicamente na aplicação do programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade, desenvolvida nos sistemas de pás-carregadeiras da empresa.

4.2 Características da empresa no processo de extração do minério

A empresa em questão é uma das maiores mineradoras do mundo e atua em segmentos minerais tais como: minério de ferro, níquel, manganês, carvão e cobre. Suas minas e plantas de pelotização estão localizadas nos cinco continentes, mas sua maior operação ocorre no Brasil, totalizando 14 estados brasileiros.

Um dos maiores produtos dessa empresa é o minério de ferro. Esse minério é encontrado em rochas na natureza e por isso sua extração envolve diversos equipamentos, entre os quais é possível destacar: (i) as perfuratrizes, responsáveis por produzir furos ou poços nos rochedos, possibilitam o desmonte dos mesmos com o emprego de explosivos; (ii) escavadeiras e pás-carregadeiras, encarregadas de extrair as massas de minério das bancadas após as explosões, colocam o material a ser carregado nos ativos de transporte; e (iii) caminhões fora-de-estrada descarregam os blocos nos britadores.

Os britadores são equipamentos responsáveis pela primeira etapa do beneficiamento do material resultante da extração e reduzem o tamanho grosseiro dos blocos de minério à partículas menores. Esse beneficiamento é uma série de processos que ocorre com o objetivo de separar e concentrar o minério de ferro da ganga, que é o rejeito para o qual não há interesse econômico.

Em seguida, o minério é carregado por correias transportadoras até a usina de beneficiamento, local em que é separado de acordo com as dimensões das partículas através do processo de peneiramento, que consiste em passar o material por uma série de aberturas de peneiras cuja relação é constante entre si. Os produtos dessa etapa são: (i) granulado, material entre 0,6 e 5 cm de diâmetro que podem ser utilizados diretamente nos alto fornos; (ii) Sinter-

feed, partículas mais finas do que os granulados, com até 0,6 cm de diâmetro; e (iii) Pellet-feed, pó de minério de ferro que passa por processo de aglomeração para ser transformado em pelotas. Essas pelotas são pequenas bolinhas de minério de ferro utilizadas na fabricação do aço.

Após o processamento na usina, o minério é conduzido a pátios de estocagem por correias transportadoras. Nessa fase, as empilhadeiras e recuperadoras retiram o minério das correias e o armazenam em pilhas de até 18 metros de altura e 50 metros de largura, terminando assim o processo de beneficiamento.

Em seguida, o minério é transportado até os silos (reservatórios cilíndricos) por meio de máquinas recuperadoras e recuperadora-empilhadeira, onde é estocado até ser descarregado em vagões de trem de carga.

Para garantir agilidade e segurança no transporte do minério, a empresa atua no Brasil com uma rede de logística que integra as minas, ferrovias, navios e portos. A primeira parte do trajeto é feito por trens, que percorrem 972 quilômetros por meios de estradas de ferro que vão das minas até o porto de embarcação. Para receber o minério, o trem de carga passa por baixo dos silos, num processo que leva em média duas horas e meia.

Ao chegar a seu destino final, o trem é descarregado com o auxílio de equipamentos viradores que tombam os vagões a 180 graus e descarregam o minério em silos. Em seguida, o minério é transferido dos silos para os pátios de estocagem do porto de embarcação.

Uma vez no pátio, o minério é colocado em esteiras e é levado diretamente para os porões de navios que estão no terminal portuário. Esses navios têm capacidade de até 400 mil toneladas de minério de ferro e partem em direção a portos na Ásia, no Oriente e na Europa. A empresa também opera uma estação flutuante de transferência de minério em alto mar, na qual o minério é transferido para navios menores que partem em direção a diversos portos.

A empresa possui uma logística bem estruturada desde a extração do minério até a sua distribuição ao destino final. A necessidade do bom funcionamento e utilização dos seus equipamentos fica evidenciada no processo, de modo que as paradas não programadas devem ser evitadas para não resultarem no descumprimento dos prazos.

Entre os equipamentos apresentados, observa-se que as pás-carregadeiras se tornaram indispensáveis e diretamente atuantes no processo produtivo nas minas, de modo que um trabalho adequado da equipe de manutenção com esses ativos pode resultar em ganhos significativos de produção. Nesse contexto, o Método de Manutenção Centrado em

Confiabilidade pode ser uma boa estratégia para estudar os modos e efeitos das falhas desses equipamentos e propor métodos de manutenção eficazes.

4.3 Descrição do equipamento

As pás-carregadeiras são equipamentos de grande porte, robustos, com pesos operacionais consideráveis e projetados para carregar, transportar e descarregar material rochoso. Esses ativos podem ser montadas sobre pneus ou esteiras e, basicamente, são constituídos de um trator com uma pá em sua dianteira.

Os equipamentos sobre rodas apresentam como vantagens uma maior velocidade de deslocamento e, conseqüentemente, grande mobilidade, bem como a possibilidade de se deslocar por grandes distâncias pelas suas próprias forças. Por outro lado, a tração sob pneus é deficiente em algumas condições, tais como operar em terrenos alagados. Nesse sentido, os ativos de esteira são mais indicados, uma vez que podem trabalhar em qualquer tipo de terreno devido a sua estabilidade e possuem a melhor tração e aderência ao solo, se comparado aos pneus. Esses dois tipos de máquinas são ilustrados nas Figuras 18 e 19.



Figura 18: Pás-carregadeiras sobre pneus.
Fonte: Catálogo CAT (2018)



Figura 19: Pás-carregadeiras sobre esteiras.
Fonte: Catálogo CAT (2018)

Para o bom funcionamento desse ativo, sem que não haja interrupções não programadas durante a jornada de trabalho, é imprescindível que se tenha ações preventivas voltadas para os seus principais sistemas, sendo eles: (i) sistema de válvulas; (ii) sistema elétrico; (iii) sistema de alimentação; (iv) sistema hidráulico; (v) sistema de arrefecimento; e (vi) sistema de lubrificação.

4.3.1 Sistema de válvulas

O sistema de válvulas controla o fechamento e abertura das válvulas nos motores de quatro tempos. Os motores convencionais apresentam duas válvulas por cilindro, sendo uma de admissão e a outra de exaustão, contudo é possível colocar mais do que duas válvulas. Alguns componentes do sistema de válvulas são ilustrados na Figura 20.

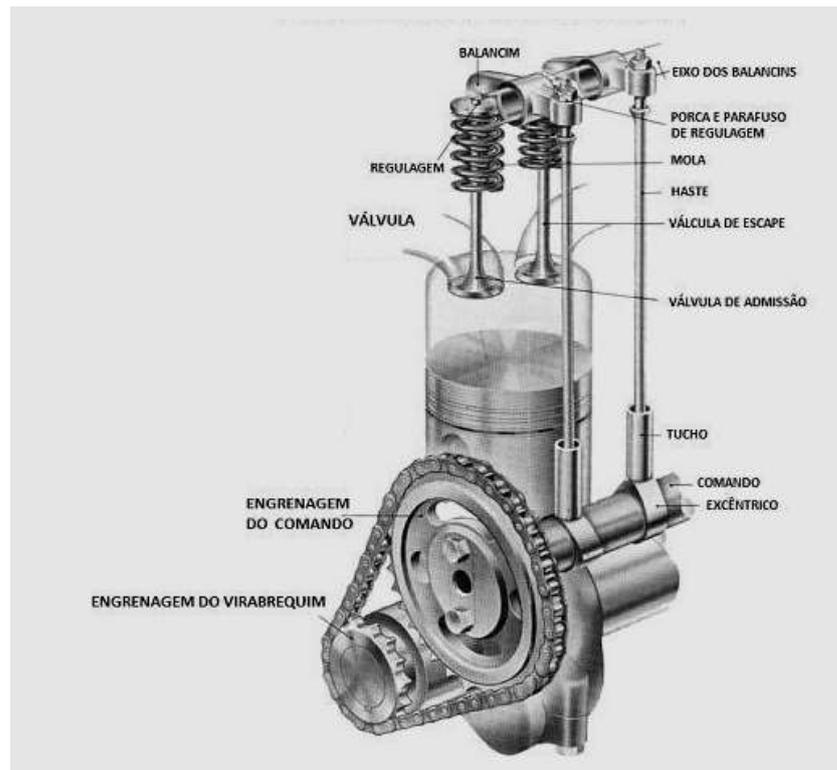


Figura 20: Componentes do sistema de válvulas.
Fonte: Monteiro (2015)

Os componentes desse sistema e suas funções são:

- a) O eixo de cames apresenta ressaltos com a finalidade de transformar o movimento de rotação em movimento linear alternado das válvulas, abrindo-as e fechando-as para admissão e escape dos gases;
- b) Os tuchos ficam em contato direto com os ressaltos a fim de que o movimento do eixo de cames seja transferido para as varetas;
- c) As varetas são responsáveis pela transmissão de movimento entre o eixo de cames, no bloco, e o eixo de balancins, localizado no cabeçote do motor;
- d) Os balancins têm como função inverter o sentido de movimento das varetas;
- e) As molas pressionam as válvulas sobre suas sedes no cabeçote com pressão suficiente para mantê-las fechadas;

f) As válvulas regulam a entrada e a saída de gases na câmara de combustão.

Os motores de combustão interna utilizados nas pás-carregadeiras possuem ignição por compressão, ou seja, são classificados como motores dieséis. Na Figura 21 é ilustrado o princípio básico do ciclo diesel, desde a abertura da válvula de admissão para a entrada de ar no cilindro até a abertura da válvula de escape para saída dos gases resultantes da combustão.

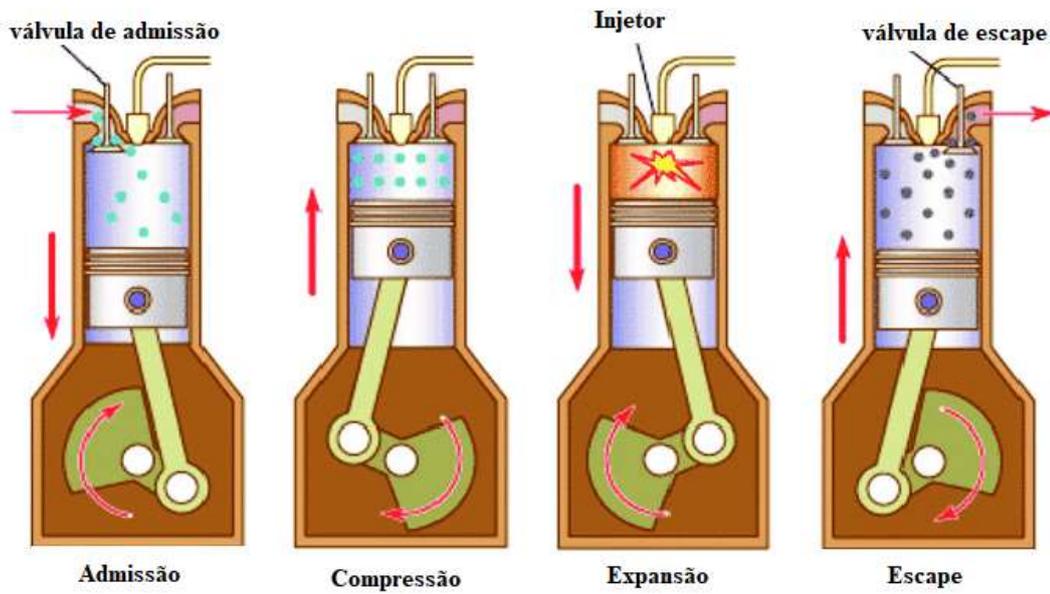


Figura 21: Princípio de funcionamento do motor diesel.
Fonte: Monteiro (2015)

Através da Figura 21 é possível perceber que no primeiro tempo do motor diesel o ar é aspirado, passando pela válvula de admissão que está aberta. Em seguida, as duas válvulas estão fechadas e o pistão sobe e comprime o ar. Pouco antes do ponto de compressão máxima, o combustível é injetado na câmara e o calor inflama a mistura, que se expande e empurra o pistão para baixo. Por fim, o pistão sobe ao mesmo tempo que se abre a válvula de escape.

4.3.2 Sistema elétrico

O sistema elétrico é basicamente constituído por alternador, bateria, motor de partida, alguns componentes presentes no painel eletrônico, cabos de distribuição, lâmpadas, entre outros. A principal função de cada um desses componentes pode ser resumida como:

a) A bateria tem como função principal guardar e acumular energia elétrica suficiente para a partida do motor ou para completar a energia dos outros componentes quando o alternador não gerar carga elétrica suficiente;

b) O alternador possui a função de transformar a energia mecânica fornecida pela rotação da árvore da manivela do motor em energia elétrica, que suprirá a bateria para a partida do motor, iluminação e demais componentes elétricos;

c) O motor de partida tem como função acionar o volante de inércia do motor para iniciar o funcionamento do mesmo, ou seja, são responsáveis por girar o virabrequim até que haja a combustão em um dos cilindros do motor. A energia inicial do motor de partida vem da bateria, que por sua vez é recarregada pelo alternador;

4.3.3 Sistema de alimentação

O sistema de alimentação é formado pelo conjunto de peças que tem a função de fornecer e dosar a mistura de ar e combustível utilizado na alimentação do motor de combustão interna. No ciclo diesel esse sistema é composto por dois circuitos, sendo eles: o circuito de ar e o circuito de combustível. A representação esquemática desses dois circuitos é exibida nas Figuras 22 e 23.

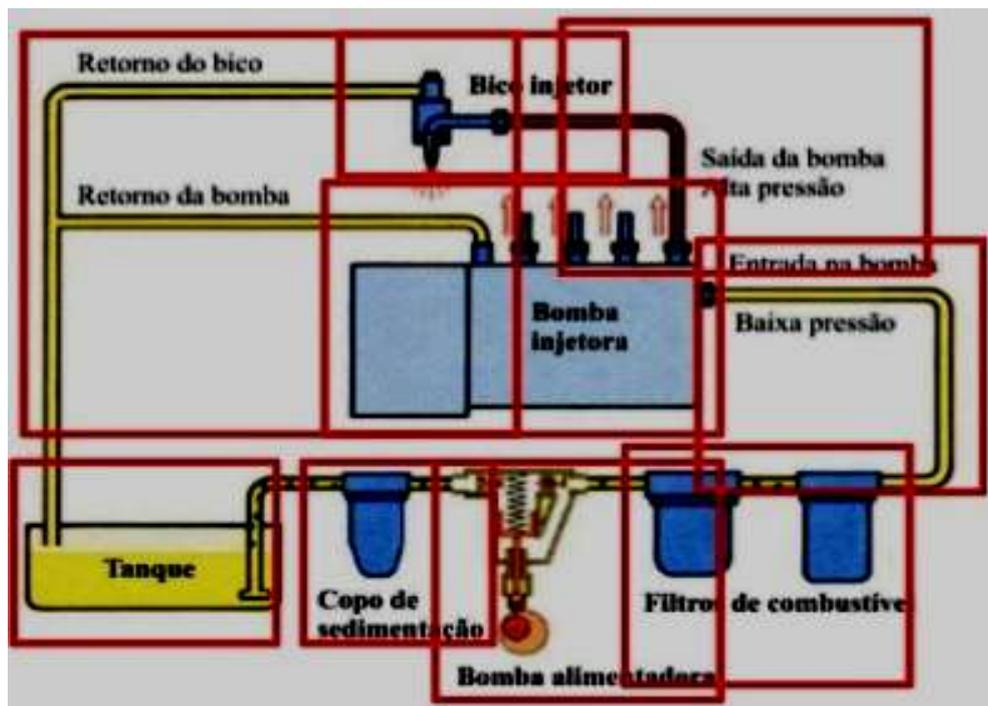


Figura 22: Circuito de combustível do motor diesel.
Fonte: Varella (2012)

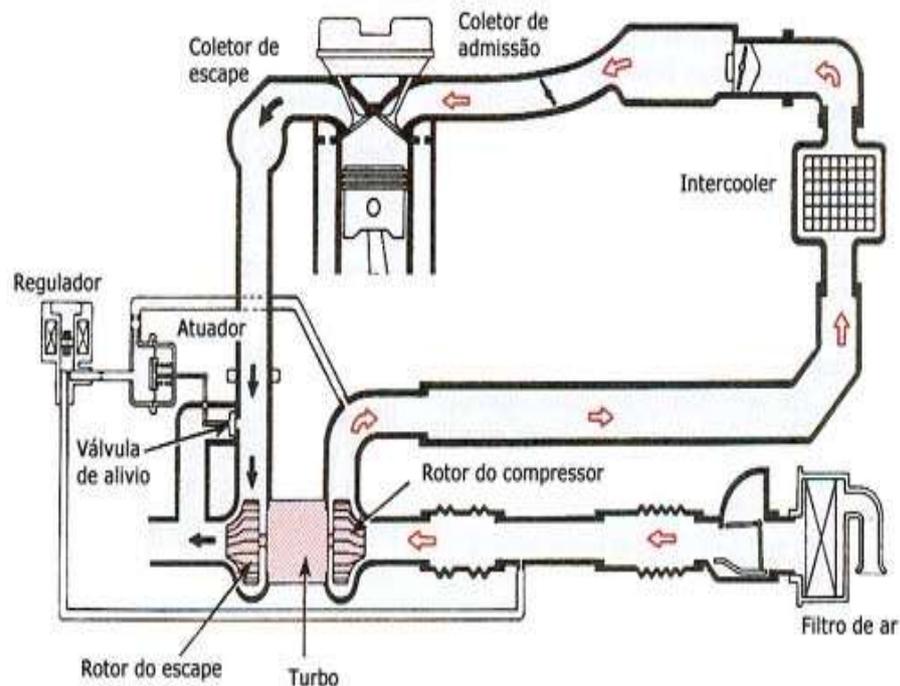


Figura 23: Circuito de ar do motor diesel.
Fonte: Meirelles (2007)

De modo geral, as funções dos componentes do circuito de combustível, ilustrado na Figura 22, e circuito de ar, apresentado na Figura 23, podem ser resumidas como:

- a) O copo de sedimentação tem a função de decantar a água contida no combustível a fim de que a mesma seja drenada através de um parafuso existente em sua parte inferior;
- b) A bomba de combustível ou bomba alimentadora bombeia o combustível do tanque até a bomba injetora;
- c) O filtro de combustível retém as impurezas contidas no combustível para que não atinjam a bomba injetora. Alguns filtros também podem apresentar um sedimentador para decantar a água existente no combustível;
- d) A bomba injetora controla e promove a injeção de combustível sob pressão nos cilindros do motor, ou seja, ela entrega a quantidade adequada de combustível ao fluxo de ar admitido;
- e) Os bicos injetores pulverizam, com extrema precisão, o combustível na câmara de combustão. Seu bom funcionamento e ajuste são fundamentais para obter um bom rendimento dos motores, uma vez que quanto melhor é a pulverização, maior é o rendimento do motor.
- f) Os filtros de ar são formados por elementos filtrantes que impedem que materiais particulados como poeira, por exemplo, entrem na câmara de combustão e cause danos ao

motor. Além disso, a falta de ações preventivas destinadas a esses componentes podem levar a um fluxo variável de ar entrando na câmara de combustão, resultando em explosões pouco consistentes e, conseqüentemente, em um rendimento inconstante do motor. Devido à sua importância, deve-se atentar à periodicidade de troca estabelecida pelo fabricante para esse item;

g) O turbocompressor, também conhecido como turbo, aproveita os gases de escape para injetar ar a uma pressão maior do que a atmosférica na câmara de combustão. Com o aumento da densidade do ar resultante da compressão, mais combustível é acionado à mistura que é encaminhada à câmara de combustão e, dessa maneira, mais trabalho é produzido em cada ciclo, melhorando assim a eficiência do motor.

h) O *intercooler* é usado em motores com turbocompressor. Uma vez comprimido pelo turbocompressor, o ar aumenta a sua temperatura e diminui a sua massa específica, limitando a quantidade de combustível que pode ser injetado nele. A função do *intercooler* é resfriar o ar comprimido para que sua densidade aumente, possibilitando assim introduzir mais combustível e gerar maiores temperaturas e pressões na câmara de combustão, o que faz aumentar o torque e a potência do motor.

