



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



JOSÉ AUGUSTO MARTINS BORGES

**APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE
PARA ELABORAÇÃO DE UM PLANO DE AÇÃO PARA UMA
RETOMADORA: O CASO DE UMA EMPRESA DO SETOR DE
MINERAÇÃO**

OURO PRETO - MG
2026

JOSÉ AUGUSTO MARTINS BORGES

jose.amb@aluno.ufop.edu.br

**APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE
PARA ELABORAÇÃO DE UM PLANO DE AÇÃO PARA UMA
RETOMADORA: O CASO DE UMA EMPRESA DO SETOR 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.

Orientador: DSc. Washington Luis Vieira da Silva

**OURO PRETO – MG
2026**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B732a Borges, Jose Augusto Martins.

Aplicação da manutenção centrada na confiabilidade para elaboração de um plano de ação para uma retomadora [manuscrito]: o caso de uma empresa do setor de mineração. / Jose Augusto Martins Borges. - 2026. 87 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Washington Luis Vieira da Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Confiabilidade (Engenharia) - Manutenção. 2. Distribuição Gama Generalizada (GG) - Distribuição de Weibull. 3. Logística empresarial. 4. Minas e recursos minerais. 5. Equipamento de transporte - Indústria - Retomadora. I. Silva, Washington Luis Vieira da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

José Augusto Martins Borges

Aplicação da manutenção centrada na confiabilidade para elaboração de um plano de ação para uma retomadora: o caso de uma empresa do setor de mineração

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

Aprovada em 09 de Julho de 2026

Membros da banca

DSc. Washington Luis Vieira da Silva - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

DSc. Diogo Antônio de Sousa (Universidade Federal de Ouro Preto)

MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Washington Luís Vieira da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Washington Luis Vieira da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/07/2026, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1147635** e o código CRC **F9AD8069**.

A minha mãe maior exemplo que a vida me deu, essa conquista é 100% sua. A Deus por ter me dado força. E a minha família base e alicerce de tudo.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por toda força, paciência e resiliência diante dos desafios enfrentados e superados na elaboração deste presente trabalho. Sem o apoio de Deus e do nosso Senhor Jesus Cristo, nada seria possível.

À minha amorosa mãe, por todo suporte e confiança. Obrigado por permitir que eu vivesse esse sonho. Te amo, mamãe.

À minha namorada, Mabi, por todo suporte e paciência nesta reta final. Te amo.

Ao meu digníssimo orientador, professor Washington, pessoa nobre e de grande coração, agradeço pela paciência.

Aos grandes mestres da engenharia mecânica da gloriosa Escola de Minas, por todo conhecimento adquirido ao longo do curso; mesmo reconhecendo que ainda sei pouco sobre essa maravilhosa profissão que é a engenharia mecânica, todo esse conhecimento se deve a eles.

À gloriosa República Quitandinha, por ter me recebido em Ouro Preto e por ter me ensinado muito sobre a vida.

E, por fim, a duas pessoas que foram superimportantes neste trabalho: ao engenheiro Marcos Lima, muito obrigado pelo suporte e direcionamento neste trabalho, por ter me ensinado tanto sobre engenharia e confiabilidade; você é referência. E ao digníssimo Júlio Moraes, por toda paciência e conhecimento transmitido.

“Eu não merecia nada, mas Deus me deu tudo”.

Autor Desconhecido

RESUMO

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) constitui uma metodologia empregada para compreender o comportamento das falhas e subsidiar a tomada de decisão na gestão da manutenção de equipamentos industriais. Este trabalho caracteriza-se como um estudo de caso, de natureza exploratória, com abordagem quantitativa e qualitativa, e tem como objetivo propor um plano de ação para uma retomadora, equipamento destinado à escavação de minério em pilhas e ao seu retorno à cadeia produtiva de uma empresa do setor de mineração, com base nos princípios da MCC. O estudo justifica-se pela elevada criticidade desse equipamento no processo de beneficiamento de minério, uma vez que suas falhas provocam indisponibilidade física, perdas de produção e aumento dos custos de manutenção. Para atingir os objetivos propostos, realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre manutenção, métodos de manutenção, confiabilidade e MCC, seguida da aplicação dessa metodologia ao estudo de caso. Além disso, a pesquisa possui caráter documental, por utilizar o histórico detalhado de falhas do equipamento. O estudo contemplou a coleta e o tratamento do histórico de falhas, a filtragem dos dados por meio da remoção de observações atípicas para definição do período amostral, bem como a modelagem estatística por meio da distribuição de Weibull. Essa distribuição permite identificar o modelo probabilístico que melhor representa o comportamento das falhas do batente. Seu parâmetro de forma (β) define o comportamento da taxa de falhas ao longo da curva da banheira e sua inclinação, enquanto o parâmetro de escala (η) define a vida característica, correspondente ao tempo, em horas, associado a uma probabilidade de falha de 63,2%. O ajuste da distribuição de Weibull resultou em valores de β igual a 0,72 e η igual a 131,28 horas, evidenciando uma taxa de falha decrescente e uma baixa vida característica do componente, compatíveis com um mecanismo de falha associado à fadiga por carregamento cíclico. Com base nesses resultados, elaborou-se um plano de ação estruturado por meio da ferramenta 5W1H, que organiza a resolução de problemas de forma prática e sistemática ao responder a seis perguntas fundamentais, no qual foram propostas alterações no projeto e no material do componente para mitigar as causas fundamentais das falhas. Conclui-se que a aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade fornece suporte técnico para a tomada de decisão na gestão da manutenção, permitindo a proposição de ações capazes de aumentar a confiabilidade e a disponibilidade da retomadora, bem como reduzir a ocorrência de falhas recorrentes.

Palavras-chave: Manutenção Centrada na Confiabilidade. Confiabilidade. Distribuição de Weibull. Plano de Ação. Mineração. Retomadora.

ABSTRACT

Reliability-Centered Maintenance (RCM) is a methodology used to understand failure behavior and support decision-making in the maintenance management of industrial equipment. This study is characterized as an exploratory case study with both quantitative and qualitative approaches and aims to propose an action plan for a bridge-type bucket wheel reclaimer, equipment designed to excavate ore stockpiles and return the material to the production process of a mining company, based on the principles of RCM. The study is justified by the high criticality of this equipment in the ore beneficiation process, since its failures lead to reduced equipment availability, production losses, and increased maintenance costs. To achieve the proposed objectives, a literature review was conducted on maintenance, maintenance strategies, reliability, and RCM, followed by the application of the methodology to the case study. In addition, the research has a documentary nature, as it uses the equipment's detailed failure history. The study included the collection and processing of failure history data, data filtering through the removal of outliers to define the sampling period, and statistical modeling using the Weibull distribution. This distribution makes it possible to identify the probabilistic model that best represents the failure behavior of the stop block. Its shape parameter (β) defines the failure rate behavior throughout the bathtub curve and its slope, whereas the scale parameter (η) defines the characteristic life, corresponding to the time, in hours, associated with a 63.2% probability of failure. The Weibull distribution fitting resulted in $\beta = 0.72$ and $\eta = 131.28$ hours, indicating a decreasing failure rate and a low characteristic life of the component, consistent with a failure mechanism associated with cyclic loading fatigue. Based on these results, an action plan was developed using the 5W1H tool, which systematically supports problem solving by addressing six fundamental questions. The proposed actions included changes to the component's design and material in order to mitigate the root causes of the failures. It is concluded that the application of Reliability-Centered Maintenance provides technical support for maintenance management decision-making, enabling the proposal of actions capable of increasing the reliability and availability of the bridge-type bucket wheel reclaimer, as well as reducing the occurrence of recurrent failures.

Keywords: Reliability-Centered Maintenance. Weibull Distribution. Action Plan. Mining. Reclaimer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da curva da banheira	23
Figura 2 – Representação de confiabilidade da distribuição exponencial	27
Figura 3 – Distribuição de Weibull	29
Figura 4 – Relação de β e as fases da curva da banheira	30
Figura 5 – Função de risco da lognormal para $\mu = 1$ e $\sigma = 0,5$	33
Figura 6 – Formulário modelo FMEA teórico	36
Figura 7 – Simbologia dos eventos numa FTA	40
Figura 8 – Simbologia das portas lógicas	40
Figura 9 – FTA de um motor elétrico inoperante	41
Figura 10 – Exemplo de um plano de ação	42
Figura 11 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho	46
Figura 12 – Organograma empresarial	52
Figura 13 – Retomadora Roda de Caçamba Tipo Ponte	53
Figura 14 – Vista geral da retomadora	53
Figura 15 – Vista lateral em corte do conjunto carro troller	54
Figura 16 – Vista frontal do conjunto carro troller	56
Figura 17 – Sistema de Amortecimento da Retomadora	57
Figura 18 – Condição do batente em operação	58
Figura 19 – Falha em batente de borracha	59
Figura 20 – Diagrama de Weibull da primeira amostra	64
Figura 21 – Curva de probabilidade de falha da primeira amostra	66
Figura 22 – Curva de confiabilidade da primeira amostra	66
Figura 23 – Diagrama de Weibull da segunda amostra	69
Figura 24 – Diagrama de Weibull da amostra final	72
Figura 25 – Número de intervenções corretivas	74
Figura 26 – Curva de probabilidade de falha da amostra final	75
Figura 27 – Curva de confiabilidade $R(t)$ da amostra final	75

Figura 28 – Comparação entre os diagramas de Weibull	76
Figura 29 – Plano de ação (5W1H)	77
Figura 30 – Protótipo do batente feito de poliuretano	78
Figura 31 – Falha no protótipo do batente de poliuretano	79
Figura 32 – Falha no protótipo do batente de poliuretano	80
Figura 33 – Mudanças realizadas no projeto do batente de poliuretano topo curvo	81
Figura 34 – Projeto final do batente de poliuretano topo curvo	82
Figura 35 – Projeto final do batente de poliuretano topo reto	82
Figura 36 – Batente de poliuretano com topo reto instalado na máquina	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre β e o comportamento da função de taxa de falhas	30
Tabela 2 – Relação entre β e interpretações físicas da unidade estudada	31
Tabela 3 – Variáveis e Indicadores	48
Tabela 4 – Fração da base crua de dados do primeiro <i>software</i>	60
Tabela 5 – Mesclagem de tempos de intervalos subsequentes em um único intervalo	61
Tabela 6 – Fração da base crua de dados do segundo <i>software</i>	61
Tabela 7 – Mesclagem de tempos de planilhas distintas em um único intervalo	63
Tabela 8 – Fração da base de dados final	63
Tabela 9 – Fração da base de dados em que será realizada a filtragem de dados	67
Tabela 10 – Valores para a primeira filtragem de dados	68
Tabela 11 – Amostra proveniente da primeira filtragem de dados	69
Tabela 12 – Valores para a segunda filtragem de dados	70
Tabela 13 – Amostra final proveniente da segunda filtragem de dados	71

LISTA DE SÍMBOLOS

- β – Parâmetro de forma da distribuição de Weibull; indica o comportamento da taxa de falha
- η – Parâmetro de escala da distribuição de Weibull; representa a vida característica
- γ – Parâmetro de forma da distribuição de Weibull ou da distribuição gama
- θ – Parâmetro de escala da distribuição de Weibull
- λ – Taxa de falhas
- μ – Média da variável logarítmica na distribuição lognormal
- σ – Desvio padrão da variável logarítmica na distribuição lognormal
- Γ – Função Gama
- Φ – Função de distribuição acumulada da distribuição normal padronizada
- ϕ – Função densidade de probabilidade da distribuição normal padronizada
- $R(t)$ – Função confiabilidade no tempo t
- $F(t)$ – Função de distribuição acumulada
- $f(t)$ – Função densidade de probabilidade
- $h(t)$ – Função de risco ou taxa de falha
- t – Tempo de operação
- T – Variável aleatória tempo até a falha
- T_0 – Tempo de vida inicial, garantia ou deslocamento da distribuição
- t_M – Mediana do tempo até a falha
- n – Tamanho da amostra
- n_0 – Número total de unidades analisadas
- $nf(t)$ – Número de unidades que falharam até o tempo t
- $ns(t)$ – Número de unidades sobreviventes até o tempo t
- N – Número total de observações ou eventos considerados
- TPF – Tempo para falha
- TPR – Tempo para reparo
- D – Disponibilidade
- e – Base dos logaritmos neperianos, aproximadamente 2,718
- RPN – Número de Prioridade de Risco

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5W1H – What, Why, Who, Where, When e How

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AND – Porta lógica E

CDU – Classificação Decimal Universal

DSc – Doctor Scientiae

FMEA – Failure Mode and Effect Analysis / Análise de Modos e Efeitos de Falha

FMECA – Failure Mode and Effect and Critical Analysis / Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falha

FTA – Fault Tree Analysis / Análise da Árvore de Falhas

GT – GT Soluções Industriais

MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade

MP – Manutenção Preventiva

MSc – Master of Science

MTBF – Mean Time Between Failures / Tempo Médio Entre Falhas

MTTF – Mean Time To Failure / Tempo Médio até a Falha

MTTR – Mean Time To Repair / Tempo Médio de Reparo

NBR – Norma Brasileira

OR – Porta lógica OU

PCM – Planejamento e Controle da Manutenção

PCP – Planejamento e Controle da Produção

PhD – Doctor of Philosophy

QFD – Quality Function Deployment / Desdobramento da Função Qualidade

QQ Plot – Quantile-Quantile Plot

RCM – Reliability-Centered Maintenance

ROM – Run-Of-Mine

RPN – Risk Priority Number / Número de Prioridade de Risco

TMEF – Tempo Médio Entre Falhas

TMPF – Tempo Médio Para Falha

TMPR – Tempo Médio Para Reparo

TPM – Total Productive Maintenance / Manutenção Produtiva Total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Manutenção	5
2.2	Métodos de Manutenção.....	6
2.2.1	Manutenção Corretiva	7
2.2.2	Manutenção Preventiva	9
2.2.3	Manutenção Preditiva.....	11
2.2.4	Manutenção Detectiva	13
2.2.5	Engenharia da Manutenção	13
2.2.6	Manutenção Autônoma (TPM).....	13
2.2.7	Melhoria dos Equipamentos	14
2.2.8	Prevenção de Manutenção	14
2.2.9	Manutenção Produtiva.....	15
2.3	Manutenção Centrada na Confiabilidade	15
2.3.1	Confiabilidade	15
2.3.2	Conceito de Manutenção Centrada na Confiabilidade	16
2.3.3	Implementação do MCC.....	18
2.3.4	Ferramentas da Confiabilidade.....	22
2.4	Plano de Ação	41
3	METODOLOGIA.....	44
3.1	Tipos de Pesquisa	44
3.2	Materiais e Métodos	46
3.3	Variáveis e Indicadores	47
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	48
3.5	Tabulação dos dados.....	48

3.6	Considerações Finais do Capítulo	49
4	RESULTADOS	50
4.1	Características da Empresa	50
4.2	Caracterização da Retomadora Roda de Caçamba Tipo Ponte	52
4.3	Proposta de um Plano de Ação em uma Retomadora a partir do MCC	57
4.3.1	Falha nos Batentes de Borracha	57
4.3.2	Coleta e Tratamento de Dados	59
4.3.3	Filtragem de dados e Distribuição de Probabilidade	63
4.3.4	Mecanismo de Falha	77
4.3.5	Plano de Ação (5W1H)	77
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	85
5.1	Conclusão	85
5.2	Recomendações	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Diante dos desafios impostos pela sociedade moderna às empresas, é necessário que elas demonstrem dinamismo e capacidade de adaptação em um mercado cada vez mais competitivo e globalizado. Para que isso seja possível, pode configurar um aspecto significativo que a empresa mantenha sua cadeia produtiva em funcionamento contínuo e eficiente, com o auxílio da manutenção.

Assim, a manutenção é conceituada segundo a NBR 5462 *apud* Xenos (2004, p.18), como “a combinação de 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.”

Com base nesses preceitos, Xenos (2004) salienta que os ativos passam por um processo natural de desgaste devido ao uso. Dessa forma, a manutenção existe para mitigar os danos provocados pela utilização e permitir uma maior vida útil dos equipamentos. Dentro da manutenção, encontra-se a Manutenção Centrada na Confiabilidade, uma importante ferramenta para auxiliar na garantia da saúde dos equipamentos.

Fogliatto (2011, p.217) define a Manutenção Centrada na Confiabilidade como “um programa que reúne várias técnicas de engenharia para assegurar que os equipamentos de uma planta fabril continuarão realizando as funções especificadas”. Ainda, segundo Fogliatto (2011) enfatiza que a Manutenção Centrada na Confiabilidade é o meio mais eficiente de tratar os problemas relacionados à manutenção, promovendo maior disponibilidade física dos ativos e reduzindo os custos do processo, desde a prevenção de acidentes até a substituição de componentes.

Portanto, a Manutenção Centrada na Confiabilidade configura-se como uma importante aliada do setor de mineração, e toda cadeia produtiva do setor caracteriza-se por um sistema altamente abrasivo, que exige dos equipamentos elevados níveis de força e resistência, em razão dos impactos decorrentes do beneficiamento do minério em larga escala, processo que envolve etapas como transporte, britagem e separação do minério do rejeito, entre outras.

Dessa forma, os equipamentos utilizados na mineração demandam manutenção constante e eficiente. Nesse contexto, a Manutenção Centrada na Confiabilidade atua na

identificação e prevenção de falhas, não apenas corrigindo as que são detectadas, mas também desenvolvendo métodos e processos de engenharia para garantir a integridade e a eficiência dos ativos, prolongando sua vida útil. Cabe ao setor de engenharia patrocinar e promover as práticas de confiabilidade dentro dos setores produtivos em conjunto a manutenção e operação.

Nesse cenário, as retomadoras desempenham papel fundamental na mineração. No pátio de homogeneização, a retomadora é responsável por desagregar o material da pilha de minério e promover a mistura de minerais com diferentes características litológicas, garantindo um produto mais homogêneo e favorecendo a eficiência do processo de beneficiamento. Para isso, realiza a escavação do minério por meio de rodas de caçambas que avançam sobre a pilha, recolhendo o material e transferindo-o aos transportadores de correia, assegurando a continuidade do processo de beneficiamento.

Assim, a proposta do estudo é investigar através da Manutenção Centrada na Confiabilidade as falhas inerentes à retomadora, para propor um plano de ação para eliminar as causas e consequentemente a falha. Dentro do contexto, tem-se a seguinte problemática:

Como a Manutenção Centrada na Confiabilidade pode contribuir para a proposta de um plano de ação para uma retomadora de uma empresa no setor de mineração?

1.2 Justificativa

A manutenção tem sua importância no contexto industrial e possui grande prestígio. Cada vez mais, os profissionais de manutenção precisam estar capacitados e preparados não apenas para corrigir as falhas, mas também para evitá-las. Nesse sentido, as empresas estabeleceram uma forte parceria com a área de manutenção, a qual desempenha um papel fundamental ao aumentar a disponibilidade e a confiabilidade das instalações, gerando consequentemente mais lucro, além de proporcionar ganhos em segurança, redução de serviços, custos e lucros cessantes, bem como contribuir para a preservação ambiental (KARDEC e NASCIF, 2009).

Dessa forma, conforme Viana (2002), a Manutenção Centrada na Confiabilidade tem como principal objetivo determinar os requisitos de manutenção de qualquer item físico dentro de seu contexto operacional, identificando as formas pelas quais esse item pode vir a falhar e fornecendo as ações de prevenção pertinentes. Assim, compreende-se a Manutenção

Centrada na Confiabilidade como uma importante aliada na tomada de decisão gerencial e no estabelecimento de diretrizes para as políticas de manutenção (VIANA, 2002).

Assim, conforme Xenos (2004), por meio da coleta de dados qualitativos e quantitativos, é possível identificar as causas-raiz dos problemas e estabelecer contramedidas para sua resolução, constituindo o pré-requisito mínimo para o desenvolvimento de um plano de ação. Ademais, segundo o autor, um plano de ação bem estruturado é de suma importância, pois possibilita a eliminação definitiva das causas fundamentais que levam à falha, desde que sua execução seja acompanhada de forma contínua e rigorosa. Isso exige que as contramedidas previstas sejam cumpridas dentro dos prazos estabelecidos pelos responsáveis. Somente por meio de um plano de ação adequadamente estruturado é possível evitar a recorrência das falhas (XENOS, 2004).

Logo, as retomadoras são partes fundamentais no processo de beneficiamento de minério e sua falha acarreta prejuízos à produção e, conseqüentemente, prejuízos financeiros. Diante disso, é necessário investigar as causas fundamentais das falhas das retomadoras e, a partir desse pressuposto, estabelecer contramedidas que as sanem, proporcionando maior disponibilidade, desempenho, menos corretivas e maior vida útil. Com isso, os ganhos de produção e de finanças do sistema produtivo são potencializados, reforçando a importância de uma abordagem sistemática de manutenção para alcançar resultados sustentáveis e fortalecer a competitividade industrial.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Propor um plano de ação para uma retomadora de uma empresa no setor de mineração, com a contribuição da Manutenção Centrada na Confiabilidade.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo bibliográfico sobre: manutenção, métodos de manutenção, Manutenção Centrada na Confiabilidade e plano de ação;
- Elaborar um procedimento metodológico para propor um plano de ação, a partir da Manutenção Centrada na Confiabilidade;

- Analisar, do ponto de vista da Manutenção Centrada na Confiabilidade o processo de manutenção da retomadora;
- Elaborar um plano de ação da retomadora a partir da aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a contextualização do tema, a formulação do problema de pesquisa, a justificativa para a realização do estudo e os objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo contempla a fundamentação teórica, abordando os principais conceitos relacionados à manutenção, aos diferentes tipos e estratégias de manutenção, à confiabilidade, à Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) e ao plano de ação, fornecendo o embasamento necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada, caracterizando a pesquisa quanto à sua natureza e abordagem, além de apresentar os procedimentos utilizados para a coleta, o tratamento e a análise dos dados, bem como a aplicação da metodologia ao estudo de caso.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos, incluindo a análise do histórico de falhas do componente, a modelagem estatística por meio da distribuição de Weibull, a identificação do comportamento das falhas e a elaboração do plano de ação fundamentado na ferramenta 5W1H.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manutenção

Segundo Seleme (2015), a manutenção é uma prática muito antiga, anterior à Revolução Industrial, caracterizada pelo conserto e reparo de equipamentos e ferramentas de engenharia. Para o mesmo autor, hodiernamente, as práticas de manutenção industrial são orientadas pelo mercado, isto é, pela necessidade de fabricar produtos e prestar serviços a um custo reduzido. Além disso, a manutenção é compreendida como o conjunto de ações que asseguram o pleno funcionamento das operações industriais. Paralelamente, surge a engenharia de manutenção, um processo que emprega modernas técnicas de engenharia a fim de desenvolver e estabelecer procedimentos de manutenção (SELEME, 2015).

Em complemento, de acordo com Bueno (2020), a manutenção consiste na preservação da condição ótima de operação dos equipamentos e na realização de reparos técnicos no menor tempo possível após o surgimento de falhas. Outrossim, conforme o autor, a manutenção tornou-se relevante no processo de produção, tendo em vista os benefícios proporcionados às empresas e indústrias.

Somado a isso, Xenos (2004) entende que, ao se observar a manutenção de maneira restrita, trata-se apenas de retornar o equipamento à sua condição original após a falha. Contudo, o autor reitera que as atividades de manutenção também devem abranger a introdução de melhorias, visando impedir a recorrência de defeitos e falhas, buscando o aumento da produtividade e a redução dos custos do processo.

Ademais, conforme Kardec e Nascif (2009), atualmente a missão da manutenção consiste em garantir a qualidade e a confiabilidade dos equipamentos e instalações, promovendo o pleno funcionamento do processo de produção ou de serviço, atuando com segurança, preservação do meio ambiente e com o melhor custo-benefício. Ainda, de acordo com o autor, observa-se uma mudança no conceito de manutenção, que não visa apenas assegurar a integridade dos equipamentos, mas também o cumprimento de suas funções, o que altera a forma de atuação dos mantenedores (KARDEC e NASCIF, 2009).

À luz desse entendimento, compreende-se que a manutenção é de suma importância para as empresas. Consoante a isso, Viana (2002) ressalta o impacto do Planejamento e Controle da Manutenção na saúde organizacional, destacando que, sem esse suporte, seria impossível às empresas alcançarem êxito. Ademais, o autor evidencia que a manutenção

industrial atua diretamente na garantia e preservação da integridade dos ativos, enquanto ao PCM cabe organizar e estruturar a função manutenção. Por fim, o autor reforça que, se a Manutenção Industrial e o PCM forem executados de maneira eficaz, a empresa tende a prosperar financeiramente, aprimorando sua competitividade no mercado por meio da oferta de produtos de qualidade a custos competitivos (VIANA, 2002).

Em última instância, a manutenção apresenta inúmeros benefícios que justificam sua prática em equipamentos e instalações industriais. Nesse contexto, Slack, Chambers e Johnston *apud* Seleme (2015) destacam que entre os principais benefícios da manutenção estão:

- Melhoria da confiabilidade: resulta em processos mais estáveis, com menos intervenções corretivas, menor tempo de reparo, redução das interrupções no processo produtivo e equipamentos que raramente apresentam falhas;
- Melhoria da segurança: instalações corretamente mantidas tornam-se mais padronizadas e previsíveis, proporcionando maior proteção a operadores e mecânicos;
- Aumento da qualidade: com maquinários operando de forma eficiente, a qualidade do produto final e de todo o processo eleva-se significativamente;
- Redução dos custos de operação: controles adequados, implementação de melhorias e manutenções periódicas permitem que os ativos operem de maneira mais eficiente;
- Ampliação da vida útil: práticas como lubrificação, limpeza e manutenção promovem uma prorrogação substancial da longevidade das instalações e dos maquinários;
- Valorização dos ativos: equipamentos bem cuidados e mantidos apresentam maior potencial de revenda futura.

Em conclusão, entende-se a manutenção como um processo de elevada importância para a indústria, demandando estudos mais aprofundados sobre o tema e sua devida classificação.

2.2 Métodos de Manutenção

Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção é classificada de acordo com o modo de atuação nos equipamentos. Assim, os autores dividem a manutenção em seis tipos principais: Manutenção Corretiva Não Planejada, Manutenção Corretiva Planejada, Manutenção Preventiva, Manutenção Preditiva, Manutenção Detectiva e Engenharia da

Manutenção. Além disso, na perspectiva dos autores, os tipos de manutenção podem ser considerados políticas de manutenção, desde que sejam efetivamente colocados em prática pelas empresas, a partir de uma definição gerencial ou de uma política geral da organização (KARDEC e NASCIF, 2009).

