



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



Caio Parzanini Marçal Valente

**Estudo do Comportamento de Falhas e Tempos de Reparo para  
Avaliação do Esforço da Manutenção Corretiva**

Ouro Preto, 2026

Caio Parzanini Marçal Valente

## **Estudo do Comportamento de Falhas e Tempos de Reparo para Avaliação do Esforço da Manutenção Corretiva**

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheira(o) de Produção.

Orientador: Dr. Prof. Magno Silvério Campos

Ouro Preto

2026



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,  
ADMINISTRAÇÃO E ECONOMIA



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Caio Parzanini Marçal Valente**

**Estudo do Comportamento de Falhas e Tempos de Reparo para Avaliação do Esforço da Manutenção Corretiva**

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

Aprovada em 18 de dezembro de 2025.

**Membros da banca**

Prof.º Dr.º **Magno Silvério Campos** - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Me. **Cristiano Luís Turbino de França e Silva** - Examinador Convidado - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. **Yã Grossi Andrade** - Examinador Convidado - Universidade Federal de Ouro Preto

Magno Silvério Campos, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 22/12/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Magno Silverio Campos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/12/2025, às 08:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Yã Grossi Andrade, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/12/2025, às 09:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/12/2025, às 09:38, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1034741** e o código CRC **29334B24**.

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente à minha mãe Elaine Chaves Marçal, ao meu pai, Maurício Antônio Valente, e ao meu irmão, Victor Parzanini Marçal Valente, por seu apoio e amor durante toda a minha vida. À Escola de Minas e à UFOP pela oportunidade e educação de qualidade. Ao meu professor, Magno Silverio Campos, por ter aceitado orientar minha proposta. A Renato Ramos, por ter me ensinado sobre manutenção durante o estágio. À minha namorada, Laura Elisa Araújo Viana, pelo apoio incondicional e pelos ensinamentos durante toda minha formação acadêmica.

“Às vezes, eu acho que só temos de fazer o melhor que podemos com o que Deus nos dá.”  
— *Forrest Gump*, em *Forrest Gump* (1994)

# Resumo

Esta monografia tem como objetivo calcular e analisar indicadores de manutenção corretiva de uma estação de bombeamento de minério de ferro, inserida no modelo de operação contínua. O estudo se fundamenta em uma base de dados cedida por uma empresa do setor minerário, composta por dados de paradas para manutenção corretiva de três classes de equipamentos de alta criticidade. Para o desenvolvimento da análise, foram aplicadas técnicas consolidadas na literatura de ciência de dados e engenharia da confiabilidade, com destaque para métodos estatísticos como Curva de Crescimento Paramétrica e o cálculo dos indicadores propostos. A partir dessa abordagem, foram calculados indicadores clássicos de desempenho da manutenção, notadamente o Tempo Médio para Reparo (MTTR) e o Tempo Médio entre Falhas (MTBF), permitindo avaliar tanto a frequência das falhas quanto o tempo necessário para a restauração funcional dos equipamentos. As análises foram realizadas com o auxílio do software Minitab 19, sendo o Microsoft Excel utilizado para a organização e o tratamento preliminar dos dados. Os resultados possibilitam a interpretar o comportamento dos equipamentos e da equipe de manutenção corretiva. Dessa forma, o trabalho contribui para a aplicação prática dos conceitos de confiabilidade e manutenibilidade no ambiente industrial.

**Palavras-chaves:** Confiabilidade. Manutenção Corretiva. Curva de Crescimento Paramétrica. Indicadores de Desempenho.

# Abstract

This monograph aims to calculate and analyze corrective maintenance indicators of an iron ore pumping station operating under a continuous operation model. The study is based on a database provided by a mining company, composed of records of corrective maintenance shutdowns of three classes of highly critical equipment. For the development of the analysis, techniques consolidated in the data science and reliability engineering literature were applied, with emphasis on statistical methods such as Parametric Growth Curves and the calculation of the proposed indicators. Based on this approach, classic maintenance performance indicators were calculated, notably the Mean Time to Repair (MTTR) and the Mean Time Between Failures (MTBF), allowing the evaluation of both failure frequency and the time required for the functional restoration of the equipment. The analyses were carried out using Minitab 19, with Microsoft Excel employed for data organization and preliminary data handling. The results make it possible to interpret the behavior of the equipment and the corrective maintenance team. Thus, the study contributes to the practical application of reliability and maintainability concepts in the industrial environment.

**Key-words:** Reliability. Corrective Maintenance. Parametric Growth Curve. Performance Indicators.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxograma metodológico do estudo . . . . .	28
Figura 2 – Janela Minitab . . . . .	31
Figura 3 – Janela Minitab - Método de Estimativa . . . . .	31
Figura 4 – Limpeza de Dados . . . . .	34
Figura 5 – Interpolação . . . . .	35
Figura 6 – Tabela Resumida . . . . .	35
Figura 7 – Estimativas de Parametro . . . . .	36
Figura 8 – Teste para os Parametros Igualdade e Forma . . . . .	37
Figura 9 – Teste de Tendencia . . . . .	37
Figura 10 – Grafico FAM . . . . .	38
Figura 11 – Grafico de Duane . . . . .	38



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Lista de Equipamentos por Categoria . . . . .	33
--	----

# Lista de abreviaturas e siglas

MTBF	Tempo Médio entre falhas
MTTR	Tempo Médio de Reparo
MCF	Função Acumulada Média
ROCOF	Taxa de Ocorrência de Falhas

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>14</b>
2.1	Conceitos fundamentais da Manutenção e Confiabilidade	14
2.2	Metodologias de Gestão da Manutenção	16
2.3	Indicadores de Manutenção	16
2.4	Estatística Aplicada à Engenharia da Confiabilidade	18
2.4.1	Importância do tratamento estatístico na confiabilidade	18
2.4.2	Organização e filtragem dos dados	18
2.4.3	Censura à direita	19
2.4.4	Verificação de valores inconsistentes e outliers	19
2.4.5	Interpolação Linear dos Dados de Horímetro	19
2.4.6	Testes de distribuição para tempos até a falha e reparo	20
2.4.7	Nível de Incerteza e Intervalos de Confiança	21
2.5	Teoria da renovação	21
2.5.1	Introdução à teoria da renovação	21
2.5.2	Processos de renovação simples e alternantes	22
2.5.3	Tempos até a falha e tempos até o reparo	22
2.5.4	Número de renovações até o instante $t$	22
2.5.5	Taxa de ocorrência de falhas (ROCOF)	22
2.6	Curvas de Crescimento Paramétrico (NHPP / Crow-AMSAA)	23
2.6.1	Introdução às Curvas de Crescimento	23
2.6.2	O modelo NHPP – visão geral	23
2.6.3	Modelo Crow-AMSAA (Lei de Potência)	23
2.6.4	Estimativa dos parâmetros $\alpha$ e $\beta$	24
2.6.5	Interpretação gráfica – MCF, Duane e TTT	24
2.6.5.1	Gráfico MCF (Nelson-Aalen)	24
2.6.5.2	Gráfico de Duane	25
2.6.5.3	Gráfico TTT (Total Time on Test)	25
2.6.6	Aplicação ao estudo	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>26</b>
3.1	Natureza do estudo	26
3.2	Equipamentos analisados	26
3.2.1	Equipamentos analisados	27
3.2.2	Fluxograma metodológico do estudo	27

3.3	Tratamento e preparação de dados . . . . .	28
3.4	Interpolação de dados horímetro . . . . .	29
3.5	Aplicação no Minitab 19 . . . . .	30
3.6	Cálculo dos Indicadores Básicos (MTTR e MTBF . . . . .	32
4	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>33</b>
4.1	Caracterização da Base de Dados e Estrutura dos Equipamentos Estudados . . . . .	33
4.2	Organização, Limpeza e Interpolação dos Dados (Resumo dos Pro- cedimentos Aplicados) . . . . .	34
4.3	Cálculo dos Indicadores Básicos (MTBF e MTTR) por Equipamento	35
4.4	Análise da Tendência das Falhas (Teste de Tendência, Laplace ou Gráfico TTT) . . . . .	36
4.5	<b>Síntese Integrada dos Indicadores de Confiabilidade e Manutenibilidade</b>	<b>39</b>
4.5.1	Bombas Principais – Maior criticidade e maior demanda de manutenção . .	39
4.5.2	Bombas de Carga – Comportamento estável e intervalos maiores entre falhas	39
4.5.3	Agitadores – Falhas esporádicas e reparos rápidos . . . . .	40
4.5.4	Síntese Final da Seção . . . . .	40
5	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>41</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>44</b>

# 1 Introdução

A mineração do minério de ferro é um grande pilar da economia brasileira e, principalmente, mineira, tanto pelo valor financeiro movimentado, quanto pela complexidade das operações que geram empregos e ajudam a desenvolver municípios. Um dos aspectos que chama a atenção com relação a esse tipo de indústria é que ela funciona de forma contínua, o que exige que os ativos da empresa estejam disponíveis durante todo o ciclo de produção.

De acordo com [Viana \(2002\)](#), os processos contínuos se definem pelo fato de suas linhas de produção nunca pararem, onde uma falha pode levar a uma interrupção total. Dessa forma, a manutenção industrial voltada para a disponibilidade dos equipamentos é crucial para que a operação não seja interrompida.

Dentro das classificações de manutenção, existe a manutenção preventiva, que, segundo a norma [ABNT \(1994\)](#), consiste em intervenções planejadas que visam reduzir as probabilidades de falhas, e a manutenção corretiva, que são ações para restaurar o funcionamento de um equipamento após a sua falha.

Segundo [Xenos \(2014\)](#), apesar de a manutenção corretiva ser vista como reativa, ela se torna essencial em sistemas industriais complexos, pois nem todas as falhas podem ser previstas. Também segundo [Kardec e Nascif \(2009\)](#), não seria economicamente viável evitar todas as falhas, já que a quantidade de inspeções, de peças sobressalentes em estoque e o alto volume de substituições preventivas encareceriam a operação. De acordo com [Tavares \(2000\)](#), é essencial a definição de uma política de manutenção que encontre um ponto de equilíbrio entre o custo da falha e o custo da prevenção, uma vez que uma adoção excessiva de medidas preventivas pode resultar em um aumento nos gastos operacionais sem uma melhoria significativa na confiabilidade. Nesse sentido, [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#) ressaltam que, em sistemas de grande complexidade, a eventualidade de falhas é parte integrante do processo produtivo, o que faz da manutenção corretiva um componente essencial na estratégia global de gerenciamento dos ativos.

No contexto da manutenção industrial, os indicadores de desempenho representam instrumentos de controle e análise que permitem quantificar a eficiência das atividades realizadas e apoiar decisões gerenciais. Segundo [Kardec e Nascif \(2009\)](#), um indicador de manutenção é uma medida objetiva capaz de traduzir o comportamento técnico, econômico e operacional dos ativos, permitindo avaliar se as estratégias adotadas estão atingindo os resultados esperados.

