UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROPOSTA DE PROJETO DE GRADUAÇÃO

MATEUS BARLEZ PEDRUZZI

ANÁLISE DE VIDA DE COMPRESSORES DE LOCOMOTIVAS DIESEL/ ELÉTRICA

VITÓRIA
2023

MATEUS BARLEZ PEDRUZZI

ANÁLISE DE VIDA DE COMPRESSORES DE LOCOMOTIVAS DIESEL/ ELÉTRICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Mateus Barlez Pedruzzi, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador(a)

Prof. Dr. José Luiz Borba
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador(a)

VITÓRIA
2023

MATEUS BARLEZ PEDRUZZI

ANÁLISE DE VIDA DE COMPRESSORES DE LOCOMOTIVAS DIESEL/ ELÉTRICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Mateus Barlez Pedruzzi, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Jussara Farias Fardin

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Orient

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE LUIZ BORBA
Data: 20/12/2023 19:13:11-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. José Luiz Borba
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador(a)

Documento assinado digitalmente
gov.br WALBERMARK MARQUES DOS SANTOS
Data: 20/12/2023 15:28:31-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.Dr. Walbermark Marques do Santos
Universidade Federal do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente
gov.br HELIO MARCOS ANDRE ANTUNES
Data: 21/12/2023 09:30:40-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Universidade Federal do Espírito Santo

VITÓRIA
2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram de maneira significativa para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço à minha família e amigos pelo constante apoio e incentivo ao longo dessa jornada. Suas palavras de encorajamento foram essenciais para superar os desafios e alcançar os objetivos propostos.

De maneira especial, dedico meu agradecimento à Roberta Alves Cortat, cujo apoio e compreensão foram fundamentais durante todo o processo. Sua contribuição foi crucial para o desenvolvimento deste trabalho, e sou imensamente grato pela parceria.

À professora Jussara Farias Fardin e ao professor José Luiz Borba, expresso minha sincera gratidão pela orientação acadêmica e valiosos *insights* fornecidos ao longo desta pesquisa. Seu comprometimento e *expertise* foram essenciais para a qualidade e relevância deste trabalho.

Aos engenheiros Warley Gleidson Lage e Alanderson Dalmaso, meu reconhecimento pela assistência valiosa. Sua orientação técnica e contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento das análises, enriquecendo o conteúdo deste estudo.

A todos que, de alguma forma, colaboraram para o sucesso deste trabalho, meu muito obrigado. Vocês foram peças-chave neste percurso acadêmico, e esta conquista é fruto do esforço coletivo.

A Deus, aos meus pais e aos demais familiares e amigos pelo apoio.

Sem dados você é apenas mais uma pessoa com uma opinião. (DEMING, Willian Edwards, 1960)

RESUMO

O transporte ferroviário desempenha um papel fundamental no Brasil, um país de dimensões continentais e grande exportador de *commodities*. No contexto do transporte de cargas, especialmente de grandes volumes, como o minério de ferro, o sistema de freio é essencial para manter a velocidade e proporcionar paradas de emergência nos trens. Nesse sentido, o correto funcionamento do conjunto de compressor, principal componente da produção de ar do sistema de freio, e sua confiabilidade estão diretamente relacionados à definição adequada do plano de manutenção. Este trabalho apresenta uma Análise de Dados de Vida (LDA) dos compressores das locomotivas para transporte de minério de ferro juntamente com um referencial teórico detalhado dos componentes presentes nesse sistema. O objetivo é analisar a confiabilidade desses equipamentos e fornecer subsídios para revisar a estratégia de manutenção, incluindo a periodicidade do plano preventivo. Para isso, serão utilizados dados reais de manutenção registrados em um sistema informatizado, analisando-se ordens e notas de manutenção e classificando-as de acordo com sua natureza. Para isso, foi utilizado o *software* Weibull++ que foi empregado para aplicar modelos estatísticos e analisar as curvas de densidade de probabilidade e confiabilidade dos compressores. É importante ressaltar que se trata de uma referência bibliográfica, baseada em estudos e análises pré-existentes, fornecendo *insights* sobre a aplicação da Análise de Dados de Vida e a otimização da estratégia de manutenção em um contexto específico de transporte ferroviário de minério de ferro.

Palavras-chave: Manutenção de Vagões. Análise de Dados de Vida. Análise de Confiabilidade. Compressor.

ABSTRACT

Rail transportation plays a fundamental role in Brazil, a country with continental dimensions and a major exporter of commodities. In the context of freight transport, especially for large volumes such as iron ore, the braking system is essential for maintaining speed and providing emergency stops in trains. In this regard, the proper functioning of the compressor assembly, the primary component of the air production system for the braking system, and its reliability are directly related to defining an appropriate maintenance plan. This work presents a Life Data Analysis (LDA) of the compressors in locomotives for the transport of iron ore, along with a detailed theoretical framework of the components present in this system. The objective is to analyze the reliability of these equipment and provide insights to revise the maintenance strategy, including the periodicity of the preventive plan. For this purpose, real maintenance data recorded in a computerized system will be used, analyzing work orders and maintenance notes and classifying them according to their nature. The Weibull++ software has been employed to apply statistical models and analyze the probability density and reliability curves of the valves. It is important to emphasize that this is a bibliographic reference, based on existing studies and analyses, providing insights into the application of Life Data Analysis and the optimization of the maintenance strategy in a specific context of iron ore rail transport.

Keywords: Wagon Maintenance. Life Data Analysis. Reliability Analysis. Compressor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema simplificado do Sistema de Freio a Ar Direto 24
Figura 2.2 – Esquema simplificado do Sistema de Freio a Ar Automático 24
Figura 2.3 – Sistema de alimentação de ar comprimido 27
Figura 2.4 – Compressor alternativo 28
Figura 2.5 – Compressor acionado diretamente pelo motor diesel 29
Figura 2.6 – Compressor acionado por motor elétrico 29
Figura 2.7 – Resfriador intermediário refrigerado a água.....31
Figura 2.8 – Resfriador intermediário refrigerado por ventilação forçada.....31
Figura 2.9 – Posicionamento da válvula de segurança do resfriador intermediário ..32
Figura 2.10 – Dreno de óleo lubrificante do compressor.....34
Figura 2.11 – Localização dos reservatórios principais.....36
Figura 2.12 – Manômetros duplos de ar.....38
Figura 2.13 – Chave pressostática CCS e Válvula magnética CGS 38
Figura 2.14 – Filtro centrífugo e Secador de ar por adsorção 39
Figura 3.1 – Função Densidade de Probabilidade (PDF).....42
Figura 3.2 – Curva da banheira idealizada.....43
Figura 3.3 – Dados Agrupados.....44
Figura 3.4 – Dados de Censura à Direita 45
Figura 3.5 – Dados Completos.....46
Figura 3.6 – Representação da Curva da Banheira. 47
Figura 3.7 – Pdf e cdf para distribuição Weibull 49
Figura 4.1 – Evolução das notas de manutenção. 53
Figura 4.2 – Teste de aderência.....54
Figura 4.3 – Tabela de dados do Testes de Aderência. 55
Figura 4.4 – Gráfico da pdf (Tempo entre falhas).....56
Figura 4.5 – Gráfico da pdf (vida vs Consumo). 57
Figura 4.6 – Gráfico da pdf (Consumo). 57
Figura 4.7 – Probabilidade para Uso Normal Weibull (Tempo entre falhas).....58
Figura 4.8 – Probabilidade para Uso Normal Weibull (Vida vs Consumo). 59
Figura 4.9 – Probabilidade para Uso Normal Weibull (Consumo). 60
Figura 4.10 – Confiabilidade vs Tempo (Tempo entre falhas).....61
Figura 4.11 – Confiabilidade vs Tempo (Consumo). 61

Figura 4.12 – Desvio-Padrão vs Estresse (Vida vs Consumo).....62
Figura 4.13 – Resíduos Padronizados. 63
Figura 4.14 – Taxa de Falha 64
Figura 4.15 – Vida vs Estresse.....66
Figura 4.16 – Dados da Simulação. 67
Figura 4.17 – Vida Média (Tempo entre Falhas). 67
Figura 4.18 – Vida Média (Consumo).....68
Figura 4.19 – Confiabilidade (Plano de 5 anos) 68
Figura 4.20 – Vida B50% (Tempo entre falhas). 69
Figura 4.21 – Vida B50% (Litros entre falhas).....69
Figura 4.22 – Confiabilidade e probabilidade de falha (Tempo entre falhas). 70
Figura 4.23 – Confiabilidade e probabilidade de falha (Consumo).....70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTT	Agência Nacional de Transportes terrestres
LDA	*Life Data Analysis*
CMV	Válvula Magnética do Compressor
EXC	Controlador de Excitação
CGS	Chave do Governador do Compressor
CDC	Contatores do Motor do Compressor
COM	Motor de Acionamento do Compressor de Ar
ACS	Sensor de Velocidade do Motor do Compressor de Ar
MTBF	Tempo médio entre falhas
MTTR	Tempo médio de reparo
RCA	Análise de causa raiz
FTA	Análise de árvore de falhas
FMEA	Modos e efeitos de falha
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
LKV	*Likelihood value*
YCO	Nota de Manutenção Corretiva não Emergencial
YCM	Nota de Manutenção Condicional
YEM	Nota de Manutenção Emergencial
PDF	Função Densidade de Probabilidade
CDF	Função de Distribuição Acumulada de Falha

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
1.1. Premissas e Problemas de Pesquisa 17
1.2. Objetivo 20
1.3. Objetivo Geral 20
1.4. Objetivos Específicos 20
1.5. Justificativa 20
1.6. Procedimentos Metodológicos 20
1.7. Estrutura do trabalho 21
2. SISTEMA DE FREIO 23
2.1. Funcionamento do Sistema de Freio Pneumático: Papel Essencial do Compressos 26
2.2. Compressor: Estrutura Interna e Princípios de Funcionamento 27
2.3. Produção de Ar 30
2.4. Funcionamento do compressor 30
2.5. Manutenção 33
2.6. Controle 34
2.7. Principais Componentes 35
2.8. Armazenamento 36
2.8.1. Reservatório 36
2.9. Condicionamento de Ar 37
2.10. Síntese e conclusão 39
3. CONFIABILIDADE E ANÁLISE DE DADOS DE VIDA 40
3.1. Confiabilidade 41
3.2. Dados de Vida 41
3.3. Dados Agrupados 43
3.4. Dados Suspensos ou Censurados 45
3.5. Dados Completos 46
3.6. Modelos Estatísticos na Análise de Dados de Vida 46
3.7. Distribuição Normal: 47
3.8. Distribuição Lognormal: 48
3.9. Distribuição de Weibull: 48
3.10. Síntese e Conclusão do Capítulo 50

4. RESULTADOS 51
4.1. Simulação 53
4.2. Análise Gráfica 53
4.3. Síntese e Conclusão do Capítulo 70
5. CONCLUSÕES 72
6. TRABALHOS FUTUROS 724
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75

1. INTRODUÇÃO

No âmbito de transporte o crescimento acelerado da exploração de minério no Brasil tem impulsionado o setor ferroviário a se adaptar e responder a essa demanda em constante expansão. Atualmente o Brasil conta com uma malha ferroviária de mais de 30 mil quilômetros (CNT, 2023) responsável por aproximadamente 21% da matriz de transporte brasileira (CTN). Essa ampla infraestrutura ferroviária desempenha um papel fundamental na movimentação de mercadorias em território nacional, proporcionando uma alternativa logística eficiente e sustentável. Com o aumento na produção e exportação de minerais, torna-se necessário um sistema de transporte eficiente e confiável para atender às necessidades logísticas desse setor. As locomotivas diesel elétricas se destacam quando o assunto é transporte em larga escala como de minério, devido à sua capacidade de lidar com grandes volumes de carga em trajetos longos e desafiadores. No entanto, essa crescente atividade de transporte apresenta desafios únicos para a manutenção e confiabilidade, neste caso, dos sistemas de freios e compressores das locomotivas.