Ademais, conforme Viana (2002), a classificação da manutenção ocorre a partir do método de intervenção nos ativos de produção. Outrossim, o autor compreende que existem diversas maneiras de classificar a manutenção; contudo, entende-se como convergente para a maioria dos autores a seguinte classificação: Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva, Manutenção Preditiva e Manutenção Autônoma (TPM).

Por fim, de acordo com Xenos (2004), os métodos de manutenção podem ser classificados da seguinte forma: Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva, Manutenção Preditiva; Melhoria dos Equipamentos; Prevenção de Manutenção e Manutenção Produtiva.

2.2.1 Manutenção Corretiva

Conforme Kardec e Nascif (2009), a manutenção corretiva consiste em intervir no equipamento que apresenta falha ou desempenho diferente do esperado, e os autores reiteram que isso não caracteriza manutenção por emergência. Ainda conforme os autores, a manutenção corretiva tem como objetivo corrigir a falha ou restabelecer o equipamento à sua condição de funcionamento.

Sob esse viés, Kardec e Nascif (2009) dividem a manutenção corretiva em duas categorias: Corretiva Planejada e Corretiva Não Planejada. Para os autores (2009, p. 39), a “Manutenção Corretiva Não Planejada é a correção da falha de maneira aleatória”. Ainda, conforme os autores, esse tipo de manutenção também pode ser denominado Manutenção Emergencial. Ademais, na perspectiva dos autores, essa manutenção ocorre quando a falha ou o desempenho abaixo do esperado já se manifestaram, havendo pouco tempo de preparação para a atividade, sendo uma prática ainda muito comum na indústria.

Além disso, segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção corretiva é extremamente custosa para a empresa, pois a falha inesperada do equipamento provoca perda de produção, de qualidade e elevação dos custos indiretos. Por último, os autores salientam que as empresas que apresentam esse tipo de manutenção de forma recorrente em suas atividades têm sua manutenção comandada pelos equipamentos, e seu desempenho organizacional não atende às expectativas do mercado competitivo.

Sob essa perspectiva, Kardec e Nascif (2009, p. 41) conceituam que a “Manutenção Corretiva Planejada é a correção do desempenho menor do que o esperado ou a correção de falha por tomada gerencial”. Ainda, os autores destacam que esse tipo de manutenção apresenta menor custo, maior rapidez e maior segurança, além de ser realizada com melhor qualidade.

Segundo o entendimento de Kardec e Nascif (2009) a principal característica dessa modalidade de manutenção é a qualidade da informação obtida pelo monitoramento do equipamento. Assim, compreende-se que, mesmo quando a decisão é permitir que o equipamento opere até a falha, trata-se de uma escolha deliberada, que possibilita o planejamento necessário para que, no momento da ocorrência, a equipe de manutenção esteja preparada para atuar imediatamente.

Por último, Kardec e Nascif (2009) ressaltam que a Manutenção Corretiva Planejada permite conciliar a necessidade de intervenção com os interesses da produção. Além do mais, por se tratar de uma falha esperada, a probabilidade de que ela represente risco à saúde dos colaboradores diminui consideravelmente. Também se possibilita um melhor planejamento da manutenção e a disponibilidade de recursos sobressalentes, incluindo peças, ferramentas e mão de obra (KARDEC e NASCIF, 2009).

Somado a isso, a Manutenção Corretiva é conceituada pela ABNT *apud* Viana (2002, p. 9) como a “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a colocar um item em condições de executar uma função requerida”. Para Viana (2002), esse tipo de manutenção caracteriza uma intervenção aleatória e imediata, cujo objetivo é evitar a propagação dos danos decorrentes da falha nos instrumentos de produção, na segurança do trabalhador e no meio ambiente.

Segundo o entendimento de Xenos (2004), a manutenção corretiva é realizada após a ocorrência da falha. O autor complementa que esse tipo de manutenção é válido apenas quando o custo de corrigir a falha é inferior ao de adotar ações preventivas. Contudo, é importante salientar que a manutenção corretiva pode gerar grandes perdas de produção decorrentes da falha do equipamento e da paralisação da cadeia produtiva.

Ainda, Xenos (2004) destaca que, mesmo quando a empresa opta pela manutenção corretiva para componentes menos críticos dos equipamentos, é fundamental que disponha de mão de obra qualificada, além de ferramentas e peças de reposição, de modo a atuar rapidamente na falha e evitar que o equipamento permaneça parado por longos períodos. Por

fim, o autor reitera que, ainda que a manutenção corretiva apresente o melhor custo-benefício, a empresa não deve tratar a falha como algo natural e inerente ao processo; cabe a ela identificar as causas fundamentais que a originam e adotar as contramedidas necessárias para bloqueá-la.

2.2.2 Manutenção Preventiva

Segundo Kardec e Nascif (2009, p.42) a “Manutenção Preventiva é a atuação realizada de forma a reduzir a falha ou a queda de desempenho, obedecendo a uma plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo”. Para esse mesmo autor, a manutenção preventiva é inversa a manutenção corretiva, tendo em vista que atua para evitar a ocorrência da falha.

De acordo com o que propõe Kardec e Nascif (2009), nem sempre os fabricantes dispõem dos dados necessários para a elaboração dos planos de manutenção preventiva pelas empresas, considerando, ainda, os fatores ambientais e operacionais que impactam diretamente a degradação do equipamento. Dessa forma, compreende-se que a definição da periodicidade será específica para cada planta. Sob esse viés, os autores destacam dois cenários possíveis na condição inicial de operação: o primeiro refere-se à ocorrência de falha antes da execução da manutenção preventiva; o segundo corresponde à abertura do equipamento para a substituição de peças.

Outrossim, Kardec e Nascif (2009) compreendem que a adoção da manutenção preventiva é recomendada quando há facilidade na reposição de peças, quando o custo da falha e seu impacto na produção são elevados e quando a falha representa risco à operação ou à saúde dos colaboradores.

Nessa perspectiva, Kardec e Nascif (2009) apontam que a manutenção preventiva apresenta aspectos positivos, como maior controle das ações e dos recursos. Entretanto, a própria execução da manutenção preventiva retira o equipamento da condição de operação para a realização de uma intervenção, podendo ocasionar defeitos antes inexistentes, os quais podem surgir por diferentes fatores, como falha humana ou inadequações no plano de manutenção.

Ademais, de acordo com Viana (2002), a manutenção preventiva é realizada em qualquer equipamento que esteja em condições de operação ou em estado de “zero defeito”, sendo caracterizada por intervenções executadas em períodos determinados e com critérios

pré-estabelecidos. Além disso, o autor reitera que esse tipo de manutenção é empregado para reduzir a probabilidade de falhas no equipamento, garantindo maior estabilidade de funcionamento.

Além do mais, Viana (2002) destaca os benefícios da manutenção preventiva, que vão desde a possibilidade de manter um almoxarifado mais enxuto e eficiente até a aplicação do Planejamento e Controle da Produção (PCP). Isso ocorre porque esse tipo de manutenção envolve planos de intervenções programadas no calendário de paradas, proporcionando controle efetivo do estado operacional da máquina, reduzindo improvisações e elevando a qualidade dos serviços realizados (VIANA, 2002).

Por fim, Viana (2002) salienta que o principal objetivo da Manutenção Industrial é evitar a ocorrência de falhas, assegurando que todo o processo produtivo ocorra conforme o planejado. No entanto, segundo o autor, quando a falha ocorre, gera um sentimento desagradável para as equipes de operação e manutenção, uma vez que provoca a parada da produção e o aumento dos custos operacionais e de manutenção.

Assim, Viana (2002) reitera que a manutenção preventiva reduz significativamente as intervenções corretivas, permitindo maior controle dos maquinários pelas equipes. Consequentemente, esse controle eleva a autoestima dos mantenedores, que passam a perceber eventuais falhas como ocorrências isoladas e administráveis.

Na perspectiva de Xenos (2004, p. 24), a “manutenção preventiva é o coração das atividades de manutenção”. O autor também a caracteriza como um conjunto de tarefas que abrangem desde a inspeção de equipamentos até reformas e substituições de peças. Assim, Xenos (2004) reforça que a manutenção preventiva constitui a principal atividade de manutenção e possui caráter obrigatório.

Nesse sentido, Xenos (2004) utiliza um efeito comparativo entre a manutenção corretiva e a preventiva. No que se refere ao custo de manutenção, a preventiva apresenta valor mais elevado, uma vez que envolve reformas e trocas realizadas antes de as peças ou o equipamento atingirem seu limite de vida. Entretanto, o autor contrapõe que, ao considerar o custo total, a manutenção preventiva é menos dispendiosa, pois reduz a ocorrência de falhas, diminui paradas de produção e, consequentemente, aumenta a disponibilidade do equipamento.

Em suma, Xenos (2004) enfatiza que a manutenção preventiva não é a solução definitiva para todos os problemas. Muitas empresas, mesmo executando ações preventivas,

continuam apresentando falhas frequentes. Ainda, segundo Xenos (2004), isso pode ocorrer devido à realização de manutenções preventivas voltadas à correção de falhas ordinárias, à ausência de padrões e procedimentos operacionais de manutenção ou à insuficiência de habilidades técnicas dos mantenedores e operadores. Portanto, o autor salienta que, sem um plano de manutenção preventiva bem estruturado, as falhas tendem a aumentar, enquanto as atividades preventivas apenas consumirão tempo da equipe de manutenção.

2.2.3 Manutenção Preditiva

À luz de Kardec e Nascif (2009), a manutenção preditiva consiste no monitoramento sistemático das condições de operação do equipamento por meio de técnicas preditivas e, quando necessária uma ação corretiva, utiliza-se a manutenção corretiva planejada. Ainda, o objetivo da manutenção preditiva, segundo Kardec e Nascif (2009, p. 45), é “prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas através de acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível”. Ademais, os autores enfatizam que a manutenção preditiva prioriza a disponibilidade do equipamento, uma vez que não exige sua parada, permitindo que o monitoramento ocorra com o equipamento em operação.

Kardec e Nascif (2009) enfatizam que são necessárias condições básicas para a adoção da manutenção preditiva, que incluem desde a adequação do equipamento até a elaboração de um programa específico para monitoramento e diagnóstico. Além disso, os autores salientam que os fatores que justificam a adoção dessa política de manutenção abrangem aspectos relacionados à segurança e à operação, bem como a redução de custos decorrente da diminuição do número de intervenções no equipamento, permitindo ainda que ele opere por um período mais prolongado.

Sob esse viés, no tocante aos custos, Kardec e Nascif (2009) enfatizam que o custo de monitoramento é baixo, uma vez que os aparelhos utilizados para medição não apresentam valor elevado e, com o avanço da microeletrônica, tendem a tornar-se ainda mais acessíveis. Somado a isso, o custo com mão de obra também é reduzido, considerando que o monitoramento pode ser realizado pelos próprios operadores. Consoante a isso, os autores destacam que o custo inicial para a instalação do sistema de monitoramento é relativamente alto, podendo alcançar valores de até 1% do capital total do equipamento. Entretanto, salientam que um programa de monitoramento bem administrado pode apresentar uma relação custo-benefício de 1/5 (KARDEC e NASCIF, 2009).

Portanto, para Kardec e Nascif (2009), quando se trata de produção, a manutenção preditiva é a que apresenta os melhores resultados, pois permite maior tempo de operação dos equipamentos e intervenções menores e mais precisas. Em conclusão, os autores ressaltam que é de suma importância que a equipe de preditiva seja bem treinada e preparada para elaborar relatórios e diagnósticos precisos, possibilitando intervenções eficientes e de alta qualidade nos equipamentos.

Consoante a isso, Viana (2002) considera a manutenção preditiva como uma tarefa integrante da manutenção preventiva, complementando que ela utiliza o monitoramento do equipamento para identificar o momento mais próximo possível da ocorrência da falha. Além do mais, o autor reitera que a manutenção preditiva tem como principal objetivo determinar com eficiência o momento ideal de intervenção, permitindo que o equipamento permaneça operando por mais tempo e aproveitando ao máximo sua vida útil, evitando reposições desnecessárias.

Viana (2002) complementa que existem quatro técnicas preditivas aplicadas por indústrias nacionais que optaram por adotar a manutenção preditiva em suas políticas de manutenção: Ensaio por Ultrassom, Análise de Vibrações Mecânicas, Análise de Óleos Lubrificantes e Termografia. Por último, Viana (2002) aponta os principais pontos positivos e os desafios relacionados a cada técnica preditiva, demonstrando que essas metodologias são utilizadas para o monitoramento da condição operacional dos equipamentos, fornecendo informações sobre espessura, temperatura, níveis vibracionais, contaminação de óleos, entre outros parâmetros.

Outrossim, Xenos (2004) relembra que a manutenção preventiva apresenta altos custos de manutenção, pois peças e equipamentos são substituídos ou reformados antes de atingirem o limite de sua vida útil. Assim sendo, Xenos (2004) enfatiza que a manutenção preditiva aumenta os intervalos de manutenção, uma vez que permite identificar quando os equipamentos e componentes estão mais próximos da falha, evitando paradas e substituições dispensáveis.

Além do mais, Xenos (2004) enfatiza que a manutenção preditiva é uma forma de inspeção dos equipamentos e, portanto, deve integrar a manutenção preventiva e compor seu planejamento. Somado a isso, Xenos (2004) destaca que a manutenção preditiva deve ser adotada pelas empresas, pois é eficiente, simples e proporciona resultados satisfatórios. Por fim, o autor relata que, apesar dos avanços tecnológicos, ainda existem desafios que impedem a aplicação da preditiva em determinadas peças e equipamentos.

2.2.4 Manutenção Detectiva

Segundo Kardec e Nascif (2009, p. 47), a “manutenção detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção, comando e controle, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação ou manutenção”. Ou seja, para Kardec e Nascif (2009), trata-se de tarefas realizadas a fim de identificar a funcionalidade de um sistema de proteção.

Kardec e Nascif (2009) enfatizam que a identificação dessas falhas ocultas é fundamental para garantir a confiabilidade dos sistemas. Nesse sentido, os autores reiteram a importância do sistema *trip* e *shut-down*, um sistema automático e independente que atua quando o equipamento sai de sua faixa de operação segura, sendo responsável por assegurar integridade e proteção. Em síntese, os autores concluem que, na manutenção detectiva, é possível identificar e intervir em falhas ocultas sem interromper a operação do equipamento.

2.2.5 Engenharia da Manutenção

De acordo com Kardec e Nascif (2009), a engenharia de manutenção representa uma mudança de cultura e constitui um dos alicerces da manutenção, sendo responsável por implementar melhorias e consolidar a rotina operacional. Para os autores, cabe à engenharia de manutenção um amplo conjunto de atribuições, cujo objetivo é aprimorar os processos de produção e manutenção, estabelecer padrões de operação e desempenho, aplicar técnicas modernas e garantir uma manutenção de alto desempenho.

Ademais, Kardec e Nascif (2009) compreendem a engenharia de manutenção como o passo seguinte à aplicação da manutenção preditiva. Outrossim, para os autores, um exemplo claro da prática de engenharia de manutenção consiste em utilizar os dados gerados pela manutenção preditiva para desenvolver estudos, análises e propor melhorias para equipamentos e instalações. Logo, os autores reiteram que a engenharia de manutenção envolve a busca contínua por melhorias a partir dos dados produzidos pela manutenção.

2.2.6 Manutenção Autônoma (TPM)

Segundo Viana (2002), a manutenção autônoma consiste em serviços de manutenção realizados pelos operadores nos equipamentos que operam. Esses serviços podem incluir limpeza, lubrificação ou até ações mais complexas, como a análise do equipamento seguida da proposição de melhorias.

2.2.7 Melhoria dos Equipamentos

De acordo com Xenos (2004), a melhoria dos equipamentos também pode ser denominada kaizen, termo japonês que significa, de modo geral, realizar melhorias. Para o autor, a prática do kaizen no contexto da manutenção consiste na busca pela melhoria dos equipamentos em relação às suas condições originais.

À luz de Xenos (2004), é comum que, na manutenção, prevaleça a cultura de apenas tratar a falha e retornar o equipamento à sua condição de operação. Contudo, o autor ressalta a necessidade de uma busca contínua pela melhoria, promovendo modificações em projetos, procedimentos de operação e práticas de manutenção, fundamentadas no estudo das causas básicas das falhas. Paralelamente, o autor destaca que, mesmo na ausência de falhas, é necessário continuar aprimorando o equipamento, o que pode ocorrer por meio da redução de custos, de sobressalentes e do tempo de manutenção.

2.2.8 Prevenção de Manutenção

Conforme Xenos (2004), a prevenção da manutenção consiste essencialmente em um conjunto de atividades realizadas em parceria com o fabricante, iniciadas ainda na fase de projeto, com o objetivo de reduzir a demanda por serviços de manutenção durante a operação do equipamento. Além disso, para Xenos (2004), um ponto importante é que, a partir do feedback fornecido ao fabricante, é possível implementar alterações de projeto que melhorem a prevenção de falhas e a manutenibilidade dos novos equipamentos a serem adquiridos.

Para Blanchard *apud* Xenos (2004), 95% dos serviços de manutenção que ocorrem durante a fase de operação são definidos ainda no desenvolvimento do equipamento. Assim, Xenos (2004) conclui que a prevenção da manutenção busca atuar de forma preventiva quando o equipamento ainda está em fase de projeto, etapa na qual é mais econômico e simples identificar falhas potenciais e impedir que elas ocorram.

Em conclusão, Xenos (2004) reitera a importância de os setores de manutenção e produção atuarem conjuntamente na aquisição de novos equipamentos, analisando o desempenho destes sob a perspectiva de ambas as áreas. Para Xenos (2004), tal análise é essencial, pois são comuns os atritos entre os dois setores decorrentes da incapacidade do equipamento de operar conforme a demanda da produção. Quando há falhas frequentes, a produção tende a interpretar que a manutenção não está sendo executada adequadamente,

enquanto a manutenção, por sua vez, considera que a produção não está operando o equipamento de forma correta (XENOS, 2004).

2.2.9 Manutenção Produtiva

De acordo com Xenos (2004), a manutenção produtiva é um conjunto de métodos que acompanha o equipamento ao longo de toda a sua vida útil, buscando maximizar os ganhos de produção. A manutenção produtiva visa aumentar a disponibilidade e a produtividade dos equipamentos, além de monitorar os custos de manutenção em relação à produtividade durante os ciclos de vida do equipamento.

Por conseguinte, Xenos (2004) enfatiza que a manutenção produtiva requer cooperação mútua entre os setores da empresa, visando ao melhor desempenho dos equipamentos, especialmente do setor de produção, pois a forma de operação impacta diretamente os custos de manutenção. Portanto, o autor ressalta que o objetivo fundamental não é apenas evitar a ocorrência de falhas, mas utilizar diversos métodos de manutenção para melhorar os ganhos de produção e, conseqüentemente, os resultados financeiros.

2.3 Manutenção Centrada na Confiabilidade

2.3.1 Confiabilidade

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011), a confiabilidade consiste basicamente no sucesso operacional de um equipamento ou instalação, caracterizado pela ausência de falhas. Ademais, Leemis, *apud* Fogliatto e Ribeiro (2011), apresenta o conceito quantitativo de confiabilidade aplicado à engenharia, definindo-a como a probabilidade de um item desempenhar as funções para as quais foi projetado por um período de tempo predeterminado e sob determinadas condições ambientais.

Segundo a NBR 5462-1994 *apud* Kardec e Nascif (2009), o conceito de confiabilidade é definido como “a capacidade de um item de desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo”. Somado a isso, os autores acrescentam que é possível calcular a confiabilidade de um equipamento por meio de uma distribuição exponencial, aplicável a taxas de falhas constantes. Essa distribuição é dada pela seguinte equação:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Onde:

$R(t)$ = confiabilidade a qualquer tempo t .

e = base de logaritmos neperianos ($e=2,718$).

λ = taxa de falhas (número total de falhas por período de operação).

t = tempo previsto de operação.

Por fim, Seleme (2015) entende que o requisito principal para garantir o desempenho de uma instalação industrial é a confiabilidade dos equipamentos. Ademais, o autor compreende que a capacidade potencial de uso do equipamento dificilmente será atingida em condições reais; assim, a confiabilidade está relacionada tanto ao equipamento quanto às suas condições de operação, de modo a reduzir as necessidades de manutenção decorrentes do esforço constante para evitar a ocorrência de avarias.

2.3.2 Conceito de Manutenção Centrada na Confiabilidade

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), a Manutenção Centrada na Confiabilidade consiste em um conjunto de técnicas de engenharia empregadas para garantir que os equipamentos desempenhem as funções para as quais foram projetados. Ainda conforme os autores, os programas de MCC possuem uma abordagem racional e sistemática, sendo, portanto, considerados a melhor forma de tratar os problemas relacionados à manutenção. Por último, os autores reiteram que esses programas constituem um alicerce na busca pela excelência nos serviços de manutenção, uma vez que aumentam a disponibilidade dos equipamentos e reduzem os custos de manutenção.

Consoante a isso, Fogliatto e Ribeiro (2011) detalham os principais pontos do programa responsáveis por garantir sua eficiência:

- A construção de um ambiente de engenharia que promova a troca de experiências e informações entre engenheiros, técnicos de manutenção e operadores;
- O direcionamento das tarefas de manutenção com base nos estudos sobre as consequências das falhas;

- A realização de análises que abrangem diversas questões, como custos, segurança, operação e meio ambiente;
- A busca por atividades proativas, envolvendo tarefas de manutenção preventiva e preditiva.
- O enfrentamento de falhas ocultas no sistema, que reduzem sua confiabilidade.

Portanto, a aplicação dos pontos apresentados pelos autores é fundamental para assegurar a eficiência da MCC.

Segundo o entendimento de Viana (2002), a Manutenção Centrada na Confiabilidade é um processo que busca definir os requisitos de manutenção dos equipamentos. Por meio dessa técnica, é possível identificar as possíveis causas que podem levar um equipamento à falha e, consequentemente, adotar as medidas corretivas necessárias. Além do mais, conforme Viana (2002), a MCC é um processo fundamental no apoio à tomada de decisão gerencial, estabelecendo as diretrizes que devem orientar as políticas de manutenção.

Segundo Smith *apud* Viana (2002), os quatro objetivos da Manutenção Centrada na Confiabilidade são:

- Garantir que o sistema execute corretamente suas funções;
- Identificar os modos de falham que podem afetar essas funções;
- Avaliar a relevância e o impacto de cada falha funcional;
- Estabelecer ações de prevenção adequadas para evitar ou mitigar as falhas funcionais.

Ainda de acordo com Smith *apud* Viana (2002), para atingir tais objetivos, é necessário seguir algumas etapas:

- Seleção do sistema e coleta das informações necessárias;
- Delimitação dos limites do sistema;
- Caracterização detalhada do sistema e de seus subsistemas;
- Determinação das funções do sistema e identificação das falhas funcionais;
- Realização da Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA);
- Elaboração do diagrama de apoio à tomada de decisão.

Por conseguinte, para Viana (2002), ao seguir essas etapas, é possível cumprir os quatro objetivos da Manutenção Centrada na Confiabilidade e assegurar sua aplicação no processo organizacional.

Sob a ótica de Kardec e Nascif (2009), a Manutenção Centrada na Confiabilidade consiste em uma metodologia que busca realizar um estudo minucioso de um equipamento ou sistema, definindo seus possíveis modos de falha e estabelecendo a melhor estratégia de manutenção para prevenir a ocorrência dessas falhas ou minimizar as perdas delas decorrentes.

Somado a isso, Kardec e Nascif (2009) salientam que a Manutenção Centrada na Confiabilidade é um instrumento de apoio à tomada de decisão gerencial. Diante disso, os autores adotam parte das etapas propostas por Smith para o alcance dos objetivos da MCC, acrescentando mais duas: um referente ao histórico de manutenção e à revisão da documentação técnica, e outra relacionada à determinação das ações de manutenção. Por fim, Kardec e Nascif (2009) apresentam as sete perguntas básicas da MCC, que são:

- Quais são as funções do item e quais níveis de desempenho ele deve atender em sua condição operacional atual?
- De que maneira o item pode deixar de cumprir suas funções?
- Quais são as causas de cada falha operacional?
- O que ocorre quando cada falha se manifesta?
- Qual é a importância ou o impacto associado a cada falha?
- Que ações podem ser adotadas para evitar cada falha?
- O que deve ser feito quando não existir uma tarefa preventiva adequada?

Em suma, para Kardec e Nascif (2009), caso essas sete perguntas básicas sejam respondidas, o item se enquadra no processo da Manutenção Centrada na Confiabilidade.

2.3.3 Implementação do MCC

Para Kardec e Nascif (2009), a implementação de qualquer processo em uma organização ocorre apenas com o apoio da alta gerência, de modo a garantir comprometimento e disponibilização de recursos. Ademais, é de suma importância a participação de todos os níveis organizacionais. Os autores reforçam a necessidade de um

Coordenador Geral que atue nas diversas plantas, bem como destacam que a equipe de MCC deve ser composta por um grupo diversificado de profissionais das áreas de operação, segurança, inspeção e manutenção.

Adicionalmente, compreende-se que esse grupo deve ser reduzido e possuir habilidades complementares, propósito comum e indicadores de desempenho, além de compartilhar os mesmos princípios dos demais grupos da planta, assumindo responsabilidade mútua pelo processo (KARDEC e NASCIF, 2009).

Além disso, de acordo com Kardec e Nascif (2009), o Coordenador Geral, ou Facilitador, é um especialista em manutenção com treinamento em MCC. Seu escopo de atuação inclui garantir a implementação e a compreensão do MCC por todos os membros da equipe, conduzir o grupo ao consenso quanto às respostas das questões analisadas, assegurar que todos os equipamentos, sistemas e componentes críticos não sejam negligenciados ou tenham sua relevância subestimada, atestar a eficácia das reuniões quanto ao tempo e aos objetivos, bem como verificar se toda a documentação necessária está sendo devidamente elaborada.