De acordo com [Kardec e Nascif \(2009\)](#), indicadores já consagrados como Mean Time Between Failures (Tempo Médio entre falhas, ou MTBF) e a própria disponibilidade

assintótica, quando sozinhos, não mostram a eficiência da equipe de manutenção ou sua demanda operacional. Isso porque tais indicadores focam no equipamento em si e não nos trabalhadores. Nesse contexto, o *Mean Time to Repair* (tempo médio para reparar, MTTR) aparece como uma medida crítica, pois expressa a rapidez e a eficiência com que o sistema pode ser recuperado, refletindo diretamente a manutenibilidade do item. Por esse motivo, a junção da análise dos indicadores é o mais indicado para medir a eficiência [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#).

O ambiente de estudo desse trabalho é uma estação de bombas de uma empresa de mineração. Nessa estação de bombas se encontram, dentre outros equipamentos, bombas de deslocamento positivo, bombas de carga e agitadores, objetos escolhidos para esse estudo devido à relevância de suas contribuições para o processo produtivo. A importância desses ativos é classificada como criticidade nível A, o mais alto para a empresa, devido a sua importância na linha de produção: quando indisponíveis, tais ativos não apenas comprometem a continuidade operacional, mas também representam potenciais prejuízos econômicos milionários para a empresa. Dessa forma, a escolha desse local como objeto de estudo é justificada pelo seu papel estratégico no sistema de transporte do minério e pela representatividade dos dados de manutenção corretiva registrados, que permitem avaliar de forma consistente o esforço da equipe responsável pelas intervenções nesses equipamentos.

Medir o desempenho das equipes de manutenção e a real necessidade delas ainda é um grande desafio no cenário das indústrias. Sem a aplicação de métricas concretas que medem o desempenho das equipes, o planejamento de recursos pode ser prejudicado, assim como a distribuição de pessoal e a avaliação da eficácia operacional das equipes envolvidas. Conforme ressaltam [Kardec e Nascif \(2009\)](#), a manutenção deve ser guiada por indicadores de desempenho que apoiem as tomadas de decisão nos níveis estratégicos e táticos, permitindo controle e previsibilidade maiores sobre os processos operacionais.

Diante desse cenário, a importância desse estudo está na proposta de uma análise integrada de indicadores amplamente consolidados — como o MTTR (*Mean Time to Repair*) e o MTBF/MTBR (*Mean Time Between Failures/Repairs*) — com o objetivo de compreender a intensidade de trabalho exigida da equipe responsável pelos ativos críticos de uma estação de bombeamento. Ao correlacionar a frequência das falhas, suas características e o tempo médio necessário para a recuperação funcional dos equipamentos, torna-se viável mensurar a eficiência e carga de trabalho associada às ações corretivas.

O objetivo desse estudo é avaliar o contexto da equipe de manutenção corretiva em relação aos equipamentos que são essenciais para a operação, utilizando indicadores já reconhecidos na literatura técnica. O que se propõe é analisar, de forma integrada, o tempo médio de reparo e a frequência das falhas, para entender qual é a carga real de trabalho imposta pela estação de bombeamento do mineroduto. Com isso, busca-se, de maneira técnica e respaldada por dados estatísticos, medir a relação entre a intensidade

das manutenções corretivas e o tempo necessário para que os ativos voltem a operar de forma completa, possibilitando uma avaliação objetiva da carga operacional que uma equipe enfrentou durante o período analisado.

Para alcançar o objetivo geral, vamos estabelecer os seguintes objetivos específicos:

- Analisar os dados de paradas corretivas da estação de bombeamento no período de janeiro a dezembro de 2024;
- Utilizar métodos de análise de dados para tratar os registros obtidos;
- Adotar métodos probabilísticos e estocásticos para mensurar o grau de confiança associado ao conjunto de dados;
- Calcular o MTTR e o MTBF dos equipamentos;
- Avaliar a carga de trabalho da equipe com base na combinação entre MTTR, MTBF e número de ocorrências corretivas;
- Interpretar os resultados obtidos pelos indicadores de manutenção, discutindo sua aplicabilidade, limitações e potencial de uso na gestão da manutenção corretiva da empresa.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Conceitos fundamentais da Manutenção e Confiabilidade

A manutenção é vista por diferentes perspectivas, desde uma visão operacional e técnica até uma visão mais estratégica das organizações. Segundo [Pinto e Xavier \(1999\)](#), a manutenção consiste no conjunto de intervenções voltadas para a preservação das condições operacionais dos equipamentos, assegurando, assim, a continuidade e a eficiência do processo produtivo. Indo além, [Kardec e Nascif \(2009\)](#) destacam a que a manutenção deve ser encarada também como uma função estratégica dentro das empresas, estreitamente vinculada à competitividade e ao desempenho geral dos ativos. Seguindo a mesma linha, [Viana \(2002\)](#) acrescenta que, em contextos de processos contínuos, a manutenção adquire relevância ainda maior, pois qualquer interrupção pode comprometer toda a cadeia produtiva. Assim, evidencia-se que a manutenção vai além da concepção limitada de simples reparo, sendo atualmente reconhecida como uma atividade essencial para assegurar a confiabilidade, a disponibilidade e a sustentabilidade operacional em sistemas produtivos de alta complexidade.

A literatura apresenta classificações distintas para a manutenção, sendo as mais recorrentes: preventiva, preditiva e corretiva. A manutenção preventiva caracteriza-se por intervenções planejadas, executadas com base em intervalos de tempo ou critérios previamente estabelecidos, como horas funcionando ou número de ciclos, com o propósito de mitigar a probabilidade de falhas e estender a vida útil dos equipamentos. Conforme a definição da [ABNT \(1994\)](#), trata-se de um conjunto de ações voltadas à redução da probabilidade de falha ou de degradação funcional de um item. [Tavares \(2000\)](#), por sua vez, enfatiza que a manutenção preventiva visa otimizar a utilização de recursos e minimizar interrupções imprevistas, consolidando-se como elemento estratégico no planejamento da manutenção.

A manutenção preditiva, por outro lado, fundamenta-se no monitoramento contínuo das condições operacionais dos equipamentos, por meio de inspeções, medições e análise de parâmetros críticos, permitindo a antecipação de falhas potenciais antes que comprometam a operação. [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#) destacam que essa abordagem apoia-se no uso sistemático de dados e indicadores como suporte à tomada de decisão, possibilitando intervenções mais assertivas. Complementarmente, [Mobley \(2002\)](#) afirma que a aplicação de técnicas preditivas contribui de forma decisiva para o aumento da confiabilidade dos sistemas ao viabilizar a detecção precoce de anomalias, reduzir custos e ampliar a disponibilidade operacional.



Por fim, a manutenção corretiva é acionada após a ocorrência da falha, com o intuito de restaurar o equipamento às suas condições normais de funcionamento. [Xenos \(2014\)](#) a define como uma prática reativa, uma vez que se concretiza apenas após a manifestação do problema, provocando a interrupção das atividades. Nessa perspectiva, [Kardec e Nascif \(2009\)](#) destacam que, embora inevitável em sistemas produtivos de elevada complexidade, a manutenção corretiva requer gestão eficiente para mitigar os impactos econômicos e operacionais decorrentes das paradas não programadas.

A confiabilidade e a manutenção industrial apresentam um papel de destaque dentro da engenharia de produção, isso porque estão diretamente ligadas à disponibilidade de ativos que são essenciais para a operação e a otimização dos processos produtivos. De acordo com [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#), a confiabilidade está entre os pilares fundamentais da gestão de ativos, uma vez que fornece evidências para a previsão de falhas e ajuda no planejamento de intervenções de manutenção. Dessa forma, compreender e aplicar os conceitos de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade se torna essencial para reproduzir indicadores capazes de orientar decisões estratégicas no ambiente industrial.

De acordo com a [ABNT \(1994\)](#), a confiabilidade corresponde à capacidade de um item desempenhar a função requerida, sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo determinado. Essa definição estabelece uma relação direta com o indicador *Mean Time Between Repairs* (MTBF), utilizado em sistemas reparáveis. O MTBF expressa o tempo médio decorrido entre falhas sucessivas, refletindo o período de operação confiável após o restabelecimento do equipamento. Em outras palavras, quanto maior o MTBF, maior é o intervalo médio em que o ativo permanece cumprindo sua função sem interrupções, o que traduz um desempenho consistente em termos de confiabilidade operacional.

A manutenibilidade é a “capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.” ([ABNT, 1994](#))

Esse conceito está totalmente relacionado ao tempo médio de reparo (MTTR), indicador que mede o tempo gasto desde que um equipamento falhou até ser reparado e recolocado a disposição da operação. Isso mostra que a manutenibilidade não depende apenas das técnicas de execução de reparo, mas também da eficiência dos recursos e procedimentos utilizados. [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#) reforçam que usar o MTTR como métrica para a gestão da manutenção é algo fundamental, pois ele traduz a capacidade da equipe de manutenção em restaurar rapidamente a disponibilidade dos ativos da organização e minimizar os impactos de indisponibilidades inesperadas.

De acordo com [ABNT \(1994\)](#), a disponibilidade pode ser descrita como a aptidão de um equipamento para estar em operação em determinado instante, considerando simultaneamente sua confiabilidade, sua manutenibilidade e o suporte de manutenção

disponível. Esses conceitos fazem parte da análise do desempenho de ativos, pois conectam a frequência com que falhas ocorrem e a capacidade da organização em restaurar rapidamente o funcionamento dos equipamentos. Ou seja, enquanto a confiabilidade está relacionada à probabilidade ou frequência de falhas, a disponibilidade expõe o equilíbrio entre o tempo em que o item está em operação e o tempo em que está indisponível. Para [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#), interpretar de maneira correta esses parâmetros afeta de forma decisiva uma gestão eficiente da manutenção, já que eles dão base para que os gestores tenham uma visão ampla do processo e assim possam otimizá-lo.

## 2.2 Metodologias de Gestão da Manutenção

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM – *Reliability Centered Maintenance*) é uma abordagem pioneira ao desenvolver estratégias de manutenção, fundamentada na análise do comportamento funcional dos sistemas e nas falhas que ocorrem. A metodologia foi inicialmente criada para a indústria aeronáutica, nos anos 60, e depois se tornou amplamente difundida em vários segmentos industriais graças às contribuições de John Moubray. Segundo [Moubray \(1997\)](#), o RCM é um processo sistemático com o objetivo de garantir que cada ativo físico continue realizando sua função de forma adequada no ambiente operacional para o qual foi projetado. Essa metodologia consiste em reconhecer as funções dos equipamentos, realizar uma análise minuciosa das falhas que podem ocorrer e selecionar os métodos de manutenção mais adequados para cada tipo de falha. Nesse sentido, o RCM possibilita uma melhor alocação de recursos, diminui os custos operacionais e aumenta a confiabilidade de todo o sistema produtivo. Para [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#), a aplicação do RCM contribui diretamente para a eficiência da gestão de ativos, uma vez que associa o conhecimento técnico sobre o comportamento das falhas à tomada de decisão baseada em critérios de risco e criticidade.