A busca por confiabilidade e excelência é um objetivo fundamental em diversos setores industriais, incluindo o transporte ferroviário. No contexto das locomotivas diesel elétricas utilizadas no transporte de minério no Brasil, a confiabilidade e o desempenho eficiente dos sistemas de freios e compressores desempenham um papel crucial na garantia da segurança e no cumprimento das demandas operacionais. A capacidade de manter um alto nível de confiabilidade desses equipamentos é essencial para evitar falhas que possam resultar em interrupções operacionais, atrasos, custos adicionais e, o mais importante, riscos à segurança dos funcionários e ao meio ambiente. Nesse sentido, é fundamental adotar abordagens e estratégias de manutenção que visem otimizar a confiabilidade e a disponibilidade desses sistemas. Este trabalho tem como objetivo abordar a análise de vida dos compressores elétricos em locomotivas diesel elétricas, com foco nos sistemas de freios, explorando os desafios enfrentados, as melhores práticas de manutenção e as estratégias implementadas para garantir a confiabilidade e o desempenho excelentes desses equipamentos.

As operações intensivas, as condições ambientais adversas e as longas distâncias percorridas podem levar a um desgaste acelerado desses componentes críticos, aumentando os riscos de falhas e impactando a segurança e a eficiência operacional. Este trabalho de monografia busca explorar a análise de vida dos compressores elétricos em locomotivas diesel elétricas utilizadas no transporte de minério, com o objetivo de investigar os desafios enfrentados, as melhores práticas de manutenção e as estratégias adotadas para assegurar a confiabilidade e o desempenho desses equipamentos em um cenário de crescimento acelerado da exploração mineral no Brasil.

A manutenção e confiabilidade dos sistemas de freios e compressores em locomotivas diesel elétricas desempenham um papel crucial no desempenho eficiente e na segurança desses veículos ferroviários. No contexto brasileiro, onde as locomotivas diesel elétricas desempenham um papel fundamental no transporte de cargas de minério devido à grande exploração desse material no Norte do pais e ainda utiliza algumas linhas para o transporte de passageiros, é essencial compreender a importância da análise de vida dos compressores elétricos e sua relação direta com a funcionalidade dos sistemas de freios, tendo assim uma maior confiabilidade nessa estrutura que desempenha um papel crucial de funcionalidade das locomotivas.

As locomotivas diesel elétricas utilizadas no Brasil são equipamentos complexos projetados para atender a diversas aplicações, desde o transporte de cargas pesadas em longas distâncias até o transporte de passageiros em serviços de passageiros interurbanos. Esses veículos possuem sistemas de freios avançados, onde tem-se um sistema de compressor alimentado por um gerador projetado para garantir a segurança durante a operação e permitir uma desaceleração controlada e eficiente.

Dentro desses sistemas de freios, os compressores elétricos desempenham um papel fundamental. Eles são responsáveis por gerar ar comprimido necessário para acionar os freios pneumáticos, que atuam nas rodas para reduzir a velocidade e parar a locomotiva. Portanto, a disponibilidade operacional e a confiabilidade dos compressores elétricos são essenciais para garantir a eficácia dos sistemas de freios.

A abordagem de Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) proposta por Moubray (1997) será adotada como uma metodologia neste projeto de graduação. A aplicação da MCC no contexto dos sistemas de freios e compressores em locomotivas

diesel elétricas utilizadas no transporte de minério no Brasil permitirá uma análise abrangente e sistemática dos desafios relacionados à manutenção e confiabilidade desses equipamentos. Ao incorporar os princípios e técnicas da MCC, será possível identificar os modos de falha críticos, avaliar seus impactos e desenvolver estratégias de manutenção adequadas para garantir a operacionalidade segura e eficiente das locomotivas. A MCC fornecerá uma estrutura sólida para a análise e tratamento das falhas, contribuindo para a maximização da confiabilidade, disponibilidade e desempenho dos sistemas de freios e compressores em locomotivas diesel elétricas, essenciais no transporte ferroviário de minério no Brasil.

A confiabilidade dos sistemas de freios e compressores em locomotivas diesel elétricas depende de uma série de fatores. A manutenção adequada é um desses fatores essenciais, pois visa prevenir falhas e garantir o bom funcionamento dos componentes. A manutenção pode ser realizada de diferentes formas, desde a manutenção preventiva, que envolve inspeções regulares e substituição de componentes desgastados, até a manutenção preditiva, que utiliza técnicas de monitoramento e análise de dados para identificar problemas antes que ocorram falhas.

A manutenção preventiva baseia-se em programas de manutenção periódica, nos quais são realizadas inspeções regulares dos compressores elétricos e sistemas de freios, substituindo componentes desgastados ou danificados. Essa abordagem busca evitar falhas imprevistas e garantir o bom desempenho dos equipamentos. Já a manutenção preditiva utiliza técnicas avançadas de monitoramento, como análise de vibração, termografia e análise de óleo, para identificar sinais de desgaste ou falhas iminentes. Essas técnicas permitem tomar ações corretivas antes que ocorram falhas, reduzindo os custos de manutenção e aumentando a disponibilidade operacional das locomotivas.

Além da manutenção, a confiabilidade dos compressores elétricos e sistemas de freios também depende da qualidade dos componentes e materiais utilizados em sua fabricação. A seleção de fornecedores confiáveis e o uso de materiais de alta qualidade são aspectos essenciais para garantir a durabilidade e a confiabilidade desses equipamentos. A utilização de peças de reposição originais e a manutenção de um estoque adequado de componentes também são práticas importantes para

minimizar os riscos de falhas e garantir a rápida disponibilidade de peças quando necessário.

A análise de falhas é outra ferramenta importante no estudo da vida útil dos compressores elétricos. Ela permite a identificação das principais causas de falhas e a implementação de ações corretivas para evitar a recorrência desses problemas. A análise de falhas pode ser realizada por meio de técnicas como análise de modos e efeitos de falha (FMEA), análise de árvore de falhas (FTA) e análise de causa raiz (RCA).

Nesse contexto, esta monografia tem como objetivo realizar um estudo abrangente sobre a análise de vida dos compressores elétricos em locomotivas diesel elétricas, com foco nos sistemas de freios. Serão abordados os desafios específicos enfrentados no contexto brasileiro, as melhores práticas de manutenção e as estratégias implementadas para garantir a confiabilidade e o desempenho eficiente dos compressores elétricos.

Ao longo deste texto, será apresentada uma revisão detalhada da literatura existente, explorando os principais conceitos e teorias relacionados à análise de vida, manutenção e confiabilidade de compressores elétricos em locomotivas diesel elétricas. Serão considerados estudos de caso, dados de campo e informações práticas para fornecer uma visão abrangente do assunto.

A análise detalhada realizada nesta monografia permitiu uma conclusão contundente sobre a eficácia das estratégias de manutenção preventiva baseadas no consumo de combustível das locomotivas. Os resultados obtidos revelaram uma confiabilidade significativamente baixa e uma probabilidade de falha elevada, especialmente no que diz respeito às falhas prematuras registradas nos compressores elétricos. Este achado desafia diretamente a abordagem tradicional de manutenção, indicando que o simples monitoramento do consumo de combustível não é uma métrica adequada para antecipar falhas nos compressores. A necessidade de reavaliar e ajustar essa estratégia de manutenção torna-se evidente diante das conclusões desta pesquisa. O estudo destaca a importância de adotar uma abordagem mais abrangente e baseada em dados, como a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), para melhorar significativamente a confiabilidade e a disponibilidade dos compressores elétricos em locomotivas diesel elétricas. Essa mudança de paradigma na estratégia de manutenção não apenas minimiza o risco de falhas prematuras, mas também

promove uma gestão mais eficiente e econômica dos recursos, alinhando-se às demandas operacionais específicas do setor ferroviário.

Dessa forma, espera-se que este texto contribua para a compreensão aprofundada dos desafios da manutenção e da análise de vida dos compressores elétricos em locomotivas diesel elétricas no contexto brasileiro. Com um enfoque específico nos sistemas de freios, pretende-se fornecer informações úteis para profissionais do setor ferroviário, pesquisadores e demais interessados na área. A partir dessas informações, espera-se promover melhorias na confiabilidade, disponibilidade e segurança desses sistemas cruciais para o transporte ferroviário no Brasil.

1.1. Premissas e Problemas de Pesquisa

Neste trabalho, será abordado a importância da manutenção confiável e eficiente dos compressores que alimentam o sistema de freio dos vagões. Para embasar essa pesquisa, considera-se as valiosas contribuições de renomados autores especializados no tema.

De acordo com Moubray (1997), a manutenção centrada na confiabilidade desempenha um papel fundamental na garantia do bom funcionamento dos equipamentos. Seguindo essa premissa, nossa estratégia de manutenção será baseada nos princípios da confiabilidade, visando maximizar a disponibilidade operacional dos compressores.

Smith (1993) destaca a importância de um planejamento cuidadoso e sistemático da manutenção, enfatizando a necessidade de registros detalhados das atividades executadas. Seguindo essa recomendação, mantendo registros precisos de todas as intervenções de manutenção realizadas nos compressores, como datas, atividades executadas, peças substituídas e resultados de testes e análises. Esses registros fornecerão um histórico valioso para análise e avaliação da confiabilidade dos compressores.

A Norma JA 1011 (SAE, 1999) estabelece critérios para a avaliação de processos de manutenção centrados na confiabilidade. Será utilizado esses critérios como base para a nossa metodologia, garantindo a aderência aos padrões e boas práticas reconhecidos internacionalmente.

Além disso, (Monchy, 1989) ressalta a importância da avaliação periódica do desempenho dos equipamentos e da análise de falhas. Seguindo essa abordagem, foram realizadas avaliações regulares do desempenho dos compressores por meio de testes e medições apropriadas. Ao analisar as falhas ocorridas, busca-se identificar suas causas raiz e propor soluções para preveni-las no futuro.

Diante da necessidade de alinhar a estratégia de manutenção aos requisitos operacionais dos ativos e considerando as diretrizes estratégicas da empresa, foram estabelecidas algumas premissas que serão adotadas para a classificação dos eventos nessa análise de vida dos sistemas de compressores dos vagões. Essas premissas visam fornecer direcionamento e critérios claros para a interpretação dos dados e a definição dos parâmetros de confiabilidade. Algumas das premissas adotadas são:

- Registro completo dos eventos: Todos os eventos de falha, manutenções preventivas, corretivas, inspeções e demais ocorrências relacionadas aos sistemas de compressores dos vagões devem ser registradas de forma completa e precisa em uma base de dados centralizada.
- Tempo de operação: Será considerado o tempo de operação dos sistemas de compressores, ou seja, o tempo decorrido desde a instalação até a data de análise, como um indicador importante para a análise de vida. Isso permitirá compreender o desempenho dos sistemas ao longo do tempo e identificar possíveis variações ou tendências.
- Classificação dos eventos: Os eventos registrados serão classificados de acordo com a natureza e a gravidade das falhas. Isso inclui categorizar as falhas em função do modo de falha, do impacto na operação dos sistemas e das ações corretivas adotadas.
- Manutenção preventiva: Será adotada uma estratégia de manutenção preventiva, considerando prazos e recomendações dos fabricantes para a substituição de componentes-chave dos sistemas de compressores. Isso garantirá a manutenção regular dos equipamentos e a prevenção de falhas prematuras.
- Análise de desempenho: Será realizada uma análise detalhada do desempenho dos sistemas de compressores, incluindo indicadores como taxa de falhas, tempo médio entre falhas (MTBF) e tempo médio de reparo (MTTR).

Isso permitirá identificar possíveis pontos de melhoria na estratégia de manutenção e no projeto dos sistemas.