4.3.4 Sistema hidráulico

O sistema hidráulico de uma pá-carregadeira consiste basicamente em conjuntos que movimentam a caçamba através da pressurização do óleo hidráulico. Esse sistema atua em locais onde exige trabalho mais bruto e, além disso, suportam cargas extremamente pesadas. O posicionamento desses conjuntos no equipamento é ilustrado nas Figuras 24.



Figura 24: Sistema hidráulico de pás-carregadeiras.
Fonte: CATERPILLAR (2017)

Alguns componentes são facilmente identificados por meio da Figura 24, tais como o reservatório de óleo, o sistema de inclinação e levantamento da caçamba, as mangueiras, entre outros. De modo geral, os componentes básicos de um sistema hidráulico são os apresentados na Figura 25.

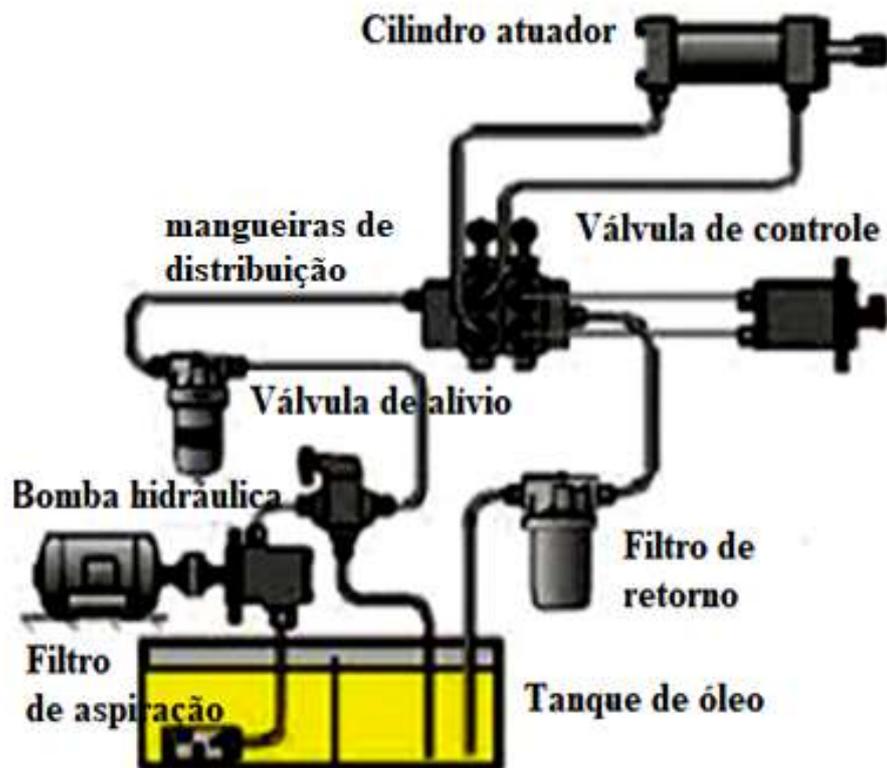


Figura 25: Representação de um sistema hidráulico.
Fonte: Varella (2012)

Os componentes apresentados na Figura 25 e suas funções são:

a) A bomba hidráulica tem a função de transformar a energia mecânica proveniente do motor de acionamento em energia hidráulica, provocando assim a pressurização do óleo hidráulico. Nas pás-carregadeiras o próprio motor de combustão interna aciona a bomba hidráulica;

b) O fluido hidráulico tem a função de transmitir a pressão, lubrificar as partes móveis da instalação, refrigerar, amortecer oscilações de pressões, proteger contra a corrosão e remover impurezas. Na maioria das aplicações esses fluidos são produtos destilados do petróleo;

c) Os reservatórios ou tanques têm a função de armazenar e facilitar a manutenção do fluido utilizado nos sistemas hidráulicos, além de auxiliar na dissipação do calor gerado pelos sistemas;

d) Os filtros são utilizados para separar os resíduos do fluido hidráulico. Para isso, empregam-se meios fibrosos ou granulados.

e) Os atuadores hidráulicos ou cilindros hidráulicos transformam a energia hidráulica em energia mecânica, executando assim movimentos lineares. Nas pás-carregadeiras, esses componentes promovem a inclinação ou levantamento da caçamba.

f) As mangueiras de distribuição geralmente são flexíveis devido ao fato desses componentes absorverem vibrações e possibilitar a mudança de direção de transmissão de força. São utilizadas para movimentação do fluido hidráulico, existindo uma grande quantidade e sendo classificadas de acordo com a pressão máxima que suporta;

g) As válvulas de controle são usadas para várias aplicações, entre as quais estão serviço de liga-desliga, prevenção de vazão reversa, controle e alívio de pressão, controle de vazão direcional, limitação da vazão, entre outros.

4.3.5 Sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento é responsável por controlar a temperatura dos motores de combustão interna através de meios arrefecedores como o ar e a água. O controle da temperatura ocorre porque a água circula nos canais de refrigeração do motor e absorve o excesso de calor gerado nos cilindros. Ao chegar ao radiador, a esse líquido transfere calor para o ar por meio do processo de convecção, reduzindo novamente a sua temperatura. O sistema de arrefecimento é esquematizado na Figura 26.

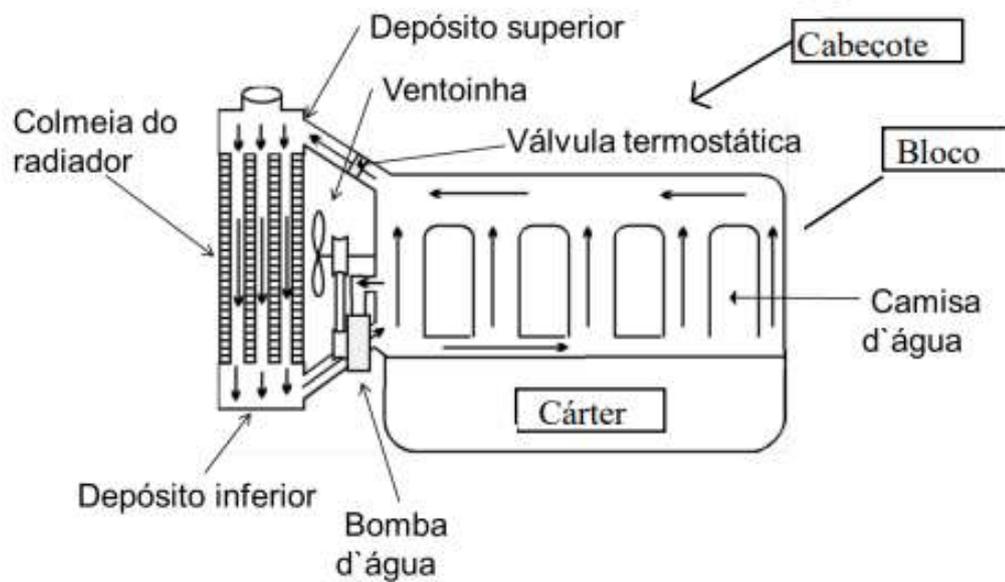


Figura 26: Conjunto de Arrefecimento ar-água.
Fonte: Varella (2012)

As funções dos componentes em destaques na Figura 26 podem ser resumidas em:

- a) A colméia do radiador é responsável por realizar as trocas térmicas entre o fluido de arrefecimento e o ar atmosférico por meio de convecção. Para evitar danos a esse componente, a água utilizada nesse sistema deve ser limpa e livre de agentes químicos corrosivos tais como cloretos, sulfatos e ácidos. De forma geral, a colméia consiste em uma região central constituída de capilares verticais e aletas horizontais para facilitar as trocas térmicas da água com o ar;
- b) A bomba d'água promove à circulação forçada de água nos canais de refrigeração do motor e succiona a água do depósito inferior para o superior;
- c) A válvula termostática controla a temperatura através do fluxo de água do motor para o radiador;
- d) A ventoinha força a passagem de ar através da colméia do radiador, aumentando assim o coeficiente convectivo do ar e melhorando as trocas térmicas através da convecção forçada.

4.3.6 Sistema de Lubrificação

O sistema de lubrificação tem como função distribuir o óleo lubrificante entre as partes móveis do motor a fim de diminuir o desgaste abrasivo, o ruído e auxiliar no arrefecimento do motor. O princípio de funcionamento do conjunto de lubrificação é esquematizado por meio da figura 27.

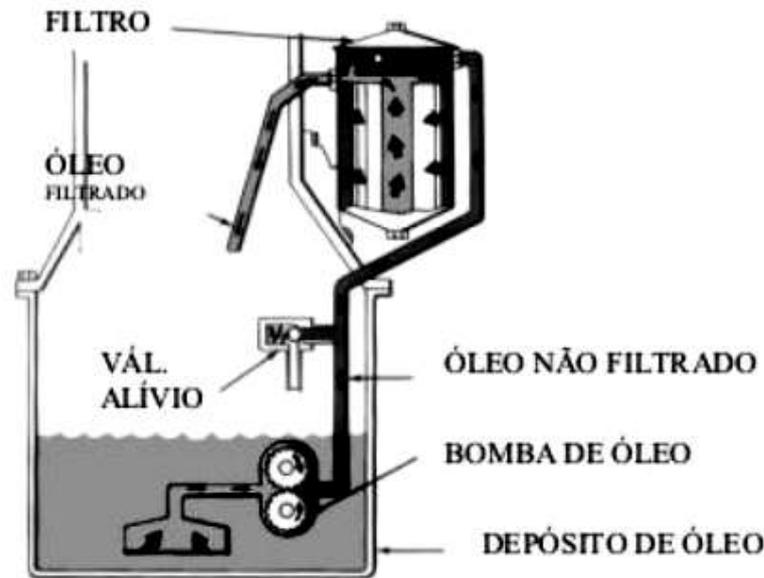


Figura 27: Representação esquemática do sistema de lubrificação.
Fonte: Varella (2012)

A função de cada um dos componentes ilustrados na Figura 27 pode ser resumida em:

a) O depósito de óleo representa o cárter do motor, sendo o local onde o óleo lubrificante fica depositado até ser puxado pela bomba de óleo. Sua função é manter certo nível de óleo de modo a garantir a lubrificação do motor e a resfriar o óleo;

b) A bomba de óleo geralmente fica localizada no reservatório de óleo lubrificante, sendo acionada pelo eixo do comando de válvulas ou pelo eixo de manivelas. Sua função é distribuir óleo lubrificante, em determinada pressão, as diversas partes do motor. Em sua maioria, essas bombas são constituídas por um par de engrenagens dentro de uma caixa fechada.

c) As galerias são as passagens pelas quais o óleo é bombeado, no interior do motor, até as partes a serem lubrificadas. Quando o óleo passa por essas galerias ele também auxilia no arrefecimento do motor;

d) O filtro de óleo fica localizado na parte externa do motor a fim de facilitar a sua troca. Sua função é reter partículas indesejadas visando promover a limpeza do óleo lubrificante, uma vez que essas reduzem significativamente a vida dos motores. Por esse motivo, esses filtros devem ser sempre trocados de acordo com a recomendação do fabricante;

e) A válvula de alívio tem como objetivo aliviar que a pressão atinja valores acima do recomendado;

f) Alguns sistemas apresentam radiador de óleo, que resfria o óleo lubrificante do motor.

Segundo Garcia (2010), para evitar falhas nos sistemas apresentados é imprescindível que o operador, antes do início de cada operação, faça as seguintes verificações:

- i. Nível de óleo do cárter e completar se necessário;
- ii. Bateria, água e cabos. É necessário completar o nível de água destilada, verificar se a água cobre as placas, movimentar os cabos e observar se estão soltos ou danificados a fim de avisar a equipe de manutenção diante de qualquer irregularidade;
- iii. Nível de óleo hidráulico e completar se necessário;
- iv. Nível de combustível, uma vez que a falha de combustível nos motores diesel acarreta sérios problemas de funcionamento;
- v. Pressão e as condições dos pneus;
- vi. Condições do radiador, realizar a limpeza e completar o nível de água com o motor em funcionamento, se necessário.

Para auxiliar a manutenção, muitas irregularidades no funcionamento do ativo podem ser identificadas através do painel de instrumentos apresentado nas Figuras 28 e 29.

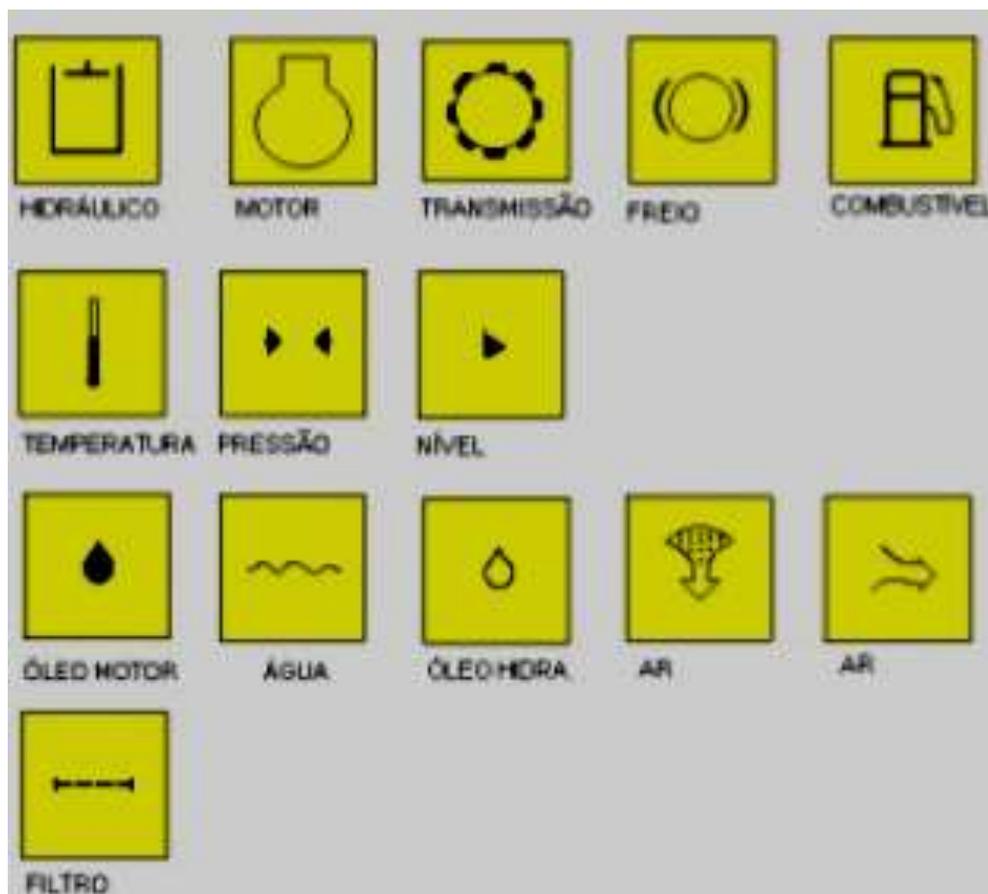


Figura 28: Simbologia universal do painel de instrumentos de uma pá-carregadeira.
Fonte: Silva (2017)



Figura 29: Simbologia universal do painel de instrumentos de uma pá-carregadeira.
Fonte: Silva (2017)

Nota-se pelas Figuras 28 e 29 que os painéis de instrumentação permitem identificar anomalias em diversos sistemas, conjuntos e componentes, mas, para isso, o operador deve estar devidamente capacitado a ponto de realizar simples manutenções autônomas, inspeções visuais e comunicar ao departamento de manutenção qualquer irregularidade encontrada.

4.4 Aplicação do Programa MCC nas pás-carregadeiras

A análise da aplicação do Método de Manutenção Centrado em Confiabilidade foi executada a partir de um sistema de pás-carregadeiras e o estudo de confiabilidade desses equipamentos foi realizado a partir dos dados de paradas não programadas cedidos pela empresa do setor de mineração e do *software* Weibull++ de Realiasoft.

O *software* Weibull++ fornece um conjunto de ferramentas para análise dos ciclos de vida de confiabilidade. Além disso, esse *software* inclui todas as principais distribuições de ciclo de vida (incluindo o modelo Weibull e o modelo Weibull misto, bem como os modos Exponencial, Lognormal, Normal, Gama Generalizada, Gama, entre outras) e um assistente de distribuição que ajuda a selecionar o melhor ajuste para um determinado conjunto de dados.

Os dados analisados estão no intervalo compreendido entre maio de 2013 a dezembro de 2014 e contém informações importantes sobre as paradas não programadas dos ativos. Parte da planilha pode ser observada por meio das Figuras 30, 31 e 32.

DataIni	DataFim	Duração	Descrição	Comentário
23/05/2015 20:26	23/05/2015 20:46	0,239999995	MANUTENCAO NAO PROGRAMADA	APAGOU O MOTOR, RETIRAR ENTRADA DE AR.
08/06/2015 15:01	08/06/2015 18:43	3,599999905	MANUTENCAO NAO PROGRAMADA	PRINCÍPIO DE INCÊNDIO EM UMA CONEXÃO
17/05/2015 09:29	17/05/2015 16:29	6,960000038	MANUTENCAO NAO PROGRAMADA	CORRIGIR FALHA NO MOTOR
08/06/2015 02:39	09/06/2015 00:03	21,36000061	MANUTENCAO NAO PROGRAMADA	ALTA TEMPERATURA DO LÍQUIDO DE
02/09/2010 07:50	02/09/2010 19:00	11,27999973	MANUTENCAO NAO PROGRAMADA	BAIXO RENDIMENTO
07/06/2015 13:23	08/06/2015 14:48	25,44000053	MANUTENCAO NAO PROGRAMADA	BAIXO RENDIMENTO
03/09/2010 07:32	03/09/2010 08:29	0,959999979	MANUTENCAO NAO PROGRAMADA	SEM PARTIDA

Figura 30: Ilustração da planilha Excel disponibilizada pela empresa – parte 1.

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Eqpto	Frota	Grupo	Modelo	Fabricante	LocComponente
PM6226	CAT 988H	Carregadeira	CAT 988H	Caterpila	Motor de combustão
PM6521	CAT 990 II	Carregadeira	CAT 990 II	Caterpillar	Motor de combustão
PM6517	CAT 990 II	Carregadeira	CAT 990 II	Caterpillar	Motor de combustão
PM3602	CAT 992 GU	Carregadeira	CAT 992 G	Caterpillar	Motor de combustão
PM3001	CAT 990 II	Carregadeira	CAT 990 II	Caterpillar	Motor de combustão
PM3604	CAT 992 GU	Carregadeira	CAT 992 G	Caterpillar	Motor de combustão
PM3005	CAT 990 II	Carregadeira	CAT 990 II	Caterpillar	Motor de combustão

Figura 31: Ilustração da planilha Excel disponibilizada pela empresa – parte 2.

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Componente	Falha	Causa	Efeito	Responsavel
Combustível	Bomba de escorva	Obstrução	Ajustar	307355 - PTCHER CORDEIRO FONTES
Cabecote	Vedação	Fixação	Fixar	307355 - PTCHER CORDEIRO FONTES
Combustível	Injetor cilindro 04	Travamento	Trocar	114181 - FABIANO CESAR DE OLIVEIRA
Turbocompressor alta dianteira	Turbocompressor	Danificado	Trocar	513712 - ELISIO GERALDO FONSECA
Combustível	Módulo ECM	Danificado	Trocar	006213 - Paulinelli Santos Rocha
Combustível	Filtro	Sujeira	Limpar	229666 - FLAVIO MOISES DA SILVA
Elétrico	Bateria	Carga	Carregar	393561 - Gleidston dos Santos

Figura 32: Ilustração da planilha Excel disponibilizada pela empresa – parte 3.

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Nota-se, por meio da tabela ilustrada na Figura 30, que a empresa não utiliza planilhas no padrão FMEA para o registro dos dados. No modelo adotado é possível encontrar descrições sobre as datas de início e fim da ocorrência, a duração, um breve comentário, assim como a identificação dos sistemas, conjuntos e componentes de cada equipamento que falhou. Também é possível identificar nos registros: a frota, o modelo, o fabricante, a causa da falha, o efeito e o profissional responsável pela manutenção, conforme apresentado nas figuras 31 e 32.

Em outras palavras, embora a planilha utilizada pela empresa não possua todos os itens utilizados na técnica de confiabilidade FMEA, ela possui os dados básicos que devem ser

registrados para que estudos formais de confiabilidade sejam realizados, conforme apresentado por Fogliatto e Ribeiro (2009) e abordado no tópico 2.5.2 da revisão bibliográfica.