Cumprе acrescentar que não deve haver alterações nos membros da equipe enquanto as análises estiverem em andamento. Além disso, é necessário elaborar um calendário de reuniões, formalizado pelos membros da equipe e pelo gerente, a fim de garantir alinhamento entre todos. Por fim, as reuniões não devem ultrapassar o período de quatro horas, sendo recomendado um intervalo de pausa de 10 a 15 minutos (KARDEC e NASCIF, 2009).

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), a MCC é implementada por meio de nove etapas, descritas pelos autores como:

1. Escolha da equipe;
2. Capacitação em MCC;
3. Estabelecimento dos critérios de confiabilidade;
4. Estabelecimento da base de dados;
5. Aplicação da FMEA e classificação dos componentes;
6. Seleção das atividades de MP pertinentes;
7. Documentação das atividades de MP;
8. Estabelecimento de metas e indicadores;

9. Revisão do programa de MCC.

O primeiro passo para a implementação da MCC é a criação de um comitê responsável por gerenciar o programa. Além disso, é fundamental a definição de um líder que possua as qualidades necessárias para conduzir o programa e formar sua equipe de trabalho. Dessa forma, o comitê deve contar com representantes de diferentes setores, organizados em frentes de trabalho compostas por quatro a seis pessoas, sendo cada frente responsável por um equipamento ou etapa do processo (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Conforme Fogliatto e Ribeiro (2011), a segunda etapa da implementação consiste na capacitação em MCC. Nessa fase, todos os integrantes do comitê e das frentes de trabalho formadas na etapa anterior devem possuir conhecimento aprofundado sobre a MCC, compreendendo conceitos que se iniciam nos fundamentos básicos da metodologia. Os autores destacam como conceitos-chave para a implementação da MCC: falhas escondidas, componentes críticos e potencialmente críticos, análise de falhas simples ou múltiplas, análise de modos e efeitos de falha e redundância.

A terceira etapa refere-se ao estabelecimento dos critérios de confiabilidade, por meio da definição da confiabilidade esperada para os equipamentos e para a planta. Além disso, os programas de MCC devem ter como objetivos impedir a ocorrência de acidentes que resultem em danos pessoais ou ambientais, o descumprimento de normas locais, nacionais e internacionais, bem como danos materiais significativos, além de promover elevada confiabilidade nos equipamentos que representam gargalos do processo. Após a definição das metas, a redundância de componentes pode ser aplicada em conjunto com o dimensionamento das tarefas de manutenção (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

A quarta etapa corresponde ao estabelecimento da base de dados. Para isso, é necessário dispor de um sistema que permita o registro e a classificação das falhas, criando um histórico que servirá como base de dados. É essencial que essa base contenha informações sobre sistema, subsistema, data e hora, modo, causa e classificação da falha, ação corretiva realizada e data de retorno do equipamento à operação. Esse padrão também deve ser replicado para o registro de intervenções programadas, estudos de confiabilidade, FMEA e atividades de manutenção (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

No que se refere à quinta etapa, que envolve a aplicação da FMEA e a classificação dos componentes, Fogliatto e Ribeiro (2011) indicam que o primeiro passo consiste na identificação da função de cada componente, uma vez que o foco primordial de um programa

de manutenção é a preservação da função. Segundo os autores, é por meio da FMEA que se identificam os modos de falha, seus efeitos e causas. No contexto da MCC, esse conhecimento permite classificar os componentes como críticos, potencialmente críticos, ambos incluídos no programa de manutenção, ou não críticos, além de possibilitar a classificação das consequências das falhas críticas.

O sexto passo trata da seleção das atividades de MP pertinentes. Nessa etapa, as tarefas de manutenção são direcionadas aos componentes classificados como críticos ou potencialmente críticos, uma vez que estes podem ocasionar perdas significativas. Assim, o programa de manutenção tem como objetivo principal evitar a falha desses componentes. As tarefas de manutenção são classificadas em preditivas, preventivas e reativas, sendo orientadas por desgaste, tempo, detecção de falhas ou operação até a falha. Por fim, a manutenção deve priorizar a avaliação do desgaste, a fim de evitar trocas e reposições desnecessárias (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Conforme Fogliatto e Ribeiro (2011), o sétimo passo refere-se à documentação das atividades de MP. Essas atividades devem ser registradas em planilhas que incluam informações relevantes, como periodicidade, descrição da atividade e responsável. Segundo os autores, quando houver dados quantitativos disponíveis, a periodicidade deve ser definida por meio de estudos de confiabilidade; na ausência desses dados, essa definição cabe à equipe de trabalho. Quanto à responsabilidade pelas atividades, esta é majoritariamente da equipe de manutenção, embora algumas possam ser atribuídas à operação, à engenharia ou a terceiros. Assim, a documentação das atividades é fundamental para o programa de MCC.

O oitavo passo do processo consiste no estabelecimento de metas e indicadores, que constituem a base do programa de MCC. Em geral, os indicadores são utilizados para medir o tempo de parada, a disponibilidade dos equipamentos e a qualidade do processo. Uma vez definidos os indicadores, procede-se ao levantamento da situação atual e, a partir disso, estabelecem-se metas adequadas. No que se refere a acidentes, a meta deve ser zero. Quanto às paradas e à disponibilidade dos equipamentos, devem ser definidas metas desafiadoras e motivadoras. Por fim, realiza-se o monitoramento contínuo dos indicadores, observados diariamente com o objetivo de acompanhar os avanços e a situação atual em relação às metas estabelecidas, permitindo a análise de equipamentos, plantas e setores (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Por último, segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), a nona e última etapa é a revisão do programa de MCC, motivada principalmente pelas mudanças nas condições dos

equipamentos, no conhecimento do processo e nos recursos de manutenção. Nesse contexto, os procedimentos de manutenção, especialmente a natureza e a periodicidade das tarefas, devem ser revisados regularmente.

Ademais, conforme Fogliatto e Ribeiro (2011), ajustes e aprimoramentos no MCC decorrem da incorporação de novas tecnologias, equipamentos, instrumentos de medição e matérias-primas, bem como do feedback da equipe, que é fundamental para a identificação de modos de falha, falhas escondidas e componentes de baixa confiabilidade.

2.3.4 Ferramentas da Confiabilidade

2.3.4.1 Medidas de Confiabilidade

Sob a ótica de Lafraia (2001), a confiabilidade é definida como a probabilidade de um componente cumprir sua função por um determinado período de tempo, sob condições de operação especificadas. Para o autor, o inverso da confiabilidade corresponde à probabilidade de falha. Ainda segundo o autor, a falha é conceituada como a impossibilidade de o componente cumprir sua função requerida; dessa forma, é possível compreender as fases de vida de um componente por meio da curva da banheira.

Somado a isso, de acordo com Lafraia (2001), a taxa de falhas consiste, basicamente, na frequência de ocorrência de falhas por intervalo de tempo, podendo ser medida por hora de operação ou por número de operações. A taxa de falhas é representada por λ , sendo o seu inverso o Tempo Médio Entre Falhas (TMEF), correspondente ao termo em inglês *Mean Time Between Failures* (MTBF). Sua equação é apresentada a seguir.

$$\text{MTBF} = 1/\lambda \quad (2)$$

A curva da banheira representa, de modo geral, as fases da vida de um componente. Essas fases podem ser divididas em três períodos característicos: mortalidade infantil, período de vida útil e período de desgaste. A seguir, apresenta-se a figura 1, que representa a curva da banheira (LAFRAIA, 2001).

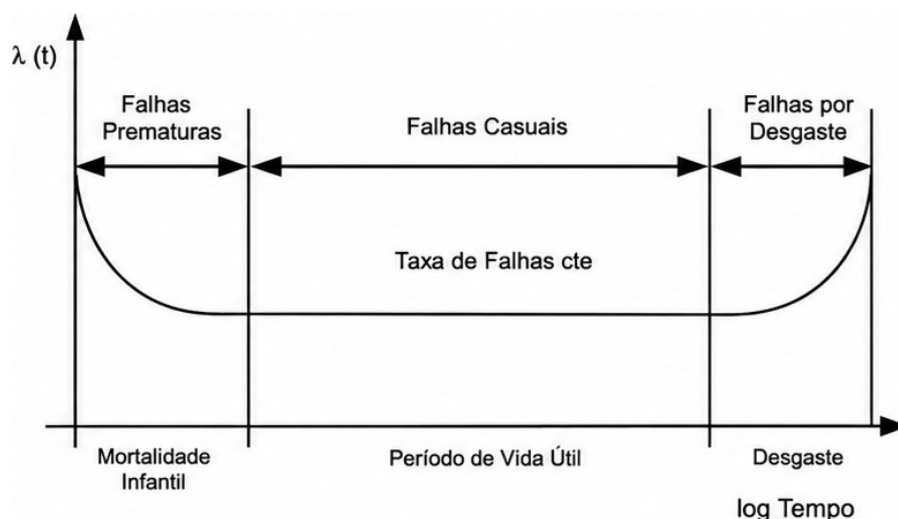


Figura 1 – Representação da curva da banheira.
Fonte: Lafraia (2001)

Por meio da análise da Figura 1, compreende-se que o primeiro período, denominado mortalidade infantil, é aquele em que ocorrem as falhas prematuras. Nesse estágio, a taxa de falhas é decrescente, e a origem dessas falhas é variada. Em síntese, elas decorrem de erros de projeto, fabricação e montagem (LAFRAIA, 2001).

De igual modo, segundo Lafraia (2001), o segundo período, caracterizado por uma taxa de falhas constante, é denominado período de vida útil. Nesse estágio, as falhas ocorrem de forma aleatória, e pouco pode ser feito para evitá-las. Além disso, o autor cita alguns exemplos de falhas típicas desse período, tais como cargas aleatórias superiores às esperadas, falhas não identificadas pelo programa de manutenção preventiva, falhas humanas, entre outras.

Ademais, conforme Lafraia (2001), o terceiro período é denominado período de desgaste. Esse estágio marca o início do fim da vida útil do equipamento, sendo caracterizado por uma taxa de falhas que cresce de maneira contínua. Ainda segundo o autor, as principais causas associadas ao período de desgaste incluem envelhecimento, abrasão, desgaste, fadiga, fluência, corrosão, deterioração do equipamento e manutenção incorreta ou insuficiente.

Para Fogliatto e Ribeiro (2011), as três principais medidas de confiabilidade para uma unidade não reparável são a função confiabilidade $R(t)$, a função de risco $h(t)$ e o tempo médio até a falha, MTTF (*Mean Time To Failure*). À luz de Lafraia (2001), outras definições relacionadas à confiabilidade incluem o tempo médio para falha (TMPF), o tempo médio para reparo (TMPR) e a disponibilidade (D).

Ademais, segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), no que se refere à função confiabilidade, os autores estabelecem o parâmetro n_0 para um conjunto de unidades idênticas submetidas a ensaios sob condições predefinidas. Após transcorrer um intervalo $(t - \Delta t, t)$, $n_f(t)$ representa o número de unidades que falharam e $n_s(t)$ o número de unidades que sobreviveram, de modo que $n_f(t) + n_s(t) = n_0$. Somado a isso, os autores afirmam que a confiabilidade de uma unidade consiste na probabilidade acumulada de sucesso. Para tal, tem-se a seguinte equação.

$$R(t) = n_s(t)/n_0 \quad (3)$$

Por conseguinte, a função confiabilidade $R(t)$ pode ser definida como a probabilidade de a unidade ter sucesso, ou seja, não falhar, durante o intervalo de tempo $(0, t)$ e continuar operando no instante t . Ainda, a função confiabilidade $R(t)$ é também designada como função de sobrevivência (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

De igual modo, de acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011), a função de risco $h(t)$ é a medida de confiabilidade mais empregada na prática. Ainda, os autores definem a função de risco como a quantidade de risco à qual uma unidade está sujeita durante um determinado período t , sendo também conhecida como taxa de falha ou taxa de risco. Segundo os autores, a taxa de falha instantânea, ou função de risco, pode ser expressa da seguinte forma:

$$h(t) = f(t)/R(t), t \geq 0 \quad (4)$$

A unidade de medida da função de risco é falha por unidade de tempo, sendo esta uma forma de indicar o envelhecimento de uma unidade, uma vez que representa a quantidade de risco à qual a unidade se expõe durante um período t . Assim, quanto menor for o seu valor, menor será o risco ao qual a unidade está sujeita. Ademais, existem três classificações básicas da função de risco: crescente, decrescente e constante ou estacionária, as quais representam a curva da banheira (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Na perspectiva de Fogliatto e Ribeiro (2011), o tempo médio até a falha (MTTF – Mean Time to Failure) representa o tempo médio até a ocorrência da falha de uma unidade. A seguir, apresenta-se a expressão matemática:

$$MTTF = \int R(t)dt \quad (5)$$

Sob a ótica de Lafraia (2001), o tempo médio para falha (TMPF) consiste, basicamente, no tempo médio até a falha de um componente não reparável, sendo aplicado a

componentes cuja vida útil se encerra na ocorrência da primeira falha. Sua equação matemática é:

$$\text{TMPF} = \Sigma \text{TPF}/N \quad (6)$$

Ainda segundo Lafraia (2001), o tempo médio para reparo (TMPR) consiste, basicamente, no tempo médio necessário para o reparo dos componentes. Sua equação matemática é:

$$\text{TMPR} = \Sigma \text{TPR}/N \quad (7)$$

Por fim, conforme Lafraia (2001), no que tange à disponibilidade (D), esta é definida como a probabilidade de um componente, após sofrer manutenção, operar durante um período t estabelecido. Assim, na prática, a disponibilidade corresponde ao percentual de tempo em que os componentes permanecem em operação, especialmente aqueles que operam de forma contínua. Por conseguinte, Lafraia (2001) reitera que seu uso é particularmente relevante em processos de alto custo associados à perda de função, sendo ideal para aplicação em plantas de processo. Sua equação matemática é:

$$D = \text{TMPF}/(\text{TMPF} + \text{TMPR}) \quad (8)$$

2.3.4.2 Distribuição de Probabilidade

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011), a confiabilidade de uma unidade, seja ela um componente ou um sistema, é definida como a probabilidade de sobrevivência dessa unidade em um determinado tempo t . Assim, segundo os autores, essa probabilidade pode ser determinada por meio da modelagem dos tempos até a falha; dessa forma, estima-se a probabilidade de sobrevivência a partir da identificação da distribuição de probabilidade que melhor se ajusta a esses tempos. Por conseguinte, os autores afirmam que a modelagem dos tempos até a falha constitui o foco central dos estudos de confiabilidade.

Adicionalmente, o tempo até a falha de uma unidade é compreendido como o intervalo entre o início de sua operação e a ocorrência da falha. Esses tempos são obtidos por meio do histórico de falhas e da observação da operação do equipamento. Ademais, considera-se $t = 0$ como o início da operação da unidade, e o tempo é tratado como uma variável aleatória não negativa, denominada T . Por fim, para uma variável T continuamente distribuída, é possível determinar a confiabilidade $R(t)$ da unidade por meio da função densidade de probabilidade $f(t)$ e da função de distribuição acumulada $F(t)$ (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Ademais, conforme Fogliatto e Ribeiro (2011), as distribuições de probabilidade comumente utilizadas em estudos de confiabilidade apresentam três parâmetros: (a) localização, (b) escala e (c) forma. Segundo os autores, os parâmetros de localização são empregados com o objetivo de deslocar a distribuição de probabilidade ao longo do eixo do tempo, sendo também denominados parâmetros de vida mínima ou de garantia. De modo semelhante, os parâmetros de escala são aplicados para promover a expansão ou contração do eixo do tempo. Por fim, os parâmetros de forma são aqueles que afetam o formato da função densidade de probabilidade.

Somado a isso, conforme Fogliatto e Ribeiro (2011), os métodos de estimação de parâmetros incluem o método dos momentos, o método dos mínimos quadrados e o método da máxima verossimilhança, sendo este último amplamente utilizado para a obtenção de estimadores pontuais dos parâmetros populacionais. Dessa forma, para os autores, os estimadores são obtidos com base nas seguintes propriedades: não tendenciosidade, consistência, eficiência e suficiência.

À luz de Fogliatto e Ribeiro (2011), quatro distribuições de probabilidade são comumente utilizadas em estudos de confiabilidade para o cálculo da função densidade de probabilidade $f(t)$, da função confiabilidade $R(t)$, da função de risco $h(t)$ e do tempo médio até a falha (MTTF). Essas distribuições são: Exponencial, Weibull, Gama e Lognormal.

Além disso, conforme Fogliatto e Ribeiro (2011), no que se refere à distribuição exponencial, esta é fundamental para os estudos de confiabilidade, uma vez que é a única distribuição contínua cuja função de risco é constante.

Ainda, segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), em razão da simplicidade de suas expressões matemáticas, seu uso foi amplamente disseminado, ainda que, em alguns casos, de forma inadequada. Nesse sentido, segundo os autores, para $t \geq 0$, têm-se as seguintes representações de confiabilidade. As equações (9) e (11) são ilustradas na Figura 2 para $\lambda=2$, sendo os gráficos obtidos por meio do *software* Proconf.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (9)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (10)$$

$$h(t) = \lambda \quad (11)$$

$$MTTF = E[T] = 1/\lambda \quad (12)$$

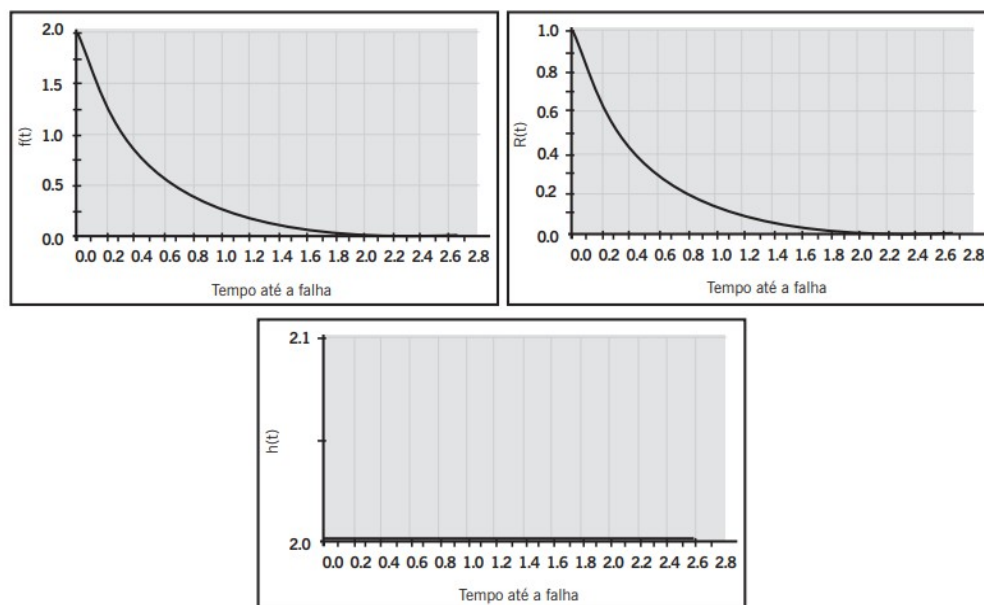


Figura 2 – Representação de confiabilidade da distribuição exponencial.
Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011)

A Figura 2 apresenta três gráficos da distribuição exponencial para três funções distintas: a função densidade de probabilidade $f(t)$, a função de confiabilidade $R(t)$ e a função de risco $h(t)$. Observa-se que a função de risco assume valores constantes ao longo do tempo, enquanto as demais apresentam comportamento exponencial decrescente.

De igual modo, de acordo com Lafraia (2001), no que tange às aplicações da distribuição exponencial, destacam-se: falhas em equipamentos com mais de 200 componentes sujeitos a mais de três manutenções corretivas ou preventivas; sistemas complexos não redundantes; sistemas complexos com componentes cujas taxas de falha são independentes; sistemas com dados de falhas que apresentam causas altamente heterogêneas; e sistemas com múltiplos componentes submetidos à substituição antes da falha em decorrência de políticas de manutenção preventiva.

Para Fogliatto e Ribeiro (2011), a distribuição de Weibull é adequada para a modelagem de tempos até a falha, pois apresenta funções de risco constante, estritamente crescente e estritamente decrescente. Ainda segundo os autores, essa distribuição é extremamente importante para a modelagem da confiabilidade, em decorrência de sua flexibilidade e de sua capacidade de representar amostras de tempos até a falha com comportamentos distintos.

Ademais, Fogliatto e Ribeiro (2011) apresentam as equações das representações de confiabilidade da distribuição de Weibull, para $t \geq 0$, $\gamma > 0$ e $\theta > 0$, as quais são:

$$f(t) = (\gamma/\theta) t^{\gamma-1} e^{-t^\gamma/\theta} \quad (13)$$

$$R(t) = e^{-(t/\theta)^\gamma} \quad (14)$$

$$h(t) = (\gamma/\theta) (t/\theta)^{\gamma-1} \quad (15)$$

$$MTTF = \theta \Gamma(1+1/\gamma) \quad (16)$$

Na equação (16), Γ representa a função Gama, a qual é uma integral definida e tabelada. As equações de γ e θ correspondem aos estimadores de máxima verossimilhança, sendo esses os parâmetros de forma e de escala, respectivamente (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Adicionalmente, conforme Fogliatto e Ribeiro (2011), a distribuição de Weibull é capaz de modelar adequadamente uma ampla gama de situações nas quais as unidades apresentam funções de risco distintas. Assim, os autores explicam que o tipo de função de risco da distribuição de Weibull é definido por seu parâmetro de forma γ , de modo que, quando $\gamma < 1$, tem-se uma função de risco $h(t)$ decrescente; para $\gamma = 1$, $h(t)$ é constante, e a distribuição de Weibull se transforma em uma distribuição exponencial; por fim, para $\gamma > 1$, $h(t)$ é crescente.

Ademais, a figura abaixo apresenta dois casos especiais: quando $\gamma = 2$, $h(t)$ torna-se uma reta com inclinação $(2/\theta)^2$, e a distribuição de Weibull se transforma na distribuição de Rayleigh; e quando $\gamma > 3,26$, a distribuição de Weibull apresenta uma função densidade de probabilidade com formato similar ao da distribuição normal. A seguir, apresenta-se a Figura 3, da distribuição de Weibull com seus casos especiais.

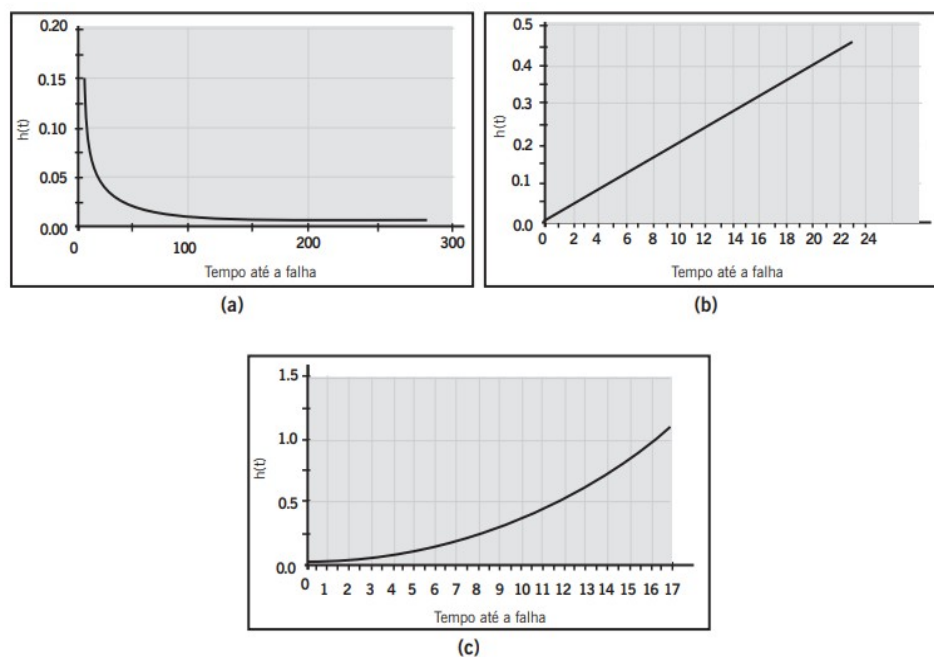


Figura 3 – Distribuição de Weibull
Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011)

A Figura 3 representa a distribuição de Weibull para a função de risco $h(t)$. A figura é dividida em três gráficos, a, b e c, nos quais o parâmetro γ assume valores distintos, sendo estes 0,5, 2,0 e 3,26, respectivamente (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Ademais, segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), o parâmetro θ da distribuição de Weibull representa a vida característica da unidade modelada. Assim, pela equação da confiabilidade (14), tem-se que $R(\theta) = 1/e \approx 0,3679$, para $\gamma > 0$ (17). Dessa forma, todas as funções de confiabilidade da distribuição de Weibull convergem para o ponto (θ, e^{-1}) , independentemente do valor de γ (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Além disso, Lafraia (2001) apresenta duas tabelas e uma figura que auxiliam na compreensão dos parâmetros da distribuição de Weibull. Cabe destacar que, para esse autor, o parâmetro γ é representado pela letra grega β . A primeira tabela descreve o comportamento da função taxa de falhas em relação ao valor de β .

Tabela 1 – Relação entre β e o comportamento da função de taxa de falhas.

β	Comportamento da Função de Taxa de Falhas
< 1	Taxa de falha decrescente com o tempo – fase da mortalidade infantil
$= 1$	Taxa de falha constante – falhas aleatórias – função exponencial
> 1	Taxa de falha crescente com o tempo
$= 2$	Taxa de falha linearmente crescente
> 2	Taxa de falha cresce a uma taxa proporcional à potência (-1); distribuição de frequência tornando-se mais simétrica à medida que β cresce
$= 3,2$	Distribuição de frequência aproxima-se da distribuição normal, tornando-se menos dispersa à medida que β cresce

Fonte: Lafraia (2001)

Observa-se, na Tabela 1, que, para valores de β maiores, menores ou iguais a 1, é possível correlacionar esse parâmetro com a curva da banheira. A figura 4, a seguir ilustra essa correlação.