Essas premissas serão fundamentais para orientar a análise de vida dos sistemas de compressores dos vagões, fornecendo uma base sólida para a compreensão da confiabilidade dos equipamentos e o desenvolvimento de recomendações pertinentes para aprimorar a estratégia de manutenção. O problema de pesquisa que orientará este estudo é o seguinte: Como garantir a confiabilidade dos compressores que alimentam o sistema de freio dos vagões, por meio de uma estratégia de manutenção eficiente e orientada pela confiabilidade?

Para responder a essa pergunta, utilizaremos os dados disponíveis, como registros de manutenção, informações de desempenho e histórico de falhas, aplicando técnicas e ferramentas de confiabilidade sugeridas pelos autores mencionados. Através da análise desses dados, buscamos identificar áreas de melhoria na estratégia de manutenção e desenvolver recomendações específicas para otimizar a gestão da manutenção dos compressores.

Espera-se que os resultados deste estudo forneçam subsídios práticos para a empresa no aprimoramento da confiabilidade e do desempenho dos compressores, visando a redução de falhas e a maximização da disponibilidade operacional dos vagões. As recomendações propostas poderão guiar a tomada de decisão dos gestores de manutenção, direcionando investimentos e recursos de forma eficiente, além de contribuir para a segurança e eficácia das operações ferroviárias da empresa.

Ao obter um entendimento mais aprofundado sobre a confiabilidade dos compressores e ao implementar medidas preventivas e corretivas adequadas, espera-se alcançar melhorias significativas na disponibilidade dos vagões e na eficiência geral do sistema de freio. Esses resultados terão um impacto direto no desempenho operacional, na produtividade e na segurança das operações ferroviárias.

Portanto, este trabalho tem como objetivo principal contribuir para aprimorar a confiabilidade e o desempenho dos compressores, fornecendo diretrizes e recomendações embasadas em análises estatísticas e práticas recomendadas pelos especialistas da área. Ao implementar as melhorias propostas, espera-se que a empresa obtenha uma gestão de manutenção mais eficiente e confiável, resultando em uma operação ferroviária mais segura, econômica e eficaz.

1.2. Objetivo

Considerando a questão motivadora deste trabalho, é importante detalhar os objetivos geral e específicos que irão orientar esta pesquisa.

1.3. Objetivo Geral

Realizar uma análise de confiabilidade dos sistemas de compressores em vagões ferroviários, utilizando dados históricos, a fim de fornecer subsídios para aprimorar a estratégia de manutenção.

1.4. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Identificar os principais modos de falha e padrões de ocorrência dos sistemas de compressores.
- Avaliar a confiabilidade dos sistemas de compressores por meio de técnicas estatísticas e ferramentas de análise de dados.
- Identificar oportunidades de melhoria na estratégia de manutenção dos sistemas de compressores, com base nos resultados da análise de vida.

Esses objetivos específicos serão conduzidos de forma integrada, visando alcançar o objetivo geral de compreender a confiabilidade dos sistemas de compressores e propor melhorias na estratégia de manutenção dos vagões ferroviários.

1.5. Justificativa

A justificativa deste trabalho reside na importância da análise de confiabilidade dos sistemas de compressores em vagões ferroviários, utilizando dados históricos, visando aprimorar a estratégia de manutenção, garantir a segurança operacional, reduzir custos e melhorar a eficiência do transporte ferroviário.

1.6. Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho consistem em uma abordagem baseada em análise de dados históricos dos sistemas de compressores

em vagões ferroviários. O primeiro passo envolve a coleta e organização dos dados disponíveis, que abrangem informações sobre falhas, eventos de manutenção, inspeções e demais registros relevantes.

Em seguida, a utilização do *software* Weibull++ 11 para a análise dos dados coletados. O *software* será empregado na aplicação de modelos estatísticos e na análise das curvas de densidade de probabilidade de falha e de confiabilidade. Por meio dessas análises, será possível obter informações relevantes sobre a vida útil dos sistemas de compressores e a confiabilidade. Essas informações serão fundamentais para o desenvolvimento de recomendações e melhorias na estratégia de manutenção, visando aumentar a confiabilidade e o desempenho dos vagões ferroviários.

Será realizada uma análise estatística dos dados, buscando identificar padrões, tendências e características de desempenho dos sistemas de compressores.

Por fim, serão aplicadas técnicas de confiabilidade, como a análise de sobrevivência e a modelagem estatística, para estimar a vida útil dos componentes e avaliar a confiabilidade dos sistemas. Com base nos resultados obtidos, serão propostas recomendações para aprimorar a estratégia de manutenção, visando aumentar a confiabilidade dos sistemas de compressores e otimizar a operação dos vagões ferroviários.

1.7. Estrutura do trabalho

A estrutura do presente trabalho está organizada em cinco capítulos, conforme detalhado abaixo:

No Capítulo 1 são apresentados os elementos pré-textuais, como o tema central do estudo e o problema de pesquisa. Será feita uma breve introdução contextualizando o assunto e serão expostas as premissas consideradas para a realização do estudo. Além disso, será apresentada a justificativa para a realização do trabalho, destacando a relevância e os benefícios esperados.

No Capítulo 2 será apresentada a fundamentação Teórica - Sistema de Compressor dos Vagões. Este capítulo abordará a fundamentação teórica relacionada ao sistema de compressor dos vagões ferroviários. Serão detalhadas as configurações de frenagem e as funções dos conjuntos de válvulas de controle presentes nesse sistema. Será realizado um levantamento bibliográfico atualizado sobre o tema, embasando o estudo.

No Capítulo 3 será discorrido a fundamentação Teórica - Confiabilidade e Análise de Dados de Vida. Neste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica sobre confiabilidade e análise de dados de vida. Serão exploradas as principais distribuições estatísticas utilizadas nessa disciplina da engenharia da confiabilidade, bem como suas características e parâmetros relevantes para o estudo em questão. Serão abordados os conceitos fundamentais e as metodologias aplicáveis à análise de dados de vida do sistema de compressor dos vagões.

O Capítulo 4 será apresentado as simulações realizadas com os dados, será apresentado uma análise gráfica e conclusiva da real situação do sistema de compressores das locomotivas.

Já no Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos Futuros. O capítulo revisará o alcance dos objetivos propostos e apresentará as conclusões das análises realizadas. Será discutida a necessidade de ajustes na estratégia de manutenção atual do sistema de compressor dos vagões, levando em consideração os resultados obtidos. Além disso, serão oferecidas sugestões para trabalhos futuros, visando aperfeiçoar o entendimento e aprimorar a eficiência da manutenção nesse sistema.

Com essa estrutura, o trabalho contemplará uma abordagem completa e embasada sobre o sistema de compressor dos vagões ferroviários, proporcionando uma análise confiável e contribuindo para a melhoria da estratégia de manutenção nesse contexto específico.

2. SISTEMA DE FREIO

Antes de adentrar na fundamentação teórica do sistema de freios dos trens, é relevante contextualizar historicamente a evolução desses sistemas cruciais para a indústria ferroviária. Desde os primórdios do transporte sobre trilhos, os sistemas de freios têm desempenhado um papel essencial na garantia da segurança e eficiência das operações ferroviárias.

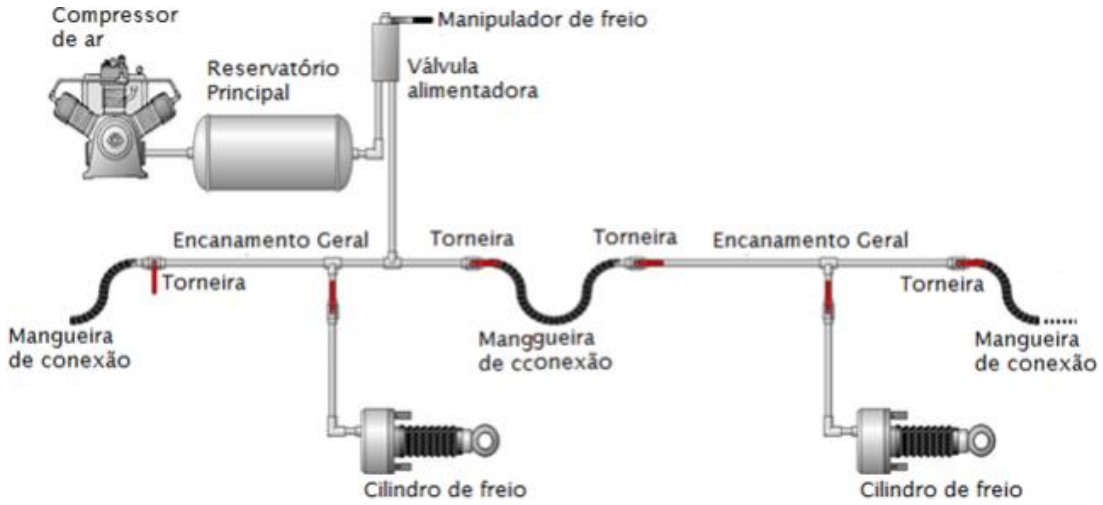
Ao longo do tempo, os sistemas de freios passaram por constantes aprimoramentos impulsionados pelas demandas crescentes por maior controle, confiabilidade e eficácia na frenagem dos trens. Inicialmente, os freios eram acionados manualmente, através de freios de mão operados pelos maquinistas ou passageiros. No entanto, as limitações desses sistemas manuais motivaram o desenvolvimento de soluções mais avançadas.

Com o progresso da tecnologia, foram introduzidos os freios a vácuo, que utilizavam o vácuo gerado por uma bomba acionada pelo movimento do trem para ativar os freios em todos os vagões simultaneamente. Embora representasse um avanço, esse sistema ainda possuía suas limitações e desafios operacionais.

Posteriormente, surgiu o sistema de freios a ar comprimido, que gradualmente substituiu os freios a vácuo devido às suas vantagens superiores. Esses sistemas passaram a utilizar compressores para gerar e armazenar ar comprimido, que era distribuído para os vagões e acionado nos freios por meio de válvulas controladoras. Essa abordagem inovadora permitiu uma frenagem mais eficiente, confiável e automatizada, trazendo significativos avanços em termos de segurança ferroviária. Na Figura 2.1, como descrito anteriormente, segue a ilustração dos sistemas de freio a ar direto, onde tem-se como principal problema a ineficiência para composições ferroviárias grandes, e um outro problema era a frenagem antecipada dos primeiros vagões fazendo com que os vagões onde ainda não se iniciava o processo de frenagem empurrasse os primeiros.

A evolução dos sistemas de freios nos trens ao longo da história foi impulsionada por desafios e carências enfrentados nos modelos anteriores. Um marco significativo foi o desenvolvimento do sistema a ar automático em 1872 por George Westinghouse, atribuído a importantes avanços em termos de segurança e eficiência.

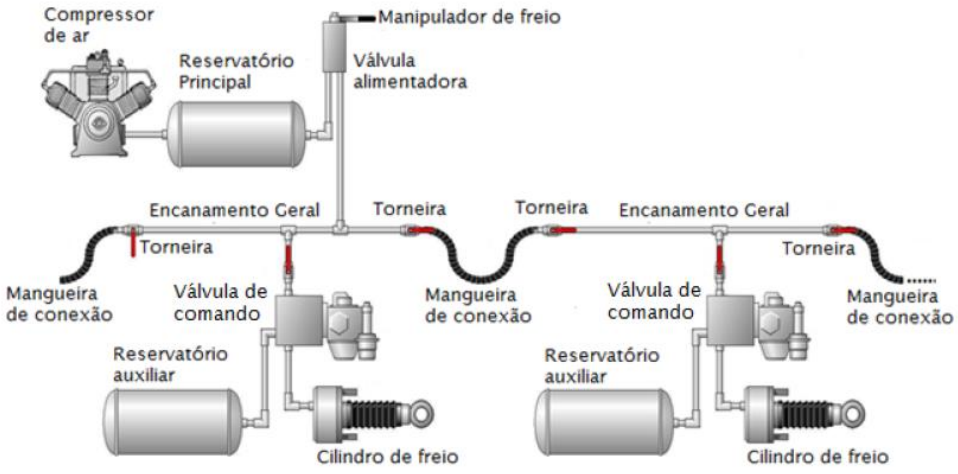
Figura 2.1: Esquema simplificado do Sistema de Freio a Ar Direto



Fonte: Borba (2011).