Os dados analisados continham registros sobre as falhas de seis frotas de pás-carregadeiras. Essas informações estavam listadas de modo aleatório, por esse motivo o estudo se iniciou com o agrupamento dos registros de acordo com a frota. O objetivo dessa ação foi contabilizar o número de ocorrências para cada frota e as datas do primeiro e último registro de cada uma delas, resultando na Tabela 3.

Tabela 3: Tempo de operação e número de ocorrências de cada frota.

Frota	Número de ocorrências	Data do primeiro dado	Data do último dado	Tempo aproximado de operação
CAT 994 D	3602	09/09/2010 10:16	12/11/2014 22:52	4 anos e 2 meses
CAT 990 II	1318	01/09/2010 17:34	06/07/2015 14:41	4 anos e 10 meses
LET L1350	760	02/08/2013 16:01	04/07/2015 10:22	1 ano e 11 meses
CAT 992 GU	694	23/09/2010 07:32	08/07/2015 16:45	4 anos e 9 meses
CAT 988H	434	21/05/2013 19:01	08/07/2015 03:56	2 anos e 1 mês
CAT 994 DU	351	03/09/2010 09:38	04/12/2013 14:05	3 anos e 3 meses
Total de frotas	7277			

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

De acordo com a Tabela 3, a Frota CAT 994 D é a que apresenta maior número de ocorrências, seguida pelas frotas CAT 990 II, LET L1350, CAT 992 GU, CAT 998 H e CAT 994 DU, respectivamente. Além disso, a Frota CAT 990 II é a que apresenta maior tempo de operação, seguida por CAT 992 GU, CAT 994 D, CAT 994 DU, CAT 988 H e LET L1350, nessa ordem.

Os gráficos apresentados nas Figuras 33 e 34 foram construídos para facilitar a análise dos dados registrados na Tabela 3.

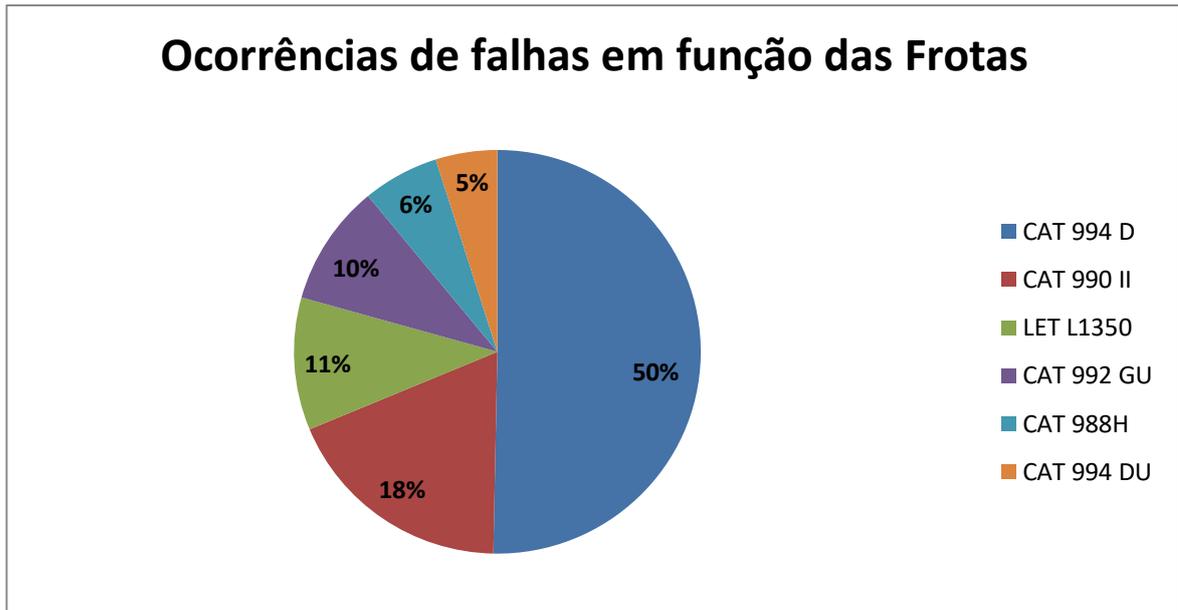


Figura 33: Porcentagem de ocorrência de falhas em função das Frotas.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

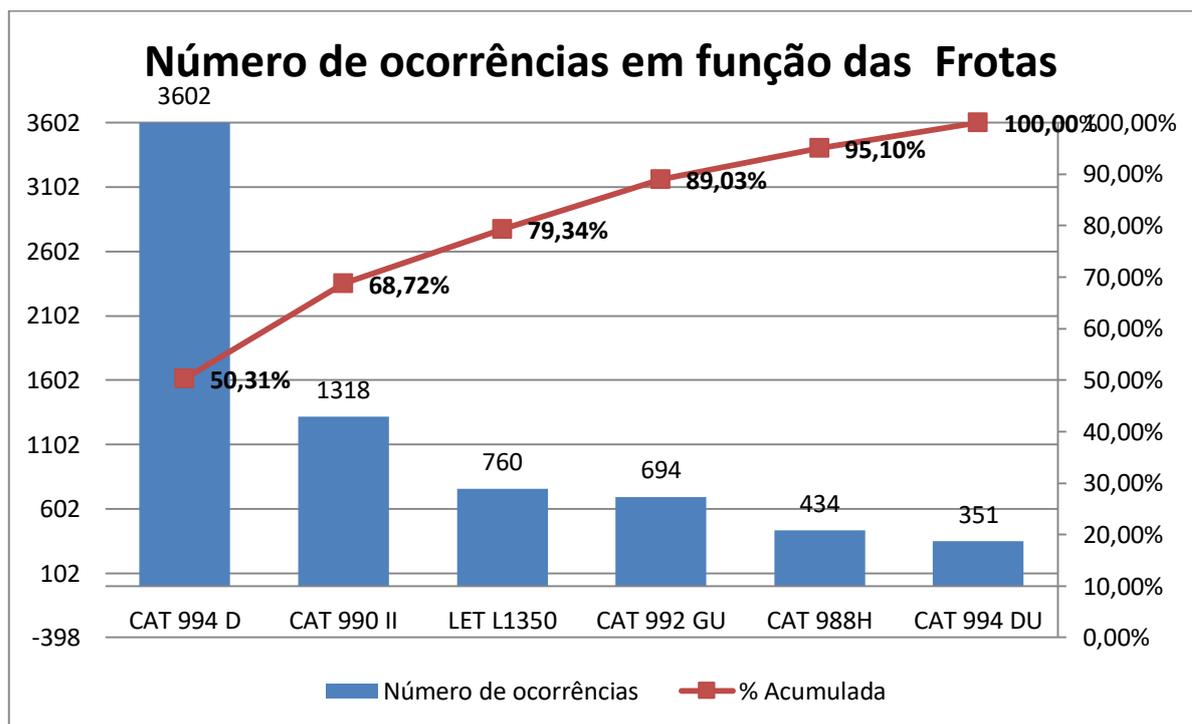


Figura 34: Diagrama de Pareto para o número de ocorrências em função das Frotas.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Constata-se por meio do gráfico da Figura 33, que as frotas CAT 994 D e CAT 990 II são as que apresentam maior porcentagem de ocorrência de falhas. Além disso, pelo Diagrama de Pareto ilustrado na Figura 34, é possível perceber que as falhas dessas duas frotas equivalem a 68,72% do total de ocorrências registradas. Diante disso, essas frotas foram selecionadas para

o estudo de confiabilidade, uma vez que suas falhas representam, aproximadamente, 70 % do total de ocorrências.

Aprofundando os estudos, os registros referentes às duas frotas selecionadas foram utilizados para construir os gráficos apresentados nas Figuras 35 e 36. Esses gráficos representam os perfis de ocorrências dos sistemas mecânicos de cada uma delas e foram construídos para que houvesse a identificação dos sistemas mais críticos.

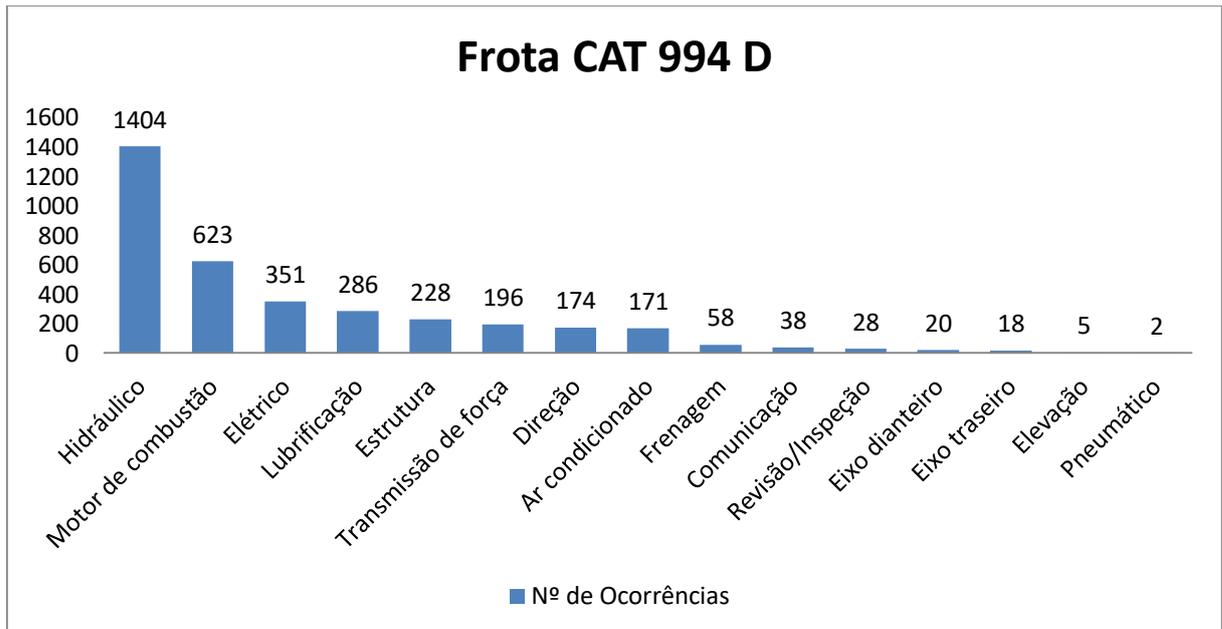


Figura 35: Número de ocorrências em função dos sistemas para a Frota CAT 994 D.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

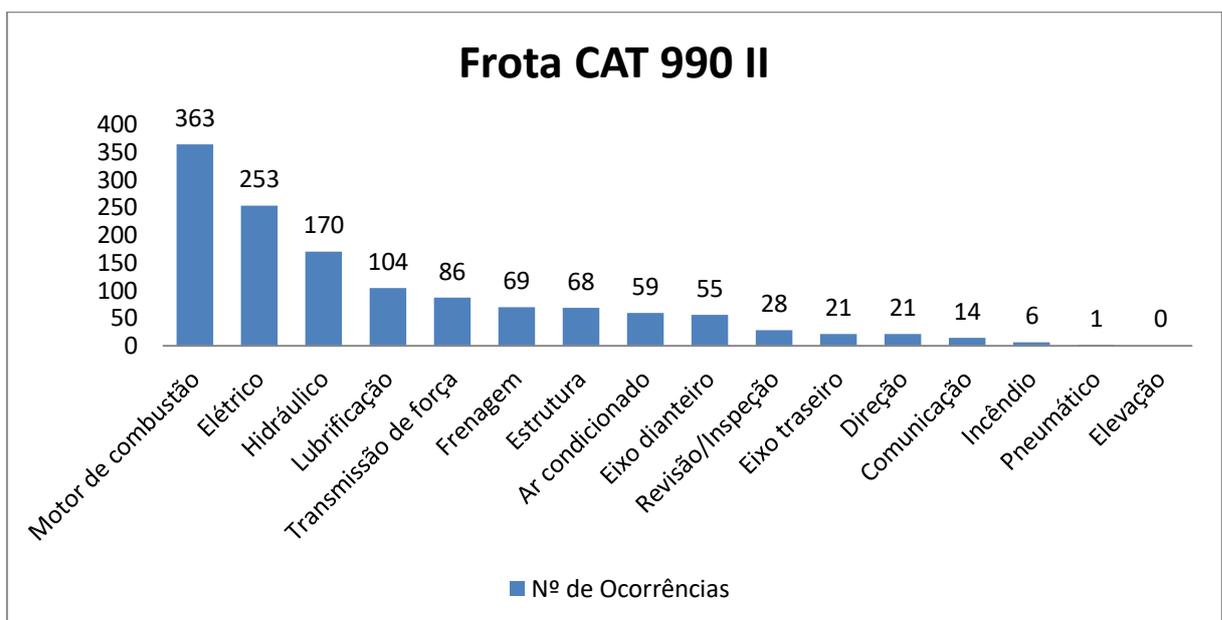


Figura 36: Número de ocorrências em função dos sistemas para a Frota CAT 990 II.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

É possível observar pelas Figuras 35 e 36 que as duas frotas possuem uma tendência comum de falhas, sendo que os maiores números de ocorrências estão para os sistemas: Hidráulico, Motor de Combustão, Elétrico, Lubrificação, Frenagem, Estrutura e Ar Condicionado.

A fim de selecionar uma amostra contendo duas pás-carregadeiras (uma de cada frota) e realizar a análise estatística a partir de um subconjunto de tamanho manejável, as frotas CAT 994 D e CAT 990 II foram agrupadas em equipamentos. A Frota CAT 994 D era composta por sete equipamentos, cujos códigos vão de PM3108 a PM3114, enquanto a Frota CAT 990 II possuía 10 equipamentos, com códigos PM 3001 a PM 3005 e PM PM6517 a PM 6521.

A seleção dos dois ativos ocorreu por meio de amostragem intencional, sendo que os filtros utilizados foram: (i) equipamentos com um perfil de ocorrências próximo ao apresentado pela frota a qual ele pertence, conforme ilustrado nos gráficos das Figuras 35 e 36; e (ii) equipamentos que apresentassem maior número de ocorrências de falhas na frota.

Para atender ao segundo filtro estabelecido, os gráficos apresentados nas Figuras 37 e 38 foram construídos com o propósito de identificar o número de falhas de cada equipamento da frota e selecionar o de maior número de ocorrências.

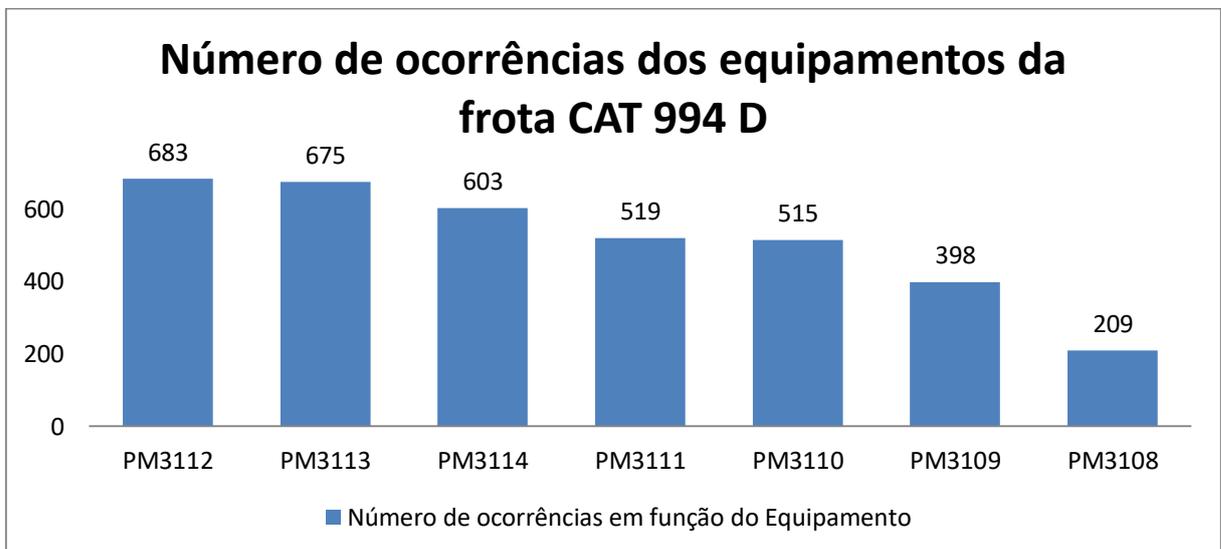


Figura 37: Número de ocorrência dos equipamentos pertencentes à frota CAT 994 D.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

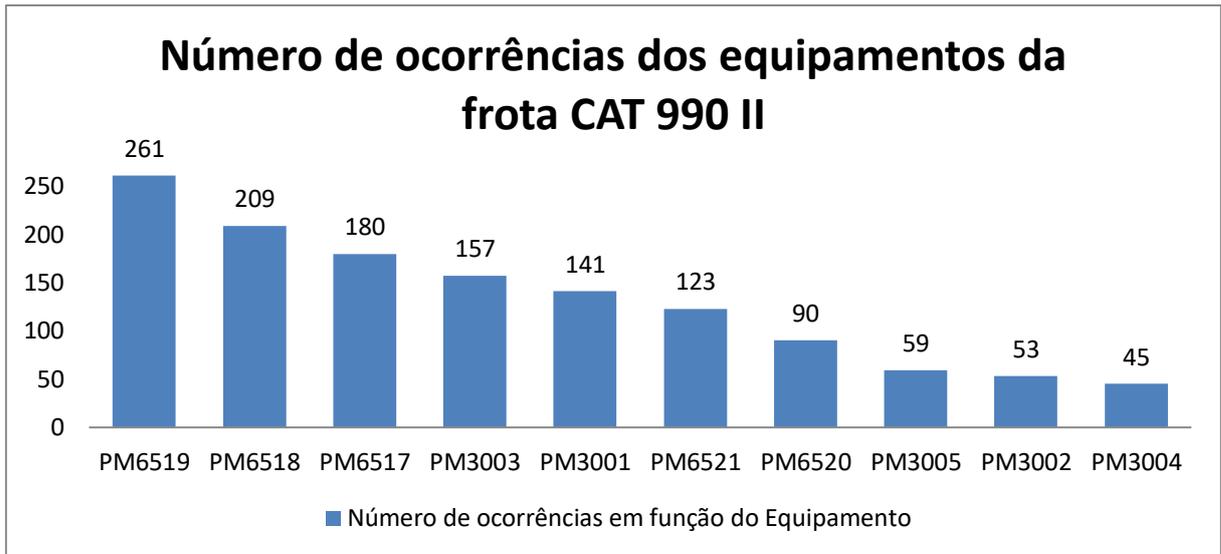


Figura 38: Número de ocorrência dos equipamentos pertencentes à frota CAT 990 II.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Por meio da análise dos gráficos apresentados nas Figuras 37 e 38 é possível verificar que os ativos PM3112 da frota CAT 944 D e PM6519 da frota CAT 990 II são os que apresentam maior número de ocorrências, com 683 e 261 falhas, respectivamente.

Os gráficos ilustrados nas Figuras 39 e 40 relacionam os sistemas e o número de ocorrências das duas pás-carregadeiras PM3112 e PM6519. Foram construídos para verificar se esses equipamentos atendiam ao primeiro filtro estabelecido, ou seja, se apresentavam um perfil de falhas próximo ao da sua frota.