## 2.3 Indicadores de Manutenção

Na gestão da manutenção, os indicadores de desempenho são essenciais: eles permitem avaliar a eficácia das ações realizadas, organizar o planejamento das intervenções e embasar decisões com base em critérios técnicos e verificáveis. [Kardec e Nascif \(2009\)](#) enfatizam que essas métricas traduzem, de maneira quantificável, o comportamento dos ativos, possibilitando o acompanhamento de sua trajetória ao longo do tempo. De forma similar, [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#) ressaltam que para uma gestão consistente da confiabilidade e da manutenibilidade, é imprescindível que haja uma definição clara das medidas a serem empregadas. [Viana \(2002\)](#) acrescenta que a aplicação sistemática de indicadores ajuda a identificar tendências, diagnosticar anomalias e definir prioridades no seio do sistema produtivo.

O Tempo Médio entre Falhas (*MTBF – Mean Time Between Repairs*) está entre os indicadores mais consolidados para mensurar a confiabilidade de equipamentos reparáveis. Segundo [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#), é o tempo médio que um ativo opera sem falhas, o que indica diretamente o quanto ele consegue manter sua função ao longo do tempo. No contexto do TPM, [Nakajima \(1988\)](#) utiliza o MTBF como uma métrica essencial para avaliar a estabilidade operacional e reduzir as perdas que ocorrem devido à variabilidade do processo. [Pinto e Xavier \(1999\)](#) também afirmam que o MTBF é essencial para avaliar a confiabilidade em sistemas industriais, pois está ligado à probabilidade de falhas e ao desempenho ao longo do tempo. Em suma, a literatura é bastante unânime ao apontar o MTBF como a principal métrica para definir o desempenho confiável de um equipamento. Segundo [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#), para sistemas reparáveis e Markovianos, a taxa média de falhas pode ser expressa como o inverso do tempo médio entre falhas, de modo que o MTBF, quando usado para sistemas reparáveis, corresponde à recíproca da taxa de ocorrência de falhas.

$$MTBF(t) = \frac{1}{\lambda(t)} \quad (1)$$

onde:  $\lambda(t)$  é a taxa de ocorrência de falhas do sistema, índice que será elucidado posteriormente.

O Tempo Médio para Reparo (*MTTR – Mean Time to Repair*) é, tradicionalmente, o indicador mais diretamente associado à manutenibilidade, já que reflete o tempo médio decorrido para restaurar um equipamento ao seu funcionamento normal após uma falha. Segundo [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(1994\)](#), a manutenibilidade relaciona-se diretamente à facilidade e rapidez com que um item pode ser reparado segundo procedimentos estabelecidos, o que torna o MTTR uma medida-chave na avaliação da eficiência da manutenção corretiva. [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#) complementam essa visão ao ressaltar que o MTTR não se limita ao tempo de intervenção, mas também reflete a habilidade da organização em diagnosticar, planejar e realizar o reparo de forma eficaz. [Viana \(2002\)](#) complementa que o MTTR afeta diretamente a disponibilidade e a estabilidade do processo produtivo, uma vez que um tempo de reparo longo aumenta o peso das falhas sobre o desempenho total do sistema. Por isso, o MTTR é tão frequentemente empregado para avaliar a capacidade de resposta das equipes de manutenção e a rapidez das intervenções. Segundo [Mobley \(2002\)](#), esse indicador é estimado pela seguinte fórmula:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (2)$$

onde  $t_i$  representa o tempo de reparo da  $i$ -ésima intervenção;  
 $n$  é o número total de ocorrências.

A Disponibilidade Assintótica ( $A$ ) é o resultado da combinação dos conceitos de confiabilidade e manutenibilidade, e é um dos indicadores mais empregados para demonstrar a proporção do tempo em que um equipamento permanece apto a desempenhar sua função. A disponibilidade, segundo [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#), sintetiza o comportamento operacional dos ativos ao relacionar o intervalo médio entre reparos (MTBF) com o tempo médio de reparo (MTTR), possibilitando uma avaliação do quanto o sistema produtivo é capaz de manter-se em funcionamento. A disponibilidade, em sua definição clássica, de acordo com [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#), é apresentada da seguinte maneira:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

onde  $MTBF$  representa o Tempo Médio entre falhas;

$MTTR$  representa o tempo médio para reparo;

$A$  representa a disponibilidade.

Assim, MTBF, MTTR e disponibilidade são considerados indicadores bem estabelecidos na literatura de manutenção e confiabilidade, formando a base quantitativa para o desempenho dos equipamentos industriais. Em seguida, esses indicadores serão utilizados em um conjunto de dados da estação de bombeamento em análise, para que se possa caracterizar o comportamento dos ativos e ajudar na interpretação dos resultados obtidos.

## 2.4 Estatística Aplicada à Engenharia da Confiabilidade

### 2.4.1 Importância do tratamento estatístico na confiabilidade

A coleta e o tratamento estatístico dos dados são processos essenciais para a engenharia da confiabilidade, pois é por meio deles que se obtêm evidências e informações que auxiliam na tomada de decisões. Segundo [Mehta e Uffenbeck \(1989\)](#), o tratamento estatístico permite identificar padrões de falhas, eliminar distorções e construir modelos que representem com maior precisão o desempenho dos equipamentos ao longo do tempo. De acordo com essa ideia, os dados por si só não permitem ao gestor tomar decisões importantes, sendo também necessário usar técnicas de coleta e tratamento de dados, bem como ferramentas estatísticas que garantam a validade dos resultados.

### 2.4.2 Organização e filtragem dos dados

O primeiro passo no processo de tratamento dos dados consiste na organização e filtragem dos dados. Nesse estudo, os registros foram extraídos do sistema da empresa em questão e filtrados para remover paradas operacionais e preventivas, considerando apenas as intervenções de natureza corretiva. A importância dessa filtragem se dá porque

a qualidade dos resultados é diretamente relacionada com a qualidade das informações extraídas do sistema.

### 2.4.3 Censura à direita

No contexto desse trabalho, é importante tratar sobre o tratamento de dados censurados, que deve acontecer quando nem todas as falhas são observadas dentro do período de análise, ou seja, quando se sabe apenas que o item permaneceu operando até certo instante, sem que se observe o momento exato de sua falha. Esse fenômeno é denominado censura à direita, uma vez que a falha é censurada em um ponto temporal que ocorre após o limite da amostra. No entanto, no presente estudo, todos os equipamentos estudados apresentaram falhas observadas dentro do período analisado (01/01/2024 a 31/12/2024). Assim, não foi necessário aplicar técnicas de censura à direita, sendo preciso apenas calcular o MTBF considerando os dados do período estudado. Essa abordagem é adequada quando o horizonte temporal é suficientemente longo para abranger os principais ciclos de operação.

### 2.4.4 Verificação de valores inconsistentes e outliers

Em análises de confiabilidade, é comum a verificação de valores atípicos ou outliers, que podem distorcer médias e comprometer a forma das distribuições [Morettin e Tolo \(2018\)](#). No entanto, em sistemas reparáveis, como os equipamentos estudados, cada falha e cada reparo representam uma ocorrência válida do processo e, por isso, não devem ser eliminados. Dessa forma, técnicas formais de detecção de outliers não foram aplicadas, e o tratamento foi restrito aos valores inconsistentes que inviabilizavam a interpolação dos dados.

### 2.4.5 Interpolação Linear dos Dados de Horímetro

Posteriormente neste trabalho, foi aplicada a técnica da interpolação linear para estimar as horas de operação dos equipamentos em que não havia registro contínuo nos horímetros. De acordo com [Hildebrand \(1956\)](#), a interpolação linear é uma técnica que consiste em estimar valores intermediários entre dois pontos conhecidos. A interpolação é uma técnica amplamente usada na estatística, que visa corrigir séries temporais e garantir a continuidade dos dados, preservando as tendências originais sem induzir distorções que podem prejudicar significativamente o resultado. Segundo [Chapra e Canale \(2010\)](#), a interpolação linear consiste em estimar valores intermediários assumindo uma variação linear entre dois pontos conhecidos. A forma geral do interpolador linear é dada pela equação da reta definida pelos pontos  $(x_0, y_0)$  e  $(x_1, y_1)$ , conforme apresentado em métodos clássicos de cálculo numérico:

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (4)$$

No presente estudo, essa formulação foi particularizada para a interpolação do horímetro dos equipamentos, em que a variável  $x$  representa o tempo e a variável  $y$  corresponde ao valor acumulado do horímetro. Dessa forma, essa equação pode ser reescrita como:

$$H_i = H_{i-1} + \left( \frac{H_{i+1} - H_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \right) (t_i - t_{i-1}) \quad (5)$$

onde  $H_i$  é o valor estimado do horímetro no instante intermediário;

$H_{i-1}$  e  $H_{i+1}$  são os valores conhecidos do horímetro antes e depois da lacuna;

$t_{i-1}$  e  $t_{i+1}$  são os tempos correspondentes às leituras  $H_{i-1}$  e  $H_{i+1}$ .

Conforme afirmam [Montgomery e Runger \(2016\)](#), essa técnica é especialmente adequada quando a variação entre os pontos é aproximadamente linear, condição observada nos dados de horímetro e paradas analisados neste trabalho. Essa etapa foi fundamental para viabilizar o cálculo posterior dos indicadores de confiabilidade (MTBF) e manutenibilidade (MTTR) no Minitab, permitindo representar fielmente o comportamento operacional dos equipamentos da estação de bombeamento.

#### 2.4.6 Testes de distribuição para tempos até a falha e reparo

Após o tratamento da base de dados e a interpolação, foi necessário os ajustes de distribuição de probabilidade para avaliar o comportamento dos tempos até a falha e tempos até reparo dos equipamentos. Essa etapa se faz necessária para entender se as falhas estão ocorrendo de forma aleatória, crescente ou decrescente ao longo do tempo. [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#) destacam que a análise de confiabilidade é fundamentada na modelagem de variáveis aleatórias positivas, sendo as distribuições Weibull, Exponencial e Lognormal as mais amplamente aplicadas em sistemas industriais.

Após realizar a filtragem dos dados, conferir a consistência dos registros, eliminar os valores discrepantes e aplicar a interpolação linear para recuperar as horas de operação, obteve-se uma base estatisticamente sólida e apropriada para uma análise de confiabilidade. Isso assegura que os tempos entre falhas e os tempos de reparo sejam fiéis ao que realmente ocorre com os equipamentos, sem criar distorções que poderiam comprometer a modelagem probabilística. Portanto, tendo a qualidade dos dados garantida, foi viável prosseguir para a análise das distribuições de probabilidade e das funções matemáticas que descrevem o comportamento das falhas em sistemas reparáveis, assunto que será tratado na próxima seção.