Neste novo sistema, Figura 2.2, todos os vagões da composição eram capazes de aplicar o freio automaticamente em caso de fracionamento do encanamento geral, resultando em uma maior uniformidade nas aplicações de freio. Essa inovação introduzida há mais de um século ainda continua sendo a base dos sistemas de freios utilizados atualmente (Borba et al., 2011).

Figura 2.2 – Esquema simplificado do Sistema de Freio a Ar Automático



Fonte: Borba (2011).

Portanto, a compreensão da evolução histórica dos sistemas de freios nos trens é fundamental para apreciar os progressos alcançados ao longo do tempo e para compreender a importância desses sistemas na indústria ferroviária. Prosseguir com a fundamentação teórica do sistema de freios dos trens, explorando detalhadamente

as características, componentes e funcionamento porém com foco no sistema do compressor.

Com base na evolução histórica dos sistemas de freios nos trens, é importante compreender o funcionamento específico do sistema de compressor, um dos componentes essenciais desse sistema. O compressor desempenha um papel fundamental ao gerar e armazenar ar comprimido, que é utilizado para acionar os freios nos vagões ferroviários. Entre suas principais funções, destacam-se a geração contínua de ar comprimido para manter a pressão adequada no encanamento geral, garantindo a prontidão e a capacidade de frenagem dos vagões. Além disso, o compressor é responsável por carregar e recarregar o sistema de freios, permitindo a aplicação e liberação dos freios de forma controlada e eficiente.

Atualmente, o sistema de freios utilizado nas locomotivas e vagões no Brasil é o sistema de freio pneumático. Esse sistema emprega o uso de ar comprimido para acionar os cilindros de freio e aplicar a força de frenagem nas rodas do trem. Ele é composto por diversos componentes essenciais, tais como o compressor, responsável por gerar e armazenar o ar comprimido, o reservatório principal, que armazena o ar comprimido para uso posterior, a válvula alimentadora, responsável por fornecer o ar comprimido aos cilindros de freio, o encanamento geral, que distribui o ar comprimido pelos vagões, o cilindro de freio, que converte a pressão do ar em força mecânica para aplicar os freios, e a timoneria de freio, que transmite o movimento do cilindro de freio para as rodas do trem. O sistema de freio pneumático é amplamente adotado em todo o mundo devido à sua eficiência, confiabilidade e capacidade de proporcionar frenagens seguras e controladas em trens de carga e passageiros.

A partir deste ponto, será apresentada uma explicação detalhada sobre o funcionamento do sistema de freio pneumático, destacando especialmente as principais funções desempenhadas pelo compressor. Serão abordados os processos de geração e armazenamento de ar comprimido, bem como sua distribuição pelos vagões e o acionamento dos cilindros de freio. O papel fundamental do compressor será ressaltado, evidenciando sua contribuição para a eficiência e operação adequada do sistema de freios nos trens.

2.1. Funcionamento do Sistema de Freio Pneumático: Papel Essencial do Compressor

O funcionamento adequado do sistema de freio pneumático em trens depende de um componente fundamental: o compressor. Neste tópico, exploraremos em detalhes o papel essencial desempenhado pelo compressor no sistema de freio pneumático. Para isso, utilizaremos como referência a apostila "Sistema de Freios – Dinâmica e Frenagem Ferroviária" de José Luiz Borba e Mauro Antônio Bergantini.

De acordo com (Borba, 2011), o compressor é responsável por gerar o ar comprimido necessário para o acionamento dos cilindros de freio. Ele é acionado pelo próprio movimento do trem, aproveitando a energia cinética das rodas para movimentar seu mecanismo interno. A compressão do ar ocorre em etapas, sendo filtrado e lubrificado para garantir seu bom funcionamento e evitar danos nos componentes do sistema de freio.

O ar comprimido gerado pelo compressor é armazenado no reservatório principal, que funciona como uma espécie de "reserva" de ar para ser utilizado quando necessário. A quantidade de ar no reservatório é monitorada e controlada pela válvula alimentadora, que regula o fluxo de ar do compressor para o reservatório e mantém a pressão adequada.

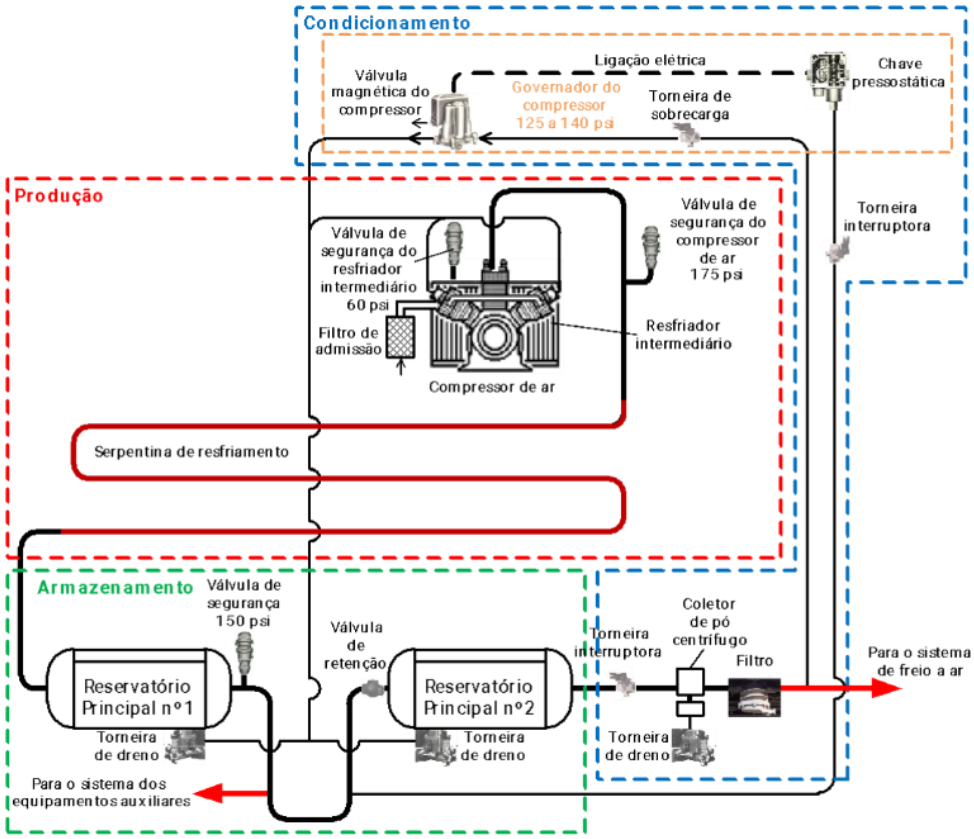
O encanamento geral é responsável por distribuir o ar comprimido a todos os cilindros de freio nos diferentes vagões da composição. Quando o maquinista aciona o freio, seja por meio de um comando manual ou automático, o ar comprimido é liberado do encanamento geral para os cilindros de freio, aplicando a força de frenagem nas rodas do trem. Esse processo ocorre de forma sincronizada em todos os vagões, garantindo uma frenagem uniforme e segura, ver Figura 2.3.

Além disso, o compressor também desempenha um papel importante na recuperação do sistema de freio. Após a frenagem, o compressor é acionado novamente para reabastecer o reservatório principal com ar comprimido, restabelecendo a pressão adequada e preparando o sistema para novas aplicações de freio.

Ao compreendermos o funcionamento do sistema de freio pneumático e a importância do compressor, podemos perceber como esse componente desempenha um papel crucial na segurança e eficiência das operações ferroviárias. Nos próximos tópicos, abordaremos de forma mais detalhada as principais funções do compressor, sua

estrutura e os cuidados necessários para garantir seu bom desempenho no sistema de freio dos trens.

Figura 2.3: Sistema de alimentação de ar comprimido



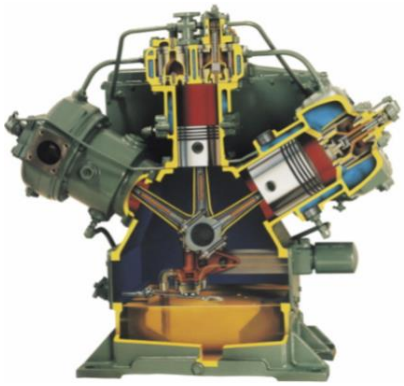
Fonte: Borba (2011).

2.2. Compressor: Estrutura Interna e Princípios de Funcionamento

Para compreender melhor o funcionamento do compressor no sistema de freio pneumático dos trens, é importante explorar sua estrutura interna e os princípios que regem seu funcionamento.

O compressor utilizado no sistema de freio dos trens é do tipo alternativo de duplo estágio de compressão. Ele é composto por cilindros de baixa pressão, cilindro de alta pressão e um resfriador intermediário. A estrutura do compressor é projetada para garantir a compressão eficiente e contínua do ar atmosférico, resultando na geração de ar comprimido necessário para o acionamento dos cilindros de freio, conforme apresentado na Figura 2.4

Figura 2.4: Compressor alternativo



Fonte: Borba (2011).

Os cilindros de baixa pressão são responsáveis pela primeira etapa de compressão do ar. Geralmente, são dois cilindros dispostos lateralmente no cárter do compressor. Esses cilindros realizam a primeira compressão do ar atmosférico, elevando sua pressão.

Após a primeira etapa de compressão, o ar comprimido é direcionado para o resfriador intermediário. Esse componente desempenha um papel crucial ao reduzir a temperatura do ar, evitando o superaquecimento do sistema e preservando a eficiência do compressor.

Em seguida, o ar comprimido passa para o cilindro de alta pressão, localizado no topo do cárter do compressor. Nessa segunda etapa de compressão, a pressão do ar é ainda mais elevada, preparando-o para ser armazenado no reservatório principal.

Durante o processo de compressão, é essencial que o ar seja filtrado. A filtragem remove impurezas e partículas que podem comprometer o funcionamento dos componentes do sistema de freio. Já a lubrificação adequada garante a redução do atrito entre os pistões e cilindros, prolongando a vida útil do compressor.

Além da estrutura interna, o compressor é acionado de duas maneiras: através do eixo virabrequim do motor diesel ou por um motor elétrico. Quando acionado pelo eixo virabrequim do motor diesel, a rotação do motor é transmitida ao compressor por meio do munhão, permitindo sua operação durante o funcionamento do trem, como ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5: Compressor acionado diretamente pelo motor diesel

Fonte: Borba (2011).

Já o acionamento elétrico do compressor é uma alternativa viável em situações em que o motor diesel não está em funcionamento ou não é necessário, como na partida do trem ou em manobras. Nesses casos, um motor elétrico é utilizado para acionar o compressor, proporcionando a compressão do ar e a geração de ar comprimido.

O motor elétrico do compressor é alimentado por uma fonte de energia externa, um gerador a bordo do trem, conforme Figura 2.6. Ele é conectado ao munhão do eixo virabrequim do compressor, permitindo que a rotação do motor elétrico seja transmitida para o compressor. Quando o motor elétrico é acionado, o munhão do compressor gira, movimentando os pistões dos cilindros e realizando a compressão do ar.

Figura 2.6: Compressor acionado por motor elétrico

Fonte: Borba (2011).

Esse tipo de acionamento elétrico é especialmente utilizado em trens que possuem um sistema híbrido de energia, combinando tanto um motor diesel quanto um motor

elétrico. Essa combinação visa reduzir o consumo de combustível e as emissões de poluentes, aproveitando o motor elétrico em momentos em que a demanda de potência é menor.