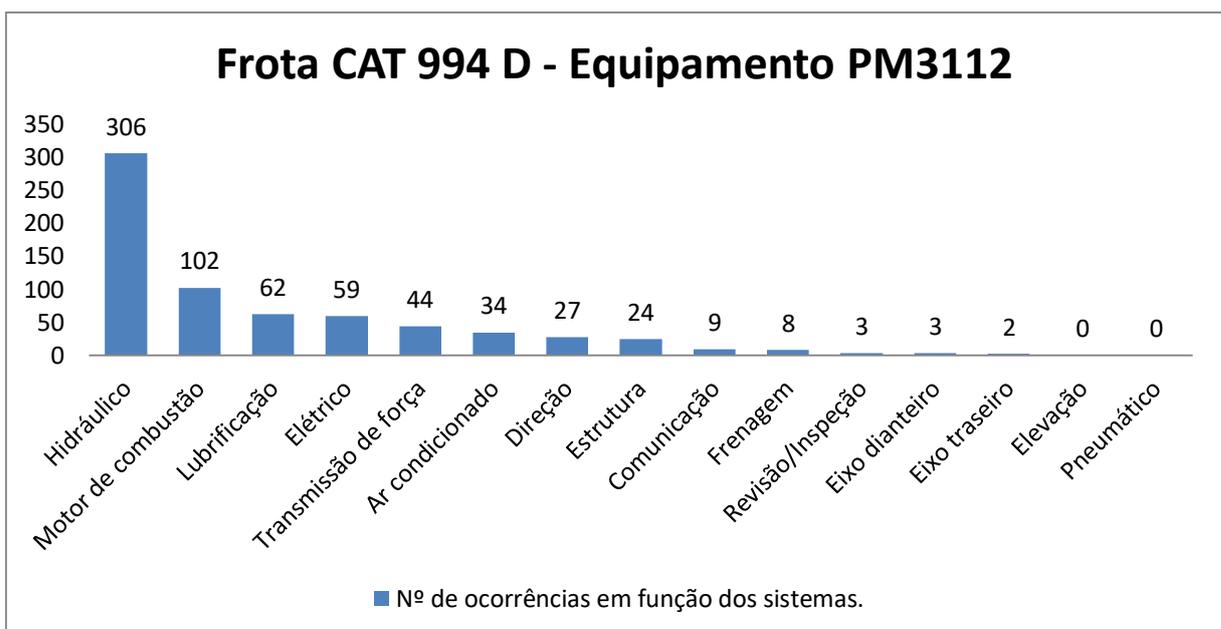


Figura 39: Ocorrências nos sistemas do equipamento PM3112 da Frota CAT 994 D.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

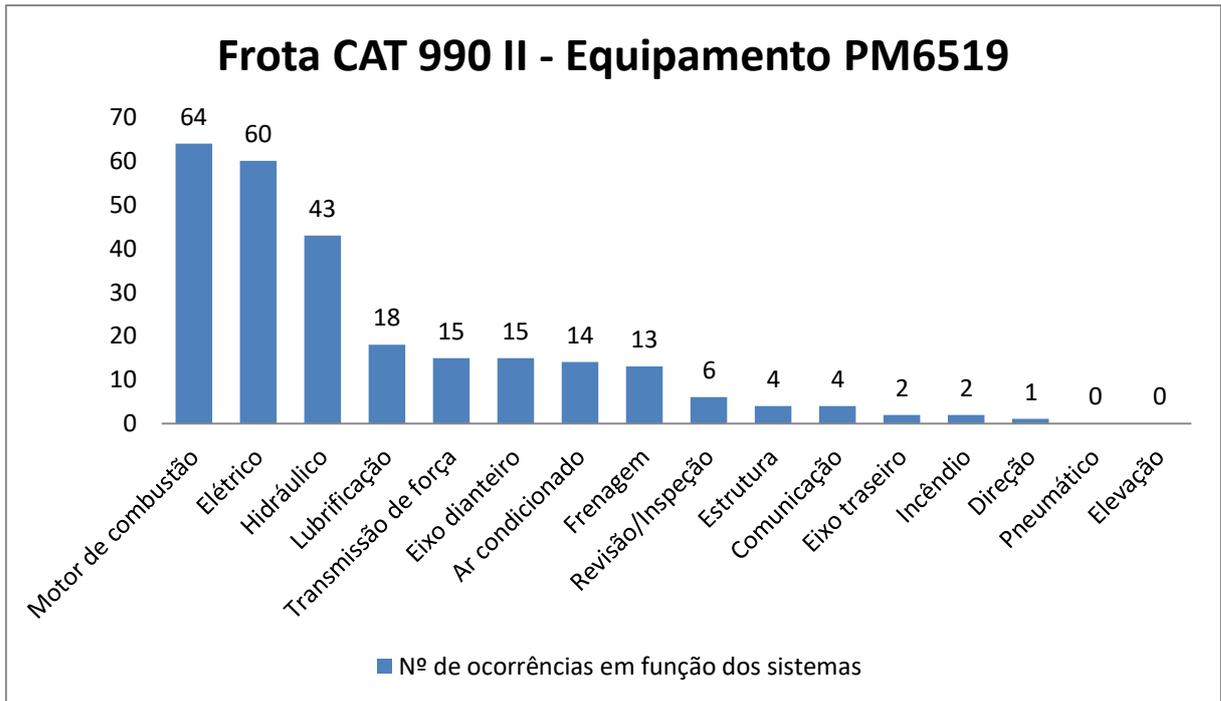


Figura 40: Ocorrências nos sistemas do equipamento PM6519 da Frota CAT 990 II.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Observa-se que os ativos selecionados seguem a tendência total dos equipamentos e apresentam maior número de falhas nos mesmos sistemas registrados para a frota a qual ele pertence. Essa semelhança pode ser constatada ao comparar as Figuras 35, 36, 39 e 40.

Diante disso, as pás-carregadeiras PM3112 e PM6519 atenderam aos dois filtros estabelecidos para a seleção da amostra e foram empregadas como unidades amostrais, isto é, foram utilizadas para representar os elementos da população sobre os quais as medidas de interesse seriam observadas, a fim de generalizar as conclusões para toda população de pás-carregadeiras da empresa.

Após definir a amostra, iniciou-se a análise dos dados pertencentes a ela que estavam nas planilhas da empresa. A fim de facilitar o estudo, essa planilha foi reorganizada em função da frota, equipamento, data início, data fim, duração, sistema, conjunto, componente, causa e efeito, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Dados disponíveis na planilha sobre os equipamentos.

Frota	Eqpto	Data Início	Data Fim	Duração (horas)	Sistema	Conjunto	Item	Causa	Efeito
CAT 994 D	PM3112	09/09/2010 10:16	09/09/2010 11:16	1,01	Lubrificação	Reservatório de graxa	Tambor de graxa	Danificado	Reformar
CAT 994 D	PM3112	21/09/2010 09:02	21/09/2010 10:06	1,07	Motor de combustão	Combustível	Bomba de transferência	Obstrução	Desobstruir
CAT 994 D	PM3112	23/09/2010 02:02	23/09/2010 17:40	15,63	Ar condicionado	Compressor	Correia	Rompimento	Alinhar
CAT 994 D	PM3112	27/09/2010 10:15	27/09/2010 10:39	0,39	Hidráulico	Tanque de óleo	Óleo	Nível	Completar
CAT 994 D	PM3112	04/10/2010 07:30	04/10/2010 09:19	1,81	Hidráulico	Grupo válvula	Tubulação	Vazamento	Trocar
CAT 994 D	PM3112	06/10/2010 23:23	06/10/2010 23:39	0,28	Hidráulico	Tanque de óleo	Óleo	Nível	Completar
CAT 994 D	PM3112	10/10/2010 23:41	11/10/2010 03:12	3,51	Ar condicionado	Compressor	Correia	Ajuste	Ajustar
CAT 994 D	PM3112	12/10/2010 01:55	12/10/2010 02:16	0,36	Hidráulico	Tanque de óleo	Óleo	Nível	Completar
CAT 994 D	PM3112	13/10/2010 07:14	13/10/2010 08:23	1,15	Motor de combustão	Motor de combustão	Bateria	Carga	Carregar
CAT 994 D	PM3112	19/10/2010 07:27	19/10/2010 07:52	0,41	Hidráulico	Tanque de óleo	Óleo	Nível	Completar
CAT 994 D	PM3112	31/10/2010 10:15	31/10/2010 23:13	12,96	Hidráulico	Tubo de sucção	Tubo de sucção	Vedação	Recuperar

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Os dados ilustrados na Tabela 4 possibilitaram o cálculo de dois parâmetros necessários para a construção das curvas de confiabilidade dos ativos, sendo eles o Tempo Entre Falhas e o Dado Suspenso. Vale ressaltar que o Tempo Entre Falhas corresponde ao tempo em que o equipamento operou, em horas, desde que foi liberado de uma manutenção corretiva até voltar a parar por avarias no mesmo sistema, conjunto ou componente e o Dado Suspenso representa o intervalo de tempo, também em horas, desde que o ativo voltou a operar pela ultima vez até o dia escolhido para realização do estudo.

O dia do estudo foi 26/09/2018 às 19h50min, sendo essa data e hora utilizada para o cálculo do Dado Suspenso. A data do primeiro e último registro dos equipamentos, assim como os valores dos Dados Suspenso, são apresentados por meio da Tabela 5.

Tabela 5: Registro da planilha sobre os dois equipamentos selecionados para o estudo.

Equipamento	Frota	Número de ocorrências	Data do primeiro dado	Data do último dado	Dado Suspenso (h)
PM3112	CAT994D	683	09/09/2010 10h16min	04/01/2014 16h12min	41427,63
PM6519	CAT990II	261	19/08/2011 18h25min	06/07/2015 14h24min	28277,43

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Após calcular o Dado Suspenso e os valores de Tempo Entre Falhas de cada equipamento, construíram-se suas Curvas de Confiabilidade, apresentadas nas Figuras 41 e 42, por meio do *software* Weibull++. Para o cálculo do Tempo Entre Falhas utilizou-se o *software* Excel.

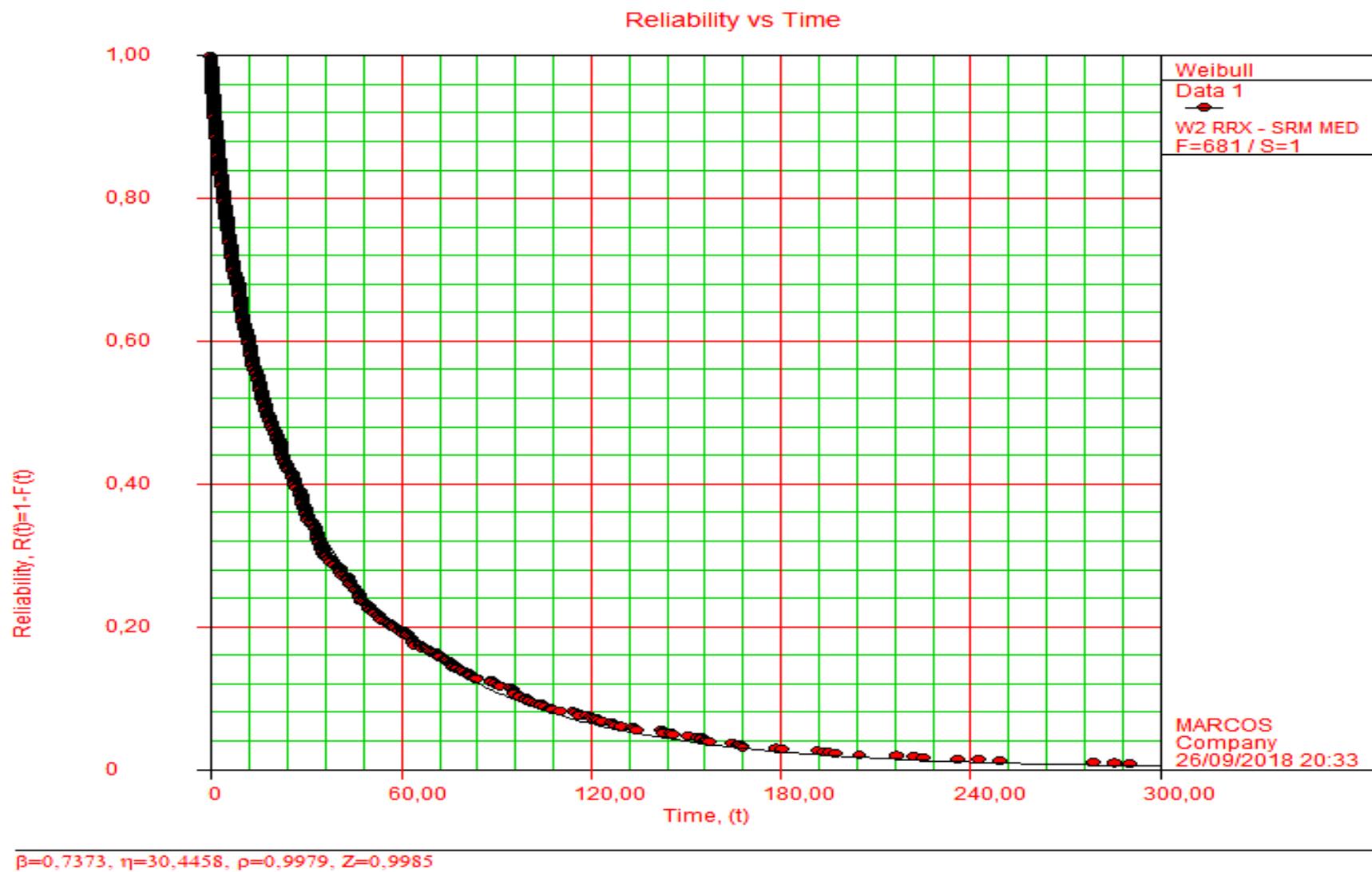


Figura 41: Curva de confiabilidade para o Equipamento PM3112.
Fonte: Pesquisa Direta (2018).

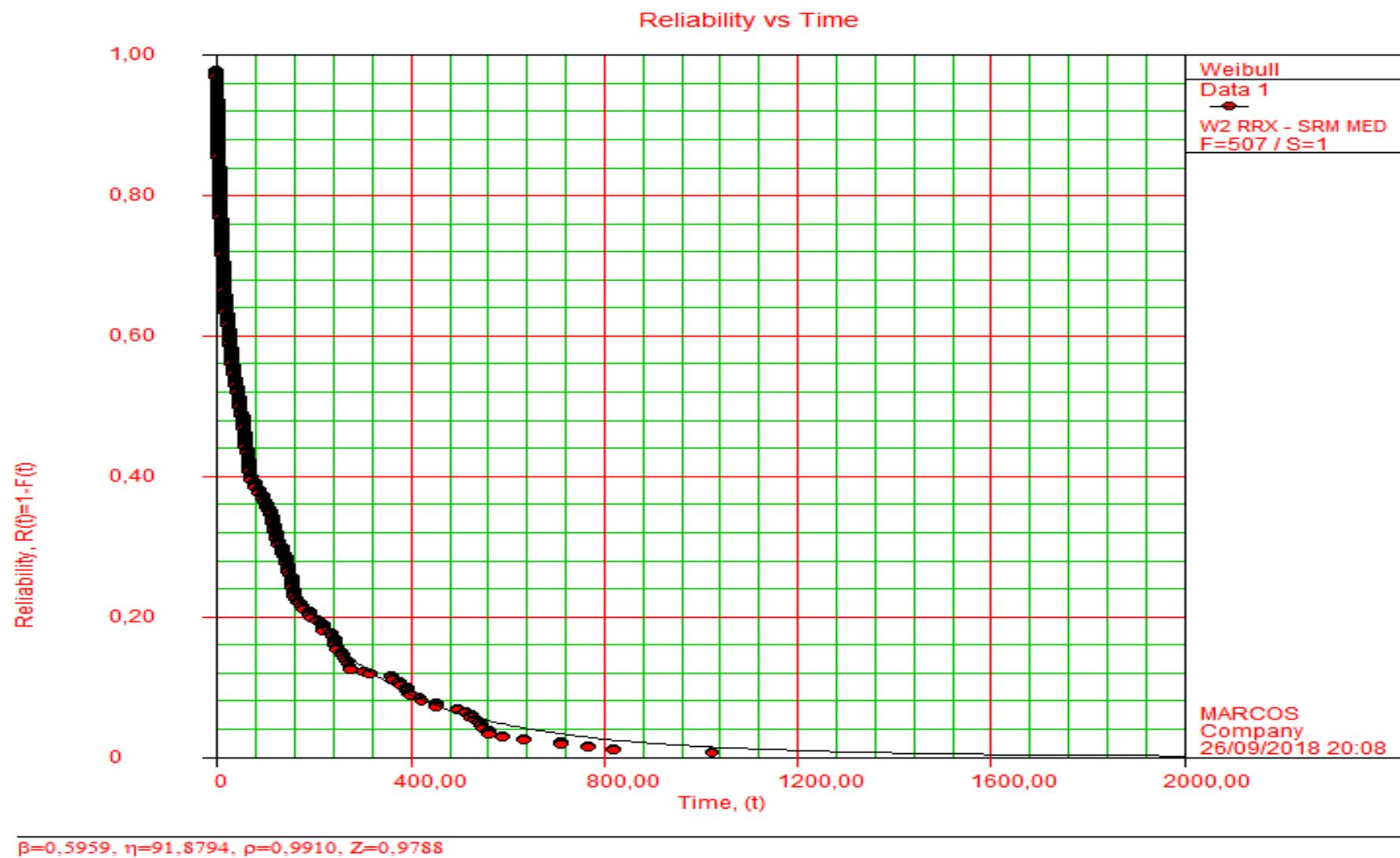


Figura 42: Curva de Confiabilidade para o Equipamento PM6519.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Verifica-se, por meio dos gráficos, Figuras 41 e 42, uma queda acentuada da Confiabilidade das duas pás-carregadeiras à medida que o intervalo de tempo de operação aumenta. Observa-se ainda que o parâmetro de forma (β) das duas curvas é menor do que um, resultando em Funções de Confiabilidade estritamente decrescente para os dois ativos, de modo que os equipamentos podem estar na fase de mortalidade infantil e as ocorrências dessas falhas podem ser reduzidas pela substituição de suas peças ou sistemas por outros mais confiáveis. (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009; KARDEC E NASCIF, 2009).

Alguns valores encontrados para a Confiabilidade desses ativos, em função de distintos intervalos de operação, são indicados na Tabela 6.

Tabela 6: Confiabilidade dos Equipamentos para alguns intervalos de tempo de operação.

INTERVALO DE OPERAÇÃO (h)	EQUIPAMENTOS	
	PM3112	PM6519
50	23,62 %	48,36 %
100	9,03 %	33,83 %
200	1,82 %	19,72 %
400	0,13 %	8,73 %
500	0,04 %	6,2 %

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

A análise da Tabela 6 permite concluir que as pás-carregadeiras apresentam baixa Confiabilidade mesmo para intervalos de tempos iguais a 50 horas de operação. A probabilidade de que o equipamento PM3112, nas condições em que opera, desenvolva sua função sem falhar durante 50 horas é de apenas 23,62%, enquanto o equipamento PM6519 apresenta probabilidade igual a 48,36%. Isto é, ambos apresentam uma probabilidade maior de falhar do que funcionar corretamente durante esse tempo de operação, o que é indesejável devido à importância desse ativo para a produção.

Além disso, observou-se que as confiabilidades dos equipamentos reduziram significativamente quando o intervalo de tempo de operação requerido é maior. O equipamento PM6519, por exemplo, nas condições originais de operação, têm apenas 6,2% de probabilidade de funcionar sem falhar por 500 horas, enquanto o equipamento PM3112 tem probabilidade praticamente nula.

Buscando analisar as falhas, o estudo se aprofundou através da identificação dos sistemas das pás-carregadeiras que contribuíam de forma mais significativa para as baixas confiabilidades encontradas. Para isso, foram construídas curvas que avaliavam a

Confiabilidade de cada sistema do ativo, obtendo assim os dados registrados na Tabela 7 e o gráfico apresentado na Figura 43.

Tabela 7: Confiabilidade dos Sistemas em função do equipamento.