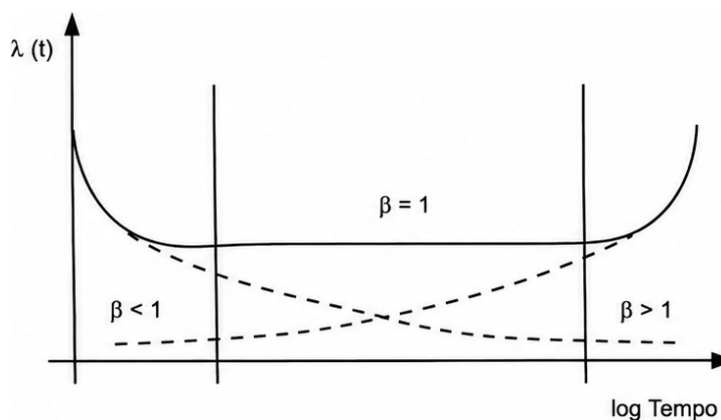


Figura 4 - Relação de β e as fases da curva da banheira.

Fonte: Lafraia (2001)

A Figura 4 demonstra a relação entre o parâmetro β e as fases da curva da banheira, na qual, para valores de $\beta < 1$, tem-se o estágio de mortalidade infantil, caracterizado por uma taxa de falhas decrescente ao longo do tempo; para $\beta = 1$, o estágio corresponde a falhas aleatórias, com taxa de falhas constante; por fim, para valores de $\beta > 1$, o estágio predominante é o de envelhecimento, com taxa de falhas crescente.

A seguir, apresenta-se a Tabela 2, que relaciona os valores de β com suas interpretações físicas.

Tabela 2 – Relação entre β e interpretações físicas da unidade estudada.

T_0	β	Significado
= 0		Não há confiabilidade intrínseca. Significa que em $t = 0$ a probabilidade de falha é 0
	<1	Taxa de falhas decrescente, possivelmente devida à baixos coeficientes de segurança na carga
	=1	Taxa de falhas constante, falhas de origem aleatórias
> 0	>1	Taxa de falhas crescente, desgaste iniciando logo que o componente entra em serviço
		Há período de garantia, durante o qual não ocorre falha. O componente possui confiabilidade intrínseca
	<1	Desgaste do tipo fadiga ou similar
	$\cong 0,5$	Fadiga de baixo ciclo
	$\cong 0,8$	Fadiga de alto ciclo
	>1	Desgaste do tipo erosão
< 0		Há vida de prateleira, o componente pode falhar antes de ser usado
	< 1	Desgaste do tipo fadiga, iniciado antes do componente entrar em serviço
	> 1	Desgaste devido à contínua redução de resistência

Fonte: Lafraia (2001)

Observa-se, na Tabela 2, a relação entre o parâmetro β e as interpretações físicas da unidade estudada, de modo que, por meio do valor de β , é possível inferir determinadas interpretações físicas sobre a condição da unidade. Por exemplo, para valores de T_0 e $\beta > 1$, o equipamento apresenta desgaste do tipo erosão.

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), a distribuição gama é uma generalização da distribuição exponencial. Para os autores, essa distribuição consiste em uma unidade exposta a uma série de choques, os quais ocorrem segundo um processo de Poisson homogêneo de intensidade λ , sendo os intervalos de tempo entre choques consecutivos independentes e exponencialmente distribuídos. Assim, os autores concluem que, no caso de falha da unidade no m -ésimo choque, o tempo de falha será dado pelo somatório dos intervalos de tempo até T_m .

A seguir, apresentam-se as equações das medidas de confiabilidade para a distribuição gama, para $t \geq 0$, parâmetro de forma $\gamma > 0$ e $\lambda > 0$ (parâmetro de escala) (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011):

$$f(t) = (\lambda / \Gamma(\gamma)) (\lambda t)^{\gamma-1} e^{-\lambda t} \quad (17)$$

$$R(t) = 1 - (1/\Gamma(\gamma)) \int_0^t x^{\gamma-1} e^{-x} dx \quad (18)$$

$$h(t) = f(t)/R(t) \quad (19)$$

$$MTTF = \gamma/\lambda \quad (20)$$

Além disso, Fogliatto e Ribeiro (2011) afirmam que as distribuições gama e Weibull são bastante similares no que tange à densidade de probabilidade, sendo difícil diferenciá-las por meio do gráfico de densidade. Ainda segundo os autores, diferentemente da Weibull, a distribuição gama apresenta função de risco decrescente quando $\gamma < 1$ e crescente quando $\gamma > 1$; quando $\gamma = 1$, a função de risco permanece constante.

Outrossim, contrariamente ao comportamento de $f(t)$, as funções de risco $h(t)$ das distribuições gama e Weibull diferenciam-se significativamente, sobretudo para valores elevados de t . Assim, para γ , tem-se que $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \lambda$, indicando que os tempos até a falha da distribuição gama apresentam uma causa exponencial (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Por fim, Fogliatto e Ribeiro (2011) citam duas situações especiais referentes à distribuição gama. A primeira, segundo os autores, ocorre quando o parâmetro de forma γ assume um valor inteiro e positivo, a distribuição gama transforma-se na distribuição de Erlang, a qual é representada pelo somatório de variáveis exponencialmente distribuídas e possui função de confiabilidade matematicamente tratável, diferentemente da distribuição gama geral. No segundo caso, para $\lambda = 1/2$ e $\gamma = n/2$, a distribuição gama torna-se a distribuição qui-quadrado, na qual o valor de n caracteriza o número de graus de liberdade (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

À luz de Fogliatto e Ribeiro (2011), a distribuição lognormal é uma distribuição limitada à esquerda e amplamente utilizada na modelagem de tempos até o reparo em unidades reparáveis.

Nesse sentido, conforme Fogliatto e Ribeiro (2011), a probabilidade de realização de uma ação de reparo aumenta conforme o tempo. Além disso, quando o reparo demora a ser concluído, algumas causas podem estar envolvidas no processo, como a falta de

conhecimento dos envolvidos na atividade ou a ausência de matéria-prima necessária à sua execução (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Ademais, para Fogliatto e Ribeiro (2011), supõe-se que a taxa de reparo, intensidade de execução dos reparos, assemelha-se à função de risco da distribuição lognormal, apresentando o formato da curva da banheira invertida. Nesse caso, $h(t)$ apresenta crescimento inicial seguido de decréscimo assintótico. A seguir, a Figura apresenta a função de risco.

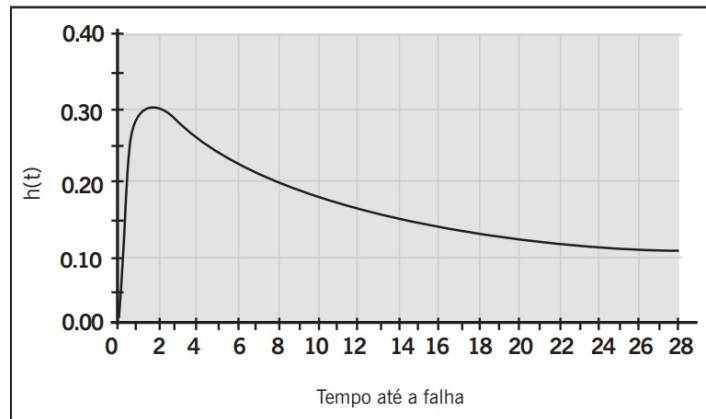


Figura 5: Função de risco da lognormal para $\mu = 1$ e $\sigma = 0,5$.
Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011)

Observa-se que, na Figura 5, a função apresenta o comportamento descrito no parágrafo anterior, com crescimento inicial e decréscimo assintótico, assumindo o formato da curva da banheira invertida. A seguir, segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), apresentam-se as equações das representações de confiabilidade da distribuição lognormal, para $t \geq 0$:

$$f(t) = (1/(\sqrt{2\pi}\sigma t)) \exp\{(-1/2)[(\ln t - \mu)/\sigma]^2\} \quad (21)$$

$$R(t) = \Phi((\mu - \ln t)/\sigma) \quad (22)$$

$$h(t) = (\varphi[(\mu - \ln t)/\sigma]/\sigma t)/(\Phi[(\mu - \ln t)/\sigma]) \quad (23)$$

$$MTTF = e^{(\mu + \sigma^2/2)} \quad (24)$$

Nas expressões acima, $\Phi(x)$ e $\varphi(x)$ representam, respectivamente, a função de distribuição acumulada e a função densidade de probabilidade da distribuição normal, ambas padronizadas e avaliadas em x . Ademais, conforme citado anteriormente, a distribuição lognormal é limitada à esquerda; assim, não é centrada em μ , como ocorre na distribuição normal. Dessa forma, a mediana do tempo até a falha T_M , que satisfaz $R(t_M) = 0,5$, é dada pela equação $t_M = e^\mu$ (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

2.3.4.3 Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA)

De acordo com Kardec e Nascif (2009), a Análise de Modos e Efeitos de Falha – FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) consiste em uma abordagem que visa identificar e priorizar falhas potenciais que afetam equipamentos, processos e sistemas. Além disso, conforme o autor, o FMEA é um processo formal de hierarquização de falhas e definição de ações preventivas, conduzido por especialistas direcionados à análise e solução dessas falhas. Por fim, o autor informa que, segundo especialistas, existem três níveis de FMEA: de projeto, de processo e de sistema.

Na perspectiva de Fogliatto e Ribeiro (2011), entende-se o FMEA como uma técnica de confiabilidade cujos principais objetivos são identificar e analisar falhas potenciais que podem ocorrer em um produto ou processo, determinar medidas capazes de eliminar ou reduzir a probabilidade de reincidência dessas falhas e documentar o estudo por meio da criação de um referencial técnico, que servirá como base para revisões ou para o desenvolvimento do projeto ou processo.

Somado a isso, Fogliatto e Ribeiro (2011) contextualizam o FMEA e sua importância em conjunto com a Análise de Árvores de Falha (FTA). Assim, segundo os autores, a aplicação integrada dessas técnicas permite a identificação de pontos fracos em um sistema, fornecendo dados necessários para atividades voltadas à melhoria contínua. Nessa perspectiva, é possível, por meio dessas técnicas, identificar e eliminar ocorrências potenciais de falhas, promovendo uma estrutura de priorização de ações (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011).

Ademais, Fogliatto e Ribeiro (2011) destacam que o sucesso dos programas de FMEA e FTA está na realização dos estudos antes da ocorrência de falhas, e não posteriormente, reiterando o maior valor agregado quando o modo de falha potencial não é incorporado ao processo ou projeto de forma inadvertida. Além disso, segundo os autores, a aplicação dessas técnicas na fase de projeto potencializa a implementação de mudanças com maior facilidade, evitando problemas futuros. Por fim, Fogliatto e Ribeiro (2011) afirmam que a prática desses estudos reduz a probabilidade de implementar mudanças que possam acarretar problemas futuramente.

Ainda, segundo Kardec e Nascif (2009), no que se refere ao FMEA de projeto, este consiste, basicamente, em eliminar as causas de falhas que podem surgir na fase de projeto, considerando diversos fatores, desde a manutenibilidade até a segurança. Ademais, segundo os

autores, no FMEA de processo, o foco principal está nas condições de operação do equipamento e na forma como este é mantido. Consoante a isso, o FMEA de sistema tem como foco principal as falhas potenciais e os gargalos do processo global, sendo a linha de produção um exemplo de aplicação desse nível de análise (KARDEC e NASCIF, 2009).

Conforme Lafraia (2001), os objetivos da utilização do FMEA consistem na criação de um método sistemático capaz de antecipar modos de falha potenciais ou já conhecidos, bem como direcionar ações corretivas que visem eliminar ou compensar as consequências dessas falhas. Além disso, segundo o autor, o FMEA também é utilizado como meio de identificar testes necessários e como requisito no processo de validação de projetos.

Ainda, sob a ótica de Lafraia (2001), o FMEA é empregado como ferramenta para documentar revisões de projetos. Por fim, o autor assevera que se trata de um sistema lógico utilizado para subsidiar considerações, avaliações e certificações de mudanças em projetos, processos ou materiais.

Ademais, na perspectiva de Lafraia (2001), os pré-requisitos para a análise podem ser definidos, por exemplo, por meio da técnica QFD (*Quality Function Deployment* – Desdobramento da Função da Qualidade). Segundo o autor, constituem pré-requisitos para a análise a determinação das funções do produto e o desenvolvimento do diagrama de blocos.

Dessa forma, sob a perspectiva de Lafraia (2001), a Figura 6 ilustra um formulário típico de FMEA.

FMEA – Análise de Modos de Falha e Efeitos

Sistemas: _____ Participantes: _____ Produto/Processo: __1__

Subsistemas: _____ Data: __/__/__ Folha: __/__ Dados de Registro: __2__

Item	Com- po- nen- te/ Pro- ces- so	Funções	Modo de Falha	Efeito(s) da Falha	Severidade	Causas	Ocorrência	Meios de Detecção	Detecção	RPN	Ações Correli- vas/ Preven- tivas
Campo 3	Campo 4	Campo 5	Campo 6	Campo 7	Campo 11	Campo 8	Campo 10	Campo 9	Campo 12	Campo 13	Campo 14

Figura 6: Formulário modelo FMEA teórico.

Fonte: Lafraia (2001)

Na Figura 6, observa-se o formulário FMEA com as informações a serem preenchidas em sua sequência lógica, bem como os respectivos campos destinados ao seu preenchimento.

À luz de Lafraia (2001), no que tange aos campos a serem preenchidos, o primeiro campo refere-se à identificação do FMEA, sendo este de produto ou de processo. Já o segundo campo, segundo o autor, trata dos dados de registro, contendo informações básicas que servirão como base para a identificação do processo/produto e do FMEA utilizado.

Ainda, sob a ótica de Lafraia (2001), o terceiro campo refere-se ao item, definido como um termo utilizado para designar um sistema, subsistema ou equipamento de forma individualizada. O quarto campo, de acordo com o autor, refere-se ao nome do componente ou à etapa do processo, sendo os elementos que constituem um item; recomenda-se utilizar a nomenclatura mais usual para identificação, ainda que não seja a tecnicamente mais precisa.

De igual modo, conforme Lafraia (2001), o quinto campo consiste na função do componente ou processo, abrangendo toda e qualquer atividade desempenhada pelo item do ponto de vista operacional. Já o sexto campo, conforme o autor, corresponde à identificação dos modos de falha, sendo falha a incapacidade de um sistema ou componente de exercer sua

função requerida, enquanto o modo de falha descreve a forma pela qual o componente ou sistema falhou, caracterizando os eventos responsáveis por reduzir total ou parcialmente a funcionalidade de um item.

De acordo com Laffraia (2001), o oitavo campo consiste na identificação das causas básicas das falhas, sendo a causa básica a razão da falha ou o processo físico que a precede, indicando o motivo pelo qual o modo de falha ocorreu. O sétimo campo, segundo o autor, trata da identificação dos efeitos das falhas, os quais correspondem aos impactos que o modo de falha exerce sobre a operação, função ou estado de um item.

Na perspectiva de Laffraia (2001), o nono campo compreende os meios de detecção, que consistem nas medidas de controle implementadas na fase de projeto ou durante o acompanhamento do processo.

À luz de Laffraia (2001), os modos de falha podem impactar a segurança quando a perda de função ou o dano for capaz de causar lesões ou morte de colaboradores, ou ainda quando houver descumprimento de requisitos ambientais. Para o autor, no contexto de segurança, é necessário distinguir entre perigo e risco, sendo o risco associado tanto a uma condição de perigo provável ou iminente quanto à probabilidade de ocorrência de perdas ou danos.

Ainda, segundo Laffraia (2001), o risco refere-se às condições de uma variável com capacidade de ocasionar danos, sendo entendido como a combinação da probabilidade de ocorrência de um evento anormal ou falha e da gravidade de suas consequências para o sistema, usuários ou meio ambiente. Ademais, para o autor, o perigo é caracterizado como uma condição de exposição ao risco que favorece sua materialização.

Ademais, Laffraia (2001) complementa que a análise de risco é o processo responsável por identificar, caracterizar, quantificar e avaliar os riscos, enquanto a gestão de risco consiste na aplicação de técnicas destinadas a reduzir a probabilidade de ocorrência de eventos ou a mitigar a severidade de suas consequências. O autor conclui que o FMEA é um método utilizado para a análise de riscos e criticidade de sistemas, bem como para o gerenciamento desses riscos. Por fim, apresenta a relação entre perigo e risco expressa pela equação 25:

$$\text{Risco} = \text{Perigo/Medidas de Controle} \quad (25)$$

Sob a ótica de Lafraia (2001), os campos 10 e 13 fornecem os elementos necessários para a priorização de falhas, subsidiando a tomada de decisão por meio do estabelecimento de notas baseadas em critérios previamente definidos.

À luz de Lafraia (2001), o campo 10 refere-se à probabilidade de ocorrência, sendo a estimativa das probabilidades combinadas de ocorrência de uma falha e de sua consequente manifestação como um tipo de falha no produto ou processo. Já o campo 11, segundo o autor, refere-se à severidade dos efeitos, sendo um índice que expressa a gravidade dos efeitos das falhas sobre o cliente; assim, sua função é compreender o impacto da falha e avaliar o quanto ela pode afetar o cliente.

Somado a isso, conforme o entendimento de Lafraia (2001), o campo 12 corresponde à probabilidade de detecção, sendo um índice responsável por avaliar a probabilidade de a falha ser detectada antes que o produto chegue ao cliente ou antes que impacte o sistema externamente. Ademais, conforme o autor, o campo 13 refere-se ao índice de risco; em uma FMECA (*Failure Mode and Effect and Critical Analysis*), os riscos são quantificados por meio do RPN (*Risk Priority Number* – Número de Prioridade de Risco).

Segundo Lafraia (2001), o RPN pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$\text{RPN} = (\text{Ocorrência}) \times (\text{Detecção}) \times (\text{Severidade}) \quad (26)$$

Assim, conforme Lafraia (2001), registra-se no campo 13 o produto dos três índices anteriores, que são gravidade, ocorrência e detecção, tratando-se do equivalente ao RPN representado na equação 26.

Dessa forma, de acordo com Lafraia (2001), as falhas com maiores índices de risco devem ser tratadas prioritariamente, mediante o estabelecimento de contramedidas. Por fim, o autor conclui que o índice de risco constitui a melhor forma de hierarquizar as falhas.

Na perspectiva de Lafraia (2001), o campo 14 refere-se às ações preventivas recomendadas. Nesse contexto, conforme o autor, o tratamento dos riscos pode ser dividido em três aspectos: reduzir a severidade das consequências, aumentar a probabilidade de detecção e reduzir a probabilidade de ocorrência. Assim, o autor conclui que as ações voltadas a esses três aspectos devem ser devidamente registradas e incorporadas a um plano de ação estruturado, como o 5W–1H.

Por último, de acordo com Lafraia (2001), o campo 15 corresponde às ações preventivas adotadas (condições resultantes), sendo utilizado para registrar as medidas

efetivamente implementadas, ressaltando-se que nem todas as ações recomendadas são necessariamente aplicadas.

2.3.4.4 Análise da Árvore de Falha (FTA)

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011), a Análise da Árvore de Falhas consiste em um método sistemático de análise de falhas, no qual é construído um diagrama lógico que busca representar a relação entre as combinações de falhas dos componentes e os impactos que provocam no sistema global. Segundo o autor, entende-se como sistema global um empreendimento, projeto, equipamento, processo, entre outros.

Ainda, Fogliatto e Ribeiro (2011) afirmam que a FTA é uma técnica analítica que caracteriza as condições que levam a um estado indesejado do sistema, denominado evento de topo. Ademais, segundo os autores, por meio da FTA é desenvolvido um modelo de visualização das dependências entre os componentes do sistema, permitindo a utilização de cálculos de probabilidade de ocorrência de eventos de topo ou de desastres a serem analisados.

Na perspectiva de Lafraia (2001), a FTA pode ser dividida em dois tipos de análise: qualitativa e quantitativa. Na análise qualitativa, o objetivo principal é determinar as causas básicas de um evento ou a sequência de ocorrências que o provocaram. Já na análise quantitativa, a finalidade é determinar a probabilidade de ocorrência de um evento.

Nesse sentido, segundo Lafraia (2001), o método da Análise da Árvore de Falhas é aplicado a qualquer evento indesejado, especialmente em sistemas complexos. Além disso, segundo o autor, o objetivo desse método é obter, por meio de um diagrama lógico, o conjunto de causas que levaram à falha em estudo.

Somado a isso, conforme Lafraia (2001), a metodologia da FTA consiste em: selecionar um evento de topo, determinar os fatores contribuintes, realizar a diagramação lógica, efetuar a simplificação booleana, aplicar os dados quantitativos e, por fim, determinar a probabilidade de ocorrência. Por fim, o autor conclui que, por meio dessa metodologia, é possível utilizar os dados de confiabilidade dos componentes e incluir a probabilidade de falhas humanas, caracterizando-se como um método dedutivo e estruturado.

De acordo com Lafraia (2001), a Figura 7 apresenta as principais simbologias utilizadas na caracterização dos eventos em uma FTA.

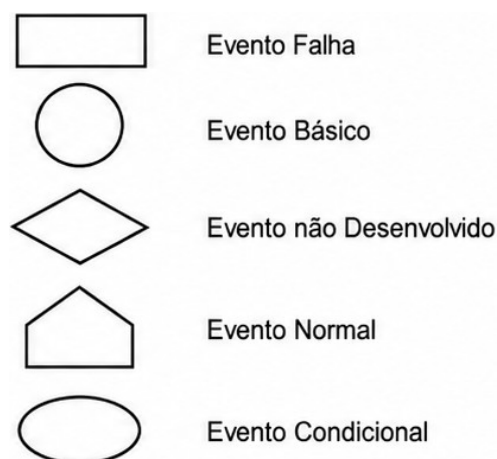


Figura 7: Simbologia dos eventos numa FTA.
Fonte: Lafraia (2001).

Assim, na Figura 7, observa-se que os principais eventos são representados por meio de figuras geométricas, sendo que cada simbologia apresenta um significado próprio. O intuito dessa padronização é facilitar a montagem dos diagramas e promover maior clareza na análise.

De igual modo, a Figura 8 traz os símbolos que caracterizam as principais portas lógicas (LAFRAIA, 2001).

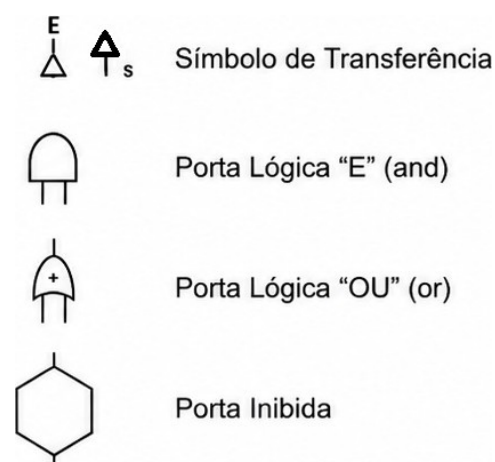


Figura 8: Simbologia das portas lógicas.
Fonte: Lafraia (2001).

Dessa forma, a Figura 8 evidencia a simbologia das principais portas lógicas utilizadas na montagem de um diagrama FTA. Segundo Lafraia (2001), a porta lógica E (*AND*) é empregada quando dois eventos ocorrem de forma simultânea, representando uma configuração em série no diagrama de blocos. Já a porta lógica OU (*OR*) é utilizada quando dois eventos ocorrem de forma independente, representando uma configuração em paralelo no diagrama de blocos.

A Figura 9 apresenta uma FTA de um motor elétrico em estado de não funcionamento (LAFRAIA, 2001).

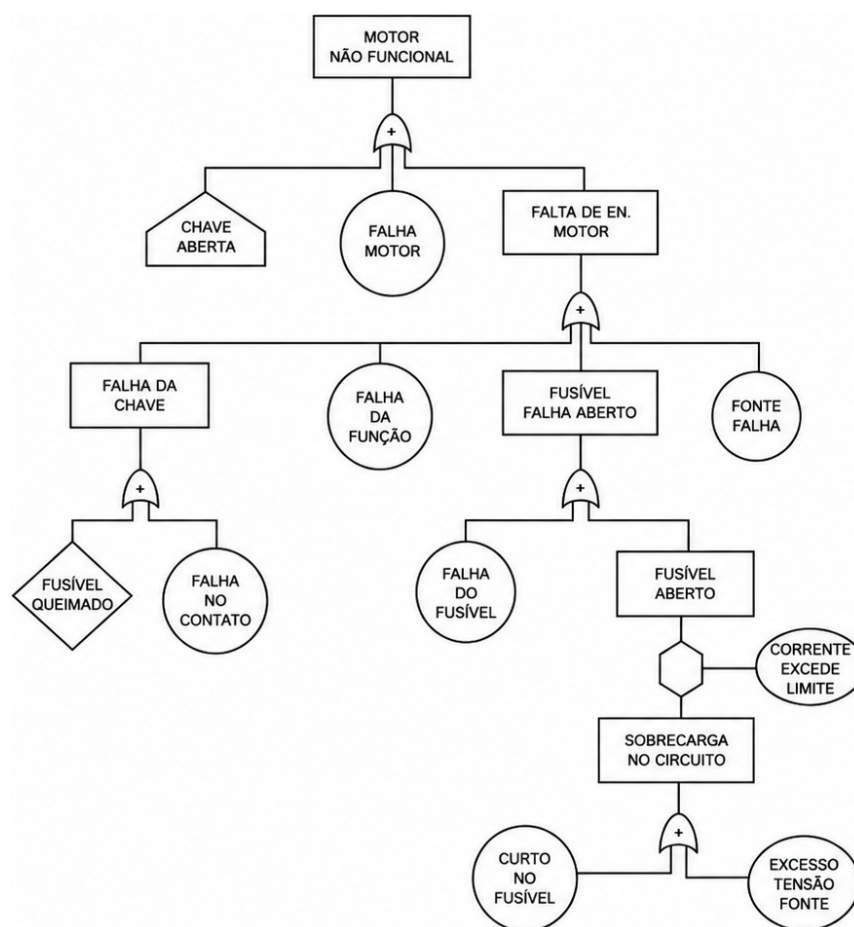


Figura 9: FTA de um motor elétrico inoperante.
Fonte: Lafraia (2001).

Assim, a Figura 9 demonstra a construção de uma Árvore de Falhas de um motor elétrico inoperante. Essa árvore de falhas tem como objetivo identificar os motivos que levaram à falha do motor, desmembrando os eventos para a compreensão das causas-raiz.

2.4 Plano de Ação

Segundo Xenos (2004), após a identificação das causas fundamentais que levam à falha, é necessário elaborar contramedidas responsáveis por erradicá-la. Ademais, o autor afirma que a forma de garantir que as contramedidas planejadas sejam devidamente implementadas ocorre por meio da elaboração de um plano de ação. Para o autor, o plano de ação tem como objetivo identificar quais contramedidas deverão ser adotadas, designar os responsáveis e definir os prazos.