O acionamento elétrico do compressor oferece benefícios adicionais, como menor ruído e vibração em comparação com o acionamento pelo motor diesel. Além disso, ele possibilita maior controle sobre a operação do compressor, permitindo ajustes precisos de acordo com as necessidades do sistema de freio.

No entanto, é importante ressaltar que a escolha entre o acionamento pelo motor diesel ou o acionamento elétrico do compressor depende das características do sistema de freio, das exigências operacionais do trem e das considerações de eficiência energética e impacto ambiental.

Com o entendimento dos principais tipos de compressores e seus acionamentos, será explorado o funcionamento do compressor de forma mais detalhada. Serão abordados os princípios de operação, os componentes internos e os cuidados necessários para garantir o funcionamento eficiente e seguro do compressor no sistema de freio dos trens.

2.3. Produção de Ar

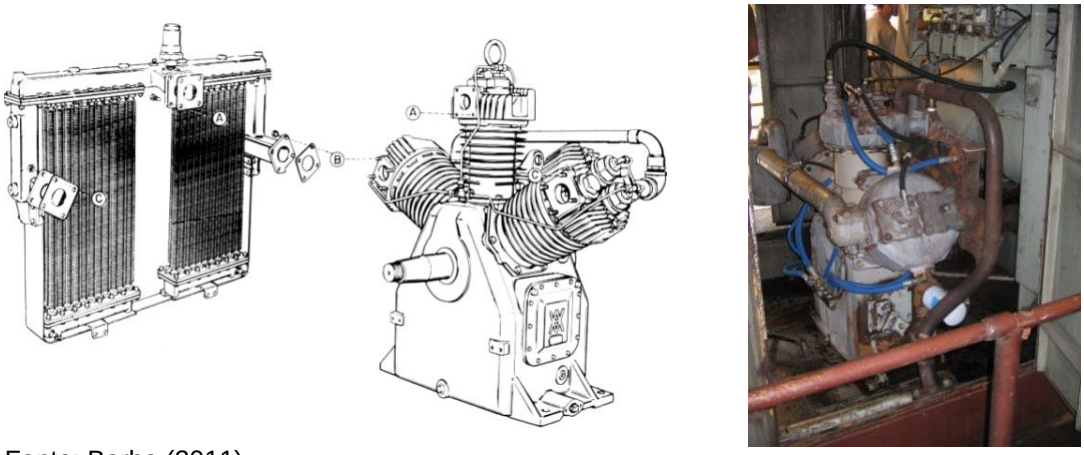
O compressor de ar comprimido desempenha um papel fundamental no sistema pneumático a bordo do trem, fornecendo ar comprimido de alta pressão para alimentar os diferentes componentes e sistemas que dependem da energia pneumática para operar, como os cilindros de freio.

2.4. Funcionamento do compressor

O processo de funcionamento do compressor inicia-se com a aspiração do ar da atmosfera, que passa por um filtro seco para remover impurezas e umidade, garantindo a qualidade do ar comprimido produzido. O ar aspirado é então direcionado para os cilindros de baixa pressão, onde ocorre a primeira etapa de compressão. Os pistões dos cilindros de baixa pressão são impulsionados pelo munhão do eixo virabrequim, que pode ser acionado pelo eixo virabrequim do motor diesel ou por um motor elétrico. Nesse estágio, o ar é comprimido e sua pressão é aumentada.

Após a compressão nos cilindros de baixa pressão, o ar segue para o resfriador intermediário, onde ocorre o resfriamento do ar comprimido, ver Figura 2.7 a 2.9. Esse resfriamento é importante para reduzir a temperatura do ar antes da próxima etapa de compressão, evitando possíveis danos aos componentes do compressor, juntamente com esse equipamento, e instalado uma válvula de segurança para garantir que a pressão do sistema não ultrapasse os 60 psi. Em seguida, o ar resfriado é direcionado para o cilindro de alta pressão, localizado no topo do cárter do compressor. No cilindro de alta pressão, ocorre a segunda etapa de compressão, onde o ar é comprimido novamente, aumentando ainda mais sua pressão antes de ser armazenado.

Figura 2.7: Resfriador intermediário refrigerado a água



Fonte: Borba (2011).

Figura 2.8: Resfriador intermediário refrigerado por ventilação forçada

Fonte: Borba (2011).

Figura 2.9:Posicionamento da válvula de segurança do resfriador intermediário

Fonte: Borba (2011)

Após a compressão nos cilindros, o ar comprimido deixa o compressor a uma temperatura elevada. Para evitar problemas como corrosão e obstruções nos componentes do sistema pneumático, é necessário resfriar o ar comprimido e remover a umidade presente. Isso é realizado por meio de uma serpentina de resfriamento, que reduz a temperatura do ar e provoca a condensação da umidade. No Brasil, onde as temperaturas são geralmente altas, a umidade no ar comprimido pode ser significativa. A presença de umidade pode causar danos aos componentes e obstruir os orifícios das válvulas. Portanto, o resfriamento e a remoção da umidade são etapas cruciais para proteger o sistema pneumático, assegurando seu desempenho confiável e prolongando sua vida útil (Borba, 2011).

O ar comprimido produzido pelo compressor é armazenado no reservatório principal, que atua como uma espécie de "reserva" de ar. A quantidade de ar no reservatório é monitorada e controlada por meio da válvula alimentadora, que regula o fluxo de ar do compressor para o reservatório, mantendo a pressão adequada para as necessidades dos sistemas pneumáticos a bordo do trem.

Antes de ser utilizado nos sistemas pneumáticos, o ar comprimido passa por um processo de condicionamento. Esse processo envolve a regulagem da pressão do ar, a drenagem de possíveis condensados e a filtragem para remover partículas e impurezas. O ar comprimido condicionado e devidamente tratado está pronto para alimentar os cilindros de freio e outros componentes do sistema pneumático, garantindo um funcionamento eficiente e seguro.

É importante ressaltar que a manutenção regular do compressor é essencial para garantir seu bom desempenho e prolongar sua vida útil. Isso inclui a verificação periódica dos níveis de óleo, a limpeza dos filtros de ar e a inspeção dos componentes do compressor para detectar qualquer desgaste ou falha que possa comprometer seu funcionamento. Além disso, é fundamental seguir as recomendações do fabricante em relação aos intervalos de manutenção e substituição de peças, bem como utilizar peças de reposição de qualidade para garantir a confiabilidade e eficiência do compressor.

2.5. Manutenção

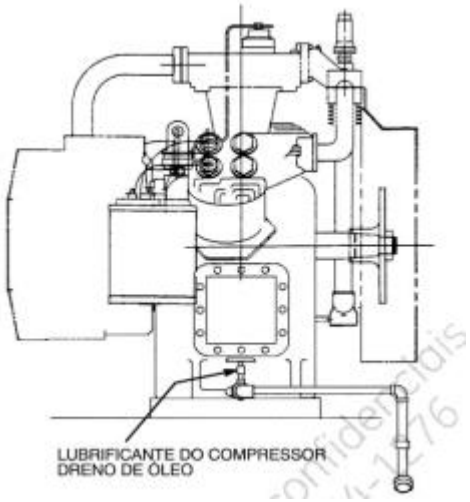
A manutenção adequada do compressor de ar é de extrema importância para garantir seu desempenho confiável e prolongar sua vida útil. O compressor a ar está sujeito a desgaste e envelhecimento natural de seus componentes, bem como ao acúmulo de sujeira, umidade e impurezas que podem afetar seu funcionamento. Portanto, seguir um programa regular de manutenção é essencial para manter o compressor em condições ideais de operação.

Um dos aspectos importantes da manutenção do compressor é a verificação e substituição regular dos filtros de ar. Os filtros de ar são responsáveis por remover partículas sólidas e impurezas do ar aspirado pelo compressor. Com o tempo, esses filtros podem ficar obstruídos, reduzindo o fluxo de ar e comprometendo o desempenho do compressor. Portanto, é necessário verificar periodicamente a condição dos filtros de ar e substituí-los conforme necessário.

Além disso, é importante realizar a drenagem regular do condensado acumulado nos reservatórios e nos sistemas de filtragem e lubrificação. O condensado é formado devido à presença de umidade no ar comprimido e pode causar corrosão nos componentes do compressor e do sistema de freio. A drenagem regular evita o acúmulo excessivo de condensado, mantendo o ar comprimido limpo e seco.

A lubrificação adequada também é essencial para o funcionamento suave e eficiente do compressor. Os pontos de lubrificação do compressor devem ser identificados e lubrificados de acordo com as recomendações do fabricante. Isso ajuda a reduzir o desgaste dos componentes móveis e a prolongar a vida útil do compressor, conforme Figura 2.10.

Figura 2.10: Dreno de óleo lubrificante do compressor



Fonte: GE (2013)

Além disso, é importante monitorar regularmente a pressão de operação do compressor e verificar se há vazamentos de ar. Vazamentos podem levar a perdas de pressão e afetar negativamente o desempenho do sistema de freio. Qualquer vazamento deve ser prontamente identificado e reparado para garantir a eficiência do compressor.

Por tanto, esses são os principais monitoramentos de manutenção para a parte física do bom funcionamento do compressor, com isso, seguir as diretrizes de manutenção fornecidas pelo fabricante do compressor é fundamental. Essas diretrizes incluem intervalos recomendados para a substituição de peças desgastadas, ajustes e verificações de desempenho. Ademais, é importante contar com profissionais treinados e qualificados para executar a manutenção do compressor, garantindo a segurança e a eficácia das operações.

2.6. Controle

O controle do compressor de ar é uma parte fundamental para garantir o seu funcionamento eficiente e seguro. Existem diferentes aspectos a serem considerados no controle do compressor de ar comprimido, como a pressão de operação, o fluxo de ar, a temperatura e a integridade do sistema.

2.7. Principais Componentes

No controle do compressor de ar, existem vários componentes essenciais que desempenham funções específicas. A seguir, está alguns dos principais componentes mencionados:

- Sensor de Velocidade do Motor do Compressor de Ar (ACS): Este sensor é montado no motor de acionamento do compressor de ar e monitora a velocidade do motor.
- Motor de Acionamento do Compressor de Ar (COM): O motor é montado no cárter do compressor de ar e possui diferentes conjuntos de enrolamentos para operação em 12 ou 6 polos. Sua rotação é no sentido horário (CW) a partir da extremidade do compressor no motor.
- Contatores do Motor do Compressor (CDC1, CDC2 e CDC2A): Esses contatores controlam a força aplicada aos enrolamentos do motor do compressor de ar. Dependendo da rotação do motor diesel, diferentes contatores são utilizados para operar o motor com 6 ou 12 polos, ajustando a velocidade do compressor.
- Chave do Governador do Compressor (CGS): Essa chave monitora a pressão do ar no reservatório principal e fornece um sinal de entrada para o controlador de excitação (EXC). Esse sinal controla o início, a carga e a descarga do compressor de ar.
- Controlador de Excitação (EXC): O controlador de excitação utiliza sinais de entrada provenientes de vários componentes, como COS/MR1, ACS, COCI, CDC2 e CDORA, para controlar a operação do compressor de ar. Ele é responsável por regular o funcionamento do compressor.
- Fusíveis (M7, M9): Esses fusíveis estão localizados próximos ao alternador auxiliar e têm a função de proteger o motor e o cabeamento do compressor.
- Válvula Magnética do Compressor (CMV): Essa válvula é ligada e desligada para controlar a carga e descarga do compressor de ar. Quando a CMV está energizada, o ar comprimido é permitido a fluir para as válvulas de descarga do compressor, descarregando o ar. Quando a CMV está desligada, o ar comprimido é esgotado pela válvula de exaustão e as válvulas de sucção do compressor podem operar normalmente para comprimir o ar.

2.8. Armazenamento

O sistema de armazenamento no contexto do sistema de freio pneumático da locomotiva refere-se ao armazenamento do ar comprimido necessário para o funcionamento adequado do sistema de freio. O ar comprimido é armazenado em reservatórios específicos, conhecidos como reservatórios de ar.