### 2.4.7 Nível de Incerteza e Intervalos de Confiança

Segundo [Montgomery e Runger \(2016\)](#), em qualquer abordagem estatística voltada à engenharia da confiabilidade, é imprescindível considerar o grau de incerteza associado às estimativas dos parâmetros analisados. Essa precaução justifica-se pelo fato de que os resultados são extraídos a partir de amostras finitas de dados, estando sujeitos à variabilidade inerente ao processo estudado. Para assegurar que as inferências realizadas sejam de fato representativas do comportamento real do sistema, adota-se o conceito de nível de confiança, que expressa a probabilidade do intervalo de confiança conter o valor do parâmetro

Neste trabalho, foi adotado um nível de confiança de 95%, prática consagrada nas análises de confiabilidade em contextos industriais. Isso implica que, caso o experimento fosse repetido inúmeras vezes sob condições idênticas, aproximadamente 95% dos intervalos de confiança obtidos incluiriam o valor real do parâmetro estimado. Tal escolha reflete um equilíbrio adequado entre rigor estatístico e aplicabilidade prática, evitando-se tanto a ampliação excessiva dos intervalos, o que comprometeria a precisão, quanto sua redução exagerada, que poderia levar à subestimação da incerteza envolvida.

[Montgomery e Runger \(2016\)](#) destacam que o uso de intervalos de confiança constitui um componente essencial em qualquer processo de inferência estatística, uma vez que “as estimativas pontuais isoladas podem induzir a interpretações equivocadas quando não acompanhadas de suas medidas de incerteza”. Dessa forma, a análise de confiabilidade conduzida neste estudo não se apoia unicamente nos valores médios estimados, mas também na robustez estatística dos parâmetros obtidos, garantindo que as inferências realizadas sobre o desempenho dos equipamentos da estação de bombas estejam respaldadas por uma margem de confiança estatisticamente consistente.

## 2.5 Teoria da renovação

A modelagem matemática usada nos cálculos, se baseou nos conceitos de [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#), onde foi mostrado o conceito de Teoria da Renovação, que será aprofundado nas seções seguintes.

### 2.5.1 Introdução à teoria da renovação

A Teoria da renovação é um pilar fundamental para a engenharia da confiabilidade aplicada para sistemas reparáveis, porque permite modelar matematicamente comportamentos cíclicos de equipamentos, como falha e reparo. De acordo com [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#), esses sistemas são representados por processos estocásticos de renovação, nos quais cada falha seguida de reparo completo reinicia o ciclo de vida do equipamento, configu-

rando uma nova “renovação” do sistema. Modelar esse processo permite tanto estimar o número esperado de falhas em um intervalo de tempo quanto calcular indicadores como disponibilidade, taxa de ocorrência de falhas e tempo médio de reparo.

### 2.5.2 Processos de renovação simples e alternantes

Essa estratégia se mostra crucial em contextos industriais de funcionamento contínuo, como nas estações de bombeamento de minerodutos, onde a alternância entre os estados de operação (ativo) e reparo (inativo) é o que define o desempenho do processo como um todo. A teoria ainda faz uma distinção entre processos de renovação simples, em que o tempo de reparo é tão curto em comparação ao tempo médio entre falhas que pode ser ignorado, e processos de renovação alternantes, onde o tempo de reparo é relevante o suficiente para afetar o comportamento estatístico do sistema.

### 2.5.3 Tempos até a falha e tempos até o reparo

Nos processos de renovação alternantes, duas variáveis aleatórias são fundamentais: o tempo até a falha ( $X_i$ ) e o tempo de reparo ( $R_i$ ). Essas variáveis são consideradas independentes e identicamente distribuídas, representando o ciclo completo de funcionamento e de restauração de um equipamento.

### 2.5.4 Número de renovações até o instante $t$

O número de renovações até o instante  $t$  é indicado por  $N(t)$ , definido formalmente como:

$$T_k = X_1 + R_1 + X_2 + R_2 + \dots + X_k + R_k \quad (6)$$

onde  $T_k$  é o tempo até a  $k$ -ésima renovação. Essa variável fornece o número acumulado de falhas e reparos no intervalo  $(0, t]$ , sendo  $N(0) = 0$ .

O valor esperado de  $N(t)$  é representado pela função  $\Lambda(t) = E[N(t)]$ , que indica o número médio de falhas até o instante  $t$ .

### 2.5.5 Taxa de ocorrência de falhas (ROCOF)

A derivada de  $\Lambda(t)$  em relação ao tempo define a função densidade de renovação, ou taxa de ocorrência de falhas (ROCOF), dada por:

$$\lambda(t) = \frac{d\Lambda(t)}{dt} \quad (7)$$

Essa função mede a frequência com que as falhas ocorrem ao longo do tempo e está diretamente relacionada à intensidade de falhas do sistema.



## 2.6 Curvas de Crescimento Paramétrico (NHPP / Crow-AMSAA)

### 2.6.1 Introdução às Curvas de Crescimento

Crescimento de falhas é um conceito essencial para a avaliação do comportamento de sistemas reparáveis ao longo do tempo, e as curvas de crescimento de falhas são a ferramenta ideal para analisar se o processo de falhas em um sistema está se aprimorando, permanecendo estável ou se deteriorando ao longo do tempo. De acordo com [Ribeiro e Fogliatto \(2009\)](#), esses modelos se tornam indispensáveis quando o comportamento do sistema não pode ser descrito por taxas de falhas que permanecem constantes ao longo do tempo, exigindo, assim, abordagens que considerem essas flutuações. É nesse cenário que as curvas derivadas de Processos Não-Homogêneos de Poisson (NHPP) se destacam na engenharia da confiabilidade, graças à sua flexibilidade e à clara interpretação física que oferecem.

### 2.6.2 O modelo NHPP – visão geral

De acordo com [Crow \(1974\)](#), no modelo NHPP, o número acumulado de falhas até o instante  $t$  é dado pela função média  $\Lambda(t)$ , que representa o valor esperado de falhas em um intervalo de tempo. Ao contrário dos processos de Poisson homogêneos, nos quais a taxa de falhas é constante, no NHPP essa taxa pode variar, permitindo a modelagem de desgaste ou de melhoria. Como observam [Meeker, Escobar e Pascual \(2021\)](#), esse tipo de processo é adequado quando os tempos entre falhas não são independentes ou não seguem distribuições simples.

A formulação geral utilizada nas análises industriais segue a expressão de [Crow \(1974\)](#):

$$\Lambda(t) = \alpha t^\beta \quad (8)$$

na qual  $\alpha > 0$  é o parâmetro de escala e  $\beta > 0$  define o comportamento da tendência.

### 2.6.3 Modelo Crow-AMSAA (Lei de Potência)

O modelo Crow-AMSAA, derivado dos estudos de [Crow \(1974\)](#) para sistemas reparáveis, é utilizado para representar o comportamento da taxa de falhas ao longo do tempo em sistemas industriais. Nesse modelo, a taxa instantânea de falhas é dada por:

$$\lambda(t) = \alpha\beta t^{\beta-1} \quad (9)$$

O parâmetro  $\beta$  fornece a interpretação fundamental:

- $\beta < 1 \rightarrow$  tendência de melhoria (learning curve);
- $\beta = 1 \rightarrow$  comportamento aleatório (processo de Poisson);
- $\beta > 1 \rightarrow$  tendência de desgaste.

Essa interpretação segue a literatura clássica de confiabilidade apresentada por [Elsayed \(2012\)](#) e é coerente com os resultados observados em sistemas sujeitos a abrasão, como bombas e válvulas de minerodutos.

#### 2.6.4 Estimativa dos parâmetros $\alpha$ e $\beta$

O software Minitab emprega diferentes métodos de estimativa para ajustar os parâmetros do modelo, destacando-se:

- Máxima Verossimilhança (MLE);
- Verossimilhança Condicional (CML);
- Mínimos Quadrados (Least Squares).

Segundo a documentação técnica do [Minitab, LLC \(2021\)](#), o método de Máxima Verossimilhança (MLE) é o mais indicado para NHPP, pois produz estimativas consistentes mesmo em conjuntos de dados com variabilidade elevada, como é comum em sistemas reparáveis.

No presente estudo, esse foi o método adotado para estimar  $\alpha$  e  $\beta$  a partir das falhas observadas ao longo do ano de 2024.

#### 2.6.5 Interpretação gráfica – MCF, Duane e TTT

Para além da modelagem paramétrica, a engenharia da confiabilidade faz uso de gráficos auxiliares para observar tendências de forma visual e sem depender do modelo.

##### 2.6.5.1 Gráfico MCF (Nelson-Aalen)

A Função Média Acumulada de Falhas (MCF) é uma ferramenta que permite avaliar se o sistema está em um comportamento crescente, constante ou decrescente. De acordo com [Montgomery e Runger \(2012\)](#), esse gráfico é especialmente valioso para descobrir padrões sem a necessidade de assumir uma distribuição previamente.

#### 2.6.5.2 Gráfico de Duane

O gráfico de Duane apresenta  $N(t)/t$  em escala log-log, e uma tendência aproximadamente linear indica aderência ao modelo de lei de potência, conforme demonstrado por [Crow \(1974\)](#).

#### 2.6.5.3 Gráfico TTT (Total Time on Test)

O TTT plot, segundo [Meeker, Escobar e Pascual \(2021\)](#), permite verificar tendências de falhas sem modelagem paramétrica:

- curva convexa  $\rightarrow$  desgaste ( $\beta > 1$ );
- curva linear  $\rightarrow$  aleatoriedade;
- curva côncava  $\rightarrow$  melhoria.

Essas ferramentas complementam a análise paramétrica e reforçam a interpretação sobre o comportamento temporal das falhas.

#### 2.6.6 Aplicação ao estudo

Foram empregados, neste trabalho, os modelos paramétricos de crescimento para analisar a tendência das falhas que ocorreram nos equipamentos da estação de bombeamento da empresa. Com as estimativas dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , e os gráficos MCF, Duane e TTT fornecidos pelo Minitab, foi possível classificar se os equipamentos estavam se desgastando ou se mantinham uma operação estável. Com base nesses elementos, foram realizadas as análises de confiabilidade apresentadas no próximo capítulo.

## 3 Metodologia

### 3.1 Natureza do estudo

Este trabalho é uma pesquisa aplicada, de natureza quantitativa, e com abordagem descritiva. Ele busca aplicar conceitos de engenharia de confiabilidade em indicadores de manutenção corretiva. A pesquisa se fundamenta na análise de dados históricos reais obtidos do sistema de uma empresa do setor de mineração, abrangendo o período de janeiro a dezembro de 2024. Como diz [Gil \(2002\)](#), a pesquisa aplicada tem o propósito de gerar conhecimento para a aplicação prática, com foco em resolver problemas específicos.

### 3.2 Equipamentos analisados

Os dados utilizados neste estudo foram coletados do sistema MES (Manufacturing Execution System) de uma empresa, do período de 01 de janeiro de 2024 a 31 de dezembro de 2024. Uma das funções do sistema é registrar as ocorrências operacionais da planta industrial e gravá-las em tempo real, incluindo eventos de parada, intervenções de manutenção, descrição dos eventos, tempos de início e término das atividades e identificação dos equipamentos afetados.