SISTEMAS	EQUIPAMENTOS			
	PM3112		PM6519	
	Tempo de operação		Tempo de operação	
	100 h	200 h	100 h	200 h
Motor de Combustão	5,88 %	0,82 %	53,88 %	42,66 %
Hidráulico	6,21 %	0,94 %	64,70 %	54,30 %
Ar Condicionado	19,63 %	5,38 %	77,12 %	70,79 %
Elétrico	30,87 %	14,57 %	60,41 %	48,82 %
Lubrificação	63,42 %	50,56 %	92,11 %	88,61 %
Estrutura	84,20 %	75,92 %	99 %	99 %
Frenagem	94,53 %	91,09 %	68,50 %	61,25 %

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

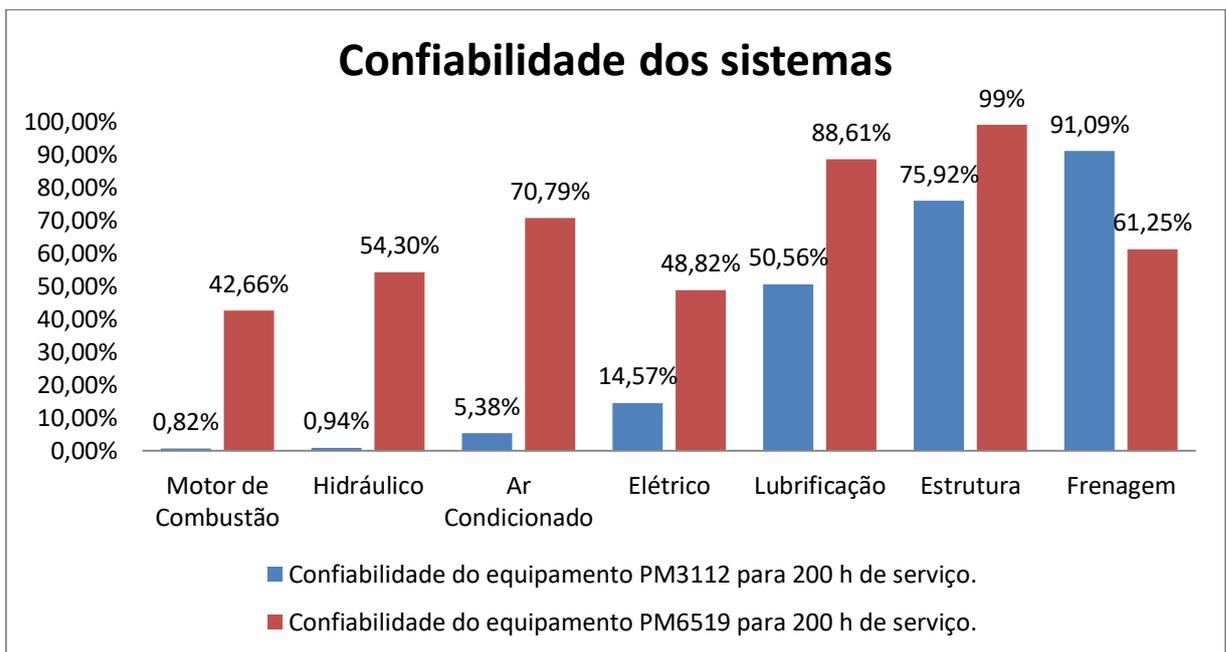


Figura 43: Confiabilidade dos sistemas motor de combustão e hidráulico para 200 horas de operação nas condições originais de operação.

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Analisando a Tabela 7 e o gráfico apresentado na Figura 43, é possível concluir que os sistemas motor de combustão e hidráulico do equipamento PM3112 apresentam valores de confiabilidade menores do que 1% para 200 horas de operação nas condições em que opera, isto é, possuem mais de 99% de probabilidade de falhar antes desse tempo de operação.

Observa-se ainda que os sistemas de menor confiabilidade para o equipamento PM6519 são os mesmos e que o motor de combustão, por exemplo, possui apenas 42,66% de probabilidade de operar durante as 200 horas sem a ocorrência de falhas.

No contexto geral, a confiabilidade da maior parte dos sistemas está abaixo de 70% para 200 horas de serviço, de modo que esses baixos valores podem estar ligados a um ciclo vicioso de falhas, no qual ações corretivas são adotadas somente para remover o sintoma, sem preocupações voltadas para bloquear as causas fundamentais das ocorrências.

Para dar continuidade aos estudos e propor meios de aumentar a confiabilidade das pás-carregadeiras, os dois sistemas de menor confiabilidade (mais críticos), sendo eles o Motor de Combustão e Hidráulico, tiveram suas falhas investigadas a fim de encontrar as causas fundamentais das mesmas e combater o possível ciclo vicioso de falhas existente. A metodologia adotada nessa etapa é sintetizada no diagrama da Figura 44.

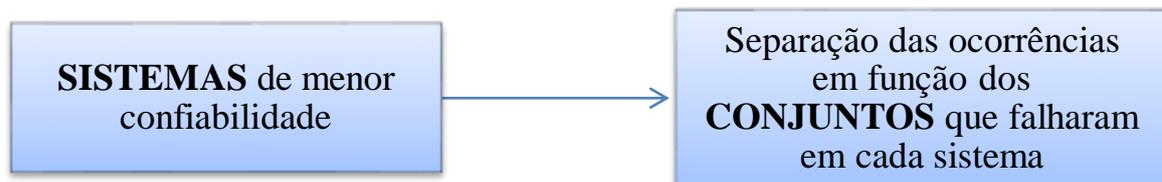


Figura 44: Metodologia adotada na investigação das falhas nos sistemas.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Conforme ilustrado no diagrama da Figura 44, o estudo prosseguiu com a separação dos dois sistemas de menor confiabilidade em conjuntos. De acordo com Xenos (2004), as causas fundamentais das falhas são agrupamentos de várias outras causas menores, por esse motivo foi adotado tal prática. Os dados obtidos para os sistemas Motor de Combustão e Hidráulico são apresentados por meio das Tabelas 8 e 9.

Tabela 8: Número e porcentagem de ocorrências relacionadas aos conjuntos do motor de combustão.

CONJUNTOS	SISTEMA MOTOR DE COMBUSTÃO					
	PM3112		PM6519		TOTAL	
	Ocorrências	%	Ocorrências	%	Ocorrências	%
Arrefecimento	48	47,06%	10	15,63%	58	34,94%
Motor de combustão	23	22,55%	33	51,56%	56	33,73%
Combustível	24	23,53%	13	20,31%	37	22,29%
Turbocompressor	3	2,94%	4	6,25%	7	4,22%
Cabeçote	0	0,00%	2	3,13%	2	1,20%
Admissão	2	1,96%	0	0,00%	2	1,20%
Estrutura	0	0,00%	1	1,56%	1	0,60%
Kit cilindro	0	0,00%	1	1,56%	1	0,60%
Bico injetor cilindro 4	1	0,98%	0	0,00%	1	0,60%
Elétrico	1	0,98%	0	0,00%	1	0,60%
TOTAL	102	100,00%	64	100,00%	166	100,00%

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Tabela 9: Número e porcentagem de ocorrências relacionadas aos conjuntos do sistema hidráulico.

SISTEMA HIDRÁULICO						
CONJUNTOS	PM3112		PM6519		TOTAL	
	Ocorrências	%	Ocorrências	%	Ocorrências	%
Tanque de óleo	172	56,21%	11	25,58%	183	52,44%
Bomba hidráulica	32	10,46%	7	16,28%	39	11,17%
Filtro	33	10,78%	0	0,00%	33	9,46%
Grupo válvula	24	7,84%	5	11,63%	29	8,31%
Bloco de distribuição	9	2,94%	6	13,95%	15	4,30%
Cilindro de elevação LE	8	2,61%	1	2,33%	9	2,58%
Arrefecimento	5	1,63%	3	6,98%	8	2,29%
Cilindro inclinação LD	5	1,63%	2	4,65%	7	2,01%
Cilindro de elevação LD	3	0,98%	3	6,98%	6	1,72%
PTO	4	1,31%	0	0,00%	4	1,15%
Cilindro de inclinação central	1	0,33%	2	4,65%	3	0,86%
Comando	3	0,98%	0	0,00%	3	0,86%
Bomba central	2	0,65%	0	0,00%	2	0,57%
Bomba acessórios	1	0,33%	0	0,00%	1	0,29%
Bomba circulação óleo	1	0,33%	0	0,00%	1	0,29%
Bomba de direção	1	0,33%	0	0,00%	1	0,29%
Cilindro inclinação LE	1	0,33%	0	0,00%	1	0,29%
Tubo de sucção	1	0,33%	0	0,00%	1	0,29%
Bloco de comando central	0	0,00%	1	2,33%	1	0,29%
Bomba elevação 3	0	0,00%	1	2,33%	1	0,29%
Piloto	0	0,00%	1	2,33%	1	0,29%
TOTAL	306	100,00%	43	100,00%	349	100,00%

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Observa-se pelas Tabelas 8 e 9 que alguns conjuntos possuem mais de 10% de ocorrências relacionadas a eles, sendo necessário hierarquizá-los no estudo das causas das falhas. Com o intuito de identificar as causas menores responsáveis pelas falhas nesses conjuntos, a investigação prosseguiu com a identificação dos componentes, conforme sintetizado no diagrama da Figura 45.

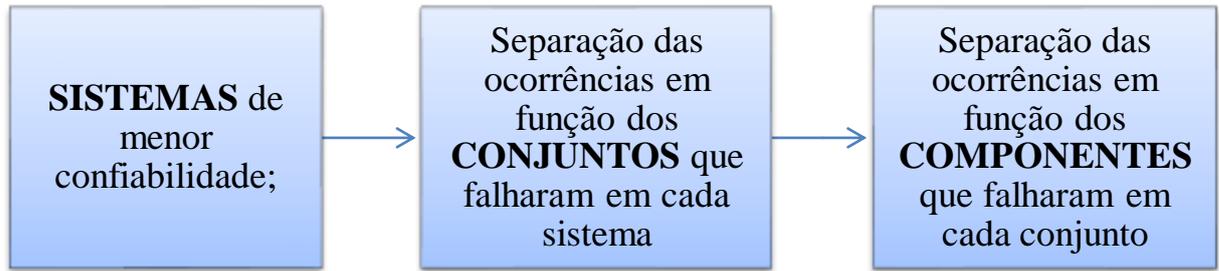


Figura 45: Metodologia adotada na investigação das falhas nos conjuntos.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Os gráficos apresentados nas Figuras 46 a 48 (sistema motor de combustão) e Figuras 49 e 50 (sistema hidráulico) foram construídos com a finalidade de analisar os impactos das falhas de cada componente no funcionamento dos conjuntos.

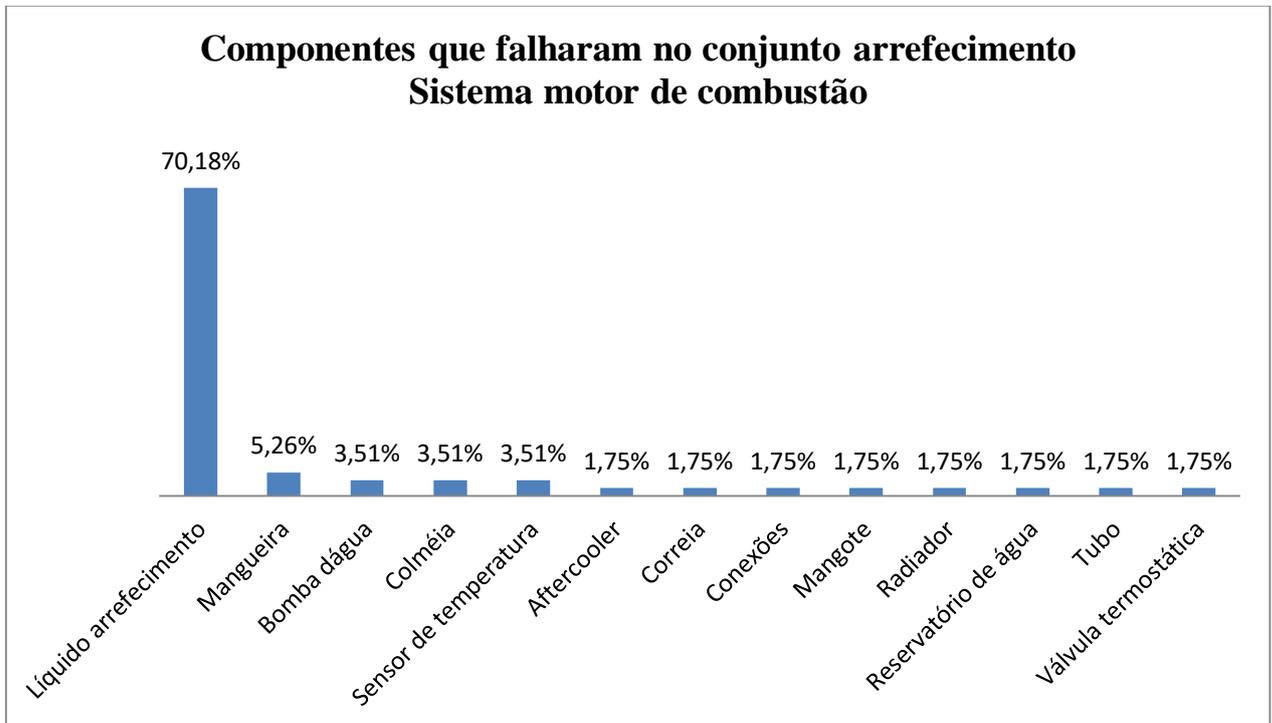


Figura 46: Porcentagem de falhas em função dos componentes - conjunto arrefecimento - sistema motor de combustão.
Fonte: Pesquisa Direta (2018).

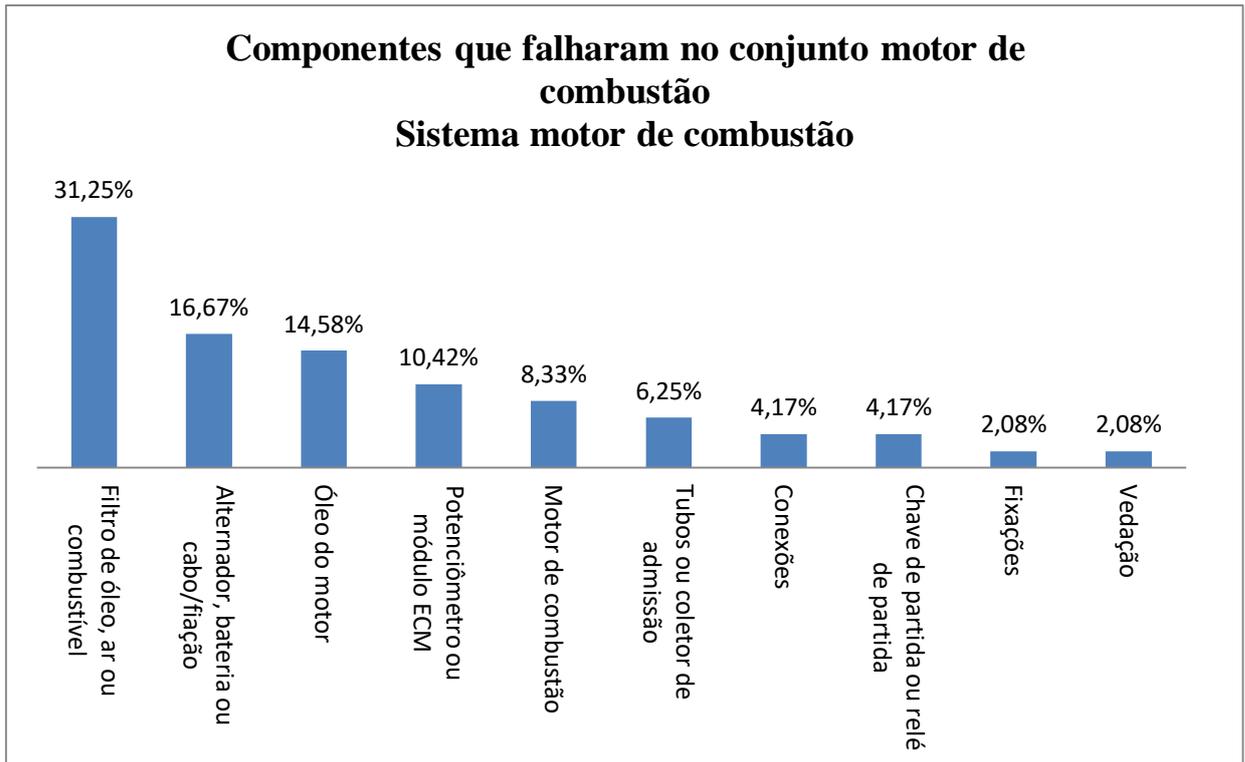


Figura 47: Porcentagem de falhas em função dos componentes - conjunto motor de combustão - sistema m. de combustão.

Fonte: Pesquisa Direta (2018).

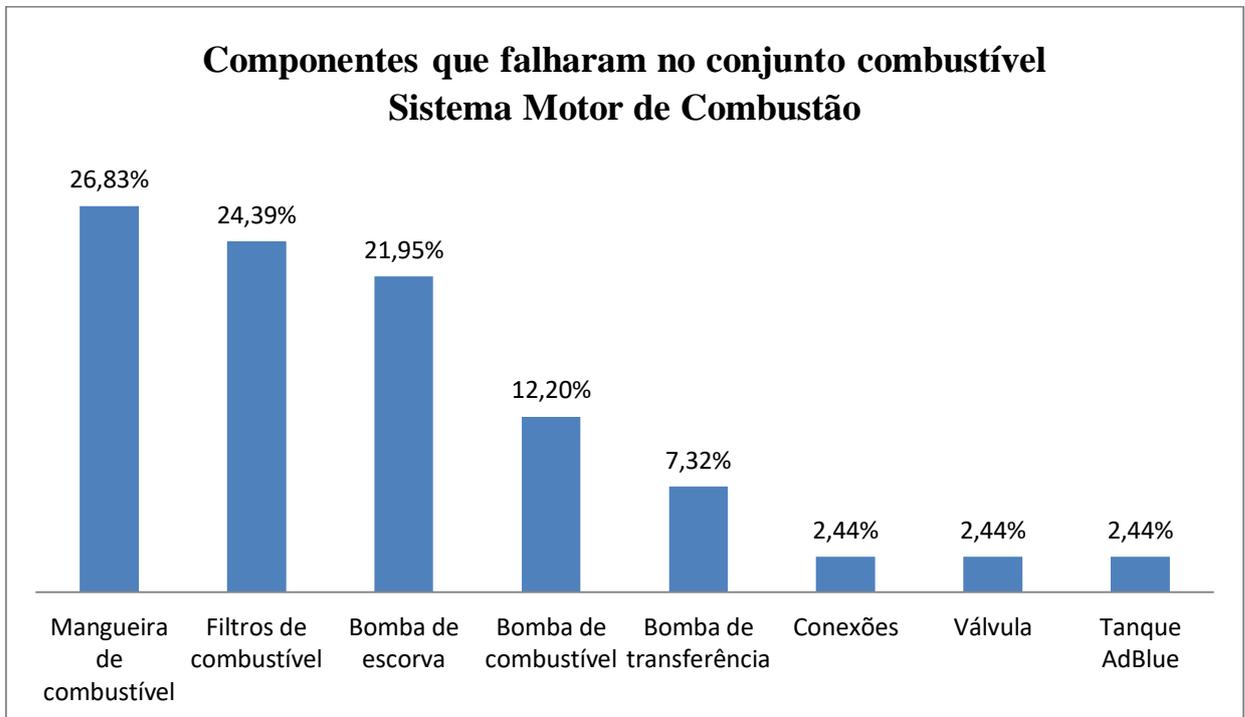


Figura 48: Porcentagem de falhas em função dos componentes - conjunto combustível - sistema motor de combustão.

Fonte: Pesquisa Direta (2018).

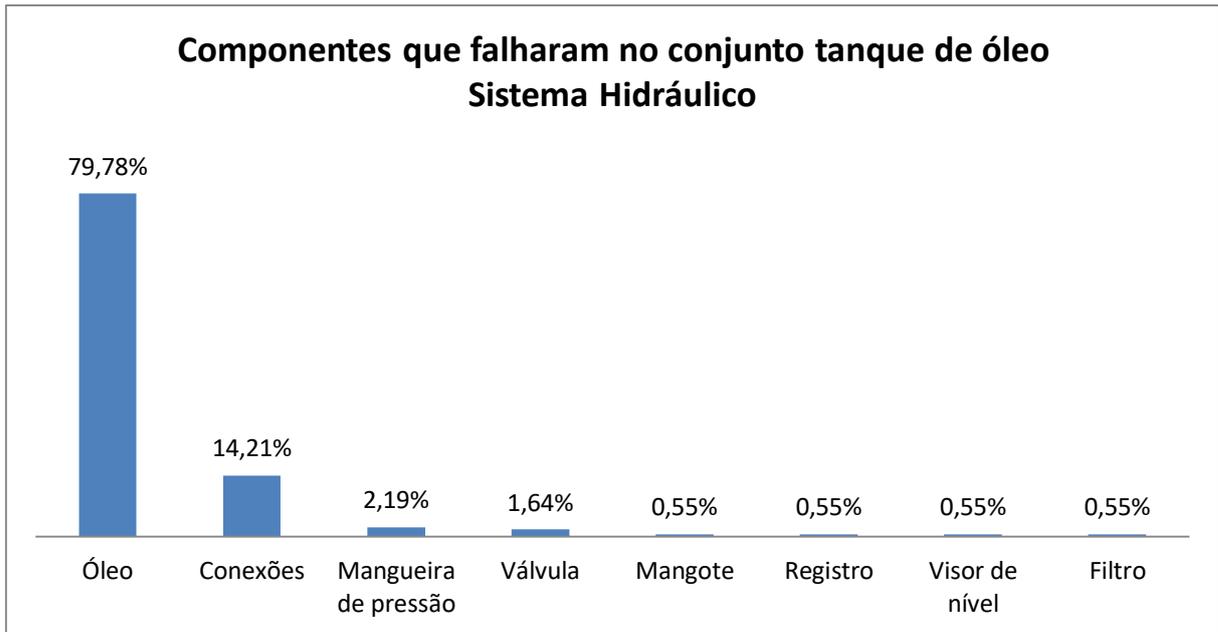


Figura 49: Porcentagem de falhas em função dos componentes - conjunto tanque de óleo - sistema hidráulico. Fonte: Pesquisa Direta (2018).