Consoante a isso, Xenos (2004) estabelece que, para o cumprimento das ações (contramedidas), é necessário um acompanhamento constante e rigoroso, a fim de assegurar que as ações estabelecidas sejam executadas dentro dos prazos definidos. Segundo o autor, caso as ações não sejam acompanhadas de forma adequada, as contramedidas não serão efetivadas e ocorrerá a reincidência das falhas. Portanto, torna-se necessário promover reuniões de acompanhamento e definir sua periodicidade (diária, semanal ou mensal), bem como os envolvidos.

Portanto, é importante destacar que uma das ferramentas utilizadas para a elaboração de um plano de ação é o 5W1H. De acordo com Seleme (2015), essa ferramenta consiste na utilização de perguntas originadas da língua inglesa, identificadas pelas iniciais “W” e “H”, a partir das quais se estrutura a resolução de um problema. Para o autor, essa ferramenta permite ao mantenedor demonstrar de maneira clara e organizada a execução de uma ação de manutenção. A seguir, apresenta-se uma figura ilustrativa da elaboração de um plano de ação, utilizando a ferramenta 5W1H, sendo importante ressaltar que um “H” foi adicionado posteriormente ao método, fazendo referência aos custos.

Contramedidas (What)	Justificativa (Why)	Respon- sável (Who)	Local (Where)	Cronograma (When)			Procedimento (How)
				Semana 1	Semana 2	Semana 3	
1. Modificar projeto do eixo para aumentar o raio de concordância entre as superfícies transversais.	Para reduzir a concentração de tensões entre as superfícies transversais do eixo.	Daniel	Departamento de engenharia				Modificar desenhos e especificações de engenharia e informar o Departamento de Compras das novas especificações.
2. Reavaliar material empregado no eixo por meio de testes de resistência.	Para avaliar a resistência do eixo aos esforços combinados de flexão e rotação.	Rogério	Departamento de engenharia				Rever especificação do material do eixo. Utilizar um dos eixos em estoque como corpo de prova para os testes de resistência.
3. Na partida do equipamento, sincronizar o acionamento das rodas direita e esquerda em todos os carros.	Para evitar a aplicação de esforços assimétricos nas rodas direita e esquerda.	Newton	Departamento de engenharia				Projetar mecanismo sincronizador e alterar sistema de acionamento elétrico das rodas direita e esquerda.
4. Fazer testes de detecção de trincas (ultrassom) em outros eixos de outros carros de transferência.	Para verificar a presença de trincas em outros eixos em uso na fábrica e substituí-los antes que falhem.	Fábio	Áreas de produção				Fazer testes de detecção de trincas segundo procedimento de manutenção T-051-92.
5. Reduzir o intervalo de inspeção dos eixos de 30 para 10 dias (contramedida temporária).	Para evitar outras falhas até que as contramedidas 1 a 4 tenham sido executadas.	Cláudio	Departamento de manutenção				Alterar temporariamente o programa de manutenção dos carros e sistema de ordens de serviço.

Figura 10 – Exemplo de um plano de ação.

Fonte: Xenos (2004)

Por meio da análise da Figura 10, entende-se que o plano de ação para o tratamento das causas fundamentais que levam à falha é capaz de proporcionar maior segurança quanto à

entrega de resultados. Isso ocorre em função do domínio exercido sobre a atividade, uma vez que se conhece o que será feito (*what*), por que será feito (*why*), por quem (*who*), onde (*where*), quando (*when*) e como será feito (*how*). Dessa forma, ao conhecer e organizar adequadamente as contramedidas, torna-se possível eliminar as causas fundamentais, aumentar a disponibilidade e elevar a produtividade.

Ao longo deste capítulo, foi realizada uma revisão teórica dos conceitos e temas essenciais que sustentam o desenvolvimento e a compreensão dos capítulos subsequentes, constituindo a base teórica para o desenvolvimento deste trabalho.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipos de Pesquisa

Conforme Gil (2002, p. 17), a pesquisa é o “procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar resposta aos problemas que são propostos”. Ademais, segundo o autor, a necessidade da pesquisa decorre da ausência ou da desordem das informações, que impedem a resolução do problema. Ainda, Gil (2002) enfatiza que a pesquisa é desenvolvida por meio da aplicação de conhecimentos, métodos e técnicas, em um processo composto por inúmeras fases, que vão desde a formulação do problema até a apresentação dos resultados.

Outrossim, Silva e Menezes (2005) classificam a forma de abordagem do problema em quantitativa e qualitativa. Os autores definem a pesquisa quantitativa como aquela que utiliza recursos e técnicas estatísticas com o objetivo de quantificar opiniões e informações, possibilitando sua classificação e análise.

No que se refere à abordagem qualitativa, Silva e Menezes (2005) destacam que, diferentemente da abordagem quantitativa, esta não utiliza recursos e técnicas estatísticas, baseando-se na relação entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito, a qual não pode ser traduzida em números. Assim, conforme os autores, essa abordagem fundamenta-se na interpretação de fenômenos e na atribuição de significados, sendo de natureza descritiva, cabendo ao pesquisador a análise indutiva dos dados.

O presente trabalho contempla ambas as abordagens, uma vez que utiliza recursos e técnicas estatísticas, bem como a análise indutiva, visando ao conhecimento, à compreensão e ao tratamento dos modos de falha.

Somado a isso, conforme Gil (2008, p. 27), a pesquisa exploratória “tem como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores”. Dessa forma, segundo o autor, esse tipo de pesquisa é realizado por meio de levantamento bibliográfico e documental, entrevistas não padronizadas e estudos de caso.

Adicionalmente, Gil (2008) afirma que a pesquisa exploratória é desenvolvida quando se pretende obter uma visão aproximada e geral sobre determinado fato ainda pouco explorado, o que dificulta a formulação de hipóteses precisas. Nesse sentido, o autor destaca a necessidade de revisão da literatura, discussão com especialistas e outros procedimentos que

buscam delimitar e esclarecer o tema escolhido. Por fim, estabelece que o produto desse tipo de pesquisa é um problema mais bem elucidado e passível de investigação por meio de procedimentos sistemáticos.

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa exploratória, uma vez que, após a identificação do problema, realizou o levantamento e o tratamento das informações relevantes, identificou os modos de falha e contribuiu para a delimitação, elucidação e proposição de soluções para um problema pouco explorado e de difícil tratamento.

Além disso, de acordo com Gil (2002), as pesquisas podem ser classificadas com base nos procedimentos técnicos utilizados, sendo eles: pesquisa bibliográfica, documental, experimental, ex-post facto, estudo de coorte, levantamento, estudo de campo, estudo de caso, pesquisa-ação e pesquisa participante. O presente trabalho pode ser classificado como pesquisa bibliográfica, documental e estudo de caso.

Nesse contexto, Gil (2002) define a pesquisa bibliográfica como aquela desenvolvida a partir de livros e referências bibliográficas. O autor afirma que, em síntese, parte considerável dos estudos de caráter exploratório pode ser definida como pesquisa bibliográfica. Ademais, destaca como principal vantagem desse tipo de pesquisa a possibilidade de fornecer ao pesquisador um volume maior de informações do que uma pesquisa direta, o que se mostra relevante quando o problema investigado demanda dados dispersos no espaço.

Dessa forma, o presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica, uma vez que possui caráter exploratório e utiliza livros e referências bibliográficas ao longo de todo o seu desenvolvimento.

Outrossim, Gil (2002) afirma que a pesquisa documental é semelhante à pesquisa bibliográfica, diferenciando-se principalmente pela natureza das fontes. Enquanto a pesquisa bibliográfica utiliza contribuições de diversos autores, a pesquisa documental baseia-se em informações que ainda não receberam tratamento analítico ou que podem ser reelaboradas conforme os objetivos da pesquisa.

Assim, o presente trabalho também se caracteriza como pesquisa documental, pois utiliza dados provenientes de um histórico detalhado de falhas do equipamento, os quais passaram pelo devido tratamento analítico.

Somado a isso, Gil (2002) estabelece que o estudo de caso consiste em uma investigação intensa, complexa e aprofundada sobre determinado objeto, com o objetivo de compreender detalhadamente seus comportamentos.

Por fim, o presente trabalho configura-se como um estudo de caso, uma vez que realiza uma análise aprofundada de uma retomadora, buscando compreender seu comportamento, identificar as falhas que impactam sua produtividade e propor soluções.

3.2 Materiais e Métodos

A seguir, apresenta-se a Figura 11, que ilustra o desenvolvimento do trabalho.

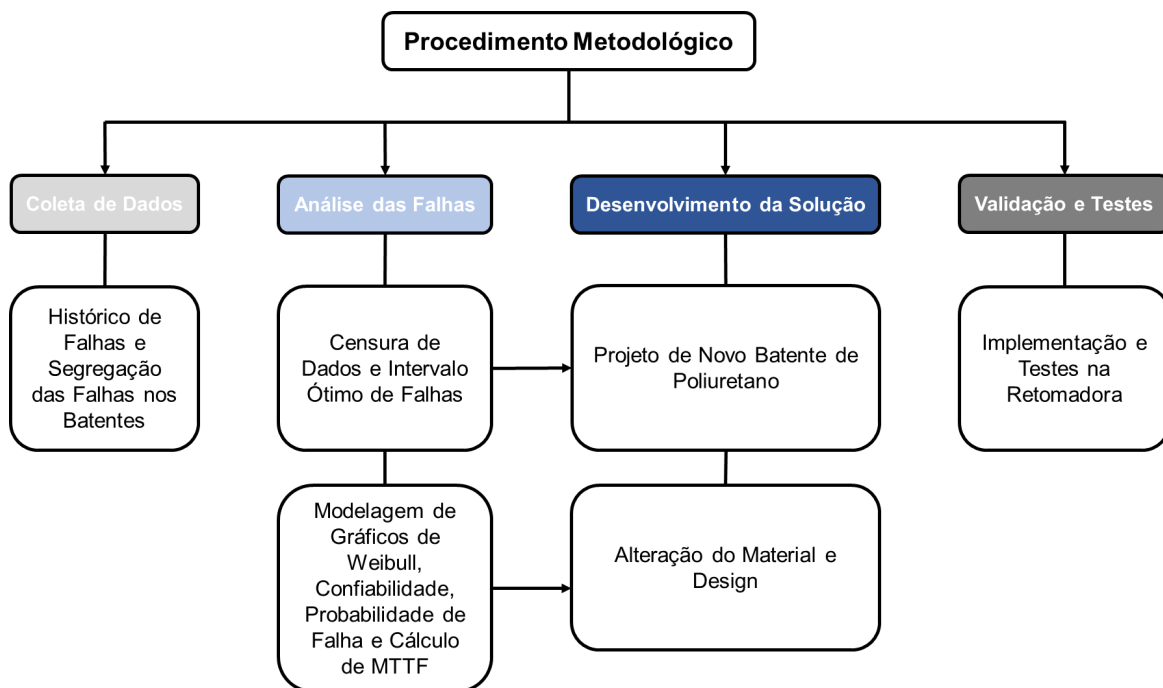


Figura 11 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Figura 11 sintetiza a metodologia aplicada para a obtenção e a análise dos resultados deste estudo. Desse modo, o trabalho inicia-se com a identificação do problema, a partir da percepção de falhas recorrentes nos batentes da retomadora pela equipe de manutenção e de seu impacto direto na produtividade do equipamento e da cadeia produtiva diretamente dependente de seu funcionamento. Em seguida, realizou-se a coleta de dados com base no histórico de falhas disponibilizado pela empresa.

Adicionalmente, foi realizada uma segregação específica das falhas nos batentes, bem como o tratamento estatístico dos dados. Considerando que as falhas foram coletadas a partir de dois *softwares* da empresa, com o objetivo de alcançar o maior número possível de registros, algumas ocorrências estavam presentes em ambos os sistemas e, portanto, foram consolidadas em uma única falha. Além disso, os dados passaram por um tratamento específico, com a aplicação de duas filtragens de dados por remoção de observações atípicas e a definição do intervalo ótimo de falhas.

Ademais, esses dados foram inseridos em um *software* online especializado em modelagem estatística, possibilitando a obtenção dos gráficos de Weibull, da curva de confiabilidade e da curva de probabilidade de falha, bem como a determinação dos parâmetros β (beta) e η (eta), que representam, respectivamente, o valor da inclinação da reta e a vida característica, além do cálculo do MTTF a partir dos dados.

Por fim, com base na interpretação desses resultados, procede-se à análise dos modos de falha e à proposição de uma solução técnica, fundamentada na alteração do material e no design do batente. Assim, o novo batente de poliuretano é projetado e implementado em parceria com empresa especializada, submetido a um período de testes em operação real e, posteriormente, realizado o levantamento e a validação dos resultados obtidos.

3.3 Variáveis e Indicadores

Conforme Gil (2008, p. 32), o conceito de variável consiste em “tudo aquilo que pode assumir diferentes valores ou diferentes aspectos, segundo os casos particulares ou circunstâncias”. Ainda, Gil (2008) exemplifica que a idade é uma variável por poder assumir diferentes valores, assim como forma, estatura, peso e temperatura. O autor complementa que, mesmo quando a variável não assume valores numéricos, ela ainda pode ser considerada uma variável, como a classe social, que assume categorias distintas, tais como alta, média e baixa.

Além disso, segundo Viana (2002), é por meio dos indicadores que se acompanha a evolução das ações mantenedoras, cabendo a eles refletir os desafios da manutenção e sua rotina diária. Ainda segundo o autor, os indicadores constituem uma forma de retratar a situação do processo da planta, sendo um dos principais meios de monitorar o processo e de visualizar, de maneira prática, aquilo que efetivamente agrega valor à companhia.

Por fim, o autor apresenta seis indicadores, denominados “Índices de Classe Mundial”, em razão de sua ampla aplicabilidade nos países ocidentais, a saber: MTBF – *Mean Time Between Failures* / Tempo Médio Entre Falhas; MTTR – *Mean Time to Repair* / Tempo Médio de Reparo; TMPF – Tempo Médio Para Falha; Disponibilidade Física da Maquinaria; Custo de Manutenção por Faturamento; e Custo de Manutenção por Valor de Reposição.

A Tabela 3 apresenta as variáveis e os indicadores utilizados no presente trabalho.

Tabela 3 – Variáveis e Indicadores.

Variáveis	Indicadores
Manutenção Centrada na Confiabilidade	- Distribuição de Weibull - Curva de Confiabilidade - Curva de Probabilidade de Falha - MTBF
Paradas Decorrentes de Falhas	- Número de Intervenções Corretivas - Número de Falhas - Duração das Falhas

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Observa-se, na Tabela 3, que as variáveis do processo são a Manutenção Centrada na Confiabilidade e as paradas decorrentes de falhas. Os indicadores do MCC são a distribuição de Weibull, a curva de confiabilidade, a curva de probabilidade de falha e o MTBF. Já para as paradas decorrentes de falhas, os indicadores são o número de intervenções corretivas, o número de falhas e a duração das falhas.

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Os dados de falhas dos equipamentos foram obtidos por meio de planilhas eletrônicas geradas no *software* Microsoft Excel, a partir de dois outros *softwares* pertencentes a uma empresa do setor de mineração, responsáveis pelo registro de informações relativas a falhas, intervenções e atividades de manutenção. Com o uso de um *software* online e gratuito, foi possível realizar a análise de confiabilidade por meio da distribuição de Weibull, obtendo-se as curvas correspondentes e a determinação dos parâmetros de forma e escala.

3.5 Tabulação dos dados

Os dados foram tabulados por meio do *software* Microsoft Excel, possibilitando a organização das informações referentes ao período pesquisado, a disposição das falhas em ordem sequencial e o cálculo do tempo entre falhas, utilizado para a filtragem de dados por remoção de observações atípicas e para o desenvolvimento do intervalo ótimo aplicado à análise de Weibull. O *software* online empregado na análise utilizou o upload de uma planilha

eletrônica específica, previamente instalada e preenchida, para a construção das informações necessárias.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

O presente capítulo identificou os tipos de pesquisa, apresentou os materiais e métodos, descreveu as variáveis e os indicadores que sustentaram o trabalho, além de indicar os instrumentos utilizados para a coleta e a devida tabulação dos dados. Tais elementos foram fundamentais para o alcance dos objetivos propostos e para a concretização desta pesquisa.

O próximo capítulo trata da análise dos resultados, com a apresentação dos objetos e equipamentos estudados, em conjunto com a aplicação da metodologia desenvolvida neste capítulo, bem como dos resultados obtidos por meio de sua implementação.

4 RESULTADOS

4.1 Características da Empresa

A empresa estudada é uma mineradora do setor de commodities minerais, com atuação na produção de minério de ferro, níquel e cobre, sendo seu principal foco a extração e o beneficiamento de minério de ferro. A empresa também possui participação no segmento logístico, por meio de uma rede própria responsável por integrar mina, ferrovia, navio e porto.

Assim, a empresa apresenta uma cadeia produtiva altamente integrada, o que permite extrair, transportar e exportar seus produtos com recursos próprios, sem dependência de terceiros. Dessa forma, possui elevado grau de competitividade, justificando sua forte presença operacional em âmbito nacional e internacional.

Nesse contexto, a empresa dispõe de inúmeros ativos que demandam manutenção constante para garantir uma operação eficiente e contínua.

O minério é lavrado na mina e transportado por caminhões fora de estrada, que descarregam o material no britador primário, responsável pela redução da granulometria do minério de ferro. Posteriormente, o minério é direcionado aos alimentadores de sapata, que abastecem um transportador de correia encarregado de conduzir o material a duas peneiras vibratórias. As peneiras são compostas por grelhas responsáveis pela classificação do minério em produto, destinado à pilha, e carga recirculante. A carga recirculante corresponde ao material que não apresentou granulometria adequada, necessitando de nova redução por meio do britador secundário. Após a britagem secundária, o material é direcionado à pilha.

Os alimentadores de sapata localizados abaixo das pilhas abastecem transportadores de correia de longa distância, que direcionam o material para o pátio de homogeneização, localizado a quilômetros de distância.

O pátio de homogeneização é composto por duas máquinas de pátio: a empilhadeira e a retomadora. A empilhadeira é responsável pela formação inicial de cordões de minério rente ao solo e, posteriormente, pela deposição de novos cordões sobrepostos ao material já empilhado, formando uma pilha com geometria piramidal. Essa etapa constitui o primeiro passo da homogeneização, uma vez que cada cordão é formado por materiais provenientes de diferentes frentes de lavra, apresentando distintos teores de ferro, sílica, potássio, entre outros elementos. Os cordões são depositados nos pátios A e B, possibilitando a realização simultânea das operações de empilhamento e retomada.

A retomadora translada pelo pátio sobre trilhos em direção à pilha formada pela empilhadeira. O ancinho da retomadora desagrega e revolve as camadas da pilha de minério, promovendo a homogeneização do material previamente empilhado. Em paralelo, o minério é retomado pela roda de caçambas e transferido para o transportador da ponte, que descarrega o material nos transportadores de longa distância responsáveis por conduzi-lo até a pilha pulmão da usina.

Logo, a retomadora desempenha papel fundamental no processo de produção mineral, uma vez que promove a homogeneização dos materiais provenientes de diferentes frentes de lavra, garantindo um minério com teores adequados de ferro, sílica e demais componentes químicos. Na sua ausência, ocorre o abastecimento direto da pilha pulmão, situação que gera retrabalho e aumento de custos operacionais. Inicialmente, torna-se necessário selecionar frentes de lavra com características mais adequadas e, posteriormente, a usina demanda maior esforço de beneficiamento para processar o material não homogeneizado, elevando o consumo de reagentes químicos e aumentando a solicitação dos equipamentos. Por conseguinte, a indisponibilidade da retomadora, objeto deste estudo, é capaz de causar impactos significativos nos resultados produtivos e financeiros.

Ademais, a Coordenação de Inspeção Mecânica e Engenharia é responsável pela realização de inspeções periódicas nos equipamentos, possuindo conhecimento aprofundado sobre suas condições físicas, mecânicas e operacionais. Com uma equipe composta por inspetores e engenheiros, a integração entre as áreas de inspeção e engenharia possibilita o desenvolvimento de estudos de confiabilidade capazes de aprimorar a integridade, a disponibilidade e a eficiência dos ativos.

A Figura 12 apresenta o organograma organizacional, com a respectiva posição da coordenação.

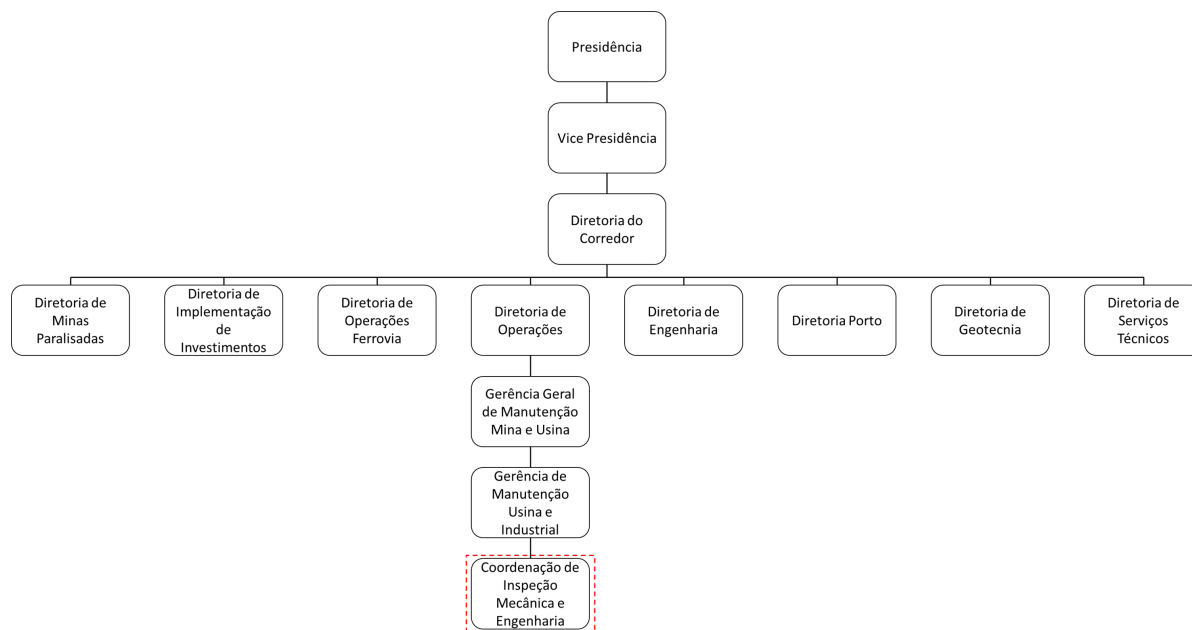


Figura 12 – Organograma empresarial.

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Observa-se, na Figura 12, que a Coordenação de Inspeção Mecânica e Engenharia apresenta posição estratégica dentro do processo, respondendo diretamente à Gerência de Manutenção Usina e Industrial, sendo fundamental para que o processo de manutenção ocorra de forma eficiente, garantindo, por meio de seu escopo, que os maquinários presentes na planta sejam capazes de exercer a função requerida dentro do processo produtivo.

4.2 Caracterização da Retomadora Roda de Caçamba Tipo Ponte

A Retomadora de Roda de Caçamba do Tipo Ponte é um dos tipos de retomadoras utilizadas no contexto da mineração. A Figura 13 apresenta uma representação da retomadora mencionada.



Figura 13 – Retomadora Roda de Caçamba Tipo Ponte.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Figura 13, apresenta-se a retomadora de roda de caçambas do tipo ponte em operação no pátio de homogeneização. Seu principal objetivo é realizar a retomada do minério armazenado nesse pátio.

A Figura 14 apresenta a vista geral da retomadora.

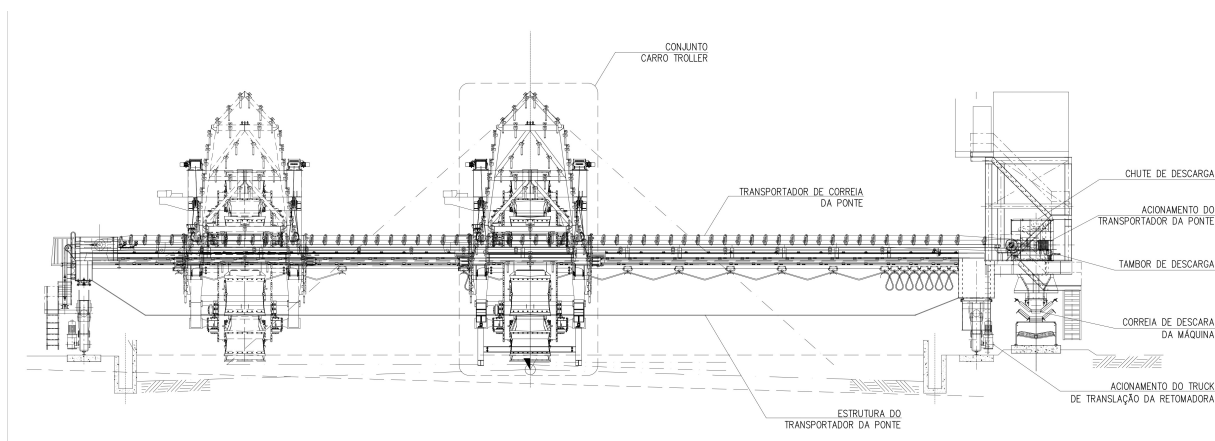


Figura 14 – Vista geral da retomadora.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Figura 14 observa-se a Retomadora de Caçamba Tipo Ponte, objeto de estudo, composta por transportador de ponte, trucks de translação, conjunto carro troller, ancinhos e roda de caçamba.

Na Figura 14, observa-se o conjunto carro-trolley, estrutura responsável por transladar ao longo do transportador de correia da ponte. Esse conjunto tem como principal função promover a desagregação do material da pilha por meio da ação dos ancinhos e realizar a retomada do minério através do movimento rotacional da roda de caçambas, responsável pela

escavação e coleta do material. Após a coleta, o minério é descarregado no chute central, que direciona o fluxo para o alimentador do transportador de correia da ponte. Em seguida, o material é transportado até o chute de descarga e posteriormente transferido para o transportador de longa distância, responsável pelo abastecimento da pilha de ROM (*Run-of-Mine*) da Usina.