Primeiro, foram coletados os dados referentes aos equipamentos estudados no período proposto. Após isso, houve um processo de filtragem dos dados, onde foram excluídos registros que não eram de paradas para manutenções corretivas, como paradas preventivas, paradas programadas para inspeção, ajustes operacionais e atividades de processo. Após essa filtragem, a base de dados resultante estava exclusivamente com os eventos de manutenção corretiva, que são o foco desse estudo, por representarem o esforço direto da equipe de campo.

A base de dados, exportada para planilhas do Microsoft Excel, foi composta por informações de tempo total de parada, equipamento afetado, descrição da ocorrência, tipo de intervenção e data/hora de início e término. Após o tratamento de dados inicial usando o Excel, os dados foram importados para o software Minitab 19, utilizado para as análises estatísticas de confiabilidade e manutenibilidade.

A escolha do período de análise (2024) se justifica pela disponibilidade dos dados e por ser um período não tão distante, assegurando a representatividade e aumentando a confiança dos resultados. Além disso, a utilização dos dados reais da empresa permite uma avaliação fiel do desempenho das equipes de manutenção, fortalecendo o caráter aplicado desse estudo.

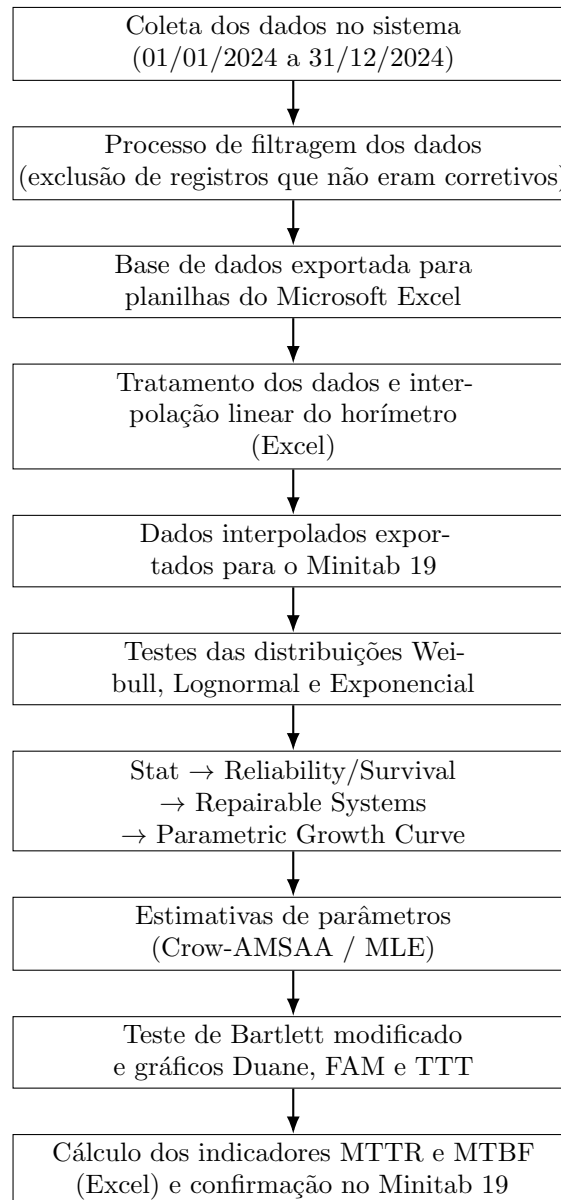
### 3.2.1 Equipamentos analisados

Os equipamentos analisados são caracterizados como sendo os com maior criticidade da estação de bombeamento. Sendo eles conhecidos como agitadores de polpa, responsáveis pela agitação da polpa de minério em tanques, bombas de carga, responsáveis pelo bombeamento do tanque em direção às bombas principais, e as bombas principais, que bombeiam o minério para o mineroduto em si.

### 3.2.2 Fluxograma metodológico do estudo

Esta subseção apresenta o fluxograma metodológico do estudo, no qual são sintetizadas as principais etapas do procedimento adotado, desde a coleta dos dados no sistema da empresa até o cálculo dos indicadores de manutenção corretiva.

Figura 1 – Fluxograma metodológico do estudo



Fonte: Elaborado pelo Autor

### 3.3 Tratamento e preparação de dados

Após a obtenção dos registros brutos extraídos do sistema da empresa, foi realizado o tratamento e a padronização das informações a fim de assegurar a integridade dos dados e a confiabilidade dos resultados analíticos. Esse procedimento envolveu a coleta inicial até a aplicação de técnicas de interpolação para a reconstrução de valores, conforme será descrito a seguir.

Após a coleta, as informações foram estruturadas em planilhas do Microsoft Excel, organizadas em colunas que mostravam a data e hora de início e fim da parada, duração total (em horas), tipo de intervenção, equipamento envolvido e observações da equipe de

manutenção.

A primeira fase do tratamento consistiu em eliminar duplicatas e inconsistências, que muitas vezes surgem devido à reabertura automática de ordens no sistema ou à falta de sincronização entre os módulos de produção e manutenção. Além disso, foram descartadas as ocorrências que não especificavam o equipamento e aquelas em que o tempo de inatividade foi igual a zero, uma vez que não constituíam intervenções corretivas reais.

Depois, foi realizada uma filtragem lógica rigorosa para reter apenas os eventos que se enquadram na definição de manutenções corretivas segundo a norma [ABNT \(1994\)](#), ou seja, as intervenções que ocorrem em função de uma falha. Assim, as paradas preventivas, preditivas, operacionais ou para testes de processo foram eliminadas.

Durante a análise exploratória, foram encontrados valores atípicos – paradas muito breves e paradas muito longas – que não seguiam o padrão geral. Cada um desses casos foi examinado separadamente, levando em conta relatórios operacionais e registros de campo. Decidiu-se excluir apenas os pontos que afetavam os processos de interpolação dos dados de horímetro, já que sua proximidade temporal causava distorções na estimativa da continuidade operacional dos equipamentos. Isso porque, em sistemas que podem ser reparados, retirar falhas de forma arbitrária pode prejudicar a precisão na estimativa da taxa de falhas  $\lambda$ . Portanto, apenas aqueles eventos que eram claramente redundantes ou que não afetavam de forma alguma o ciclo falha-reparo foram excluídos.

Os autores [Montgomery e Runger \(2016\)](#) alertam que, ao manipular dados experimentais, é fundamental encontrar um meio-termo entre eliminar erros e manter a representatividade da amostra para que as inferências não sejam comprometidas. Com isso, a base de dados foi mantida o mais realista possível em relação à operação, para que os padrões de falha e de reparo representassem o comportamento real dos ativos em análise.

Após o tratamento, os dados foram exportados para o Minitab 19, onde foram calculados os tempos médios entre falhas (MTBF) e os tempos médios de reparo (MTTR), além das análises das distribuições estatísticas e suas funções de confiabilidade. Essa etapa final definiu uma base consistente e sólida, que poderia suportar as discussões apresentadas nos capítulos seguintes.

### 3.4 Interpolação de dados horímetro

No decorrer da preparação e análise dos dados, foram identificadas lacunas nas medições de horímetro de certos equipamentos, resultantes de falhas pontuais nos registros ou de intervalos irregulares entre as medições. Isso compromete o cálculo dos tempos de operação, o que, por sua vez, afetaria a determinação dos indicadores de confiabilidade, como o MTBF (*Mean Time Between Failures*). Para contornar essa questão e manter a

continuidade nas séries temporais, foi utilizada a interpolação linear, uma técnica frequentemente empregada em investigações de engenharia de confiabilidade para a reconstrução de dados de medição ao longo do tempo.

Esse processo foi realizado diretamente no Microsoft Excel, aplicando fórmulas de progressão linear para cada intervalo de falhas de medição. A seguir, os dados interpolados foram exportados para o Minitab 19, garantindo a integridade das séries temporais antes do cálculo das distribuições de falhas e dos tempos médios entre paradas.

Com a correção dos dados de horímetro, foi possível obter o tempo real de operação de cada equipamento entre falhas consecutivas, que é crucial para os cálculos de MTBF e para as análises de confiabilidade que foram realizadas no Minitab, conforme detalhado nas próximas seções deste trabalho.

### 3.5 Aplicação no Minitab 19

Após o tratamento e padronização dos dados, as análises estatísticas foram realizadas no software Minitab 19, amplamente utilizado na engenharia da confiabilidade para o estudo de sistemas reparáveis, avaliação de falhas e modelagem probabilística de tempos de reparo. O Minitab permite ajustar distribuições teóricas aos dados observados, calcular parâmetros estatísticos e realizar testes de aderência, fornecendo subsídios para a tomada de decisão baseada em evidências quantitativas.

O processo de análise iniciou-se com a importação da base de dados tratada em formato .xlsx, contendo as colunas referentes ao tempo de operação (horas), tempo de parada (horas) e tipo de equipamento.

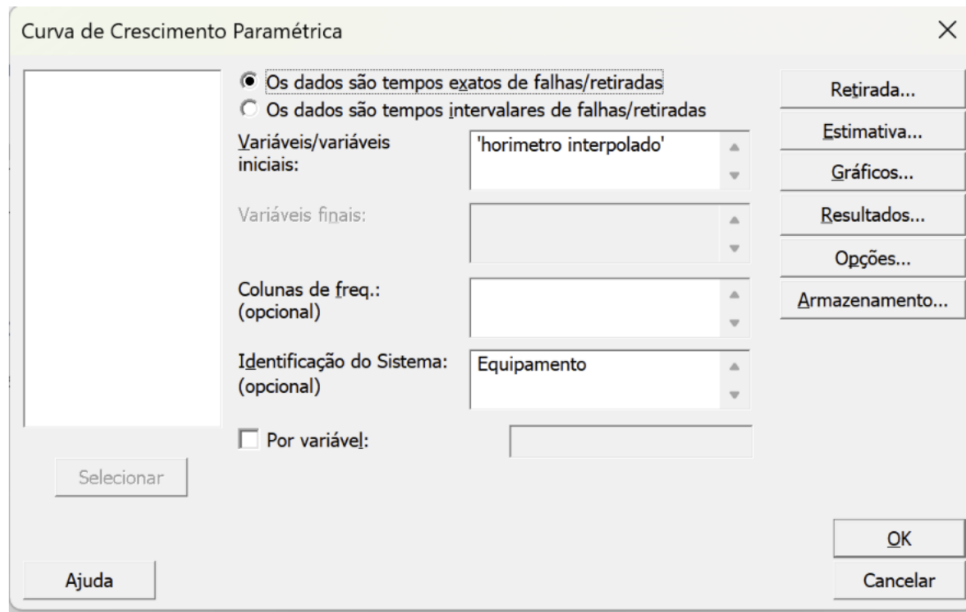
Para cada conjunto de dados, que se refere a um tipo de equipamento, foram realizados testes das distribuições de probabilidade Weibull, Lognormal e Exponencial para determinar qual delas melhor modelava o comportamento dos tempos de falha e reparo.