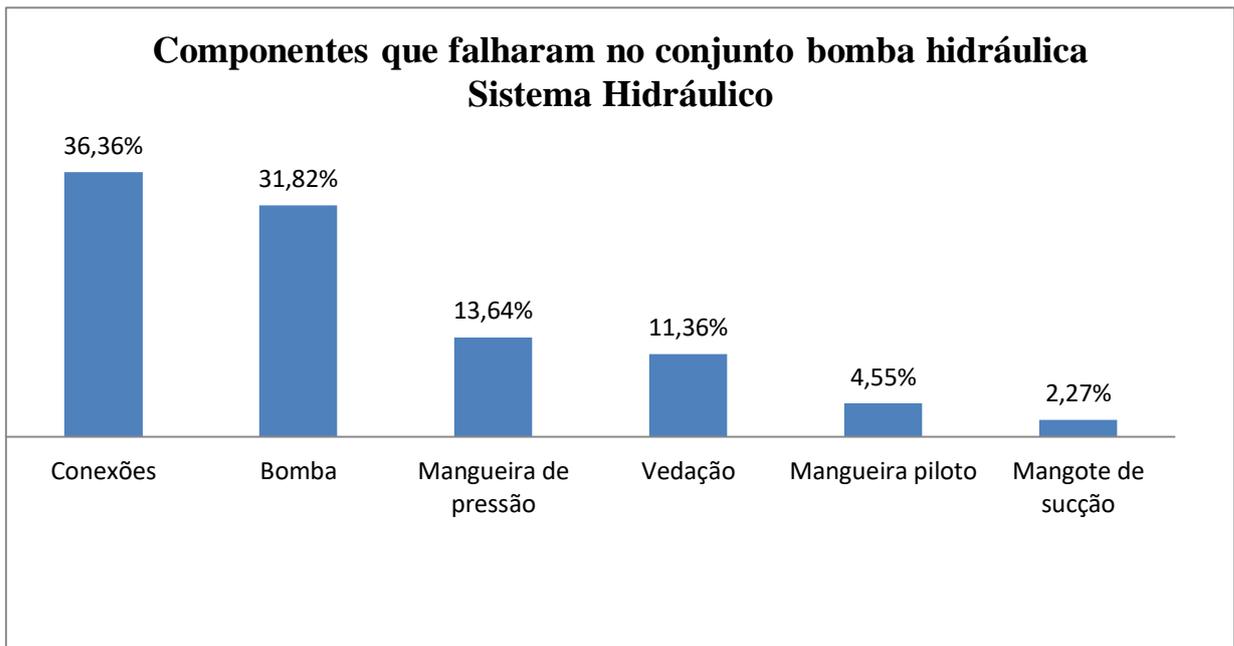


Figura 50: Porcentagem de falhas em função dos componentes - conjunto bomba hidráulica - sistema hidráulico. Fonte: Pesquisa Direta (2018).

Os gráficos apresentados nas 46 a 50 permitem examinar quais componentes falharam em cada conjunto. Nos gráficos apresentados por meio das Figuras 46 a 48, nos quais o percentual de falhas de cada componente dos conjuntos arrefecimento, motor de combustão e combustível são ilustradas, é possível destacar:

i. O componente líquido de arrefecimento é o que apresenta maior número de ocorrências no conjunto arrefecimento (70,18 %), seguido por mangueira (5,26 %), bomba d'água (3,51 %), colméia (3,51 %), sensor de temperatura (3,51 %), outros (14,03 %);

ii. O conjunto motor de combustão apresenta maior número de ocorrências nos componentes: filtros de óleo, ar ou combustível (31,25%), alternador, bateria ou cabos/fiações (16,67%), óleo do motor (14,58%), potenciômetro ou módulo ECM (10,42%), motor de combustão (8,33%), tubos ou coletor de admissão (6,25%), outros (12,50%);

iii. O conjunto combustível tem maior número de falhas nos componentes: mangueira de combustível (26,83%), filtros de combustível (24,39%), bomba de escovas (21,95%), bomba de combustível (12,20%), bomba de transferência (7,32%), outros (7,31%);

Da mesma forma, observa-se pelas Figuras 48 e 49 que nos conjuntos tanque de óleo e bomba hidráulica, pertencentes ao sistema Hidráulico:

iv. O conjunto tanque de óleo tem uma porcentagem considerável de ocorrências relacionadas ao componente óleo hidráulico (79,78%), seguido por conexões (14,21%), mangueiras (2,19%), outros (3,82%);

v. A falha no conjunto bomba hidráulica ocorre nos componentes: conexões (36,36%), bomba (31,82%), mangueira de pressão (13,64%), vedação (11,36%), outros (6,82%);

Após identificar quais componentes apresentavam falhas e os seus respectivos percentuais de ocorrências no conjunto, realizou-se uma busca pelas possíveis causas fundamentais por meio de análise aos registros da empresa. As etapas adotadas no estudo até o momento são sintetizadas no diagrama da Figura 51.

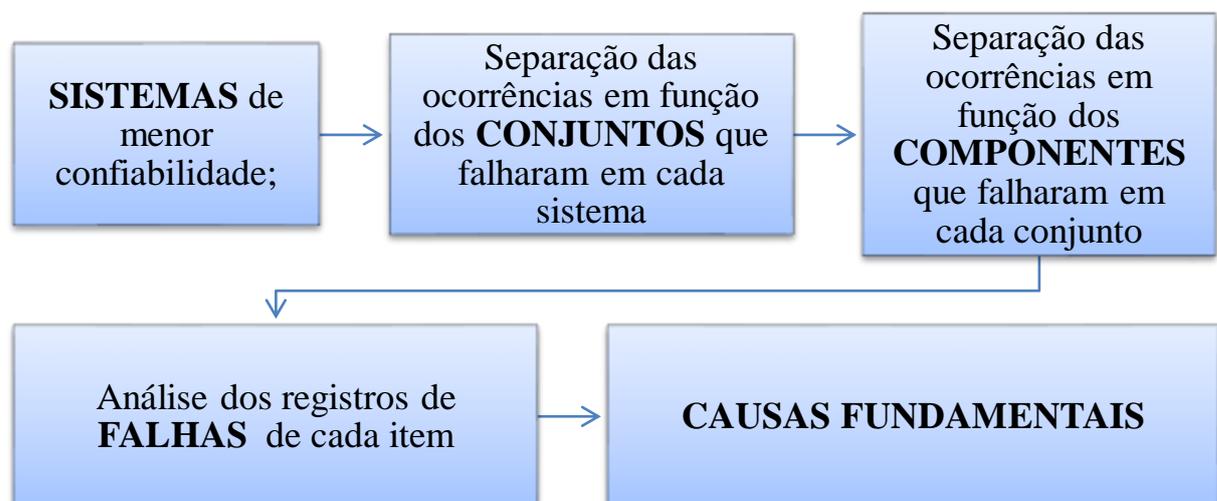


Figura 51: Metodologia adotada na investigação das falhas.
Fonte: Pesquisa Direta (2018).

Para encontrar a causa raiz utilizou-se o Diagrama dos “Porquês”, uma vez que esse representa um método eficiente na identificação da causa básica. Os primeiros itens abordados com esse método foram os responsáveis pelas ocorrências no conjunto de arrefecimento do sistema motor de combustão.

A falha de cada componente desse conjunto é relacionada a sua causa base por meio do Diagrama dos “Porquês” apresentado na Figura 52. É importante lembrar que, para que haja a sua correta interpretação, o leitor deve fazer a pergunta “por que?” antes de seguir as orientações fornecidas pelas linhas.

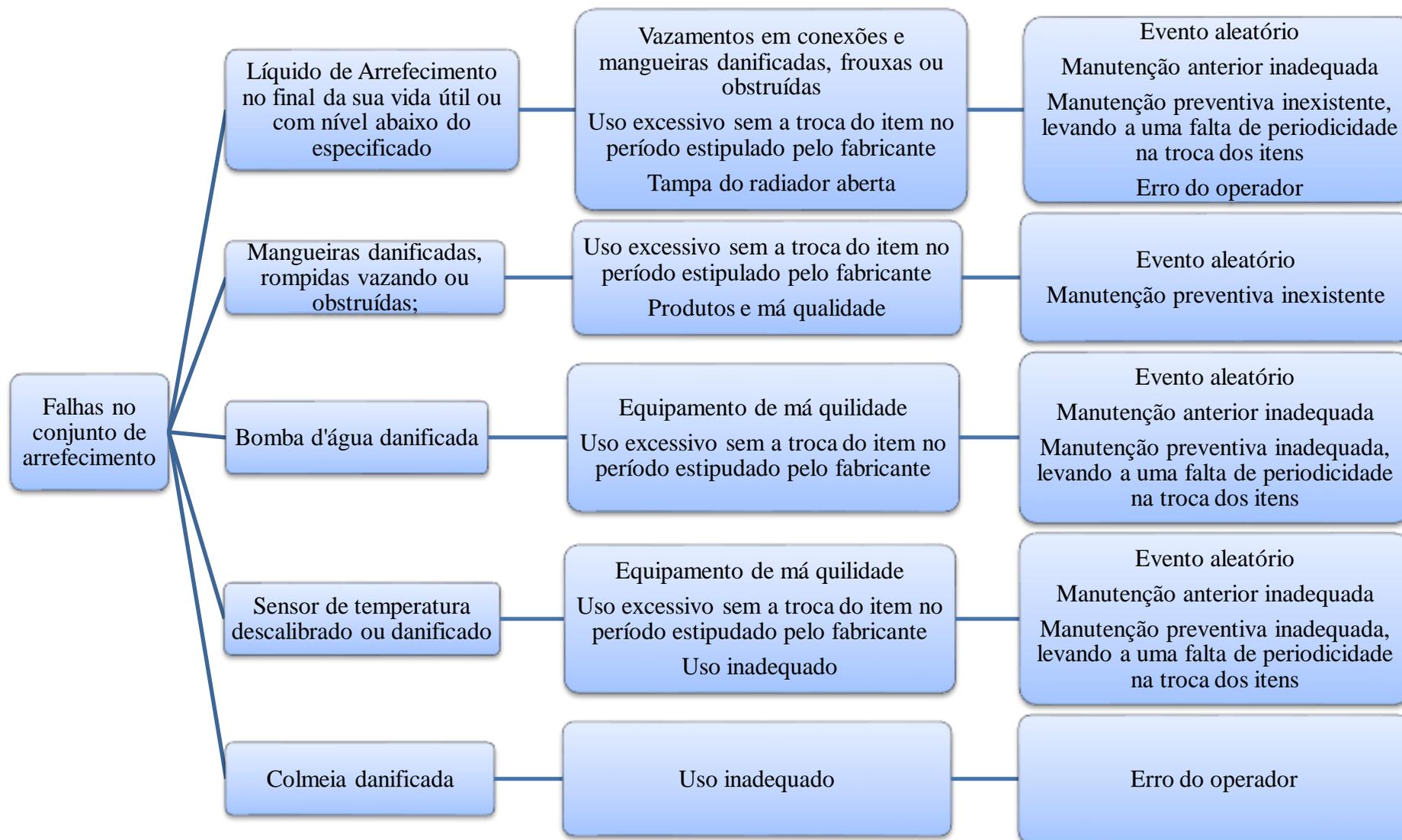


Figura 52: Diagrama dos Porquês para o conjunto de arrefecimento pertencente ao sistema Motor de Combustão.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

A análise do diagrama da Figura 52 permite visualizar as possíveis causas fundamentais das falhas do conjunto de arrefecimento. Atentando-se as ocorrências relacionadas ao líquido de arrefecimento (que possui maior número de ocorrências nesse conjunto), observa-se que as falhas desse componente foram causadas porque havia um baixo nível de fluido ou porque ele estava no fim da sua vida útil.

As falhas ocasionadas pelo baixo nível do líquido de arrefecimento podem estar relacionadas a vazamentos em conexões danificadas ou vazamentos em mangueiras frouxas e obstruídas, enquanto a interrupção devido ao fluido estar no fim da sua vida útil possivelmente tem relação com o uso excessivo do mesmo por um período de tempo maior do que o estipulado pelo fabricante, sem respeitar a periodicidade da troca. Outra possível causa do baixo nível de fluido poderia estar relacionada a um erro do operador, que não fechou adequadamente a tampa do radiador e por isso o fluido evaporou.

Os fatores apresentados indicam que não há manutenção preventiva eficiente para esse componente ou que houve uma manutenção inadequada do mesmo, uma vez que existiam mangueiras frouxas, obstruídas e não houve verificação do baixo nível do fluido antes do início da operação. Se a falha estiver relacionada a um erro do operador, que pode ter deixado a tampa do radiador aberta, o operador provavelmente não seguiu o Procedimento Operacional Padrão para conferência e fechamento do recipiente de fluido ou esse POP pode não existir.

Do mesmo modo, a análise do diagrama permite concluir que as ocorrências relacionadas às falhas da bomba d'água e das mangueiras danificadas, rompidas, vazando ou obstruídas provavelmente apresentam como causas fundamentais o uso excessivo além do período estabelecido pelo fabricante ou até mesmo a falta de qualidade do produto adquirido, o que o levaria a falhar antes do período estipulado para manutenção. Dessa maneira, as falhas desses componentes podem ser eventos aleatórios devido a sua baixa qualidade ou ter relação com a ausência de manutenções preventivas.

Por fim, verifica-se que os sensores de temperatura tiveram que ser calibrados ou substituídos durante a operação do equipamento, indicando falta ou falha no planejamento preventivo para troca desse componente, uma vez que não houve inspeções para verificar as condições desses componentes ou as inspeções não foram eficientes para identificar a sua baixa confiabilidade, uma vez que a calibragem ocorreu somente após uma parada não programada.

Seguindo o estudo, os componentes responsáveis pelas ocorrências nos conjuntos motor de combustão e combustível podem ser visualizados, respectivamente, nas Figuras 53 e 54.

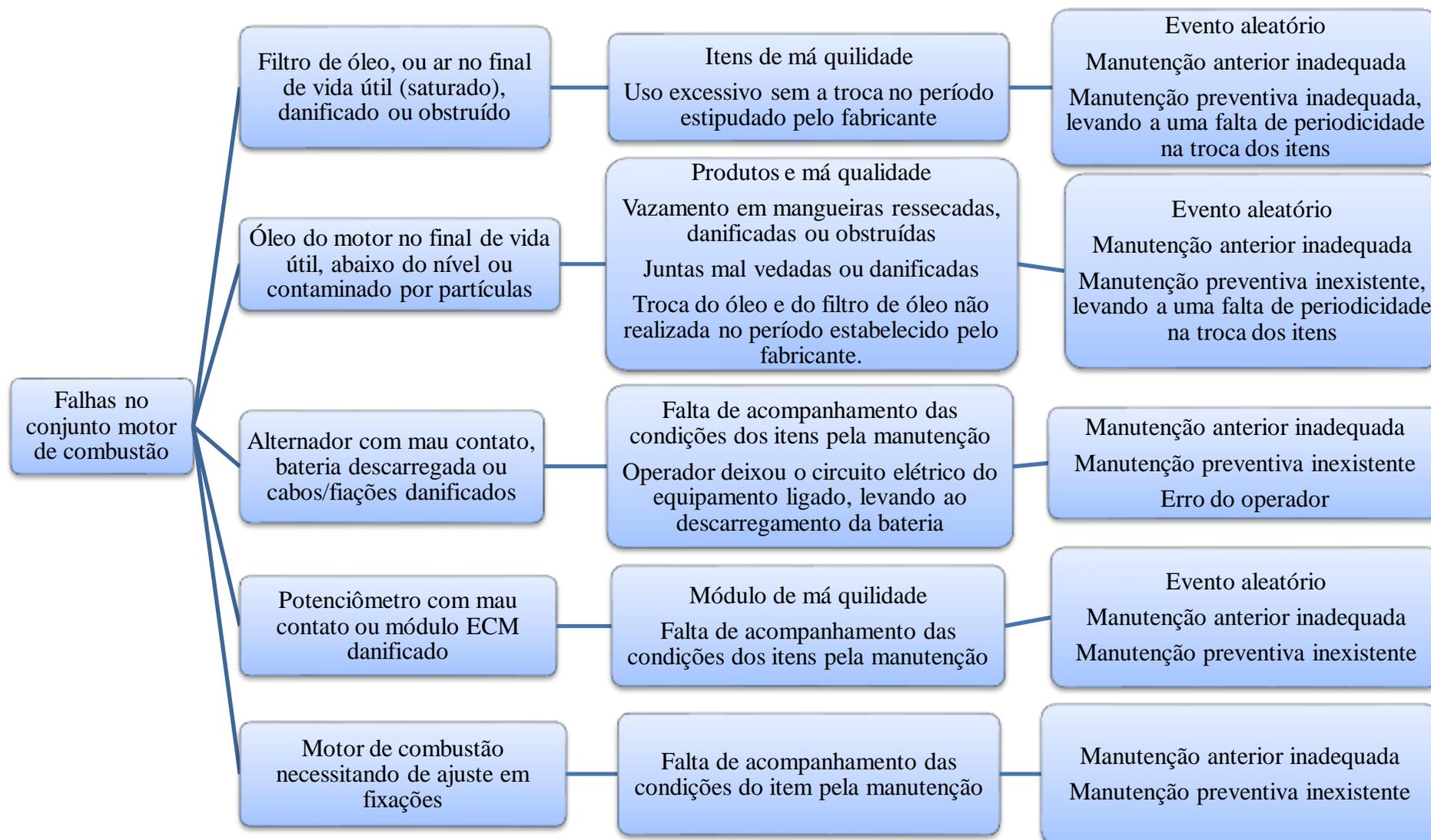


Figura 53: Diagrama dos Porquês para o conjunto Motor de Combustão, pertencente ao sistema Motor de Combustão.
Fonte: Pesquisa Direta (2018).