Além disso, na Figura 14, nota-se que o transportador de correia da ponte é acionado por um conjunto composto por motor elétrico e redutor de velocidade. A transmissão de torque é realizada por meio de um acoplamento magnético, permitindo a movimentação da correia transportadora. A correia é sustentada por uma estrutura apoiada sobre rolos de impacto, enquanto a estrutura do transportador de correia da ponte é responsável por suportar as cargas provenientes do conjunto carro-troller, bem como do próprio sistema transportador.

Ademais, na Figura 14, observa-se também o sistema de translação da retomadora. Ao todo, a máquina possui 10 trucks motrizes de translação, responsáveis pela movimentação de todo o conjunto ao longo do caminho de rolamento. Esse movimento tem como finalidade aproximar a retomadora da pilha de minério, permitindo a execução do processo de retomada.

A Figura 15 apresenta a vista lateral em corte do conjunto carro troller.

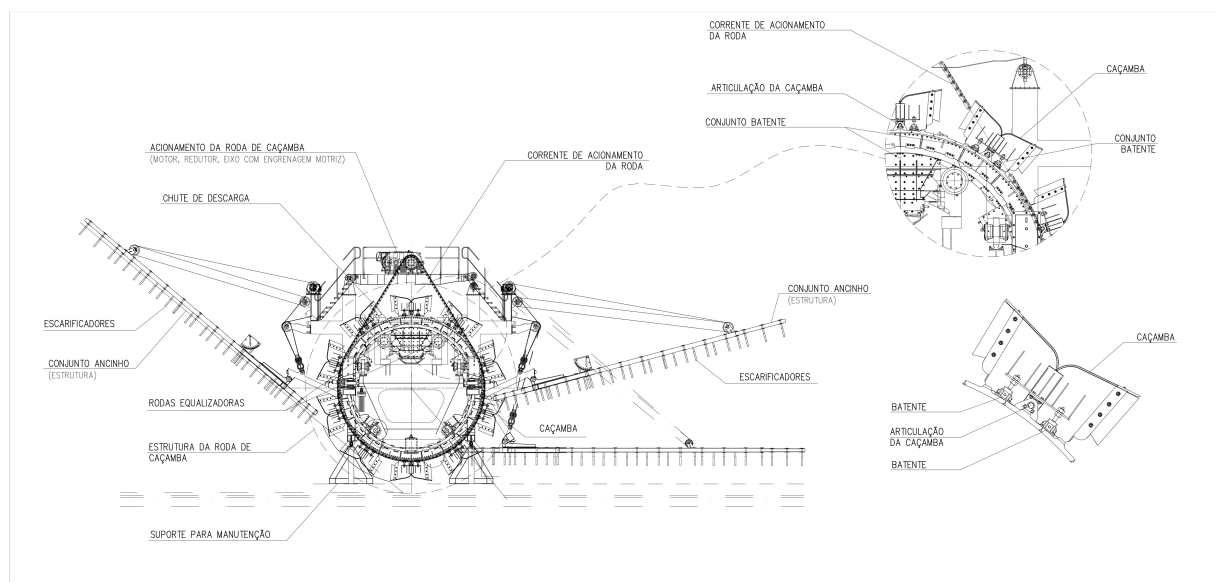


Figura 15 – Vista lateral em corte do conjunto carro troller.

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Figura 15, observa-se a vista lateral em corte do conjunto carro-troller. O conjunto da roda de caçambas é acionado por um sistema composto por motor elétrico, redutor de velocidade e eixo com engrenagem motriz acoplada à corrente de acionamento da roda de caçambas, responsável por promover seu movimento rotacional. Nesse sistema, a roda de

caçambas atua como engrenagem movida. Em sua periferia, encontram-se os dentes por onde a corrente é tracionada, transmitindo o torque e a rotação necessários para a execução do processo de escavação e retomada do minério.

Na Figura 15, também é possível observar o chute de descarga, componente responsável por receber o minério descarregado pelas caçambas ao transportador de correia. As rodas equalizadoras têm a função de suportar todo o peso do conjunto da roda de caçambas, constituindo os principais elementos de apoio do sistema. Essas rodas são equipadas com rolamentos de elevada capacidade de carga, lubrificados a graxa, projetados para suportar as severas condições operacionais do processo de retomada.

O conjunto ancinho, também apresentado na Figura 15, é responsável pela desagregação e homogeneização do minério da pilha. Essa função é fundamental, uma vez que o minério proveniente da mina pode apresentar diferentes características litológicas em função das diversas frentes de lavra. O posicionamento do ancinho é ajustado por meio de roldanas, permitindo adequar sua angulação à geometria da pilha. O conjunto também é composto por escarificadores, elementos que entram em contato direto com o minério e, por esse motivo, são considerados componentes sujeitos ao desgaste.

Na Figura 15, observa-se ainda o suporte de manutenção, responsável pela elevação do conjunto da roda de caçambas durante intervenções de manutenção rotineiras. Essa elevação é realizada por meio de um cilindro hidráulico com capacidade de 200 toneladas.

A Figura 15 também apresenta um detalhe ampliado da caçamba, permitindo a visualização de seus principais componentes. A caçamba é composta por uma borda de ataque, elemento de desgaste fixado por parafusos. Sua conexão à estrutura da roda de caçambas ocorre por meio de um sistema de articulação constituído por pino central, bucha de aço e bucha de bronze, componentes igualmente sujeitos ao desgaste. A fixação da caçamba à estrutura é realizada por meio de um olhal, no qual é inserido o pino de articulação. Esse pino permite o movimento angular da caçamba e é travado por uma chapa parafusada.

No detalhe ampliado da caçamba apresentado na Figura 15, também é possível observar o conjunto de batentes. Os batentes, inicialmente de borracha, são instalados em um suporte metálico e fixados lateralmente por quatro parafusos em cada extremidade do suporte. Sua função é absorver os impactos gerados durante a operação e evitar o contato direto entre superfícies metálicas. A ocorrência de contato aço-aço pode provocar a ruptura dos parafusos da articulação, acelerar o desgaste dos pinos e das buchas de aço e bronze e, em casos mais

severos, ocasionar o desprendimento da caçamba, resultando em uma falha catastrófica da máquina.

A Figura 16 apresenta a vista frontal do conjunto carro troller.

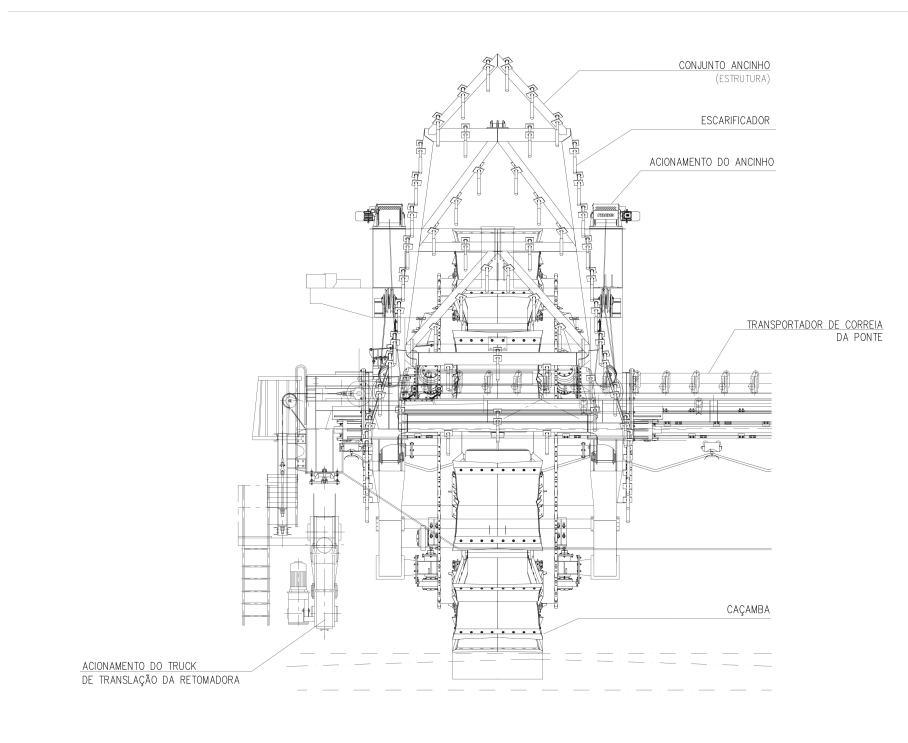


Figura 16 – Vista frontal do conjunto carro troller.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Figura 16, observa-se a vista frontal do conjunto carro-troller. Nota-se o sistema de acionamento do ancinho, responsável por ajustar sua angulação em relação à pilha de minério por meio do recolhimento ou da liberação dos cabos de aço. Além de permitir o ajuste operacional do ancinho, a liberação dos cabos também possibilita seu abaixamento para a execução de atividades de manutenção e substituição dos escarificadores.

Assim, a retomadora analisada é considerada um ativo crítico devido à sua importância para o sistema produtivo, tendo em vista que sua indisponibilidade física impede a usina de receber minério com teores adequados de ferro, sílica e demais componentes especificados. Consequentemente, há impacto nos equipamentos responsáveis por realizar maior esforço no processo de beneficiamento. Além disso, a manutenção e a substituição de componentes exigem rigorosos protocolos de segurança e engenharia.

4.3 Proposta de um Plano de Ação em uma Retomadora a partir do MCC

4.3.1 Falha nos Batentes de Borracha

Os batentes de borracha fazem parte do sistema de amortecimento das caçambas. Esse sistema é necessário devido ao movimento angular realizado pelas caçambas durante a escavação e coleta do minério na pilha. As caçambas estão montadas na roda de caçambas, e o processo de retomada do minério ocorre por meio do movimento rotacional desse conjunto. A roda de caçambas é acionada por duas correntes e constitui o elemento movido de um sistema de transmissão composto por uma engrenagem dentada acionada por um conjunto motriz formado por motor elétrico e redutor de velocidade. A roda de caçambas é composta por um conjunto de caçambas responsáveis pela escavação, coleta e transferência do minério durante a operação de retomada.

Durante a operação, a retomadora translada em direção à pilha de minério enquanto os ancinhos promovem a desagregação do material. Simultaneamente, as caçambas penetram no minério desagregado, realizando sua coleta. Esse processo submete a roda de caçambas a elevados esforços mecânicos, com predominância de esforços de compressão, tornando necessária a utilização de batentes para amortecer e absorver os impactos gerados durante a operação.

A Figura 17 apresenta detalhes da roda de caçambas e da região onde os batentes estão instalados.



Figura 17 – Sistema de Amortecimento da Retomadora.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Figura 17, observa-se o sistema de amortecimento da roda de caçambas da retomadora. No destaque amarelo da imagem à esquerda, encontra-se uma das 10 caçambas que compõem a roda de caçambas, responsável pela coleta do minério da pilha. Cada caçamba possui quatro batentes, totalizando 40 batentes em toda a roda de caçambas da retomadora. A região destacada em azul corresponde à articulação da caçamba, cuja geometria e posicionamento são definidos em projeto e influenciam diretamente as condições de carregamento do conjunto. Já a região destacada em vermelho indica a localização do batente, sendo ampliada para facilitar sua visualização. Na imagem à direita, o destaque vermelho apresenta uma visão ampliada da região de instalação do batente, enquanto o destaque verde identifica sua posição dentro da estrutura da roda de caçambas.

A Figura 18 apresenta a condição de um dos batentes de borracha no dia posterior a uma das falhas que resultou em um período considerável de indisponibilidade da retomadora, ocorrida em 16/10/2025.



Figura 18 – Condição do batente em operação.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Figura 18, é possível observar a condição operacional de um dos batentes de borracha. O componente apresenta elevado grau de degradação, caracterizado por elevada perda de material. Embora não se trate do batente que efetivamente falhou, observa-se visualmente que o componente já se encontrava em estágio avançado de desgaste, próximo ao final de sua vida útil.

A falha ocorreu em um dos batentes de borracha que, devido ao elevado grau de degradação, perdeu praticamente toda a camada de material responsável por impedir o contato direto entre as superfícies metálicas. Com a eliminação do material remanescente que isolava a caçamba da estrutura metálica de sustentação do batente, passou a ocorrer contato direto entre aço e aço. Essa condição resultou em esforços excessivos sobre a caçamba, provocando

o desprendimento da caçamba da sua articulação. A Figura 19 evidencia a condição do batente.



Figura 19 – Falha em batente de borracha.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Figura 19, observa-se uma falha em batente ocorrida em 16/10/2025. Nota-se que o batente, apresenta quantidade insuficiente de borracha para absorver adequadamente os esforços mecânicos provenientes da operação de retomada.

Em decorrência da degradação do batente, ocorreu contato direto entre superfícies metálicas, resultando na transmissão de elevadas cargas entre a caçamba e sua estrutura de sustentação. Como consequência da interação entre ação e reação dos esforços mecânicos, houve o rompimento da chapa metálica conectada à articulação da caçamba, provocando o desprendimento do componente.

Após o desprendimento, a caçamba colidiu com uma viga estrutural da retomadora, ocasionando sua deformação. Trata-se de uma falha de caráter catastrófico, que gerou impactos significativos na operação e ocorreu durante o período de realização deste estudo.

4.3.2 Coleta e Tratamento de Dados

Dentro da rotina da empresa, são realizadas reuniões diárias, semanais e mensais de acompanhamento de falhas. Essas reuniões permitem discutir e propor soluções para as falhas identificadas. Observou-se que, ao longo do ano de 2025, a retomadora apresentou diversas falhas em seu sistema de amortecimento das caçambas composto por batentes de borracha. Essas falhas estavam comprometendo o fornecimento adequado de *blend* para a usina. A partir disso, foi proposta a realização de um estudo de engenharia baseado na MCC, com o intuito de elaborar um plano de ação.

O primeiro passo consistiu em acessar os dois *softwares* responsáveis pelo registro e armazenamento das falhas. Os dados coletados compreenderam um período de aproximadamente um ano, considerando setembro de 2024 até a primeira quinzena de outubro de 2025, quando o trabalho foi iniciado.

Ademais, vale ressaltar que ambos os *softwares* permitem direcionar previamente a pesquisa antes do acesso aos dados, o que facilita o posterior tratamento das informações. As Tabelas 4 e 6 demonstram as duas bases de dados brutas utilizadas.

Tabela 4 – Fração da base crua de dados do primeiro *software*.

Início	Fim	Duração	Causa	Falha	Observação
15/09/2025 10:51	15/09/2025 14:07	03:15:42	Roda de caçamba	Falha nas fixações do revestimento	Desprendimento de chapa de fixação da caçamba N°08.
30/08/2025 15:04	30/08/2025 15:50	00:45:38	Amortecedor - roda de caçamba	Defeito ou Falha	Troca do batente.
28/08/2025 09:23	29/08/2025 01:55	16:31:31	Roda de caçamba	Avaria na caçamba	Quebra dos parafusos do olhal da caçamba 08.
06/07/2025 16:16	06/07/2025 19:50	03:34:31	Amortecedor - roda de caçamba	Defeito ou Falha	RC-463 Desprendimento do batente lado esquerdo da caçamba N°01.
02/07/2025 10:19	02/07/2025 16:08	05:48:56	Roda de caçamba	Falha nas fixações do revestimento	Desprendendo batente da caçamba N°08.

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Tabela 4, observa-se uma fração dos dados do primeiro *software* compilados em uma única planilha. Na segunda linha, é possível observar uma das falhas nos batentes, com início em 30/08/2025 às 15:04 e término em 30/08/2025 às 15:50. O tempo de duração da falha foi de 45 minutos e 38 segundos. A causa identificada foi uma falha no amortecedor da roda de caçamba, sendo registrada como defeito ou falha do componente. Como observação, foi registrada a realização da troca do batente.

Além disso, vale ressaltar que esses dados foram extraídos de um *software* online e proprietário da empresa. Esse *software* permite gerar uma planilha em Excel contendo os dados mensais de falhas. A partir dessas informações, foi construída uma planilha para a qual os dados relevantes foram transferidos. A planilha desenvolvida é apresentada na Tabela 4.

Ademais, no primeiro *software*, a pesquisa foi direcionada à roda de caçamba. Dessa forma, a base bruta de dados apresentava 87 falhas mecânicas. Assim, o primeiro tratamento de dados realizado consistiu em segregar as falhas referentes aos batentes das demais falhas. Após esse tratamento, percebeu-se que o *software*, por vezes, fragmentava uma mesma falha em dois ou mais intervalos subsequentes. Entretanto, tais registros continuavam se referindo a uma única falha. Dessa forma, os tempos foram mesclados em um único intervalo, considerando-se como início o ponto mais antigo entre as falhas e, como término, o ponto mais recente.

A mescla dos tempos funciona conforme exemplificado na Tabela 5.

Tabela 5 – Mesclagem de tempos de intervalos subsequentes em um único intervalo.

Intervalos	Data e Hora Início	Data e Hora Fim
Intervalo 1	15/08/2025 15:00	15/08/2025 15:15
Intervalo 2	15/08/2025 15:15	15/08/2025 18:00
Intervalo Final	15/08/2025 15:00	15/08/2025 18:00

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 5 apresenta, por meio de valores aleatórios, o procedimento de mesclagem de tempos de intervalos subsequentes. Considerou-se uma situação em que o tempo de reparo foi dividido em dois intervalos pelo sistema de registro. Entretanto, esses intervalos correspondem a uma única falha e a um único período de manutenção, sendo, portanto, necessário consolidá-los em um único intervalo de tempo.

Tabela 6 – Fração da base crua de dados do segundo *software*.

Ordem	Data Início	Hora Início	Data Fim	Hora Fim	Concatenar Início	Concatenar Fim	Texto Breve
202501071371	02/03/2025	15:30:02	02/03/2025	18:02:00	02/03/25 15:30:02	02/03/25 18:02:00	02/03/2025 SUBSTITUIR E REPARAR BATENTE
202504643872	02/09/2025	11:00:02	02/09/2025	12:36:00	02/09/25 11:00:02	02/09/25 12:36:00	02/09/2025 SUBSTITUIR BATENTES E PARAFU
202500642902	06/02/2025	09:00:02	06/02/2025	12:36:00	06/02/25 09:00:02	06/02/25 12:36:00	06/02/2025 SUBSTITUIR BATENTE
202501188042	09/03/2025	16:30:03	09/03/2025	18:00:00	09/03/25 16:30:03	09/03/25 18:00:00	09/03/2025 SUBSTITUIR E REPARAR BATENTE
202503107615	10/06/2025	11:30:04	10/06/2025	12:36:00	10/06/25 11:30:04	10/06/25 12:36:00	10/06/2025 SUBSTITUIR BATENTE RC463

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Tabela 6, observa-se uma fração dos dados do segundo *software* compilados em uma única planilha. Na primeira linha, é possível observar uma das falhas em batentes. Inicialmente, apresenta-se a ordem de manutenção, seguida da data e da hora de início da intervenção. Na sequência, são apresentados a data e a hora de término. Posteriormente, a data e a hora de início foram concatenadas em uma única célula, enquanto a data e a hora de término foram concatenadas em outra célula. No campo de descrição breve da ordem, foi registrado o texto “substituição e reparo nos batentes”.

Dessa forma, esses dados foram extraídos de um *software* contratado pela empresa, o qual permite gerar uma planilha em Excel contendo os registros de falhas referentes a qualquer intervalo selecionado. A partir dessas informações, foi construída uma segunda planilha para a qual os dados relevantes foram transferidos. A planilha elaborada é apresentada na Tabela 6.

Além disso, no segundo *software*, a pesquisa foi direcionada aos batentes. Dessa forma, a base bruta de dados apresentava 63 intervenções realizadas em batentes, sendo essas intervenções de caráter corretivo e preventivo. Como a pesquisa já havia sido direcionada ao componente objeto de estudo, o único tratamento de dados necessário consistiu em mesclar, em um único intervalo de tempo, as falhas fragmentadas em dois ou mais períodos subsequentes, conforme apresentado na Tabela 5. Nesse processo, foi considerado como início o ponto mais antigo entre as falhas e, como término, o ponto mais recente.

Ademais, é importante ressaltar que as intervenções de caráter preventivo também foram consideradas como falhas dos batentes, embora não representem necessariamente falha funcional completa, as intervenções preventivas foram incluídas por indicarem degradação suficiente para a substituição do componente. Além disso, as intervenções preventivas foram tratadas como falha única, mesmo quando houve atuação em mais de uma caçamba.

Com os dados tratados, as duas planilhas construídas foram mescladas em uma única planilha. Ressalta-se que algumas falhas estavam presentes em ambos os *softwares*; nesses casos, elas foram consolidadas em uma única ocorrência, considerando-se um único intervalo de tempo, com início no ponto mais antigo e término no ponto mais recente.

A elaboração de duas planilhas distintas, posteriormente mescladas, foi fundamental, tendo em vista que algumas falhas estavam presentes em apenas um dos *softwares*. Dessa forma, foi possível abranger o maior número possível de falhas em batentes dentro do intervalo de tempo estabelecido.

No entanto, essa planilha não atendia ao formato exigido pelo *software* online utilizado para a realização da distribuição de Weibull. Dessa forma, os dados foram transferidos para a planilha-base disponibilizada pelo *software*, seguindo o formato solicitado.

Na Tabela 7 é exemplificado como funciona a mesclagem de dados entre as duas planilhas.

Tabela 7 – Mesclagem de tempos de planilhas distintas em um único intervalo.

Intervalo	Data e Hora Início	Data e Hora Fim
Intervalo 1 (Planilha 1)	22/08/2025 15:20	22/08/2025 18:00
Intervalo 2 (Planilha 2)	22/08/2025 15:30	22/08/2025 18:10
Resultado Final	22/08/2025 15:20	22/08/2025 18:10

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 7 demonstra como funciona a mesclagem dos tempos das duas planilhas de *softwares* diferentes criadas, na qual o intervalo 1 da planilha 1 representa a mesma falha presente no intervalo 2 da planilha 2, ou seja, a falha é a mesma com apontamento realizado em dois *softwares* distintos, com horas diferentes, tendo em vista que foram apontados por equipes diferentes, assim sendo foi considerado como hora inicial, a menor hora e como hora final a maior hora.

4.3.3 Filtragem de dados e Distribuição de Probabilidade

4.3.3.1 Primeira Amostra de Dados

Na Tabela 8, observa-se a base de dados final, na qual são considerados todos os registros de falhas em batentes. Foram registradas 76 falhas em batentes ao longo de um intervalo de aproximadamente um ano.

Tabela 8 – Fração da base de dados final.

Equipamen	Falha	Data hora in	Data hora fim
Retomadora	Falha de Batente	04/09/2024 15:15	04/09/2024 18:15
Retomadora	Falha de Batente	06/09/2024 01:00	06/09/2024 06:24
Retomadora	Falha de Batente	17/09/2024 12:45	17/09/2024 14:33
Retomadora	Falha de Batente	17/09/2024 22:02	18/09/2024 01:11
Retomadora	Falha de Batente	22/09/2024 03:06	22/09/2024 20:55

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na primeira célula da primeira coluna, identifica-se o equipamento como sendo a retomadora. Em seguida, é apresentada a falha classificada como falha em batente, acompanhada da data e hora de início e da data e hora de término da ocorrência. A partir

desse ponto, esta passa a ser a base de dados final sobre a qual será aplicada a filtragem de dados.

Inicialmente, a base de dados final, constituída como a primeira amostra, foi inserida no *software* on-line utilizado para o ajuste da distribuição de Weibull. Considerando o cenário em que toda a amostra de dados foi utilizada, com um total de ($n = 76$) observações, os resultados são apresentados nas Figuras 20, 21 e 22.

Ademais, é importante destacar que, por meio do *software* utilizado, a distribuição de Weibull analisa o comportamento dos eventos de falha/intervenção associados aos batentes da retomadora, e não a vida de um patente individual.

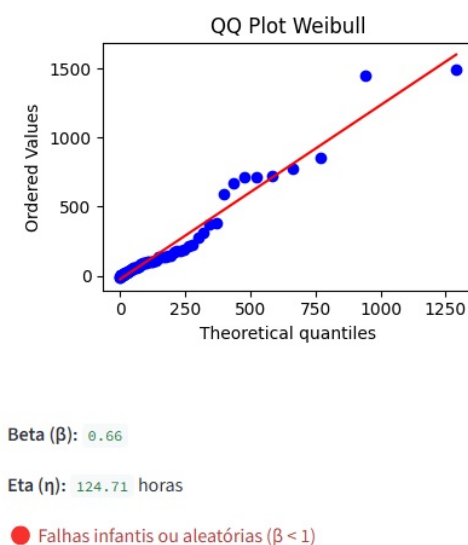


Figura 20 – Diagrama de Weibull da Primeira Amostra.
Fonte: Ferramenta Reliability Asset Management

Na Figura 20, observa-se um gráfico QQ Plot de Weibull, utilizado com o objetivo de verificar se os dados de tempo até a falha podem ser adequadamente representados por essa distribuição. Os pontos azuis representam os valores observados de tempo até a falha da primeira amostra. O eixo das ordenadas apresenta os tempos reais de falha observados, enquanto o eixo das abscissas representa os valores teóricos esperados caso os dados seguissem perfeitamente a distribuição de Weibull ajustada.

Conforme a Figura 20, a linha vermelha representa a reta de referência da distribuição de Weibull ajustada aos dados. Quanto mais próximos os pontos azuis estiverem dessa reta, melhor será a aderência do modelo aos dados observados. Por outro lado, caso ocorram

desvios significativos em relação à linha de referência, a distribuição de Weibull não estará representando adequadamente a primeira amostra.

A reta de referência é obtida a partir da busca por uma equação matemática capaz de descrever, da melhor forma possível, o comportamento das falhas da amostra estudada. Para isso, são utilizados os valores da Equação (14), variando-se os parâmetros de forma e escala. Ressalta-se que existem diferenças na nomenclatura desses parâmetros entre a Equação (14) e a Figura 20, sendo beta (β) e eta (η) equivalentes a gama (γ) e theta (θ), respectivamente.

A partir dos valores ajustados de beta (β) e eta (η), são calculados os tempos teóricos esperados para cada posição da amostra, os quais dão origem à reta de referência apresentada no gráfico. Dessa forma, uma distribuição de Weibull perfeita seria aquela capaz de prever exatamente todos os tempos observados, fazendo com que os valores teóricos coincidissem com os valores reais e todos os pontos se posicionassem sobre a reta de referência.