Em seguida, foi acessado o menu:

Stat → Reliability/Survival → Repairable Systems → Parametric Growth Curve



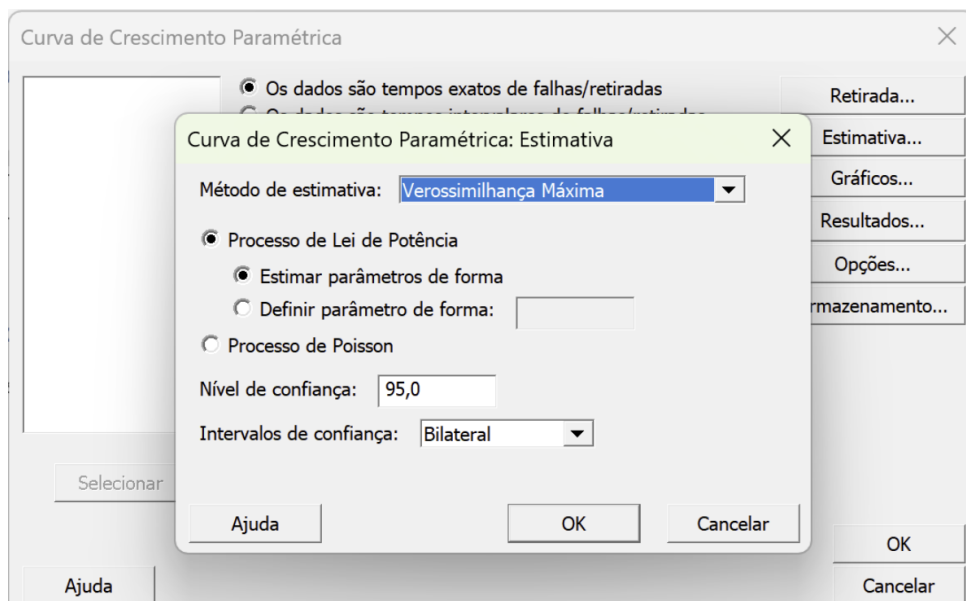
Figura 2 – Janela Minitab



Fonte: Elaborado pelo Autor

No Minitab, são apresentados os valores estimados dos parâmetros de forma ( $\beta$ ) e escala ( $\eta$  ou  $\alpha$ ), juntamente com seus intervalos de confiança de 95%, que foram obtidos pelo modelo Crow-AMSAA e método de Verossimilhança Máxima (Maximum Likelihood Estimation – MLE).

Figura 3 – Janela Minitab - Método de Estimativa



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com essa ferramenta é possível simular como as falhas se comportam no decorrer do tempo, considerando que o sistema é reparável, ou seja, é capaz de voltar a operar após

cada falha. Essa estratégia se aplica ao exame de dispositivos como bombas e agitadores de polpa, que operam em um ciclo contínuo e recebem manutenções corretivas regulares.

Complementarmente, a análise da tendência das falhas foi conduzida por meio do Teste de Bartlett modificado, o qual compara os parâmetros de forma entre distintos subconjuntos de dados. Essa abordagem permitiu verificar se o padrão de falhas se manteve estável ao longo do tempo ou se há indícios de degradação progressiva, elemento fundamental para fundamentar decisões quanto à necessidade de revisão das estratégias de manutenção adotadas.

A partir disso, foram gerados os gráficos de Duane, FAM e TTT, utilizados para analisar, confirmar a aplicabilidade do método utilizado e representar visualmente as tendências.

### 3.6 Cálculo dos Indicadores Básicos (MTTR e MTBF)

Em seguida, procedeu-se ao cálculo dos indicadores tradicionais da engenharia da confiabilidade: Tempo Médio Para Reparo (MTTR – *Mean Time to Repair*) e Tempo Médio entre Falhas (MTBF – *Mean Time Between Repair*). Esses indicadores são essenciais para descrever o desempenho dos sistemas reparáveis e para entender o comportamento das falhas dos equipamentos em questão.

Esses cálculos foram executados inicialmente em planilhas do Microsoft Excel e, posteriormente, confirmados no Minitab 19. Para o MTBF, foi utilizando novamente o módulo de *Reliability/Repairable Systems Analysis*, o qual fornece resultados da taxa de ocorrência de falhas. Já o MTTR foi calculado utilizando o campo Estatísticas Descritivas, usando as médias de duração das paradas retiradas do sistema da empresa analisada e separadas por equipamento.

## 4 Apresentação de Resultados e Discussão

### 4.1 Caracterização da Base de Dados e Estrutura dos Equipamentos Estudados

No presente estudo foram analisados três tipos de equipamentos, sendo, duas bombas de carga (BP), dois agitadores de polpa (AG) e seis bombas principais (PP). Para facilitar a compreensão, os códigos dos equipamentos estão na tabela abaixo:

Tabela 1 – Lista de Equipamentos por Categoria

<b>Bomba Principal</b>	<b>Bomba de Carga</b>	<b>Agitador</b>
Bomba Principal 1	Bomba de Carga 1	Agitador 1
Bomba Principal 2	Bomba de Carga 2	Agitador 2
Bomba Principal 3	–	–
Bomba Principal 4	–	–
Bomba Principal 5	–	–
Bomba Principal 6	–	–

Por fazerem parte de um processo de produção contínuo, esses equipamentos funcionam vinte e quatro horas por dia, todos os dias. No entanto, as bombas de carga operam em regime de redundância, ficando sempre uma em *stand-by*. O período analisado foi de primeiro de janeiro de dois mil e vinte e quatro a trinta e um de dezembro de 2024 (1 ano).

Devido ao cálculo da interpolação e limpeza de dados (como dados duplicados e inconsistência), o número de falha foi dividido em 2 tipos: número total de falhas registradas e número de falhas contabilizadas nos cálculos dos indicadores:

- **Bombas de carga:**

- Bomba de Carga 1 = 13 falhas totais / 12 falhas contabilizadas no cálculo;
- Bomba de Carga 2 = 16 falhas totais / 13 falhas contabilizadas no cálculo.

- **Agitadores de Polpa:**

- Agitador 1 = 11 falhas totais / 10 falhas contabilizadas no cálculo;
- Agitador 2 = 25 falhas totais / 25 falhas contabilizadas no cálculo.

- **Bombas Principais:**

- Bomba Principal 1 = 23 falhas totais / 17 falhas contabilizadas no cálculo;

- Bomba Principal 2 = 57 falhas totais / 43 falhas contabilizadas no cálculo;
- Bomba Principal 3 = 16 falhas totais / 15 falhas contabilizadas no cálculo;
- Bomba Principal 4 = 66 falhas totais / 41 falhas contabilizadas no cálculo;
- Bomba Principal 5 = 20 falhas totais / 19 falhas contabilizadas no cálculo;
- Bomba Principal 6 = 30 falhas totais / 25 falhas contabilizadas no cálculo.

## 4.2 Organização, Limpeza e Interpolação dos Dados (Resumo dos Procedimentos Aplicados)

Chama atenção a diferença entre o número total de falhas registradas e o número de falhas contabilizadas nos cálculos dos indicadores, consequência da organização, limpeza e interpolação dos dados. No total foram 277 falhas coletadas e 220 usadas nos cálculos, uma diferença de 57 registros. Apesar da discrepância, a quantidade de falhas usada para calcular os indicadores foi suficiente para manter a representatividade da análise estatística proposta e assegurar que os resultados reflitam o comportamento real dos ativos.

Figura 4 – Limpeza de Dados

Equipamen	Início Parada	Fim Parada	Hrs par.	Horímetro
M03-01BP001	19/04/2024 16:00	19/04/2024 16:03	0,05	19.801
M03-01BP001	19/04/2024 16:22	19/04/2024 18:00	1,63	19.801

Fonte: Elaborado pelo Autor

É característico de bases extraídas de sistemas de armazenamento de dados operacionais que haja registros de pequenas quedas momentâneas, resets de instrumentação ou oscilações. No entanto, isso atrapalha na interpolação do horímetro, registrando duas falhas com mesma quantidade de horas e atrapalhando o cálculo do MTBF.

Um exemplo disso são os registros consecutivos de parada para o equipamento M03-01BP001, ambos ocorridos no dia 19/04/2024, mostrados na imagem acima. O primeiro registro apresenta um intervalo muito curto — apenas 3 minutos (16:00 a 16:03), resultando em 0,05 horas de parada. Já o segundo evento, iniciado poucos minutos depois (16:22 a 18:00), registra um tempo de 1,63 horas. Ambos, porém, têm o mesmo valor de horímetro, o que inviabilizaria o cálculo do MTBF. Por isso, assumiu-se como padrão considerar a parada mais longa para obter o indicador, uma vez que se aproxima mais de uma intervenção corretiva real.

A interpolação do horímetro foi feita considerando todos os dados de paradas do período, tanto as paradas preditivas e operacionais foram consideradas na interpolação, já que sem elas as lacunas entre paradas corretivas seriam muito grades, isso foi feito a fim de garantir a confiabilidade dos dados. Antes da interpolação, alguns registros de parada não

continham informação referente ao horímetro, possivelmente devido a falhas de registro, como mostra a figura 4.

Figura 5 – Interpolação

Equipamen	Início Parada	Fim Parada	Hrs parada	Horímetro	Horímetro interpolado
M03-01PP001	06/01/2024 09:04	06/01/2024 12:14	3,17	21.002	21.002
M03-01PP001	07/01/2024 08:42	07/01/2024 09:16	0,57		21.022
M03-01PP001	12/01/2024 22:04	12/01/2024 22:40	0,60	21.155	21.155
M03-01PP001	19/01/2024 17:46	19/01/2024 18:52	1,10		21.317
M03-01PP001	21/01/2024 08:52	21/01/2024 11:19	2,45	21.357	21.357

Fonte: Elaborado pelo Autor

### 4.3 Cálculo dos Indicadores Básicos (MTBF e MTTR) por Equipamento

São levados em conta nesse estudo 4 indicadores para interpretar o comportamento real dos equipamentos, conforme descrito na figura abaixo.