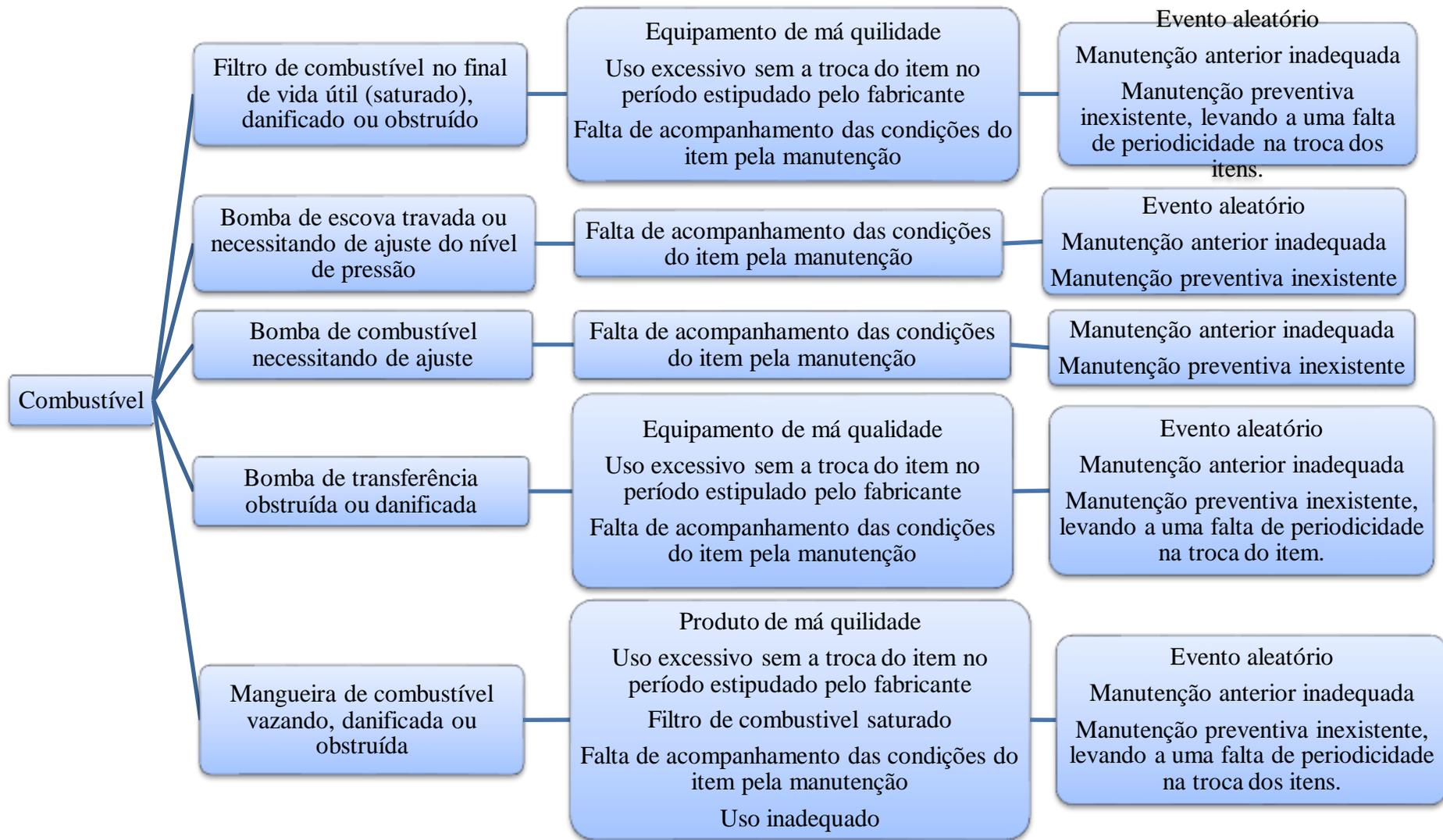


Figura 54: Diagrama dos Porquês para o conjunto Combustível, pertencente ao sistema Motor de Combustão.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Analisando-se os diagramas para o conjunto motor de combustão, ilustrado na Figura 53, e para o conjunto combustível, apresentado na Figura 54, nota-se que as causas fundamentais das falhas dos seus componentes podem estar relacionadas a: (i) produtos de má qualidade que falham antes do período estabelecido pela manutenção; (ii) ao uso excessivo além do período estabelecido pelo fabricante; (iii) erros do operador; e (iv) falta de acompanhamento das condições dos componentes pela equipe de manutenção.

Os dados registrados sugerem que não há planejamentos de ações preventivas para os componentes dos dois conjuntos ou, se houver ela não está sendo eficiente para bloquear as causas fundamentais e evitar a reincidência de falhas.

Observa-se, como exemplo, que o funcionamento do componente motor de combustão foi interrompido porque os filtros de ar ou de óleo estavam no final de sua vida útil, danificados ou obstruídos. Esses registros levam a suspeita de que esses componentes foram utilizados por um período de tempo superior ao estipulado pelo fabricante, sem atenção alguma para a periodicidade de sua troca, de modo que a equipe de manutenção resolveu aguardar a ocorrência da falha para tomar medidas corretivas ou não realizou atividades preventivas nesses componentes, tais como a sua troca no período estipulado pelo fabricante. Outra possível causa poderia ser o uso de filtros de baixa qualidade, que falharam antes do período programado pela equipe de manutenção.

Nas ocorrências relacionadas ao óleo do motor, a equipe descreve que o mesmo estava no final da sua vida útil, abaixo do nível recomendado ou contaminado por partículas. O baixo nível de óleo pode estar relacionado a vazamentos em mangueiras frouxas, danificadas ou obstruídas, vazamentos em juntas mal vedadas e ao uso de mangueiras de má qualidade, enquanto a contaminação por partículas pode ter relação com o uso de filtro de óleo saturado, cuja troca não foi realizada no período correto, ou filtros de baixa qualidade, que falharam antes do período programado.

As causas fundamentais das ocorrências relacionadas ao conjunto combustível são semelhantes as do conjunto motor de combustão. Percebe-se que componentes como a bomba de combustível e a bomba de escova tiveram que ser ajustados durante a operação do ativo e que o filtro de combustível estava saturado, obstruído ou danificado, evidenciando mais uma vez a falta do planejamento ou execução de atividades preventivas eficientes no bloqueio das causas raízes de suas falhas.

Fica evidente nos registros que tanto os filtros de óleo, de combustível e de ar, quanto o óleo do motor necessitaram ser trocados durante a operação do ativo, resultando em uma parada não programada. Essas informações são fortes indícios de que a equipe não segue um

planejamento com atividades preventivas que evitem a troca de componentes essenciais para o funcionamento do ativo durante a sua operação, prejudicando assim a sua Disponibilidade Física. Também é possível perceber que o setor de manutenção não realizou a troca de alguns componentes no período estipulado pelo fabricante, esperando que os mesmos falhassem para serem trocados.

A mesma análise pode ser realizada no sistema motor de combustão ou sistema hidráulico. Os Diagramas dos “Porquês” para os conjuntos desses sistemas são apresentados nas Figuras 55 e 56.

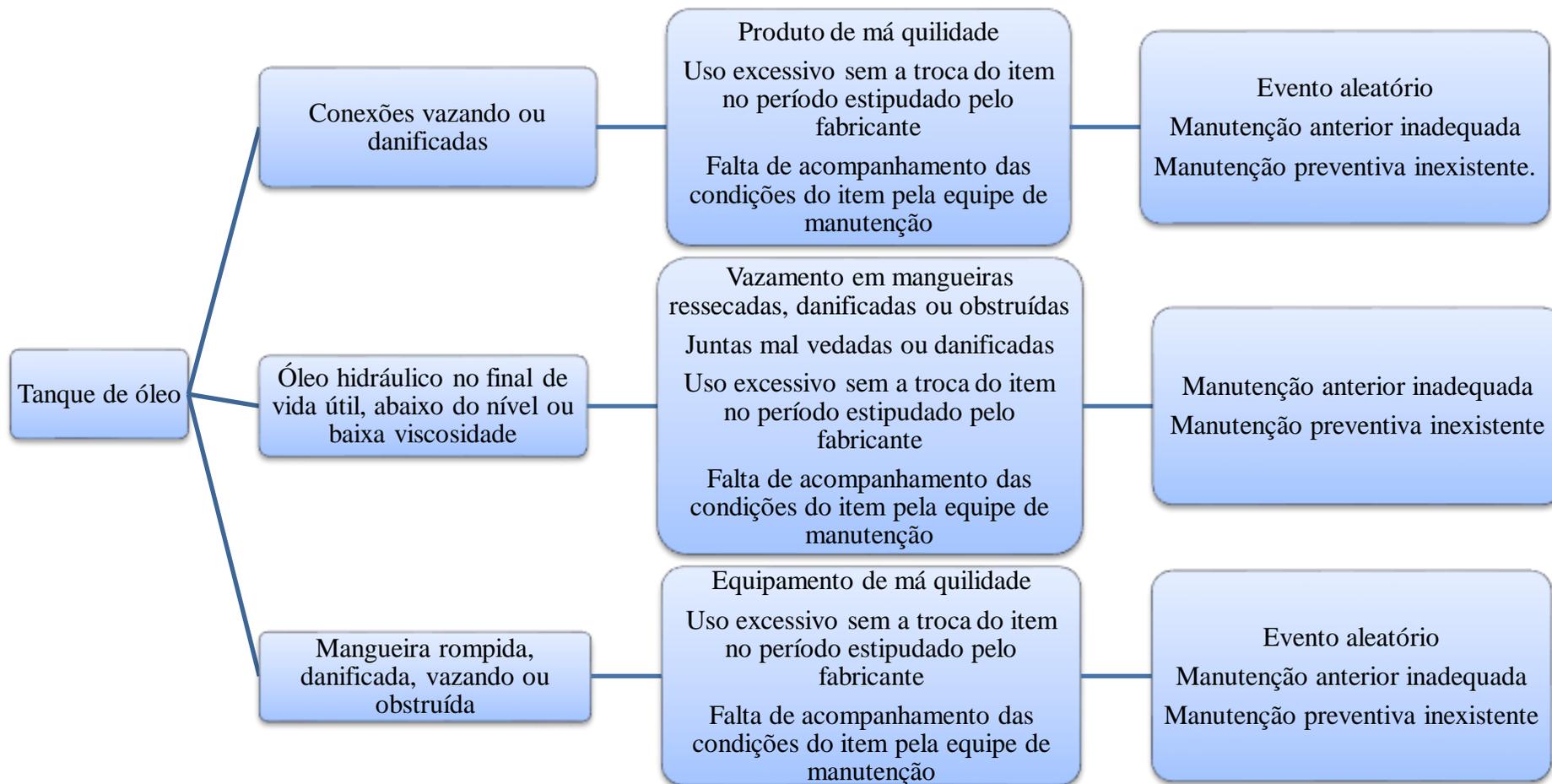


Figura 55: Diagrama dos Porquês para o conjunto Tanque de óleo, pertencente ao sistema Hidráulico.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

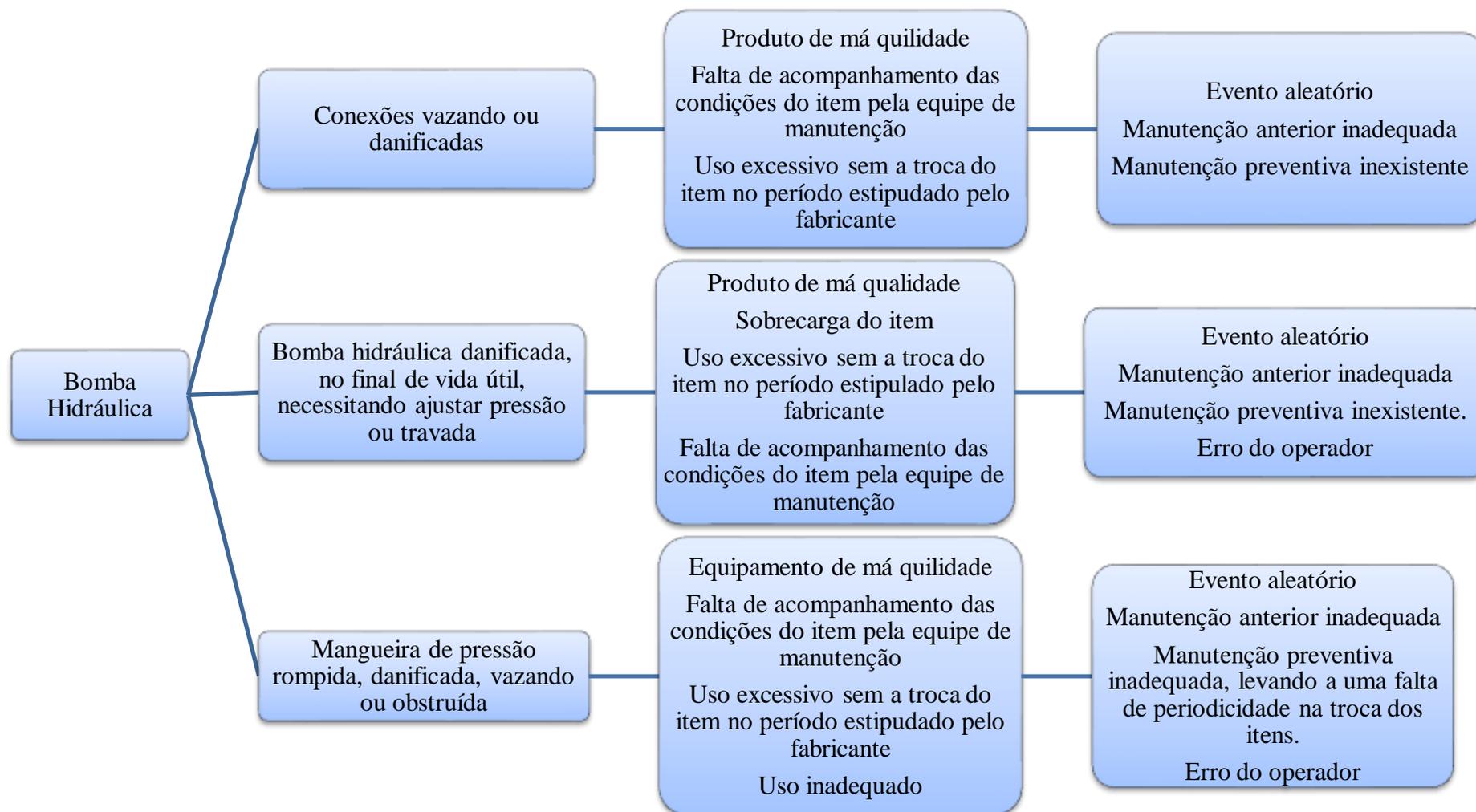


Figura 56: Diagrama dos Porquês para o conjunto Bomba Hidráulica, pertencente ao sistema Hidráulico.
 Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Pelos diagramas das Figuras 55 e 56 fica perceptível que as causas básicas das falhas nos conjuntos do sistema hidráulico são semelhantes às relatadas para o sistema Motor de Combustão, sendo elas: falta de manutenção preventiva, equipamentos ou componentes de má qualidade, erro do operador e manutenções mal executadas.

Analisando o conjunto tanque de óleo, verifica-se que as falhas relacionadas ao componente óleo hidráulicas têm relação direta com o baixo nível, o uso excessivo além do período estabelecido pelo fabricante e a baixa viscosidade, que também pode estar relacionada ao uso excessivo do produto. Também há registros de conexões e mangueiras vazando, obstruídas ou danificadas e de interrupções no funcionamento do ativo para realizar ajustes de pressão na bomba hidráulica, o que evidencia a falta de planejamento preventivo também para o sistema hidráulico.

Embora os dois sistemas sejam de naturezas diferentes e possuam componentes distintos, o Diagrama dos “Porquês” possibilitou a verificação de que as ocorrências de suas falhas possuem causas semelhantes, resumidas no diagrama da Figura 57.

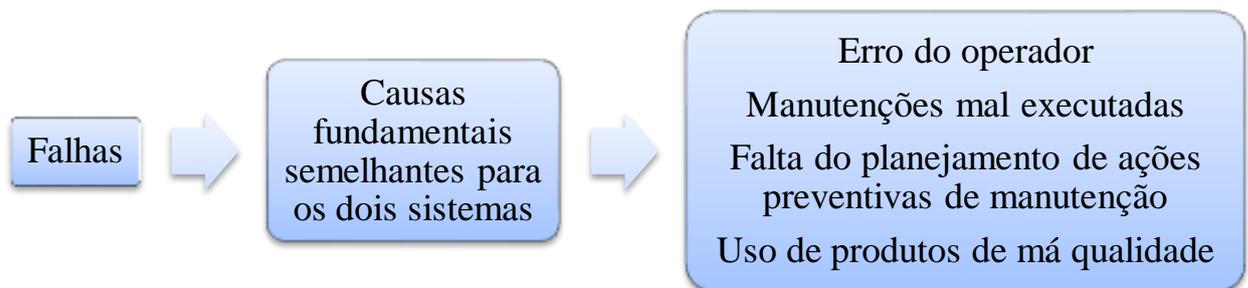


Figura 57: Resumo das causas fundamentais das falhas dos dois sistemas.
Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Nota-se que, embora a pesquisa tenha se afunilado à apenas dois sistemas de duas pás-carregadeiras, as falhas têm causas fundamentais comuns e podem ser generalizadas a todos os equipamentos e seus respectivos sistemas.

Desse modo, são quatro as causas fundamentais do alto número de paradas não programadas das pás-carregadeiras e, conseqüentemente, da baixa confiabilidade desses equipamentos: erro do operador da máquina, as manutenções mal executadas, a falta do

planejamento de manutenções preventivas e o uso de componentes de baixa qualidade, que falham antes do período previsto.

Vale ressaltar que os registros analisados evidenciaram a falta de um plano de manutenção preventiva ou execução inadequada do mesmo. É possível notar nas Tabelas diversas paradas resultantes da inexistência de ações preventivas destinadas a componentes essenciais para o bom funcionamento do ativo, tais como óleo de motor, óleo hidráulico, filtros de óleo, de combustível, de ar, mangueiras e conexões. Também é possível perceber que esses componentes, muitas vezes, foram utilizados por um período maior do que o estipulado pelo fabricante, mesmo não havendo acompanhamento preditivo.

Diante desse cenário, algumas contramedidas que podem ser eficazes no combate da reincidência dessas falhas são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Causas Fundamentais e Contramedidas

Causas Fundamentais	Contramedidas
<ul style="list-style-type: none"> • Erro do operador; • Manutenções mal executadas; • Inexistência de planos de manutenções preventivas ou a não execução adequada; • Componentes de má qualidade; 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacitar os operadores para que sigam os POPs adequadamente e para que sejam capazes de analisar e identificar anomalias, definir as condições do equipamento, cumprir normas para manutenção (limpeza, lubrificação, etc) e comunicar ao setor de manutenção qualquer irregularidade; • Capacitar a equipe de manutenção para que tenham a prática e o conhecimento necessário para realizar a manutenção adequadamente; • Formular ou aperfeiçoar os planos de manutenções preventivas destinados aos componentes de cada sistema; • Comprar produtos de fornecedores com credibilidade e que garantam a qualidade e confiabilidade dos seus produtos.

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

Observa-se por meio dos registros que muitas ocorrências poderiam ser evitadas se os operadores estivessem capacitados para analisar as anomalias e comunicá-las ao setor de manutenção, uma vez que esses colaboradores conhecem muito bem os equipamentos e são capazes de definir suas condições, assim como cumprir normas básicas da manutenção, tais como limpeza, lubrificação, inspeções de componentes como nível de óleo, de líquido de arrefecimento, condições das mangueiras, conexões, entre outros.

Em relação à equipe de manutenção, são necessários investimentos em capacitações a fim de que a mesma tenha as habilidades e conhecimentos necessários para realizar ações corretivas e preventivas do modo mais eficiente possível, uma vez que algumas ocorrências podem estar ligadas a manutenções anteriores ineficazes.

Os planos de manutenção da empresa devem ser aperfeiçoados de forma que as ações corretivas executadas estabeleçam as condições mínimas requeridas para manter a máquina em funcionamento, enquanto ações preventivas são estabelecidas para levar o ativo ao seu estado ideal, com máximo rendimento. Pensando nisso, algumas ações preventivas para combater a reincidência das falhas nos dois sistemas das pás-carregadeiras estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Ações preventivas sugeridas.

COMPONENTES A SEREM VERIFICADOS E AÇÕES	PERIODICIDADE		
	Diário	Semanal	Fabricante
SISTEMA HIDRÁULICO			
Verificar mangueiras, braçadeiras e conexões no geral. Reparar ou substituir caso haja necessidade.	x		
Verificar nível do óleo hidráulico e completar caso haja necessidade.	x		
Verificar se existem vazamentos de óleo hidráulico	x		
Verificar estado do filtro de sucção do óleo hidráulico e substituir caso haja necessidade.		x	
Verificar estado do filtro de respiro do óleo hidráulico e substituir caso haja necessidade.		x	
Trocar óleo hidráulico no período estipulado pelo fabricante.			x
SISTEMA MOTOR DE COMBUSTÃO			
Verificar conexões e mangueiras no geral e reparar ou substituir caso haja necessidade.	x		
Verificar se existem vazamentos no motor	x		
Verificar nível do óleo lubrificante e completar caso haja necessidade.	x		
Verificar o estado do filtro de ar, limpar ou substituir caso haja necessidade.		x	
Verificar o estado do filtro de combustível e substituir caso haja necessidade.		x	
Verificar o estado do filtro de óleo lubrificante e substituir caso haja necessidade.		x	
Verificar nível do fluido do radiador e completar caso haja necessidade.	x		
Limpar radiador		x	
Trocar óleo e filtros de óleo, combustível e ar no período estipulado pelo fabricante.			x
Verificar cabos, potenciômetro, módulo ECM, níveis de água e terminais de bateria. Reparar ou substituir caso haja necessidade.		x	
Avaliar as condições da bomba hidráulica e reparar caso haja necessidade.		x	
Avaliar as condições da bomba de combustível e reparar caso haja necessidade.		x	
Avaliar as condições da bomba de transferência e reparar caso haja necessidade.		x	

Fonte: Pesquisa Direta (2018)

As ações apresentadas na Tabela 11 são capazes de combater as falhas nos componentes dos sistemas motor de combustão e hidráulico, mas o estudo realizado até o momento pode ser ampliado a fim de atender aos demais sistemas e formular um plano de manutenção preventivo único, que combata a causa base das falhas em todos os sistemas das pás-carregadeiras. A

periodicidade das manutenções sugeridas na Tabela 11 foi adotada tendo como base os registros analisados.