2.9. Reservatório

Existem diferentes tipos de reservatórios de ar utilizados nas locomotivas, conforme mostrado na Figura 2.11, sendo os mais comuns o reservatório principal e o reservatório combinado. Esses reservatórios têm funções específicas no sistema de freio:

- Reservatório principal: O reservatório principal é responsável por armazenar o ar comprimido gerado pelo compressor de ar. Esse ar comprimido é usado para fornecer pressão aos componentes do sistema de freio, como os cilindros de freio, para aplicar e liberar os freios.
- 2. Reservatório combinado: O reservatório combinado é um tipo de reservatório que possui dois compartimentos separados. Um compartimento é destinado ao reservatório auxiliar, que armazena ar comprimido para uso em aplicações de serviço ou emergência. O outro compartimento é destinado ao reservatório de emergência, que armazena ar comprimido para uso exclusivo em emergências.

Figura 2.11: Localização dos reservatórios principais

Fonte: Borba (2011)

Os reservatórios de ar são dimensionados de acordo com a capacidade de ar necessária para operar o sistema de freio de forma eficiente e segura. O volume dos reservatórios pode variar dependendo do tipo de vagão ou locomotiva. Geralmente, os reservatórios são projetados para armazenar ar suficiente para várias aplicações de freio antes que o compressor precise ser acionado novamente para reabastecê-los.

Dentre os principais componentes dos reservatórios de ar se destacam:

- Válvulas de dreno: São responsáveis por permitir a drenagem da água acumulada no interior dos reservatórios, evitando a corrosão e garantindo a qualidade do ar comprimido. Essas válvulas podem ser manuais ou automáticas, acionadas por temporizadores ou sensores de umidade.
- Válvulas de segurança: São dispositivos de segurança projetados para aliviar a pressão excessiva nos reservatórios. Elas se abrem automaticamente quando a pressão interna atinge um limite pré-determinado, protegendo os reservatórios contra falhas ou rupturas.
- Válvula de retenção do reservatório principal: Desempenha um papel fundamental no sistema de ar comprimido dos trens ferroviários. Sua instalação ocorre no encanamento que conecta o reservatório principal nº 1 ao reservatório principal nº 2. Essa válvula é projetada para permitir o fluxo total de ar do reservatório principal nº 1 para o reservatório principal nº 2, garantindo um suprimento adequado de ar comprimido. No entanto, sua função principal é impedir o fluxo no sentido inverso, evitando que o ar retorne do reservatório principal nº 2 para o reservatório principal nº 1.

Em resumo, o sistema de armazenamento de ar comprimido é vital para o funcionamento adequado do sistema de freio pneumático dos trens. Os reservatórios principais, juntamente com os dispositivos de controle, desempenham um papel fundamental na manutenção da pressão e na distribuição do ar comprimido para os sistemas pneumáticos.

2.10. Condicionamento de Ar

O condicionamento do ar comprimido é uma etapa crucial no uso eficiente e seguro do ar comprimido nos sistemas pneumáticos. O ar comprimido gerado pelo compressor pode conter impurezas, umidade e partículas sólidas, que podem afetar

negativamente o desempenho dos equipamentos pneumáticos e causar danos ao sistema.

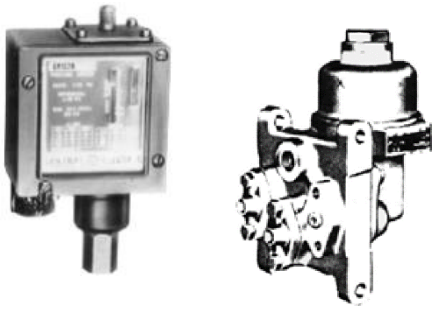
Existem três principais processos de condicionamento do ar comprimido: regulagem da pressão, drenagem e filtragem.

A regulagem da pressão é realizada para ajustar a pressão do ar comprimido de acordo com os requisitos dos sistemas pneumático. Isso é feito por meio de válvula magnética CGS, manômetros, Figura 2.12, reguladores de pressão, chave pressostática CCS, Figura 2.13, que permitem definir e manter a pressão desejada nos sistemas pneumáticos.

Figura 2.12: Manômetros duplos de ar

Fonte: Borba (2011)

Figura 2.13: Chave pressostática CCS e Válvula magnética CGS

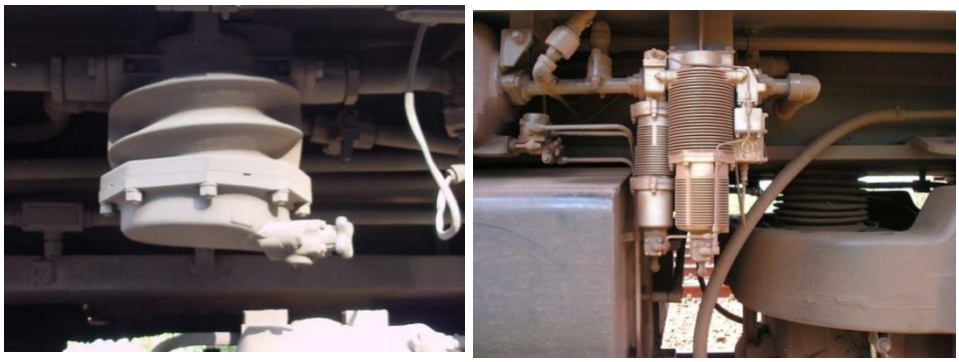


Fonte: Borba (2011)

A drenagem é necessária para remover a umidade acumulada no ar comprimido. A umidade pode ser prejudicial, causando corrosão e obstrução dos componentes do sistema pneumático. Para evitar esses problemas, são utilizados dispositivos de drenagem, como purgadores automáticos, que removem eficientemente a água condensada do ar comprimido.

A filtragem é essencial para remover as impurezas e partículas sólidas presentes no ar comprimido. Os filtros de ar comprimido são responsáveis por reter essas partículas indesejadas, garantindo a qualidade do ar comprimido antes de sua utilização nos sistemas pneumático, sendo eles, Filtro centrífugo, Filtro coalescente e Secador de ar ver Figura 2.14.

Figura 2.14: Filtro centrífugo e Secador de ar por adsorção



Fonte: Borba (2011)

2.11. Síntese e conclusão

Este capítulo apresenta uma visão abrangente do sistema de freio, e produção de ar comprimido, abordando as principais funções de cada equipamento presente nesse sistema, a fim de compreender seus funcionamento e particularidade em detalhes, apresentando os três processos que contemplam esse sistema de compressor: Produção de Ar, armazenamento e condicionamento.

Compreender o assunto abordado e extremamente importante para esclarecer os processos e equipamento envolvidos, desde o acionamento até a estabilização do sistema, a fim de compreender as principais ações de manutenção e confiabilidade inerente a esses componentes e sistema de um modo geral.

No próximo capítulo, será abordado os conceitos gerais de confiabilidade, exploraremos as métricas relevantes e apresentaremos uma visão geral da análise de dados de vida.

3. CONFIABILIDADE E ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

“Confiabilidade é a verdade que permanece constante quando todas as outras variáveis estão em constante mudança.” – (Lido Anthony "Lee" Iacocca)

Iniciar este capítulo sobre confiabilidade e análise de dados de vida com as palavras inspiradoras de Lee Iacocca destaca a duradoura relevância da confiabilidade em um cenário dinâmico. A engenharia depende crucialmente da confiabilidade, requerendo uma compreensão profunda de métricas e modelos estatísticos para avaliar o desempenho e a durabilidade de equipamentos e sistemas.

> *A análise dos dados de vida de um equipamento ou sistema pode ser realizada através da função confiabilidade, função taxa de falha e ainda através dos valores de vida média e vida mediana. Todas essas funções e valores podem ser determinadas diretamente a partir de uma aproximação, utilizando a distribuição adequada, da função de probabilidade de falha* F(t)*. Cada distribuição possui alguns parâmetros particulares que a descreve e define, esses parâmetros são estimados a partir dos dados de falha obtidos em observações experimentais. – (DANIELLI VILLAR LEMES, 2006, pág. 33)*

Danielli Villar Lemes (Lemes, 2006) complementa essa ideia, enfatizando que a análise de dados de vida vai além, proporcionando um olhar detalhado através da função confiabilidade, taxa de falha e valores de vida média e vida mediana. Essas métricas, fundamentais para a compreensão da confiabilidade, podem ser determinadas de maneira precisa através de uma abordagem cuidadosa, utilizando a distribuição apropriada da função de probabilidade de falha. Essa abordagem fornece não apenas uma visão sobre o comportamento do equipamento ao longo do tempo, mas também a base essencial para a aplicação de modelos estatísticos.

Essa combinação de citações destaca não apenas a importância da confiabilidade, mas também a necessidade de uma análise detalhada dos dados de vida para uma compreensão do desempenho e da durabilidade de sistemas e equipamentos. No decorrer deste capítulo, será apresentado essas métricas e modelos estatísticos, permitindo uma compreensão crítica e interpretativa dos dados coletados.

3.1. Confiabilidade

Destacar a confiabilidade como uma verdade constante em meio às mudanças, leva a refletir sobre a base sólida necessária para sustentar o funcionamento eficiente de equipamentos e sistemas. No universo da engenharia, a confiabilidade é mais do que uma qualidade desejável, é um pilar essencial para garantir que os equipamentos desempenhem suas funções requeridas sob condições especificadas durante um determinado intervalo de tempo.

A definição padrão de confiabilidade, conforme estabelecida pela NBR 5462 (ABNT, 1994), a descreve como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas. Essa função pode ser primária ou secundária, abrangendo desde a partida de um motor até a transmissão de dados em um sistema complexo.

As métricas estatísticas associadas à confiabilidade variam em função do tempo de uso ou operação, bem como das condições determinadas de uso. Os estudos confiáveis requerem dados precisos, modelos matemáticos apropriados e o uso de gráficos para visualizar o comportamento dos dados em relação ao modelo selecionado.

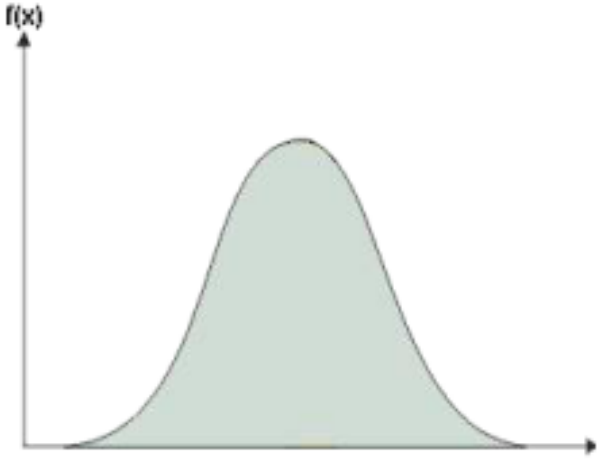
3.2. Dados de Vida

A análise de dados de vida, na engenharia da confiabilidade, é uma disciplina que se baseia em observações experimentais para definir e descrever os parâmetros essenciais que delineiam o comportamento de um sistema ao longo do tempo (Lemes, 2006). Em um contexto mais amplo, os resultados dessa análise são derivados de estimativas alimentadas por modelos matemáticos, os quais são alimentados por dados provenientes de diversas fontes, como testes de campo, retornos de garantia, ordens de manutenção e notas de manutenção.

Compreender a confiabilidade requer, antes de tudo, a compreensão de conceitos fundamentais, destacando a importância de possuir informações precisas sobre censura e tempos de falha, enfatizando a necessidade de definir claramente o tempo de início do estudo para permitir uma comparação eficaz entre os indivíduos no início dele.

A distribuição dos dados é um passo crucial na análise de dados de vida. Utilizando conceitos de variáveis aleatórias contínuas, a função densidade de probabilidade de falha (PDF) é uma ferramenta essencial. A *PDF*, representada por $f(x)$, Equação (3.1), descreve a probabilidade de uma variável aleatória contínua assumir valores em um determinado intervalo.