Figura 6 – Tabela Resumida

EQUIPAMENTO	MTBR (h)	MTTR (h)	DesvPad (h)	Número de falhas
AGITADOR 1	249,28	0,14	0,16	10
AGITADOR 2	242,05	1,16	1,91	25
BOMBA DE CARGA 1	1005,23	4,93	6,66	12
BOMBA DE CARGA 2	1142,33	5,03	4,09	13
BOMBA PRINCIPAL 1	581,84	5,58	8,19	17
BOMBA PRINCIPAL 2	565,29	4,33	6,18	43
BOMBA PRINCIPAL 3	824,61	2,74	4,59	15
BOMBA PRINCIPAL 4	639,18	6,90	8,59	41
BOMBA PRINCIPAL 5	586,72	3,29	4,64	19
BOMBA PRINCIPAL 6	609,53	3,95	6,45	25

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para avaliar a confiabilidade dos equipamentos neste estudo, utilizou-se como referência principal o MTBF final — calculado com base na última falha ocorrida no intervalo em análise. Conforme discutido anteriormente, nos sistemas reparáveis, o MTBF pode ser obtido pelo inverso da taxa de ocorrência de falha ( $\lambda$ ), que tende a mostrar uma evolução descendente, visto que, no início do período de análise, são registradas poucas falhas, e  $\lambda$  é, portanto, artificialmente baixa, inflacionando os primeiros valores do indicador. Conforme ocorrem mais falhas,  $\lambda$  se eleva e o MTBF se ajusta para refletir valores menores, sinalizando a real condição do equipamento. É por isso que o MTBF final é o parâmetro mais apropriado para indicar o estado consolidado de confiabilidade ao término do período analisado.

Há uma relação direta entre MTBF e a manutenção: quanto mais frequentes são as falhas (ou seja, quanto menor o MTBF), maior é a necessidade de intervenções corretivas,

o que se traduz em um aumento na demanda da equipe de manutenção. Equipamentos com MTBF inferiores requerem uma maior alocação de recursos humanos. Ao contrário, dispositivos com um alto MTBF falham menos e exigem menos ações corretivas.

Para analisar a manutenibilidade dos ativos foi usado o MTTR, calculado, como elucidado anteriormente, a partir das médias dos tempos de parada por equipamento. É importante também a análise de seu desvio padrão para considerar a variabilidade de tempos de reparo dos equipamentos. Foram obtidos valores muito variados de MTTR, o que se justifica devido a variáveis não alisadas neste estudo, como eficiência da equipe e nível de complexidade envolvido em cada reparo.

#### 4.4 Análise da Tendência das Falhas (Teste de Tendência, Laplace ou Gráfico TTT)

Diante da ausência de aderência dos métodos tradicionais de distribuição conforme mostrado na seção anterior, optou-se pela aplicação de um modelo específico para sistemas reparáveis. Para isso foi aplicado a Curva de Crescimento Paramétrica (NHPP – Processo de Lei de Potência), ajustada pelo método de Máxima Verossimilhança. O objetivo da seção é mostrar os resultados desse método e discutir os resultados.

A figura 6 apresenta as estimativas dos parâmetros do modelo, com seus respectivos erros-padrão e intervalos de confiança de 95%.

Figura 7 – Estimativas de Parametro

Estimativas dos Parâmetros				
Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	IC Normal de 95%	
			Inferior	Superior
Forma	3,05967	0,183	2,72057	3,44104
Escala	11685,6	783,086	10247,3	13325,8

Fonte: Elaborado pelo Autor

O parâmetro de forma  $\beta \approx 3,06$  ( $> 1$ ) indica que a taxa de falhas cresce ao longo do tempo, o que indica que os equipamentos estão em deterioração acelerada, algo muito comum em equipamentos da indústria de mineração. O parâmetro de escala  $\eta \approx 11685$  define a posição da curva e está condicionado ao horizonte operacional a partir do qual o acúmulo de falhas se intensifica.

A figura 7 apresenta o teste de igualdade dos parâmetros de forma, que avalia se os equipamentos compartilham o mesmo comportamento de tendência.

Figura 8 – Teste para os Parâmetros Igualdade e Forma

### Teste para os Parâmetros de Igualdade de Forma

Qui-Quadrado da Razão de Verossimilhanças Modificada de Bartlett

Estatística de teste	13,04
Valor-p	0,161
GL	9

Fonte: Elaborado pelo Autor

O valor-p = 0,161 indica que não há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese de igualdade de forma. Ou seja, apesar de apresentarem frequências distintas de falha, os equipamentos seguem uma tendência de crescimento de falha semelhante.

Os testes de tendência foram aplicados para verificar se a ocorrência de falhas ao longo do tempo apresenta comportamento aleatório ou se existe tendência estatisticamente significativa, conforme representado 8.

Figura 9 – Teste de Tendência

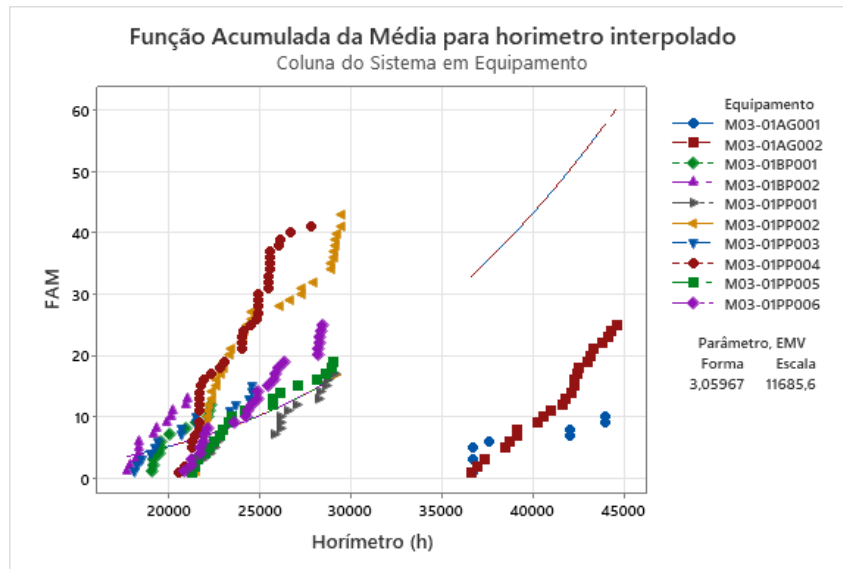
Testes de Tendência					
	MIL-Hdbk-189		Laplace		Anderson-Darling
	Baseado em TTT	Combinado	Baseado em TTT	Combinado	
Estatística de teste	102,47	63,54	15,30	17,97	125,46
Valor-p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
GL	438	420			

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os testes indicaram um valor-p de 0,000 em todos os casos, o que levou à rejeição da hipótese de uma taxa de falhas constante e confirmou uma tendência crescente ao longo do tempo. Esse resultado é mais uma confirmação do que os parâmetros do modelo já haviam indicado e valida o uso do processo de Lei de Potência.

A Figura 9 apresenta a Função Acumulada da Média (FAM), que ilustra visualmente o acúmulo de falhas por equipamento ao longo do tempo.

Figura 10 – Grafico FAM

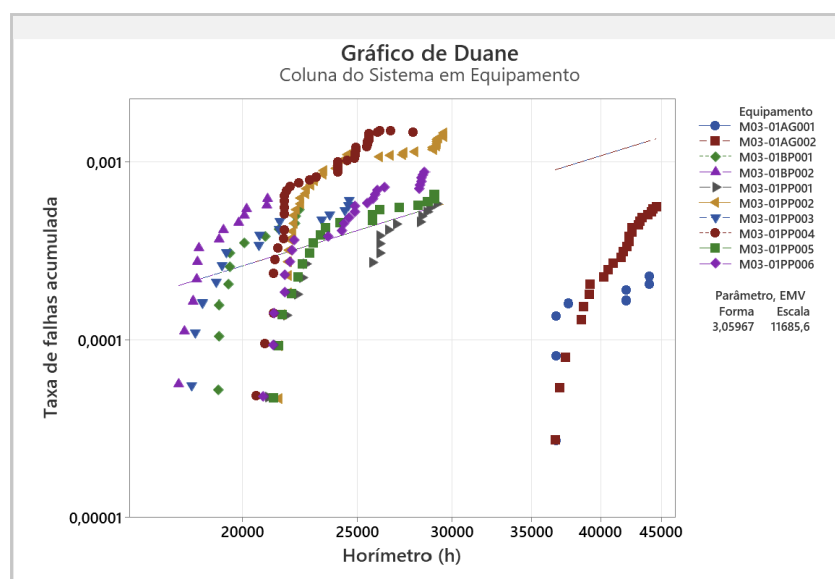


Fonte: Elaborado pelo Autor

As curvas côncavas para cima ( $\beta > 1$ ) confirmam aumento progressivo da quantidade acumulada de falhas, consistente com sistemas em deterioração. Equipamentos como PP002 (Bomba Principal 2) e PP004 (Bomba Principal 4) exibem crescimento mais acelerado, refletindo maior severidade operacional. A inclinação das curvas e o alinhamento com o modelo reforçam a presença de tendência crescente.

O comportamento da taxa de falhas acumulada foi analisado por meio do Gráfico de Duane, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 11 – Grafico de Duane



Fonte: Elaborado pelo Autor

A inclinação positiva das curvas em escala log-log evidencia crescimento da ROCOF,



característica típica de processos NHPP com  $\beta > 1$ . Esse comportamento visual converge com os testes estatísticos, confirmando que o sistema opera em regime de deterioração contínua.

Os resultados da modelagem paramétrica, dos testes de tendência e dos gráficos FAM e Duane, quando considerados em conjunto, evidenciam que os equipamentos analisados constituem um sistema reparável que opera em um regime de deterioração, apresentando uma taxa de falhas que está aumentando. Esses achados descrevem com precisão o comportamento que foi observado e servem de fundamento para discussões sobre confiabilidade, manutenção corretiva e esforço da equipe.

## 4.5 Síntese Integrada dos Indicadores de Confiabilidade e Manutenibilidade

Essa seção apresenta a integração dos indicadores clássicos calculados no estudo. O objetivo é discutir o comportamento dos equipamentos analisados, trazer as diferenças entre eles e relacionar os resultados com a equipe de manutenção corretiva.

### 4.5.1 Bombas Principais – Maior criticidade e maior demanda de manutenção

As bombas principais, de pistão, são responsáveis por manter a pressão do mineroduto e bombear polpa de minério por dezenas de quilômetros. Elas apresentam valores baixos de MTBF, o que indica uma grande frequência de falhas corretivas ao longo do ano. Esse resultado é coerente com a função desempenhada por esse conjunto de bombas, uma vez que elas operam de forma contínua e com grande pressão hidráulica, fatores que influenciam a taxa de falhas.

O MTTR das bombas principais, embora variado, tende a ser maior que os dos demais equipamentos porque estas integram um arranjo de alta complexidade, no qual inúmeras partes e dispositivos de apoio podem falhar simultaneamente ou de forma encadeada. Essa característica prolonga as etapas de diagnóstico e localização de pane, demandando maior tempo e esforço da equipe de manutenção corretiva.

### 4.5.2 Bombas de Carga – Comportamento estável e intervalos maiores entre falhas

As bombas de carga resultaram nos maiores valores de MTBF obtidos pelo estudo, ou seja, demonstram menor frequência de falhas ao longo do ano. Isso é coerente devido ao fato de trabalharem em condições operacionais menos severas que as bombas principais e de atuarem em regime redundante (enquanto uma para, a outra mantém seu funcionamento habitual).