A última das quatro contramedidas apresentadas destaca a importância do uso de produtos de boa procedência no planejamento da manutenção, uma vez que produtos de baixa qualidade podem falhar antes do período estipulado e conduzir a paradas não programadas. Em outras palavras, produtos cuja confiabilidade seja garantida pelo fornecedor podem apresentar um custo inicial maior, mas os custos finais podem ser menores quando o uso destes evita as perdas de produção causada por falhas aleatórias. Por isso, antes de adquirir peças ou matérias, a equipe deve realizar um estudo que avalie a relação entre os custos e os benefícios dos mesmos.

As contramedidas apresentadas na Tabela 10 podem trazer grandes resultados e aumento da Confiabilidade e Disponibilidade Física das pás-carregadeiras, enquanto as inspeções e ações sugeridas na Tabela 11 são capazes de bloquear ou combater a reincidência das falhas nos dois sistemas analisados. A vista disso, conclui-se que o melhor desempenho das pás-carregadeiras dessa empresa depende de um investimento em capacitação dos funcionários, do aperfeiçoamento das manutenções preventivas no ativo e da formulação de planos de ações preventivas direcionadas a cada sistema.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Segundo Xenos (2009), os produtos e serviços têm a sua qualidade cada vez mais dependente do bom funcionamento dos instrumentos de produção, o que faz com que as falhas desses equipamentos e instalações resultem em impactos que ameaçam diretamente a satisfação, o conforto e, principalmente, a segurança das pessoas.

Diante disso, o objetivo desse trabalho foi aplicar o método de Manutenção Centrada em Confiabilidade para uma frota de pás-carregadeiras de uma empresa de mineração, uma vez que as paradas não programadas desses ativos podem resultar no descumprimento de prazos, perdas econômicas devido à interrupção da produção, riscos de acidentes, baixa satisfação dos clientes e, conseqüentemente, baixa competitividade no mercado.

A pesquisa realizada teve caráter exploratório, baseando-se em revisão bibliográfica e no estudo de casos nos quais ocorreram falhas operacionais nos sistemas das pás-carregadeiras. Além disso, a natureza do trabalho foi simultaneamente qualitativa e quantitativa, uma vez que foram analisados os modos e os efeitos das falhas, além de quantificar as medidas de confiabilidade dos equipamentos a partir de ajustes estatísticos das paradas.

O início da análise se deu a partir de uma revisão bibliográfica sobre Manutenção Mecânica, Confiabilidade, Modelos Estatísticos aplicados a Confiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e Manutenção Centrada em Confiabilidade. Essa fundamentação teórica possibilitou a análise e interpretação dos dados fornecidos pela empresa, a fim de esclarecer e justificar o problema em estudo, além de orientar quanto ao método mais adequado para os procedimentos de análise e coleta de dados.

Quanto aos dados fornecidos, embora a FMEA seja uma técnica que apresenta a vantagem de sistematizar o diagnóstico das falhas e auxiliar na detecção e eliminação de possíveis ocorrências de falhas, fornecendo uma hierarquia de prioridades para as quais as atividades de manutenções devem ser direcionadas (KARDEC & NASCIF, 2009; FOGLIATO & RIBEIRO, 2009), a empresa em questão optou por não fazer o uso dessa ferramenta, dispondo apenas de planilhas de Excel na qual as atividades de manutenção são registradas e detalhadas em função da periodicidade, dos sistemas, subsistemas, conjuntos, componentes e do responsável pela execução.

Essas descrições, embora sucintas, foram suficientes para realização do estudo, porém durante o trabalho, ficou evidente que para o controle do programa MCC é necessário o registro das atividades de manutenção e que a FMEA, devido sua melhor sistematização das falhas, pode representar um suporte mais adequado para calcular e avaliar os riscos para cada ocorrência.

Durante o estudo, as sete questões básicas contempladas pelo programa MCC e apresentadas por Moubray (1997) *apud* Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 218) foram respondidas, sendo elas:

- (1) Quais as funções e padrões de desempenho esperados para os equipamentos fabris?
- (2) De que modo os equipamentos podem falhar em cumprir suas funções?
- (3) O que causa a falha funcional?
- (4) O que acontece quando cada falha ocorre?
- (5) De que forma cada falha interessa?
- (6) O que pode ser feito para prevenir ou impedir a falha?
- (7) O que deveria ser feito quando não pode ser estabelecida uma atividade pró-ativa pertinente?

As três primeiras questões foram contempladas ao caracterizar a empresa e ao descrever o equipamento em função dos seus sistemas, conjuntos e componentes. Essa etapa teve como objetivo conhecer o equipamento e o seu contexto de operação, a fim de identificar como eles poderiam falhar em cumprir suas funções e quais componentes poderiam estar relacionados a essa falha.

Os padrões de desempenho apresentados pelos ativos, por sua vez, foram estimados através de análise estatística realizada pelo *software* Weibull++ de Realiasoft. Visto que o programa MCC estuda os equipamentos ou sistemas em detalhes, analisa como eles podem falhar e define a melhor estratégia de manutenção, o cálculo da confiabilidade dos equipamentos possibilitou hierarquizar as falhas mais comuns, a fim de fornecer recomendações de ações preventivas para esses casos.

A análise estatística foi realizada em duas frotas, sendo elas a CAT 994 D e CAT 990 II, uma vez que elas representavam, aproximadamente, 70 % do total das ocorrências registradas. Em seguida, uma amostra com duas pás-carregadeiras, sendo uma de cada frota,

foi selecionada por meio de amostragem intencional para representar os elementos da população sobre os quais as medidas de interesse seriam observadas. Os equipamentos selecionados foram: PM3112 e PM6519, das frotas CAT994 D e CAT 990 II, respectivamente.

O conhecimento da Função Confiabilidade do ativo permite definir a melhor estratégia de manutenção para o ativo (KARDEC & NASCIF, 2009). Ao construir as curvas de confiabilidade dos dois equipamentos, constatou-se que ambos apresentavam Funções Confiabilidade estritamente decrescente, com parâmetro de forma menor do que um.

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), o valor encontrado para o parâmetro de forma é um indício de que os equipamentos podem estar na fase de mortalidade infantil, na qual há uma grande incidência de falhas causadas por deficiências de projeto ou componentes defeituosos, assim como falhas provenientes de problemas de instalação. Dessa maneira, Kardec e Nascif (2009) relatam que o número de falhas desse ativo pode ser reduzido por meio de atividades preventivas de troca e reforma.

A fim de analisar as ocorrências, o estudo se aprofundou mediante identificação dos sistemas, conjuntos e componentes, cujas falhas resultavam na baixa confiabilidade das pás-carregadeiras e que eram primordiais para o seu bom funcionamento. Os dois sistemas com os menores valores de confiabilidade encontrados foram o motor de combustão interna e o sistema hidráulico.

Uma vez que as causas fundamentais das falhas são agrupamentos de várias outras falhas (XENOS, 2004), os dois sistemas identificados foram separados em partes menores, ou seja, em conjuntos, com a intenção de identificar qual deles apresentavam maior percentual de ocorrências. Os conjuntos mais críticos para o sistema motor de combustão foram arrefecimento, motor de combustão e combustível, enquanto para o sistema hidráulico os conjuntos foram tanque de óleo e bomba hidráulica.

Contemplando as questões de número quatro e cinco do programa MCC, o Diagrama dos “Porquês” foi utilizado para entender o que acontece quando esses conjuntos falham e de que forma a interrupção da sua função prejudica o funcionamento do ativo.

Foi possível concluir, a partir da análise dos diagramas construídos, que as causas básicas das falhas nos conjuntos do sistema hidráulico eram semelhantes às relatadas para o sistema motor de combustão, ou seja, embora os dois sistemas fossem de naturezas diferentes e possuíssem componentes distintos, as causas fundamentais de suas falhas eram semelhantes e possivelmente tinham relação com fatores tais como: erros do operador, manutenções mal

executadas, falta de planejamento voltado para ações preventivas de manutenção e/ou ao uso de produtos de má qualidade.

Por fim, as últimas duas questões do programa MCC foram contempladas ao avaliar as estratégias de manutenção que deveriam ser adotadas para cada modo e efeito das falhas encontradas. Constatou-se que atividades pró-ativas poderiam prevenir as falhas nos sistemas, conjuntos e componentes das pás-carregadeiras e, conseqüentemente, reduzir o número de paradas não programadas desse ativo, aumentando assim a sua Disponibilidade Física. Além disso, visto a importância desse ativo para o setor produtivo, essas ações preventivas são economicamente justificadas. Desse modo, tendo como base o presente trabalho, recomendam-se para combater a reincidência das falhas:

- Qualificar e treinar os operadores para que sigam os POPs adequadamente e para que sejam capazes de analisar e identificar anomalias, definir as condições do equipamento, cumprir normas para manutenção (limpeza, lubrificação, etc.) e comunicar ao setor de manutenção qualquer irregularidade;
- Capacitar a equipe de manutenção para que tenham a prática e o conhecimento necessário para realizar as manutenções adequadamente;
- Formular ou aperfeiçoar os planos de manutenções preventivas destinadas aos componentes de cada conjunto e sistema;
- Optar por produtos de fornecedores com credibilidade no mercado e que garantam a qualidade e confiabilidade dos seus produtos.

O estudo e os resultados encontrados, em concordância ao que foi apresentado por Kardec e Nascif (2009) e Fogliatto e Ribeiro (2009), evidenciam que a técnica de engenharia utilizada na metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade pode garantir a disponibilidade física de um equipamento na linha de produção, pois possibilita ao setor de manutenção atribuir metas precisas para que suas ações atuem de acordo com os modos de falha e restaure a confiabilidade e segurança após a deterioração do ativo.

Através desse trabalho foi apresentado como aplicar o programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade para o sistema de pás-carregadeiras e essa análise permitiu conhecer melhor o equipamento e suas curvas de confiabilidade. O conhecimento da curva de confiabilidade possibilitou a hierarquização das ocorrências, a busca pelas suas causas raiz e a definição do método de manutenção mais adequado para cada situação. Desse modo, a

aplicação do programa MCC realizada nesse trabalho mostra-se como uma importante ferramenta para o setor de manutenção na busca pela máxima eficiência dos seus ativos e os estudos de Manutenção Centrada em Confiabilidade podem ser tratados como um trabalho de melhoria contínua.

Por fim, embora esse estudo possibilite identificar as causas fundamentais das ocorrências relacionadas a dois sistemas, pertencentes a duas pás-carregadeiras, as falhas analisadas têm causas fundamentais comuns e podem ser generalizadas a todos os equipamentos e seus respectivos sistemas. Dessa maneira, a aplicação realizada nesse trabalho do programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade pode conduzir a uma redução de manutenções preventivas e, conseqüentemente, nos custos de manutenção, uma vez que há pontos críticos nos quais ações preventivas devem ser focadas.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

A partir do estudo realizado, recomenda-se para trabalhos futuros:

1. Estudo de melhoria do processo de manutenção preventiva de um sistema de pás-carregadeiras do setor de mineração por meio de modelagem estatística de confiabilidade.
2. Estudo de melhorias para um plano de manutenção a partir do estudo do sistema de tratamento de falhas;
3. Análise da Aplicação do programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade para um sistema de coréias transportadoras do setor de mineração;

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

AGUIAR, M. C. **Análise da causa raiz: levantamento dos métodos e exemplificação**. 2014. 153f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.

BARAN, Leandro Roberto. **Manutenção Centrada em Confiabilidade aplicada na Redução de Falhas: um estudo de caso**. 2011. 102f. Dissertação (Especialização em Gestão Industrial: Produção e Manutenção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.

BARBOSA, J. P. **Modelagem da confiabilidade de equipamentos por combinações ou extensões de distribuições de Weibull**. 2008. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

BOLFARINE, H.; BUSSAB, W. O: **Elementos de Amostragem**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

BORGES, THIAGO CAMPOS. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração**. 2013. 116f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação) – Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

BRITTO, T. M. **Metodologia da manutenção centrada em confiabilidade aplicada a pára-raios de alta tensão**. 2006. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CAIADO, R. G. G. *et al.* **Aspectos da aplicação da manutenção centrada em confiabilidade**. XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2015, Rio de Janeiro – RJ.

CARNEIRO, P. M. T. F. **Análise de modelos numéricos para cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull: Estudo de caso para o Campus do Pici da UFC**. 2013. 87f. Dissertação (Graduação), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CASTRO, C. M. **Estrutura e apresentação de publicações científicas**. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.

CATERPILLAR. **Manual de pás-carregadeiras**. Disponível em: <http://solumaqlocacoes.com.br/arquivos/ficha_tecnica_pa_carregadeira_988h.pdf>. Acesso em: 01 de outubro de 2018.

Conselho Nacional da Indústria – CNI. **Mineração e economia verde**. 69f. Brasília: CNI, 2012.

COSTA, B. A. **Aplicação da manutenção centrada em confiabilidade na função transmissão a fim de reduzir o tempo de indisponibilidade**. 2009. 72f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COSTA, M. DE ALMEIDA. **Gestão estratégica da manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional**. 2013. 103 f. Dissertação (Curso de Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, José Luis Duarte: **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1. ed. São Paulo: Campus-Elsevier, 2009.

FREITAS, L. F. **Elaboração de um plano de manutenção em uma pequena empresa do setor metal-mecânica de Juiz de Fora com base nos conceitos da Manutenção Preventiva e Preditiva**. 2016. 96f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

GARCIA, Joseph. **Pá carregadeira**. Disponível em: < <https://pt.scribd.com/doc/44584773/Op-Pa-Carregadeira-Apostila>>. Acesso em: 01 de outubro de 2018.

GIL, ANTONIO CARLOS. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. THIOLENT, Michel. Metodologia da pesquisa - ação. 2. ed. São Paulo: Cortez, 1986

GUASTALA, FABIO ARIELO. **Estudo do efeito da degradação térmica nas propriedades mecânicas de correias transportadoras operando em alta temperatura**. 2013. 78f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. **Relatório anual de atividades: junho 2016 a junho 2017**. 36f. Brasília: IBRAM, 2017.

KARDEC, A.; NASCIF J. **Manutenção: função estratégica**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009. 384 p.

KERSTEN, A. **Proposta de manutenção centrada em confiabilidade para uma jateadora de granalha**. 2014. 69f. Dissertação (Trabalho Final de Curso) – Faculdade Horizontina, Horizontina.

KOMNINAKIS, D. **Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia**. 2017. 95f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade de Araraquara, Araraquara.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos metodologia científica**. 8.ed. São Paulo: Atlas, 2011.

MARTINS, C. B. **Metanálise caso a caso sob a perspectiva Bayesiana**. 2013. 87f. Tese – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MATOS, P. Z.; ZOTTI, D. M. **Análise de confiabilidade aplicada a indústria para estimações de falhas e provisionamento de custos**. 2010. 59f. Dissertação (Graduação) – Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MATTAR, F. N. **Pesquisa de marketing**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 2001.

MENDES, ANGÉLICA ALEBRANT. **Manutenção Centrada em Confiabilidade: uma abordagem quantitativa**. 2011. 85f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

OHTA, R. **Gestão da Manutenção Centrada na Confiabilidade em Pontes Rolantes**. 2014. 66f. Dissertação (Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

OLIVEIRA, Ralph Werner Heringer. **Introdução ao transporte e pavimentação**. Volume 1. Ouro Preto: Editora da UFOP, 2017.

OLIVEIRA, M. F. **Metodologia científica: um manual para a realização de pesquisas em Administração**. 2011. 72f. Manual (Pós-Graduação) – Universidade Federal de Goiás, Catalão.

OZAWA, M. T. **Aplicação de parâmetros da distribuição de Weibull na análise do potencial energético de um microgerador eólico em cidades do estado do paraná**. 2017. 109 p. Dissertação (Engenharia Eletrônica) - Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa.

PORCIÚNCULA, G. S. **Metodologia para análise de confiabilidade no projeto de sistemas automáticos**. 2009. 163f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

QUEVEDO, J. M. G.; DIALLO, M.; LUSTOSA, L. J. Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2009.

RAPOSO, J. L. O. **Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: uma proposta para uso de análise de risco no diagrama de decisão**. 2005. 149f. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

REIS, E. A. **Análise descritiva de dados, tabelas e gráficos**. 1º edição. Belo Horizonte: Instituto de Ciências Exatas, 2001.

RIBEIRO, BRENO GONÇALVES CARDOZO. **Estudo de viabilidade econômica para a implantação de correias transportadoras de Rom de minério de ferro**. 2013. 81f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3º edição revisada e ampliada. São Paulo: Atlas, 2015.

RACIA, I. M. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração**. 2016. 108f. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROSA, ADRIANO. **Gestão do Transporte na Logística de Distribuição Física: uma análise da minimização do custo operacional**. 2007. 90f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação) – Departamento de Economia, Universidade de Taubaté, Taubaté.

SANTOS, *et al.* **Fenômenos Tribológicos: uma análise de um transportador de correia utilizado no processo de beneficiamento**. 70º Congresso Anual da ABM, 2015, Rio de Janeiro – RJ.

SILVA, Fernando. **Operação de carregadeira**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/FernandoSilva267/operao-de-carregadeira>>. Acesso em: 01 de outubro de 2018.

SOUZA, F. J. **Melhoria do pilar “manutenção planejada” da TPM através da utilização do RCM para nortear as estratégias de manutenção**. 2004. 115f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TATSCH, D. M. **Metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade Aplicada em uma Máquina de Montar Pneus**. 2010. 30f. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TORQUETTO. **Ambiente do motor**. Disponível em: <<http://automobilistica.forumeiros.com/t92-ambiente-do-motor-parte-i>>. Acesso em: 01 de outubro de 2018.

TRIVELLATO, A. A. **Aplicações das sete ferramentas básicas da qualidade no ciclo PDCA para melhoria contínua: estudo de caso numa empresa de autopeças**. 2010. 73 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de curso) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos.

VALE, E. **Avaliação da mineração na economia nacional: matriz insumo produto do setor mineral**. Brasília: CPRM, 2001.

VARELLA. **Sistemas auxiliares dos motores de combustão interna**. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Aulas/sistemas_auxiliares.pdf>. Acesso em: 01 de outubro de 2018.

VIANA, H. R. G. **PCM: Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Quality mark, 2002.

VIEIRA, J. C. A. O. **A tecnologia do transportador de correias de longa distância (TCLD) como estratégia do sistema de transporte numa mineradora em Minas Gerais**. 2012. 48f. Dissertação (Curso de Especialização em Logística) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

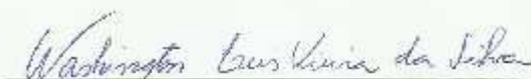
WADA, C. **Histórico dos movimentos ambientais no Brasil e no mundo**. Disponível em: <<http://www.cmqv.org/website/artigo.asp?cod=1461&idi=1&moe=212&id=17071>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

WERNER, L. **Modelagem dos tempos de falhas ao longo do calendário.** 1996. 107f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

XENOS, H. G. **Gerenciando a Manutenção Preventiva: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade.** Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.

Declaração

Certifico que o aluno Marcos Rafael da Silva, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "ESTUDO DE CONFIABILIDADE APLICADO À MANUTENÇÃO DE PÁS-CARREGADEIRAS: O CASO DE UMA EMPRESA DE MINERAÇÃO", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Prof. DSc. Washington Luis Vieira da Silva

Orientador

Ouro Preto, 11 de dezembro de 2018