Figura 3.1 – Função Densidade de Probabilidade (PDF)



Fonte: Weibul, 2023.

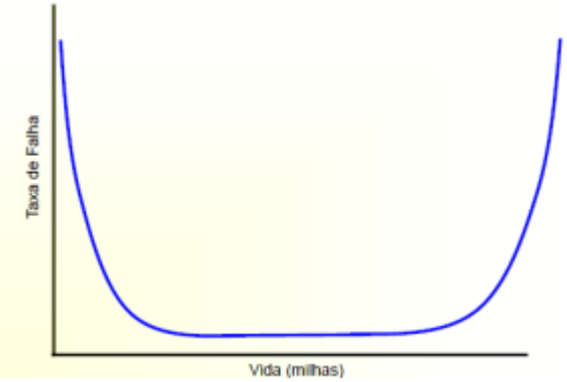
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (3.1)$$

Compreender a confiabilidade, representada por $\mathrm{f}\,(t)$, é a probabilidade de não observar falha em um intervalo de tempo t.

Além disso, a taxa de falhas, expressa por $\lambda(t)$, conforme equação 3.2, é um indicador crucial, representando a probabilidade de um item falhar na próxima unidade de tempo, dada sua operação até o momento. Essa taxa é fundamental para compreender o comportamento ao longo do tempo, muitas vezes representado pela curva da banheira, Figura 3.2, uma representação gráfica idealizada dos diferentes estágios de falhas em um produto.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.2)$$

Figura 3.2 - Curva da banheira idealizada



Fonte: Adaptado Santos, 2019

Por fim, a função vida média e a vida mediana são métricas essenciais para avaliar a confiabilidade. A vida média, representada por $T = m$, equação 3.3, calcula o tempo médio de operação até a falha ocorrer, enquanto a vida mediana, T, divide a PDF exatamente pela metade ver equação 3.4.

$$T = m = \int \int_0^\infty t \,.\, f(t) dt \tag{3.3}$$

$$\int_0^T f(t)\, dt = 0{,}5 \tag{3.4}$$

Esta seção explorou os fundamentos da análise de dados de vida de forma superficial, destacando a importância de uma abordagem sistemática e da compreensão precisa dos conceitos estatísticos subjacentes. Nas próximas seções, serão abordados os conceitos de classificação dos tipos de dados utilizados nessa análise.

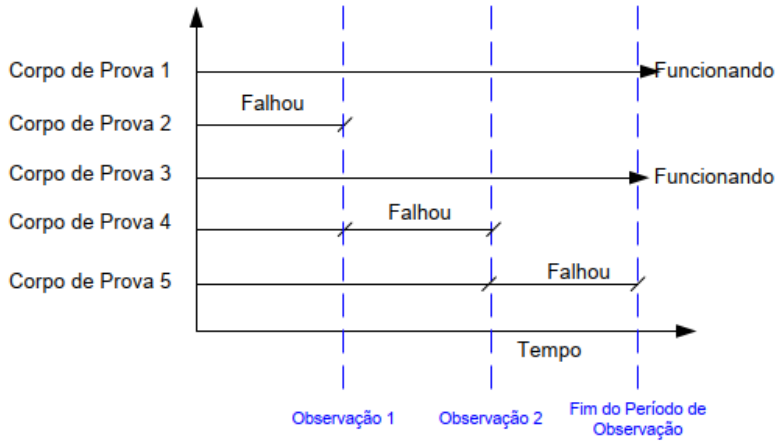
3.3. Dados Agrupados

A análise de dados agrupados é uma abordagem chave na análise de confiabilidade, proporcionando uma visão ampla e eficiente de conjuntos extensos. Ao invés de lidar com dados individuais, essa técnica concentra-se na categorização e organização, simplificando a interpretação e destacando padrões significativos, ver Figura 3.3.
Essa metodologia é especialmente crucial em contextos industriais com grandes volumes de dados. A categorização em intervalos, conforme sugerido por (Lemes,

2006), simplifica a análise e revela padrões que podem passar despercebidos em escalas menores.

(Nelson, 1982) salienta que, ao realizar análises baseadas em inspeções realizadas em intervalos de tempo predefinidos, os dados muitas vezes se apresentam de maneira agrupada. Isso significa que é possível saber o número de equipamentos ou sistemas que falharam entre dois períodos, mas não se tem conhecimento do momento exato da ocorrência da falha. Essa abordagem, centrada na categorização temporal, destaca a natureza agrupada dos dados, diferenciando-se da análise individual. A definição criteriosa de intervalos torna-se, portanto, uma consideração essencial nesse contexto, contribuindo para uma compreensão mais abrangente das tendências e condições específicas dos dados agrupados. Essa perspectiva alinhada com a observação de (Nelson, 1982) enfatiza a importância de estratégias analíticas que levem em conta a natureza temporal dos eventos, indo além da abordagem individualizada para uma compreensão mais abrangente da confiabilidade em intervalos específicos.

Figura 3.3 – Dados Agrupados.



Fonte: Lafraia (2001) – Adaptado.

Essa abordagem não apenas simplifica a interpretação, mas também permite a aplicação eficaz de técnicas estatísticas. A média, desvio padrão e outras métricas podem ser calculadas com base nos dados agrupados, oferecendo uma visão resumida do conjunto de dados.

A análise de dados agrupados desempenha um papel importante na identificação de *outliers* na avaliação da consistência dos dados. Essa metodologia robusta fortalece

a validade estatística das conclusões derivadas do conjunto de dados, promovendo uma interpretação mais eficaz.

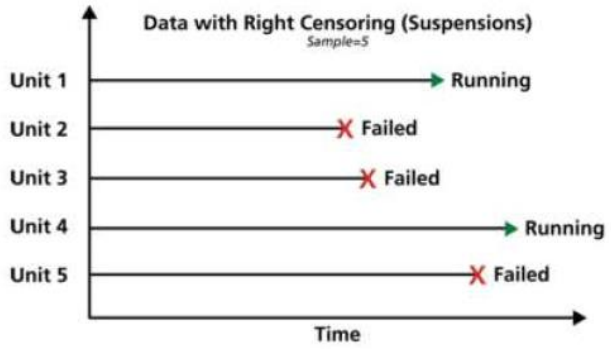
3.4. Dados Suspensos ou Censurados

Após a realização de um ensaio, é comum aparecerem dados suspensos, uma situação em que alguns equipamentos ou sistemas não apresentam falhas. Essa condição é recorrente em avaliações de campo ou análises de garantia, onde determinados itens não experimentam falhas durante o período de coleta.

A exclusão inadequada desses dados pode comprometer a análise, levando a uma interpretação equivocada de que todos os equipamentos falharam. Por exemplo, se, de um conjunto de 10 equipamentos, 3 falharam em 10 dias e os outros 7 permaneceram operacionais, estes últimos são considerados suspensos na análise, indicando uma confiabilidade mais substancial.

A imagem oferece uma representação visual dos dados suspensos. Alguns itens continuam em operação após o período de observação, sendo classificados como amostras suspensas, podendo ser representados como dados censurados a direita ou dados censurados a esquerda, para essa análise, utilizaremos apenas a representação de dados censurados a direita, ver Figura 3.4.

Figura 3.4 – Dados de Censura à Direita



Fonte: Reliawiki, 2023.

É fundamental reconhecer a importância desses dados para uma análise completa da confiabilidade. Integrar essas informações na análise possibilita avaliar de maneira realista a durabilidade contínua de parte da amostra, contribuindo para decisões e estratégias de manutenção mais embasadas.

3.5. Dados Completos

No âmbito da análise de dados de vida, é necessária a compreensão de dados completos. Esses dados representam a total degradação ou falha de equipamentos, revelando, ao final, o tempo até a falha de cada unidade. Uma ilustração esquemática desse conceito pode ser observada na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Dados Completos

Fonte: Reliawiki, 2023.

Nesta abordagem, destaca-se que, quando os dados analisados são de maneira a registrar o tempo de falha de todas as unidades, o conjunto de dados de tempo de falha é categorizado como completo. Essa metodologia proporciona uma visão abrangente dos eventos de falha, contribuindo para análises mais detalhadas e compreensão aprofundada do desempenho dos equipamentos.

3.6. Modelos Estatísticos na Análise de Dados de Vida

A análise de dados de vida se beneficia significativamente da aplicação de modelos estatísticos, ferramentas que proporcionam uma compreensão mais profunda dos eventos de falha ao longo do tempo. Neste capítulo, serão explorados quatro modelos estatísticos: Distribuição Normal, Distribuição Lognormal, Distribuição de Weibull e Distribuição Exponencial como uma contribuição valiosa para a compreensão desses eventos.

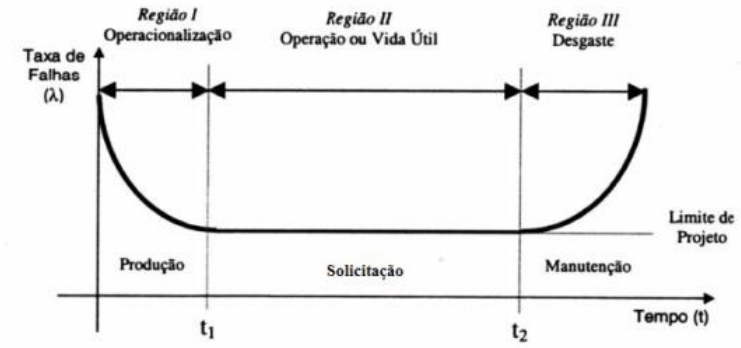
A análise dos dados de vida de um equipamento ou sistema é um processo fundamental na avaliação da confiabilidade e desempenho ao longo do tempo. Conforme salientado por (Lemes, 2006), essa análise pode ser efetivamente

conduzida por meio de ferramentas estatísticas, explorando a função confiabilidade, a função taxa de falha, bem como os valores de vida média e vida mediana. Essas métricas essenciais podem ser derivadas de uma aproximação da função de probabilidade de falha (F(t)), utilizando a distribuição apropriada nesse processo, proporcionando uma base para a estimativa dos parâmetros que caracterizam o comportamento dos dados de falha obtidos por meio de observações experimentais.

3.7. Distribuição Normal:

A Distribuição Normal, embora mais frequentemente aplicada na engenharia de qualidade, encontra um papel menos proeminente na análise de confiabilidade. Quando utilizada para esse fim, a distribuição modela a confiabilidade de equipamentos com uma taxa de falha que cresce ao longo do tempo, sendo especialmente eficaz na representação da Região III da curva da banheira, conforme ilustrado na Figura 3.6, que abrange o envelhecimento e o desgaste dos componentes.

Figura 3.6- Representação da Curva da Banheira.



Fonte: LEMES (2006) -adaptado.

A função densidade de probabilidade associada a essa distribuição é expressa pela Equação 3.5, onde (t) representa o tempo, (μ) é a média da população, e (σ)é o desvio padrão. Os parâmetros (σ_t)e (μ_t) caracterizam a dispersão e a média da população, respectivamente. Essa formulação matemática é essencial para compreender o comportamento estatístico dos dados de vida quando modelados por uma Distribuição Normal

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_t . \sqrt{2.\pi}} . e^{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t - \mu_t}{\sigma_t} \right)^2} \tag{3.5}$$

3.8. Distribuição Lognormal:

A Distribuição Lognormal, Equação 3.6, segundo (Nelson, 1982), encontra aplicação na análise de confiabilidade em contextos que envolvem ciclos até a falha por fadiga, resistência dos materiais e projetos probabilísticos com cargas variáveis. Além disso (Lima, 2014) destacam sua relevância na modelagem de tempos até reparo em unidades reparáveis, caracterizando-a como uma distribuição limitada à esquerda.

$$f(t) = \frac{1}{t . \sigma'_t . \sqrt{2.\pi}} . e^{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t - \mu'_t}{\sigma'_t} \right)^2} \tag{3.6}$$

A função densidade de probabilidade para a distribuição Lognormal, conforme expressa pela Equação 3.6, é fundamentada no logaritmo natural dos tempos até a falha, resultando em uma distribuição cujo logaritmo natural é normalmente distribuído. Os parâmetros dessa distribuição são (σ'_t) e (μ'_t) que representam, respectivamente, o desvio padrão no domínio logarítmico e a mediana da população. Ao explorar as características da distribuição lognormal, evidencia-se sua assimetria e deslocamento para a esquerda. Variações no parâmetro (σ'_t), desvio padrão no domínio logarítmico, impactam a forma das curvas de densidade de probabilidade e distribuição acumulada, onde a escala varia em (10μt).