Assim, a distância entre os pontos observados e a reta de referência constitui uma medida visual da qualidade do ajuste. Quanto menor for esse afastamento, maior será a capacidade do modelo matemático de representar o comportamento dos dados observados.

O parâmetro de forma beta (β) descreve o comportamento da taxa de falha ao longo do tempo. Para valores de $\beta < 1$, a taxa de falha é decrescente, característica de falhas infantis ou precoces. Quando $\beta = 1$, a taxa de falha permanece constante ao longo da vida útil do componente. Já para $\beta > 1$, a taxa de falha é crescente, indicando a predominância de mecanismos associados ao desgaste e ao envelhecimento.

Dessa forma, para o valor de beta (β) igual a 0,66, observa-se um comportamento característico de falhas infantis, indicando que os eventos de falha se encontram na região de mortalidade infantil da curva da banheira. Isso significa que a probabilidade de ocorrência de falhas é maior nos estágios iniciais da vida útil do batente e tende a diminuir à medida que os componentes sobrevivem ao período inicial de operação.

O parâmetro de escala eta (η), denominado vida característica, representa, na distribuição de Weibull, o tempo característico na qual a probabilidade de falha é de 63,2%. Assim, para $\eta = 124,71$ h, estima-se cerca de 63,2% da probabilidade de ocorrência de eventos de falha/intervenção associados aos batentes. Em termos práticos, esse valor corresponde a aproximadamente 5 dias, 4 horas, 42 minutos e 36 segundos de operação contínua.

A Figura 21 representa a curva de probabilidade de falha.

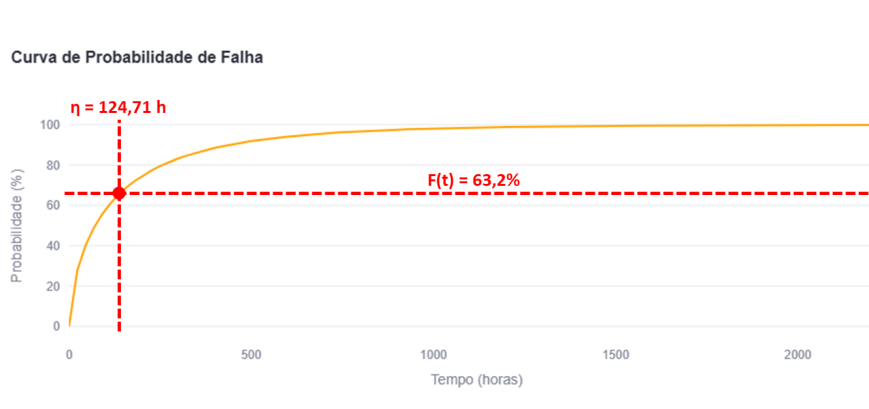


Figura 21 – Curva de probabilidade de falha da primeira amostra.
Fonte: Ferramenta Reliability Asset Management

A curva de probabilidade de falha apresentada na Figura 21 representa a probabilidade de ocorrência de eventos de falha/intervenção associados aos batentes em função do tempo de operação, em horas. Observa-se que, para um tempo de 124,71 horas, a probabilidade de falha é de 63,2%. Ademais, nota-se que a maior parte das falhas ocorrem nas primeiras centenas de horas de operação, evidenciando que as falhas tendem a ocorrer no início da vida útil do componente.

A Figura 22 representa a curva de confiabilidade.

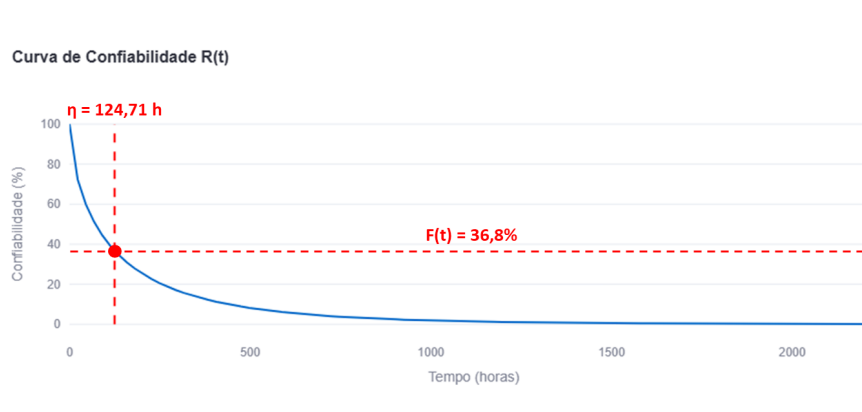


Figura 22 – Curva de confiabilidade da primeira amostra.
Fonte: Ferramenta Reliability Asset Management

A curva de confiabilidade apresentada na Figura 22 complementa a curva de probabilidade de falha, representando a confiabilidade em função do tempo. Observa-se que a capacidade do batente de continuar operando reduz-se drasticamente nas primeiras horas de funcionamento, atingindo uma confiabilidade de 36,8% em 124,71 horas de operação.

O valor de referência de 36,8% decorre diretamente da formulação matemática da distribuição de Weibull. Quando, na Equação (14), o tempo é igualado a eta (η), obtém-se $R(\eta) = e^{-1} \approx 0,3679$.

No gráfico QQ Plot Weibull da Figura 20, observa-se que a maior parte dos pontos azuis apresenta alinhamento satisfatório com a reta de referência (linha vermelha), indicando uma aderência adequada da distribuição de Weibull à amostra analisada. Contudo, a presença de alguns pontos afastados da reta sugere a ocorrência de falhas atípicas, que podem comprometer a representatividade do ajuste em relação ao comportamento predominante das falhas observadas. Dessa forma, foram realizadas duas filtrações de dados com o objetivo de reduzir a influência dessas observações atípicas e avaliar o comportamento das falhas de forma mais homogênea.

4.3.3.2 Segunda Amostra de Dados

A Tabela 9 apresenta a planilha elaborada para a realização da filtração de dados por remoção de observações atípicas e para a determinação dos intervalos da segunda amostra e da amostra final.

Tabela 9 – Fração da base de dados em que será realizada a filtração de dados.

Equipamen	Falha	Data hora in	Data hora fim	Tempo entre falhas
Retomadora	Falha de Batente	01/09/2024 00:00		
Retomadora	Falha de Batente	04/09/2024 15:15	04/09/2024 18:15	87:15:03
Retomadora	Falha de Batente	06/09/2024 01:00	06/09/2024 06:24	33:44:58
Retomadora	Falha de Batente	17/09/2024 12:45	17/09/2024 14:33	275:44:59
Retomadora	Falha de Batente	17/09/2024 22:02	18/09/2024 01:11	9:17:18
Retomadora	Falha de Batente	22/09/2024 03:06	22/09/2024 20:55	101:03:58

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Tabela 9, observa-se a planilha construída para a realização da filtração de dados. A primeira coluna corresponde ao campo do equipamento, sendo este a retomadora. A segunda coluna refere-se ao campo da falha, correspondente às falhas em batentes. As duas colunas subsequentes registram, respectivamente, a data e a hora de início e de término da intervenção. Adicionalmente, foi inserida uma coluna destinada ao cálculo do tempo entre falhas.

Para o cálculo do tempo entre falhas, considerou-se o dia 01/09/2024, às 00:00, como o zero do relógio. A partir desse instante, o intervalo até o surgimento da primeira falha foi determinado. A escolha dessa data como referência deve-se ao fato de que, anteriormente, a retomadora passou por um processo de *retrofit*, permanecendo aproximadamente dois meses fora de operação para a realização de intervenções de engenharia voltadas à melhoria da eficiência do ativo.

No período compreendido entre 01/09/2024, às 00:00, e 04/09/2024, às 15:15, foi identificado um intervalo de aproximadamente 87 horas até a ocorrência da primeira falha. Após a correção da falha, concluída em 04/09/2024, às 18:15, o equipamento retornou à operação, permanecendo em funcionamento até 06/09/2024, às 01:00, quando ocorreu a segunda falha em batentes, registrando-se um intervalo de aproximadamente 34 horas. Com base nesse procedimento, foram calculados os intervalos entre falhas para as 76 intervenções realizadas em batentes.

Após o cálculo dos intervalos entre falhas, foi aplicada uma filtragem de dados sobre esses intervalos. Esse procedimento foi adotado porque os gráficos de Weibull, confiabilidade e probabilidade de falha são geradas a partir dos tempos entre falhas. A Tabela 10 apresenta a forma como a filtragem de dados foi realizada.

Tabela 10 – Valores para a primeira filtragem de dados.

Mediana	Desvio Padrão	Limite Inferior	Limite Superior
63:16:03	190:02:09	00:00:00	253:18:12

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 10 apresenta a forma como a filtragem de dados foi realizada na amostra analisada. Os dados estão expressos no formato horas:minutos:segundos. Na primeira coluna, foi calculada a mediana dos dados e, na segunda, o desvio padrão. Observa-se que o desvio padrão apresentou valor elevado em relação à mediana, indicando grande dispersão dos dados e evidenciando a existência de tempos entre falhas significativamente superiores e inferiores ao valor central.

Para a definição dos limites inferior e superior de filtragem, utilizou-se a mediana acrescida e decrescida do desvio padrão. Entretanto, como o desvio padrão foi superior ao valor central, o limite inferior resultou em um valor negativo. Como o tempo entre falhas é uma variável física que não admite valores negativos, adotou-se o valor de 00:00:00 como limite inferior. Dessa forma, os dados foram segregados com base no limite inferior de 00:00:00 e no limite superior de 253:18:12, apresentado na quarta coluna da Tabela 10.

Ademais, a elevada dispersão observada nos dados sugere a presença de observações atípicas, as quais podem influenciar significativamente os parâmetros estatísticos da distribuição de Weibull e comprometer a representatividade do comportamento predominante das falhas em batentes.

Tabela 11 – Amostra proveniente da primeira filtragem de dados.

Equipamento	Falha	Data hora in	Data hora fim
Retomadora	Falha de Batente	04/09/2024 15:15	04/09/2024 18:15
Retomadora	Falha de Batente	06/09/2024 01:00	06/09/2024 06:24
Retomadora	Falha de Batente	17/09/2024 22:02	18/09/2024 01:11
Retomadora	Falha de Batente	22/09/2024 03:06	22/09/2024 20:55
Retomadora	Falha de Batente	23/09/2024 01:52	24/09/2024 00:00

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Tabela 11, observa-se a amostra resultante da primeira filtragem de dados. A primeira coluna identifica o equipamento analisado, correspondente à retomadora. A segunda coluna refere-se ao modo de falha analisado, correspondente à falha de batente. As terceira e quarta colunas apresentam, respectivamente, as datas e horários de início e término das falhas.

Após a primeira filtragem de dados, o número de falhas em batentes foi reduzido de 76 para 67 intervenções, representando a exclusão de 9 *outliers* da base de dados. Assim, foi admitido tamanho de amostra $n = 67$.

Os dados da amostra foram inseridos em um *software* online destinado à realização da análise por distribuição de Weibull. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 23.

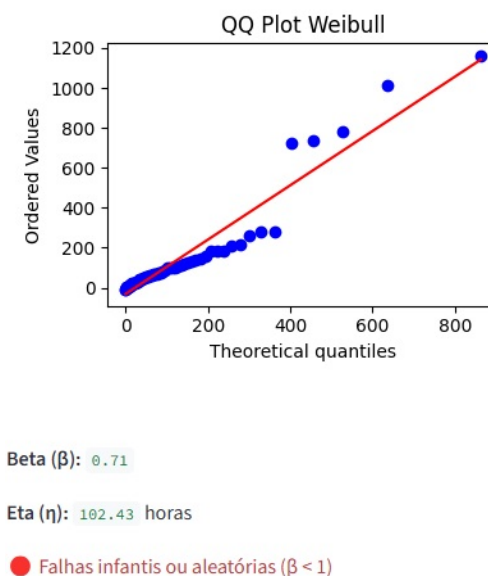


Figura 23 – Diagrama de Weibull da amostra.

Fonte: Ferramenta Reliability Asset Management

A Figura 23 apresenta o diagrama de Weibull da amostra após a primeira filtragem de dados. Observam-se diferenças em relação ao diagrama apresentado na Figura 20. A filtragem

promoveu a remoção dos tempos entre falhas extremamente elevados, resultando na redução da amplitude dos intervalos observados.

Ainda, na Figura 20, o valor do parâmetro de forma beta (β) da população de dados era de 0,66. Na Figura 23, o valor de beta (β) da amostra após a primeira filtragem é de 0,71. Apesar do aumento desse parâmetro, beta (β) permanece inferior a 1, indicando que o comportamento das falhas continua característico da região de mortalidade infantil da curva da banheira, com taxa de falha decrescente ao longo do tempo. Já o parâmetro de escala eta (η) foi reduzido de 124,71 h para 102,43 h, evidenciando o impacto dos tempos entre falhas extremamente elevados sobre a estimativa da vida característica.

Entretanto, ainda é possível identificar pontos afastados da reta de referência, sugerindo que o ajuste, apresenta potencial para aprimoramento. Dessa forma, buscando avaliar a influência de observações atípicas remanescentes e obter uma amostra mais homogênea, será realizada uma nova filtragem dos dados. O objetivo é verificar o impacto dessa etapa adicional na qualidade do ajuste da distribuição de Weibull e nos parâmetros de confiabilidade estimados para o componente.

4.3.3.3 Amostra Final de Dados

A Tabela 12 apresenta os valores calculados para a realização da segunda filtragem de dados na base amostral obtida após a primeira filtragem.

Tabela 12 – Valores para a segunda filtragem de dados.

Mediana	Desvio Padrão	Limite Inferior	Limite Superior
51:21:54	57:28:12	00:00:00	108:50:06

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Tabela 12, os cálculos da mediana e do desvio padrão foram realizados sobre a segunda amostra obtida a partir da primeira filtragem dos dados. Dessa forma, os dados analisados representam uma subamostra da segunda amostra, denominada amostragem final. Os valores estão expressos no formato horas:minutos:segundos.

A mediana calculada na primeira coluna da Tabela 12 foi de 51:21:54, enquanto o desvio padrão foi de 57:28:12. Apesar da redução considerável do desvio padrão em relação à amostra original, quando comparado aos resultados apresentados na Tabela 10, o desvio

padrão permanece superior à mediana. Esse comportamento indica a persistência de uma elevada dispersão dos dados, mesmo após a aplicação de duas filtrações.

A elevada dispersão observada, evidenciada pelo alto valor do desvio padrão, levanta a hipótese de que os batentes possam estar falhando por mecanismos distintos. Entretanto, essa condição não compromete a análise do comportamento das falhas, apenas reforça a limitação do componente em resistir aos esforços presentes no sistema, evidenciando um comportamento com elevado grau de variabilidade e incerteza.

Na terceira coluna da Tabela 12, o limite inferior adotado foi de 00:00:00, uma vez que o tempo é uma variável física que não admite valores negativos. Já para o limite superior, foi obtido o valor de 108:50:07. Dessa forma, a segregação dos dados será aplicada aos valores situados fora do intervalo compreendido entre 00:00:00 e 108:50:07. A Tabela 13 apresenta a base de dados resultante após a segunda filtração.

Tabela 13 – Amostra final proveniente da segunda filtração de dados.

Equipamento	Falha	Data hora in	Data hora fim
Retomadora	Falha de Batente	25/09/2024 00:00	27/09/2024 15:01
Retomadora	Falha de Batente	08/10/2024 10:12	08/10/2024 12:24
Retomadora	Falha de Batente	13/10/2024 15:22	13/10/2024 16:54
Retomadora	Falha de Batente	14/10/2024 21:48	15/10/2024 12:10
Retomadora	Falha de Batente	15/10/2024 01:00	15/10/2024 06:24

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na Tabela 13, observa-se a amostra final resultante da segunda filtração de dados. A primeira coluna identifica o equipamento analisado, correspondente à retomadora. A segunda coluna refere-se ao modo de falha analisado, correspondente à falha de batente. As duas colunas subsequentes apresentam, respectivamente, a data e hora de início e a data e hora de término das falhas em batentes.

Após a segunda filtração dos dados, o número de falhas nos batentes foi reduzido de 67 para 53 intervenções, representando a exclusão de 14 *outliers* da base de dados. Dessa forma, adotou-se um tamanho amostral de ($n = 53$).

As Figuras 24, 26 e 27 apresentam os resultados obtidos a partir da aplicação da distribuição de Weibull à amostragem final de dados.

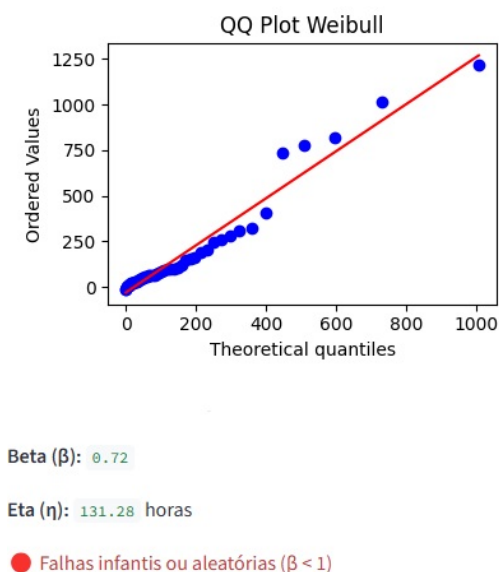


Figura 24 – Diagrama de Weibull da amostra final.
Fonte: Ferramenta Reliability Asset Management

A Figura 24 apresenta o Diagrama de Weibull da amostra final, percebe-se uma melhora significativa em relação à aderência à reta referência (linha vermelha) no gráfico em comparação com os diagramas das Figuras 23 e 20, observa-se que os menores tempos entre falhas apresentam excelente alinhamento, também é possível notar alguns pontos intermediários e superiores um pouco afastados da reta, porém dada a excelente aderência e também visando não reduzir mais o período amostral, conclui-se que o diagrama da Figura 24 representa de forma adequada o comportamento predominante de falhas em batentes.

Os pontos removidos por meio da filtragem de dados, baseada na remoção de observações atípicas, embora fizessem parte da realidade operacional da máquina, representavam eventos associados a condições operacionais específicas que não refletiam o comportamento predominante das falhas do batente. Ressalta-se que a amostra completa também foi analisada, apresentando resultados próximos aos obtidos na amostra final, como taxa de falha decrescente e vida característica de aproximadamente 5 dias.

Ademais, em relação ao valor de beta (β) observou-se um pequeno aumento de 0,71 para 0,72, porém, o valor de beta (β) continua sendo <1 com a taxa de falha sendo decrescente e o mecanismo predominante associado a mortalidade infantil da curva da banheira.

Ademais, destaca-se que uma parcela significativa das modificações na retomadora ocorreu durante o processo de *retrofit*, no qual foram realizadas modificações substanciais que alteraram significativamente sua forma de operação e as cargas atuantes durante o funcionamento. Entretanto, não foi possível obter acesso à documentação técnica referente às

alterações executadas, impossibilitando identificar se o batente de borracha analisado pertencia à configuração anterior ou posterior ao *retrofit*.

Diante dessa limitação, reconhece-se que processos de reengenharia e alterações significativas de projeto podem resultar em condições de carregamento distintas daquelas originalmente previstas em projeto, favorecendo a ocorrência de falhas em componentes que anteriormente não estavam submetidos a tais solicitações. Adicionalmente, não se pode descartar a possibilidade de o batente ter sido modificado ao longo dos anos de operação da máquina sem a devida atualização da documentação (*as built*), ou mesmo de ter sido introduzido durante o processo de retrofit sem que seu dimensionamento ou especificação fossem plenamente compatíveis com as condições operacionais impostas ao equipamento.

É importante destacar que, ao longo dos anos, a retomadora passou por diversas modificações de projeto, adaptações operacionais e intervenções estruturais, realizadas com o objetivo de atender às demandas produtivas e às necessidades de manutenção identificadas durante sua operação. Essas alterações modificaram significativamente as características originais do equipamento.

Um exemplo dessas modificações refere-se às caçambas da roda de caçambas, que, em sua configuração original, não possuíam geometria bilateral, permitindo a retomada de material em apenas um sentido de rotação. Com as adaptações implementadas ao longo dos anos, foram incorporadas soluções que ampliaram a flexibilidade operacional do equipamento, possibilitando sua utilização em condições distintas das previstas no projeto inicial.

Nesse contexto, a adoção de uma estratégia baseada no retorno integral à configuração original da retomadora mostra-se tecnicamente inviável. Após aproximadamente quatro décadas de operação, inúmeras alterações mecânicas, estruturais e funcionais foram incorporadas ao equipamento, muitas das quais não possuem documentação completa ou demandariam intervenções de elevada complexidade técnica e econômica. Assim, qualquer proposta de melhoria deve considerar a configuração atualmente existente, buscando eliminar ou mitigar as causas fundamentais das falhas por meio de soluções compatíveis com o estado atual do equipamento, em vez de tentar restabelecer as condições de projeto originalmente concebidas.

Dessa forma, a proposta desenvolvida neste estudo não teve como objetivo restaurar a concepção original da retomadora, mas sim aumentar sua confiabilidade e disponibilidade considerando as características construtivas atualmente existentes, resultado das sucessivas modificações realizadas ao longo de sua vida operacional.

A Figura 25 apresenta a evolução do número de intervenções corretivas realizadas nos batentes de borracha ao longo dos últimos quatro anos.

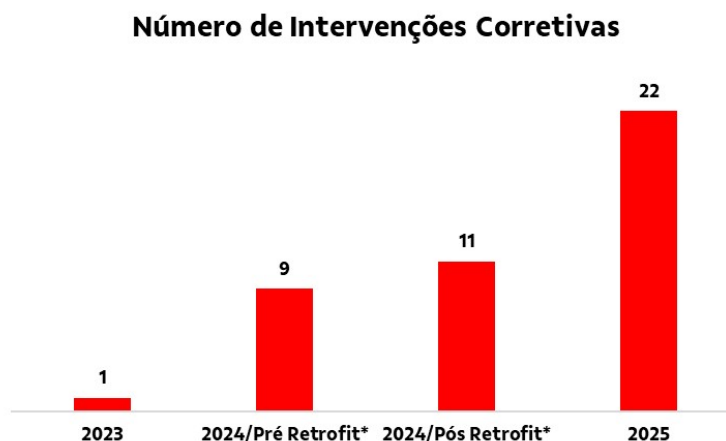


Figura 25 – Número de intervenções corretivas.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Observa-se, na Figura 25, que no ano de 2023 foi registrada apenas uma falha em batentes. Em 2024, esse número aumentou para nove ocorrências, ainda antes da realização do *retrofit* da máquina. Esse comportamento sugere que alterações anteriores no equipamento podem já ter contribuído para o surgimento das falhas em batentes, considerando a quantidade de ocorrências registradas em um período de aproximadamente seis meses. Entretanto, o aspecto mais relevante é o crescimento expressivo do número de falhas após o processo de reengenharia. Nesse período, foram registradas 33 intervenções corretivas em aproximadamente um ano de operação, totalizando 466 horas de manutenção.

Ademais, na Figura 24 para o parâmetro de escala η o valor obtido foi de $\eta = 131,28$ horas, na primeira amostra de dados obteve-se $\eta = 124,71$ horas, isso indica que a queda substancial da amostra da Figura 23 com o valor de $\eta = 102,43$ horas foi atípica, não permanecendo após a segunda filtragem de dados. Além disso, vale destacar que o valor de $\eta = 131,28$ horas representa um total de 5 dias 11 horas 16 minutos e 48 segundos, um tempo extremamente baixo para uma probabilidade de falha de 63,2%. Isso indica que o batente de borracha apresentou vida característica inferior à esperada para um componente de elevada criticidade operacional.

A Figura 26 representa a curva de probabilidade de falha da amostra final.



Figura 26 – Curva de probabilidade de falha da amostra final.
Fonte: Ferramenta Reliability Asset Management

Na Figura 26, observa-se a curva de probabilidade de falha da amostra final. Verifica-se que, para um tempo característico η de 131,28 horas, a probabilidade de falha é de 63,2%. Além disso, observa-se que a maior parte das falhas ocorrem nas primeiras centenas de horas de operação, evidenciando que as falhas tendem a ocorrer no início da vida útil do componente.

A Figura 27 representa a curva de confiabilidade.

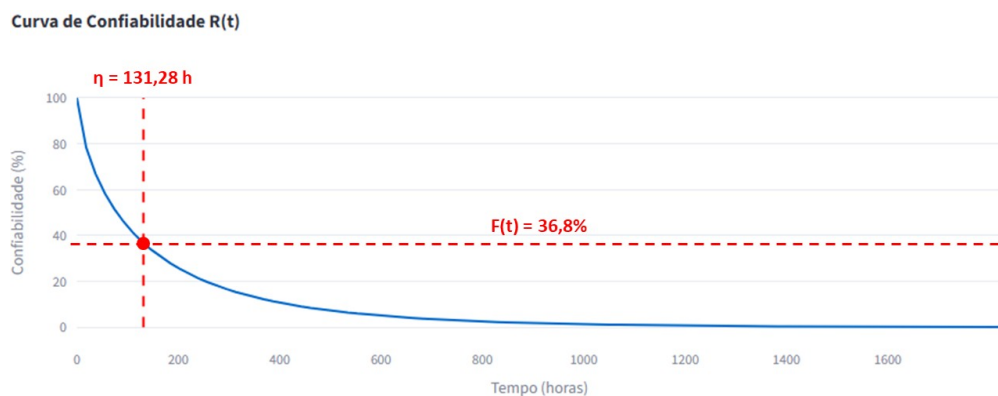


Figura 27 – Curva de confiabilidade $R(t)$ da amostra final.
Fonte: Ferramenta Reliability Asset Management

Na Figura 27, observa-se a curva de confiabilidade $R(t)$ da amostra final, que corresponde ao complemento da curva de probabilidade de falha. Verifica-se que a confiabilidade diminui rapidamente nas primeiras horas de operação. Para um tempo característico η de 131,28 horas, obtém-se uma confiabilidade de 36,8%.

A Figura 28 traz um comparativo entre as três distribuições de Weibull.