Durante todo o período analisado, o MTTR das bombas de carga (BP) permaneceu alto, uma vez que a parada de um desses equipamentos não compromete o sistema produtivo, permitindo melhor planejamento das ações corretivas e maior tempo de reparo. Mesmo apresentando altos valores de MTTR.

#### 4.5.3 Agitadores – Falhas esporádicas e reparos rápidos

Os agitadores de polpa são um caso à parte no conjunto de equipamentos que foram analisados. Mesmo sendo ativos muito importantes para o funcionamento do mineroduto, já que são responsáveis pela homogeneização da polpa e evitam a sedimentação no tanque de estocagem, os dados de manutenção corretiva indicam os menores valores de MTBF, que refletem grande número de falhas. Isso pode ser explicado pelo fato de que, dada sua criticidade, estes equipamentos possuem sistemas mais sensíveis a pequenas avarias, o que aciona a equipe de manutenção corretiva mais vezes para evitar consequências mais deletérias ao processo de produção.

Ao mesmo tempo, o MTTR dos agitadores foram os menores entre os equipamentos analisados. Esse comportamento vem da alta dependência de estratégias preditivas e preventivas, amplamente adotadas para evitar a interrupção da operação. Como a perda momentânea de agitação compromete diretamente a integridade operacional do sistema, uma boa parcela das manutenções nesses equipamentos é pensada de forma antecipada, o que reduz significativamente o tempo de reparo, com falhas simples de resolver. É importante ressaltar que esse indicador não representa toda a complexidade das intervenções habituais nesses ativos, uma vez que as atividades de maior envergadura — normalmente de difícil acesso e que exigem mais recursos — não estão representadas na amostra por serem, na sua maioria, preventivas ou preditivas.

#### 4.5.4 Síntese Final da Seção

Os resultados indicam que as bombas principais são responsáveis pela maior parte das falhas, demandando assim um esforço operacional significativamente maior da equipe de manutenção. Diferentemente, as bombas de carga e os agitadores têm um comportamento mais estável, estas porque, mesmo falhando, não comprometem a operação devido ao regime de redundância e por isso permitem melhor programação dos reparos, e aquelas porque, ao falharem, precisam de correções imediatas devido a sua criticidade. A análise conjunta dos indicadores tradicionais oferece uma visão clara da dinâmica operacional e da distribuição do esforço corretivo ao longo do ano na empresa analisada.

## 5 Conclusões e Considerações Finais

A análise conjunta dos indicadores de confiabilidade e manutenibilidade destacou as diferenças no comportamento dos equipamentos analisados, evidenciando os diferentes níveis de esforço que a equipe de manutenção corretiva da estação de bombeamento precisa empregar para repará-los. Os dados de MTBF e MTTR, mostraram-se coerentes com os resultados estatísticos obtidos pelos testes de tendência e estimativas de parâmetro, evidenciando a relevância de se avaliar a frequência das falhas e o tempo de recuperação delas.

Os agitadores (AG001 e AG002) mostraram os menores números de MTBF da estação, o que significa que estavam falhando com frequência ao longo do ano. No entanto, seus tempos de reparo médios foram drasticamente reduzidos, muitas vezes para menos de uma hora, o que levou a um impacto operacional quase insignificante.

As bombas de carga (BP001 e BP002) foram os equipamentos mais confiáveis, apresentaram os maiores valores MTBF e um número mínimo de falhas durante o período analisado. Os seus tempos médios de reparo, apesar de serem mais longos do que os dos agitadores, permaneceram em níveis moderados, assegurando baixo impacto acumulado no esforço da equipe. Isso evidencia que as bombas de carga têm uma operação mais estável e menos propensa a falhas entre intervenções, necessitando de manutenções menos frequentes e com um nível de complexidade mais gerenciável.

No entanto, as bombas principais (PP001 a PP006) foram as que mais exigiram a equipe de manutenção corretiva. Embora seus valores de MTBF estejam na média, estes equipamentos tiveram o maior número de falhas absolutas, com algumas ultrapassando quarenta ocorrências no ano, e exibiram tempos médios de reparo muito superiores aos outros ativos. O alto MTTR e a frequente taxa de falhas impuseram uma carga operacional bem maior à equipe, o que realça a complexidade dos mecanismos, seu desgaste progressivo e a importância crítica desses equipamentos para a operação do mineroduto. Além disso, a maior imprevisibilidade dos intervalos entre manutenções implica a necessidade de ações corretivas e de um planejamento mais rigoroso.

De maneira geral, os resultados sustentam a adequação dos tradicionais indicadores — notadamente o MTBF e o MTTR — para caracterizar o esforço necessário à manutenção corretiva em sistemas reparáveis. Isso permitiu identificar quais equipamentos têm o maior impacto na carga de trabalho da equipe e como as falhas se distribuem entre as várias categorias de ativos. Dessa maneira, os resultados obtidos enfatizam a aplicação desses indicadores na administração da manutenção, fornecendo bases consistentes para as decisões operacionais e estratégicas da organização.

O trabalho trouxe importantes contribuições tanto para o conhecimento do desempenho dos equipamentos críticos da estação de bombeamento quanto para a análise do esforço da equipe de manutenção corretiva, utilizando indicadores clássicos da engenharia da confiabilidade. A grande contribuição está em mostrar que métricas bem estabelecidas, como o MTBF e o MTTR, quando observadas de maneira conjunta, são capazes de descrever a carga de trabalho ligada às intervenções corretivas.

Além disso, a pesquisa também estabeleceu um método sistemático para o tratamento e organização dos dados de manutenção. Foram filtradas sistematicamente, removidas inconsistências que inviabilizariam a interpolação e reconstruídas as horas de operação para obter uma base estatisticamente íntegra, fundamental para uma estimativa precisa dos indicadores de desempenho. Essa sistematização, que pode ser aplicada em diferentes contextos industriais, ressalta a necessidade de dados de qualidade para análises de confiabilidade, além de proporcionar maior segurança nas decisões gerenciais.

Finalmente, o estudo evidenciou diferenças estruturais entre os grupos de equipamentos — como a elevada carga operacional associada às bombas principais e a robustez das bombas de carga — contribuindo para um entendimento mais claro do comportamento operacional e da demanda real por manutenção em sistemas reparáveis utilizados no transporte de polpa de minério.

É importante levar em conta algumas limitações do estudo ao interpretar os resultados. A primeira limita-se ao tempo de estudo adotado, que é o ano de 2024. Análise de apenas um ano, apesar de ser suficiente para estimar o MTBF e o MTTR, não leva em consideração as possíveis variações sazonais ou tendências de longo prazo no comportamento das falhas. Mudanças operacionais, como quantidade de polpa bombeada por um período, podem afetar os indicadores.

Outro ponto é, a pesquisa se concentrou nos indicadores tradicionais de confiabilidade, sem levar em conta os fatores operacionais que impactam a eficiência da equipe de manutenção — como a disponibilidade da equipe, a logística de reparo, as condições operacionais específicas e os modos de falha individuais. Portanto, apesar de os resultados refletirem bem o comportamento geral dos equipamentos, análises adicionais podem apresentar melhor as razões e implicações dos padrões observados.

É necessário acrescentar que ainda não foi possível validar os resultados junto a empresa.

Para enriquecer as análises, investigações futuras poderão incluir séries temporais mais extensas, o que possibilitará identificar tendências de deterioração ao longo do tempo, e padrões sazonais de falha. Seria interessante também incluir variáveis operacionais que impactam diretamente o esforço da equipe, como o número de técnicos por turno, tempo de deslocamento até os equipamentos e a disponibilidade de materiais e ferramentas.

A gestão precisa melhorar a forma como analisa as falhas das bombas principais. Isso ajuda a identificar quais peças costumam quebrar com mais frequência, permitindo deixá-las disponíveis e reduzir o tempo perdido com logística. Além disso, entender melhor esses padrões ajuda a treinar a equipe de manutenção para resolver mais rápido os problemas que acontecem sempre.

# Referências

ABNT, NBR. 5462. Confiabilidade e manutenibilidade. *Rio de Janeiro*, v. 6, 1994. Citado 6 vezes nas páginas 11, 14, 15, 29.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade*. Rio de Janeiro, 1994. Norma Técnica. Citado 1 vez na página 17.

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. *Numerical Methods for Engineers*. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2010. Citado 1 vez na página 19.

CROW, L. D. *Reliability Analysis for Complex Repairable Systems*. Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1974. Citado 4 vezes nas páginas 23, 25.

ELSAIED, Ahmed. *Reliability Engineering*. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2012. ISBN 9781118217986. Citado 1 vez na página 24.

GIL, Antonio Carlos. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. Citado 1 vez na página 26.

HILDEBRAND, Francis Begnaud. *Introduction to Numerical Analysis*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1956. Citado 1 vez na página 19.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. *Manutenção-função estratégica*. Qualitymark Editora Ltda, 2009. Citado 7 vezes nas páginas 11, 12, 14–16.

MEEKER, William Q; ESCOBAR, Luis A; PASCUAL, Francis G. *Statistical methods for reliability data*. John Wiley & Sons, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 23, 25.

MEHTA, R. K.; UFFENBECK, J. E. *Statistical Methods for Reliability Engineering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989. ISBN 9780138429630. Citado 1 vez na página 18.

MINITAB, LLC. *Minitab Statistical Software: User Guide*. State College, PA, 2021. Available at: <https://support.minitab.com>. Citado 1 vez na página 24.

MOBLEY, R. Keith. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 9780750675314. Citado 2 vezes nas páginas 14, 17.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. ISBN 9788521634540. Citado 1 vez na página 24.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. ISBN 9788521634540. Citado 4 vezes nas páginas [20](#), [21](#), [29](#).

MORETTIN, Pedro A.; TOLOI, Carlos M. *Estatística Básica*. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2018. ISBN 9788543024963. Citado 1 vez na página [19](#).

MOUBRAY, John. *Reliability-Centered Maintenance*. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997. Citado 1 vez na página [16](#).

NAKAJIMA, Seiichi. *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988. ISBN 0915299232. Citado 1 vez na página [17](#).

PINTO, A.; XAVIER, J. N. *Manutenção: Função Estratégica*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1999. ISBN 9788573030737. Citado 2 vezes nas páginas [14](#), [17](#).

RIBEIRO, José Luiz Duarte; FOGLIATTO, Flávio Sanson. *Confiabilidade e manutenção industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. Citado 17 vezes nas páginas [11](#), [12](#), [14–18](#), [20](#), [21](#), [23](#).

TAVARES, L. A. *Manutenção: Função Estratégica*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2000. ISBN 9788573033202. Citado 2 vezes nas páginas [11](#), [14](#).

VIANA, Adilson Carlos. *Planejamento e Controle da Manutenção*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. ISBN 9788573035459. Citado 4 vezes nas páginas [11](#), [14](#), [16](#), [17](#).

XENOS, Harilaos N. G. D. *Gerenciando a Manutenção Produtiva*. 2. ed. São Paulo: Falconi, 2014. ISBN 9788593030035. Citado 2 vezes nas páginas [11](#), [15](#).