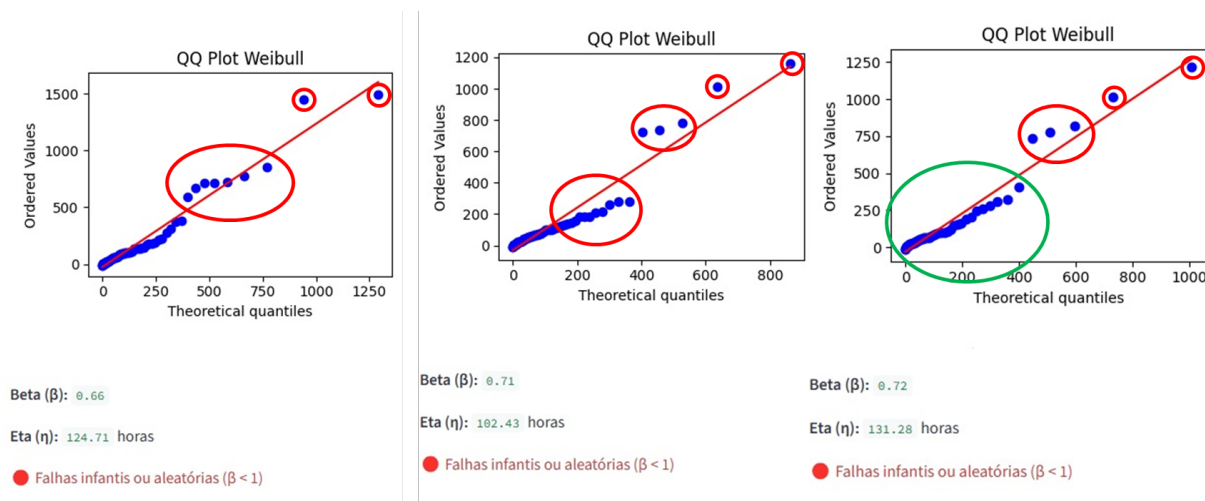


Figura 28 – Comparação entre os diagramas de Weibull.

Fonte: Ferramenta Reliability Asset Management

Na Figura 28, é possível observar uma comparação entre os três diagramas de Weibull referentes à primeira, à segunda e à terceira amostra, respectivamente. Na primeira amostra, os pontos centrais de tempo entre falhas, destacados em vermelho, apresentam afastamento da reta de aderência, assim como alguns pontos localizados na região superior do diagrama. No segundo diagrama, os pontos da região inferior, destacados em vermelho, também se encontram afastados da reta de referência, comportamento que se repete nas regiões intermediária e superior, evidenciando que a segunda amostra é a que menos representa o comportamento de falha dos batentes. Já o terceiro diagrama apresenta, na região inferior, destacada em verde, inúmeros pontos com excelente aderência à reta de referência. Entretanto, também são observados pontos nas regiões intermediária e superior afastados da reta de referência, destacados em vermelho. Dessa forma, nota-se que a primeira e a terceira amostras são as que melhor representam o comportamento de falha dos batentes, apresentando parâmetros de escala e de forma bastante semelhantes.

Após o desenvolvimento da análise por distribuição de Weibull, verificou-se que, tanto para a primeira amostra quanto para a segunda amostra e a amostra final, os eventos de falhas/intervenções associados aos batentes apresentaram comportamento característico de falhas infantis, com vida característica de aproximadamente 5 dias. Esse valor é considerado relativamente baixo para um componente essencial inserido em um ativo de elevada criticidade operacional.

Por fim, concluiu-se que era necessária a elaboração de um plano de ação utilizando a metodologia 5W1H, tendo em vista que, com base no estudo de confiabilidade realizado por meio da filtragem dos dados e da aplicação da distribuição de Weibull, o batente de borracha

demonstrou ser um componente de baixa confiabilidade. Assim, as interrupções decorrentes das falhas dos batentes de borracha estavam ocasionando perdas de produtividade, aumento dos custos de manutenção e impactos na disponibilidade operacional do equipamento.

4.3.4 Mecanismo de Falha

O mecanismo de falha dos batentes é interpretado como associado à fadiga decorrente de ciclos de compressão e impacto. A intensidade desses ciclos varia em função de diversos fatores, tais como a taxa de penetração da caçamba no minério, a umidade do material e suas características granulométricas. Além disso, o intemperismo também contribui para a degradação do material elastomérico ao longo do tempo.

Dessa forma, tanto os ciclos repetitivos de compressão quanto os efeitos do intemperismo atuam na redução da vida útil da borracha. Com a progressão da fadiga, o material passa a apresentar perda de propriedades mecânicas e desagregação gradual, resultando na redução de sua capacidade de absorção de impactos até a ocorrência da falha do batente.

4.3.5 Plano de Ação (5W1H)

A Figura 29 apresenta o plano de ação desenvolvido com o objetivo de interromper a recorrência das falhas em batentes na retomadora.

Contramedidas (What)	Justificativa (Why)	Responsável (Who)	Local (Where)	Cronograma (When)	Procedimento (How)
Procurar um fornecedor capaz de desenvolver um novo batente.	Necessidade de desenvolver solução mais robusta devido à alta recorrência de falhas.	José Borges e Equipe de Engenharia	Gerência de Manutenção e Engenharia	Semana 1 a Semana 3	Definir requisitos técnicos (material, dureza e condições de operação) e desenvolver solução com fornecedor.
Produzir e instalar batentes de poliuretano (protótipo).	Maior resistência as forças atuantes e aumento da vida útil.	Fabricante e Equipe de Preventiva da Retomadora	Fabricante e Retomadora	Semana 3 a Semana 6	Produzir batentes em poliuretano e instalar na retomadora para avaliação em campo.
Após aplicação do período de teste, realizar as modificações necessárias.	Ajustar o projeto com base nos resultados obtidos durante os testes operacionais.	José Borges, Equipe de Engenharia e Fabricante	Fabricante	Semana 6 a Semana 8	Avaliar desempenho do protótipo, identificando oportunidades de melhoria.
Produzir e instalar batente de poliuretano (versão modificada).	Implementar as melhorias identificadas durante a fase de testes.	Fabricante e Equipe de Preventiva da Retomadora	Fabricante e Retomadora	Semana 8 a Semana 11	Fabricar a versão revisada dos batentes e realizar a instalação para validação operacional.
Monitorar desempenho da versão modificada dos batentes. Em caso da necessidade de correções, solicitá-las ao fabricante.	Verificar a eficácia da solução e garantir o atendimento aos requisitos de vida útil e confiabilidade.	José Borges e Equipe de Engenharia e Manutenção	Gerência de Manutenção e Engenharia	Semana 11 a Semana 20	Acompanhar indicadores de desempenho, registrar falhas, inspecionar periodicamente o componente.
Validar projeto e instalar novo batente nas caçambas da retomadora.	Padronizar a solução validada em todo equipamento.	Equipe de Preventiva da Retomadora	Retomadora	Semana 20 adiante	Fazer a validação do projeto dentro do sistema da empresa e, posteriormente, substituir os batentes.

Figura 29 – Plano de ação (5W1H).

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Na primeira linha da Figura 29, observa-se a contramedida de buscar um fornecedor capaz de desenvolver um novo modelo de batente. Após a realização do estudo de engenharia, verificou-se que o batente existente não apresentava confiabilidade suficiente para atender às condições operacionais da retomadora, tornando necessária a elaboração de um novo projeto. Foi estabelecido o prazo de duas semanas para a seleção de um fabricante e para a definição conjunta dos requisitos técnicos do componente, incluindo material, dureza e condições de operação, visando ao desenvolvimento de um protótipo inicial. A Figura 30 apresenta o primeiro protótipo desenvolvido.

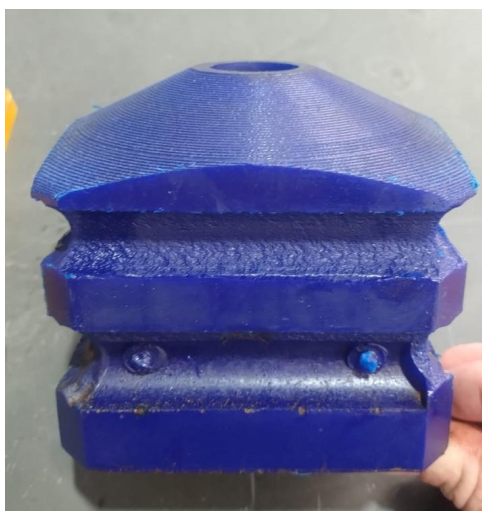


Figura 30 – Protótipo do batente feito de poliuretano.
Fonte: Empresa parceira (2026)

A Figura 30 apresenta o protótipo do novo batente. Coube à equipe de engenharia fornecer ao fabricante externo as condições de carregamento e compressão às quais o componente seria submetido durante a operação. Com base nessas informações, foi sugerida à equipe de engenharia e manutenção a utilização de um batente fabricado em elastômero, uma classe de materiais poliméricos.

A escolha desse material foi motivada por suas propriedades mecânicas adequadas à aplicação, destacando-se a elevada resistência à abrasão, a boa capacidade de absorção de impactos, a resistência ao rasgamento e a maior durabilidade em aplicações sujeitas a carregamentos cíclicos. Essas características são particularmente relevantes para a operação de retomada de minério, na qual as caçambas submetem os batentes a sucessivos ciclos de impacto e compressão.

A partir dessas definições, a equipe de engenharia, em conjunto com o fornecedor, desenvolveu o projeto inicial do batente. O componente foi concebido com ranhuras laterais e um furo central, formando zonas de deformação capazes de conduzir e direcionar a

deformação do material, de modo a maximizar a absorção de energia. Além disso, o projeto busca reduzir a rigidez do conjunto e favorecer a deformação elástica controlada durante a compressão, minimizando as concentrações de tensão e permitindo a acomodação da deformação no interior do suporte metálico.

As dimensões de largura, comprimento e altura do batente foram definidas pela equipe de engenharia com base nas dimensões do suporte existente. Adicionalmente, foi especificada uma inclinação na região superior do componente, com o objetivo de estabelecer um ângulo no batente de borracha compatível com o ângulo de atuação promovido pela articulação da caçamba durante o processo de compressão.

Na segunda linha da Figura 29, observa-se a contramedida de fabricar e instalar o protótipo do batente de poliuretano na retomadora. Coube ao fornecedor externo a fabricação do componente, enquanto a equipe de manutenção preventiva da retomadora ficou responsável por sua instalação durante a primeira janela de manutenção programada da máquina. O objetivo dessa contramedida foi validar em campo o desempenho do novo projeto, verificando sua capacidade de suportar os esforços atuantes durante a operação e sua vida útil em comparação ao batente de borracha anteriormente utilizado.

O batente foi então submetido a um período de testes operacionais. Foram instalados quatro batentes de poliuretano em uma única caçamba, com o intuito de avaliar seu desempenho. Entretanto, o protótipo apresentou falha após aproximadamente dois dias de operação. Na Figura 31, observa-se a falha ocorrida no protótipo do batente de poliuretano.



Figura 31 – Falha no protótipo do batente de poliuretano.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Figura 31 apresenta a falha no protótipo do batente de poliuretano. Observa-se que o batente não resistiu aos ciclos de compressão e impacto, resultando no rasgamento do material. Verifica-se que o componente se encontra severamente deformado, com perda significativa de sua geometria original, além de apresentar regiões visivelmente rompidas e fragmentadas, o que indica que o elastômero foi submetido a tensões superiores à sua capacidade de suporte.

A Figura 32 apresenta detalhes adicionais da falha no protótipo do batente de poliuretano.



Figura 32 – Falha no protótipo do batente de poliuretano.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Figura 32 apresenta a falha observada no protótipo do batente. Visualmente, verifica-se que o componente se encontra excessivamente inserido no suporte metálico, não apresentando altura suficiente para sofrer compressão, o que justifica a necessidade de alteração do projeto quanto à altura do componente. Entende-se que a altura inadequada foi a principal causa da falha do batente, pois pode permitir a ocorrência de contato aço-aço, condição que deve ser evitada.

Na terceira linha da Figura 29, observa-se a contramedida de, após o período de testes, realizar as modificações necessárias no protótipo por meio de ajustes no projeto, com base nos resultados obtidos durante o teste operacional. Foi definido um período de duas semanas para que a equipe de Engenharia e Manutenção, em contato com o fabricante, realizasse as alterações necessárias.

Assim, a primeira mudança consistiu na alteração das dimensões do batente, abrangendo a altura, as ranhuras laterais, o furo central e a angulação da região superior. Além disso, foram estabelecidos dois modelos de batente: um com topo reto e outro com topo curvo, ambos com configurações distintas na região superior. O modelo de topo reto foi desenvolvido com o objetivo de servir como contraponto ao modelo com angulação, uma vez que o batente de borracha da configuração original não possuía inclinação na região superior. Observa-se, na Figura 30, que o protótipo de poliuretano apresentava uma angulação acentuada, a qual foi posteriormente reduzida com o objetivo de ampliar a área de contato durante a compressão.

A Figura 33 apresenta as modificações realizadas no batente de topo curvo.

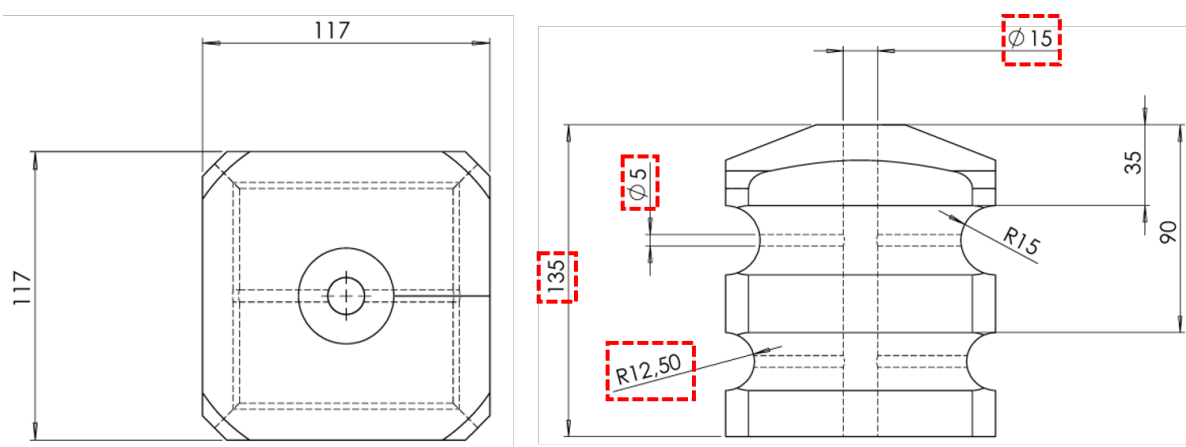


Figura 33 – Mudanças realizadas no projeto do batente de poliuretano topo curvo.
Fonte: Empresa parceira (2026)

A Figura 33 apresenta as modificações realizadas no projeto do batente de poliuretano com topo curvo. As alterações implementadas pelo fornecedor externo estão destacadas em vermelho. A principal modificação consistiu no aumento da altura do batente, que passou de 115 mm para 135 mm. Além disso, o raio da ranhura lateral inferior foi reduzido de 15 mm para 12,5 mm. O diâmetro do furo central também foi alterado, passando de 30 mm para 15 mm.

Outro aspecto relevante foi a inclusão de furos para a saída de ar nas ranhuras superiores, com diâmetro de 5 mm. Além disso, o raio superior foi reduzido, visando ampliar a área de contato. Por fim, as dimensões laterais de 117 mm foram mantidas.

A Figura 34 apresenta o projeto final do batente de poliuretano com topo curvo.

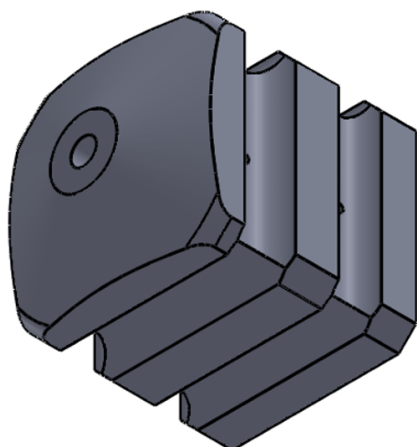


Figura 34 – Projeto final do batente de poliuretano topo curvo.
Fonte: Empresa parceira (2026)

A Figura 34 apresenta o projeto final do batente de poliuretano com topo curvo. No lado esquerdo, é possível visualizar o modelo tridimensional do componente, incorporando as modificações apresentadas na Figura 33. No lado direito, observa-se o batente após sua fabricação pelo fornecedor externo. Destaca-se que a empresa chegou a receber o modelo de topo curvo após sua fabricação; entretanto, esse componente não foi submetido a testes, uma vez que uma remessa de batentes com topo reto foi entregue anteriormente e passou pela fase de testes antes do modelo de topo curvo.

A Figura 35 apresenta o projeto final do batente de poliuretano com topo reto. O modelo foi produzido sem perfil esférico na região superior.

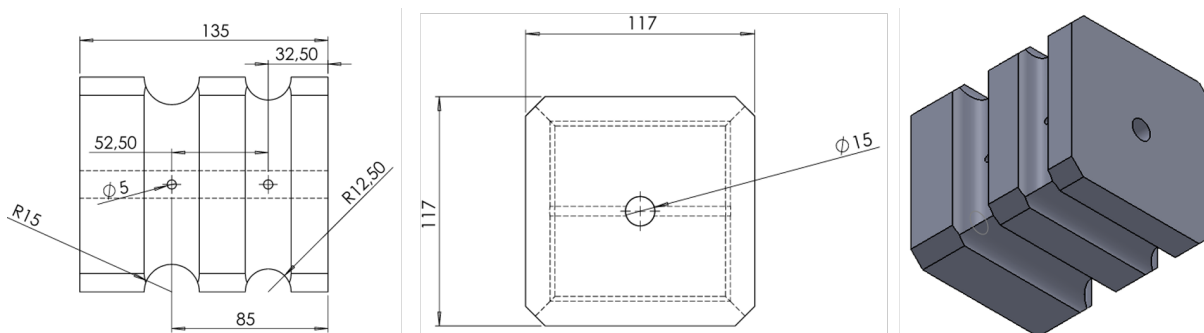


Figura 35 – Projeto final do batente de poliuretano topo reto.
Fonte: Empresa parceira (2026)

Nota-se, na Figura 35, que o batente apresenta dimensões iguais às do modelo com topo curvo, diferindo apenas pela ausência do perfil esférico no topo. Dessa forma, as modificações solicitadas e exemplificadas na Figura 33 foram incorporadas ao projeto do novo modelo de batente. Foi definida uma dureza de 65 Shore para ambos os batentes.

Assim sendo, conforme a quarta linha da Figura 29, coube ao fabricante externo produzir os batentes após as modificações no projeto, e à equipe de manutenção preventiva da retomadora realizar a instalação dos novos componentes na primeira janela de manutenção preventiva da máquina, visando à validação operacional.

Inicialmente, o fornecedor externo forneceu quatro batentes de topo reto para instalação na máquina. Os componentes foram instalados em uma única caçamba e submetidos à fase de testes. A Figura 36 apresenta a aplicação desses batentes em uma das caçambas da retomadora.



Figura 36 – Batente de poliuretano com topo reto instalado na máquina.

Fonte: Empresa parceira (2026)

Nota-se, na Figura 36, em comparação com a Figura 32, a alteração na altura do batente. Essa modificação constituiu um dos fatores determinantes para o sucesso do componente após as alterações de projeto. As demais modificações implementadas também foram fundamentais. A redução das dimensões do furo central e da angulação das ranhuras laterais permitiu otimizar as zonas de deformação, garantindo que o componente se deformasse de forma eficiente.

Os batentes foram instalados e, conforme previsto na quinta linha da Figura 29, passaram a ser monitorados continuamente, de modo que, em caso de falha, fossem solicitadas ao fornecedor externo as adequações necessárias.

Além disso, foi estabelecido que a equipe de manutenção realizasse inspeções periódicas, com o objetivo de acompanhar visualmente o desempenho dos batentes e identificar precocemente possíveis sinais de degradação ou falha.

Ao longo das semanas 11 a 20, o batente foi monitorado de forma contínua pela equipe de Engenharia e Manutenção. Inicialmente, foi estabelecida uma meta de 60 dias de operação dos batentes em função das mudanças de projeto. Entretanto, o batente superou significativamente esse período. Durante o período monitorado, não foram registradas falhas

nos batentes instalados, indicando aumento significativo do desempenho operacional em relação ao modelo anterior. Estima-se mais de 150 dias de operação desde sua instalação.

Por fim, conforme apresentado na sexta linha da Figura 29, cabe à equipe de manutenção preventiva da retomadora realizar a instalação dos novos batentes nas caçambas. Para isso, é necessário que a equipe de engenharia valide a solução no sistema corporativo da empresa, incluindo o novo componente na lista técnica do ativo, homologando o produto e, posteriormente, incorporando sua aquisição ao contrato estabelecido com o fornecedor.

O processo de inclusão na lista técnica e de homologação do produto já foi concluído. Dessa forma, a instalação dos novos batentes nas caçambas da retomadora poderá ocorrer gradativamente, conforme o planejamento definido pelas equipes de engenharia e manutenção. É importante ressaltar que, durante esse processo, também foi utilizado outro material que havia apresentado resultados satisfatórios antes do *retrofit* da máquina. Esse material, composto por pneus fora de estrada, demonstrou bom desempenho operacional, porém não apresentou a melhor relação custo-benefício quando considerados conjuntamente o custo de aquisição e a vida útil do componente.

Dessa forma, a substituição do material de borracha por poliuretano, associada às modificações geométricas do projeto, como a inclusão de furos e ranhuras, possibilitou o desenvolvimento de um componente mais confiável. O poliuretano elastômero apresenta boa capacidade de absorção de impactos e elevada durabilidade quando submetido a carregamentos cíclicos, características fundamentais para a aplicação estudada.

Adicionalmente, foi especificada uma dureza de 65 Shore, proporcionando um equilíbrio entre capacidade de absorção de impactos e deformação sob compressão. O material apresenta elevada tenacidade, favorecendo sua resistência à propagação de danos durante a operação. A presença das ranhuras laterais, do furo central e o aumento da altura do componente contribuíram significativamente para facilitar sua deformação elástica. Assim, a combinação entre a escolha do material, a definição adequada da dureza e as alterações geométricas do projeto foi fundamental para permitir que o componente suportasse os carregamentos cíclicos por meio de deformações predominantemente elásticas.

Por último, o batente de poliuretano apresentou uma relação custo-benefício satisfatória, combinando baixo custo unitário em comparação com outras alternativas avaliadas e boa vida útil em serviço.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

O presente trabalho teve como propósito analisar a contribuição da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) para a elaboração de um plano de ação aplicado a uma retomadora utilizada no setor de mineração. A partir da problemática proposta, buscou-se verificar de que maneira a aplicação dessa metodologia poderia subsidiar a identificação dos mecanismos de falha e orientar a definição de ações capazes de aumentar a confiabilidade e a disponibilidade do equipamento.

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação da MCC permitiu estruturar, de forma sistemática, a análise do histórico de falhas do componente estudado, desde a coleta e o tratamento dos dados até a modelagem estatística por meio da distribuição de Weibull. A análise evidenciou um parâmetro β igual a 0,72, indicando uma taxa de falha decrescente, característica de falhas prematuras associadas, principalmente, a aspectos relacionados ao projeto e ao material do componente. Além disso, foi obtido um parâmetro η igual a 131,28 horas, indicando uma vida característica de aproximadamente cinco dias, na qual 63,2% dos componentes apresentam probabilidade de falha. A compreensão desse comportamento permitiu identificar os mecanismos predominantes de falha do batente, fornecendo a base técnica para a elaboração do plano de ação.

Assim, foi proposto um plano de ação fundamentado em critérios técnicos. Nesse contexto, a utilização da ferramenta 5W1H possibilitou organizar as ações necessárias para mitigar a recorrência das falhas. Entre as principais medidas propostas destacam-se a substituição do material do batente de borracha por poliuretano com dureza de 65 Shore, o aumento considerável da altura do componente e a inclusão de um furo central e de uma ranhura lateral, de modo a proporcionar uma deformação predominantemente elástica e aumentar a resistência ao impacto e aos ciclos de compressão. Além disso, foram definidos os responsáveis pela execução das ações, os prazos de implementação e a sistemática de acompanhamento, com o objetivo de monitorar a fabricação dos protótipos, avaliar seu desempenho em operação na máquina e, após a comprovação de sua eficácia, estabelecer os procedimentos necessários para sua replicação.

Dessa forma, o estudo respondeu à problemática da pesquisa ao demonstrar que a aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) contribuiu para a proposta de um plano de ação ao organizar a análise do histórico de falhas, permitir a identificação do

comportamento probabilístico das intervenções, orientar a interpretação do mecanismo de falha e subsidiar a definição de contramedidas técnicas para o componente. Por fim, o uso da Manutenção Centrada na Confiabilidade somado a um plano de ação contribuiu para o aumento da confiabilidade e da disponibilidade física, bem como para a redução dos custos de manutenção e das paradas não programadas.

5.2 Recomendações

A partir dos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se o desenvolvimento das seguintes pesquisas:

- Aplicação da Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) na Retomadora para Priorização de Componentes Críticos e Definição de Estratégias de Manutenção.
- Avaliação da Efetividade do Plano de Ação Proposto por meio da Análise dos Indicadores de Confiabilidade e Disponibilidade da Retomadora após a Implementação das Melhorias.
- Desenvolvimento de um Programa de Manutenção Preditiva Integrado à Manutenção Centrada na Confiabilidade para Equipamentos de Pátio de Minério.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUENO, Edson Roberto Ferreira. **Gestão da manutenção de máquinas**. Curitiba: Contentus, 2020. E-book. 95 p.
- FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011. 265 p.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 216 p.
- KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. Disponível em: <https://www.slideshare.net/slideshow/manual-de-confiabilidade-mantenabilidade-e-disponibilidade-lafraia-1-pdf/275627854>. Acesso em: 26 jun. 2026.
- SELEME, Robson. **Manutenção industrial: mantendo a fábrica em funcionamento**. Curitiba: InterSaberes, 2015. 144 p.
- SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. e atual. Florianópolis: UFSC, 2005. 138 p.
- SOARES, Vitor Matos; HARMENDANI, Leonardo Silva; NICHOLLS, João Antônio. **Análise de Confiabilidade - Distribuição Weibull**. Disponível em: <https://reliability-asset-management.streamlit.app/>. Acesso em: 26 jun. 2026.
- VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM: planejamento e controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 192 p.
- XENOS, Harilaus Georgius D'Philippos. **Gerenciando a manutenção produtiva: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade**. 2. ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços, 2004. 312 p.