3.9. Distribuição de Weibull:

A Distribuição de Weibull é reconhecida por sua notável flexibilidade, permitindo a representação de todas as regiões da curva da banheira, como indicado por (Nelson, 1982). Amplamente utilizada em estudos de confiabilidade, essa distribuição é capaz de modelar funções de risco constantes, crescentes ou decrescentes, tornando-se uma ferramenta valiosa para analisar componentes até a falha, mesmo quando apresentam comportamentos distintos.

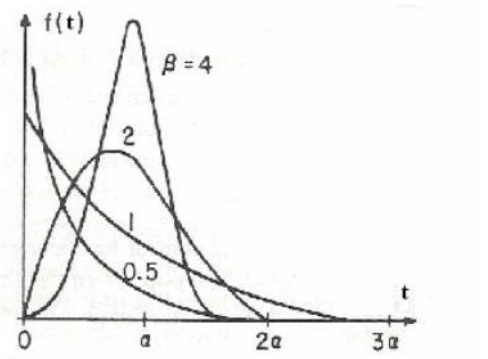
A função densidade de probabilidade para a Distribuição de Weibull, expressa pela Equação 3.7, é fundamentada em três parâmetros: (η), (β), (γ). O parâmetro (η), representa a constante de escala ou a vida característica do equipamento, definindo a probabilidade de os equipamentos analisados apresentarem falhas. (β), é a constante de forma ou inclinação da distribuição, determinando o formato da curva que caracteriza a densidade de probabilidade de falha. Já (γ), é o parâmetro de localização, que estabelece a vida mínima, ou seja, o intervalo de tempo mínimo em que o equipamento não apresentará falha, podendo ser nulo e indicar uma distribuição de dois parâmetros (O'Connor, 2002, citado por Lemes, 2006).

A função densidade de probabilidade é representada na Equação 3.7:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{3.7}$$

> É importante notar que quando β = 1 a distribuição se torna idêntica à distribuição Exponencial, representando o período de vida útil do produto, em que a taxa de falhas do mesmo é constante, quando β = 2, a distribuição se aproxima da lognormal e, quando β = 4, a distribuição se aproxima da distribuição normal, mostrando a flexibilidade da distribuição de Weibull, Nelson (1982). Os resultados mostram que, para β < 1, a distribuição representa bem a infância dos componentes, para β = 1, a distribuição refere-se a vida útil do produto e para β > 1, a distribuição trata do envelhecimento ou fase de degradação do produto. *(DANIELLI VILLAR LEMES, 2006, pág. 37)*

Figura 3.7 – PDF para distribuição Weibull



Fonte: LEMES (2006).

3.10. Síntese e Conclusão do Capítulo

A compreensão dos dados de vida e a aplicação de modelos estatísticos apropriados são fundamentais para uma análise robusta da confiabilidade de sistemas e equipamentos. Este capítulo forneceu uma base teórica, explorando diferentes tipos de dados (completos, agrupados e suspensos) e apresentando modelos estatísticos essenciais, como a Distribuição Normal, Lognormal, Weibull e Exponencial.

Ao adotar essa abordagem, ficam estabelecidas as diretrizes para a coleta, simulação e análise dos dados que serão apresentados no próximo capítulo. Os modelos estatísticos aqui discutidos servirão como referencial para interpretar os resultados obtidos, proporcionando insights valiosos sobre a confiabilidade dos sistemas. O próximo passo é apresentar os dados coletados, simulados e analisados, destacando as conclusões relevantes derivadas dessas análises estatísticas.

4. RESULTADOS

No âmbito desta análise de confiabilidade, a atenção vai ser concentrada no sistema de compressor das locomotivas da frota DASH-9W, composta por 198 unidades essenciais para o transporte de minério. Como destacado no Capítulo 2, a escolha desse sistema como objeto central deste estudo decorre de sua natureza crítica. O sistema de compressor desempenha um papel vital no desempenho operacional dessas locomotivas, sendo o componente-chave para garantir o funcionamento eficaz do sistema de freios. Sua importância estratégica faz dele um eficaz e excelente indicador para avaliação da confiabilidade global das locomotivas, motivando assim a seleção criteriosa desse equipamento para análise aprofundada.

Os dados utilizados nesta análise foram extraídos do sistema SAP de SISGAF, abrangendo o período de 2015 a 2023. Essa escolha visa garantir uma análise abrangente e relevante, dado que todas as locomotivas da frota DASH-9W estão praticamente submetidas às mesmas condições operacionais e situações de estresse. Além dos dados do sistema SAP e SISGAF, uma planilha de controle de consumo diário de cada locomotiva foi utilizada para enriquecer as informações disponíveis.

É fundamental ressaltar que todos os dados passaram por um rigoroso processo de saneamento e tratamento. Foram analisados todos os tipos e motivos de troca do compressor, garantindo uma compreensão abrangente e detalhada do comportamento do equipamento ao longo do tempo. Este procedimento assegura a confiabilidade e a qualidade dos dados utilizados nas análises subsequentes. No decorrer deste capítulo, serão apresentados resultados consolidados por meio de um *dashboard* que destaca os principais elementos que conduziram à substituição do compressor. Além disso, serão explorados os modos de falhas identificados durante o período analisado, proporcionando uma visão abrangente sobre os desafios enfrentados por esse componente crucial das locomotivas.

Após a classificação dos dados, a análise estatística foi conduzida com o auxílio do *software* Weibull++, oferecendo uma abordagem robusta para a realização de análises, cálculos e geração de gráficos. A escolha dessa ferramenta reflete o compromisso com a precisão e a confiabilidade na interpretação dos dados coletados, contribuindo para uma compreensão mais profunda da confiabilidade do sistema de compressor nas locomotivas da frota DASH-9W.

Considerando isso, a análise dos dados revela uma mudança significativa nas tendências de manutenção a partir de 2015, correlacionada à transição do modelo de manutenção preventiva baseado no tempo para o modelo baseado no consumo. Nota-se que essa mudança de estratégia de manutenção, ao realizar a alteração na frequência de manutenção de 5 anos para 5 milhões de litros de diesel consumidos anualmente, quantidade escolhida baseada da média de consumo dos últimos anos, teve consequências significativas para a vida do equipamento, pois ele raramente irá passar por uma manutenção preventiva pelo fato de falhar em um tempo menor. Com isso, o número de notas YPM, representando ações preventivas, experimentou uma redução acentuada e, em alguns casos, cessou completamente. Essa diminuição está diretamente relacionada à redução do consumo das locomotivas, drasticamente afetado pelo desastre do rompimento da barragem de Brumadinho, onde ocorreu a diminuição significativa na dinâmica de transporte de *Pellet Feed* até as usinas de pelotização em Vitória-ES, somado ao impacto nas operações ferroviárias devido a pandemia do Covid-19, que afetou as práticas de manutenção preventiva, assim como elevou a frequência de manutenção das locomotivas.

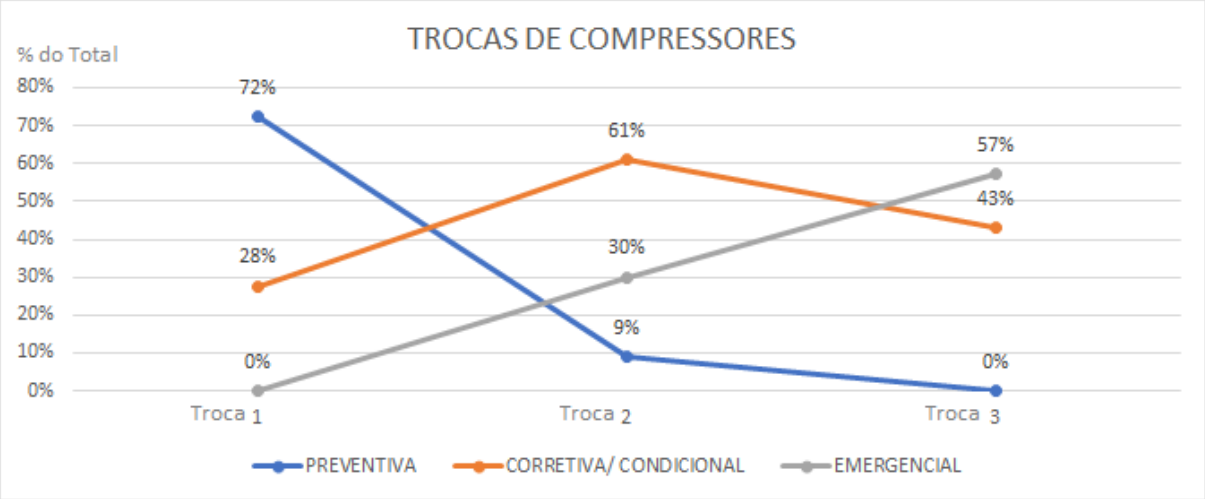
Em contrapartida, os dados evidenciam um aumento expressivo nas notas YEM (emergenciais) e YCO/YCM (corretivas). Esse aumento significativo sugere que, com a mudança para o modelo de manutenção baseado no consumo, os equipamentos estão operando por mais tempo sem intervenções preventivas regulares por não completarem a quantidade de litragem mínima para realização das manutenções. A ausência dessas intervenções preventivas pode ter contribuído para o aumento nas notas de manutenção emergencial e corretiva, indicando a necessidade de avaliar a eficácia do novo modelo de manutenção em termos de confiabilidade e disponibilidade operacional.

Essas transformações nas estratégias de manutenção serão claramente visíveis nos gráficos apresentados, onde se espera observar falhas ocorrendo em intervalos de tempo mais curtos. Essa mudança paradigmática reforça a necessidade de uma abordagem analítica detalhada, considerando não apenas a frequência de falhas, mas também os fatores ambientais e operacionais que influenciam o desempenho do equipamento. A análise desses gráficos permitirá uma compreensão mais profunda dos padrões de falha, orientando futuras decisões de manutenção e contribuindo para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes e eficientes.

Essas observações sublinham a importância de uma estratégia de manutenção equilibrada e adaptável, considerando não apenas o tempo, mas também os padrões de consumo do equipamento. O entendimento dessas tendências é crucial para aprimorar as práticas de manutenção, garantindo a eficiência operacional e a prolongação da vida útil dos equipamentos.

A Figura 4.1 exibe a evolução dos números de notas YPM, YCO e YEM ao longo dos anos, 2015 a 1023. Para esse gráfico foram analisadas as notas em 3 períodos, 2015 a 2016, 2018 a 2019 e 2023. Esses registros fornecem uma visão detalhada das ocorrências de manutenção preventiva, corretiva e emergencial, oferecendo *insights* valiosos sobre a performance e as necessidades de manutenção ao longo do tempo.

Figura 4.1 – Evolução das notas de manutenção



Fonte: O Autor, (2023)

A Figura 4.1, está apresentando a evolução da quantidade de notas ao logo de três trocas, pode-se observar que na primeira troca há 72% de notas Preventivas, 28% corretiva e 0% emergenciais. Contudo, ao logo das trocas nota-se que essas quantidades invertem, mostrando assim a real situação dos equipamentos, em estresse e com uma vida útil menor do que a preventiva.

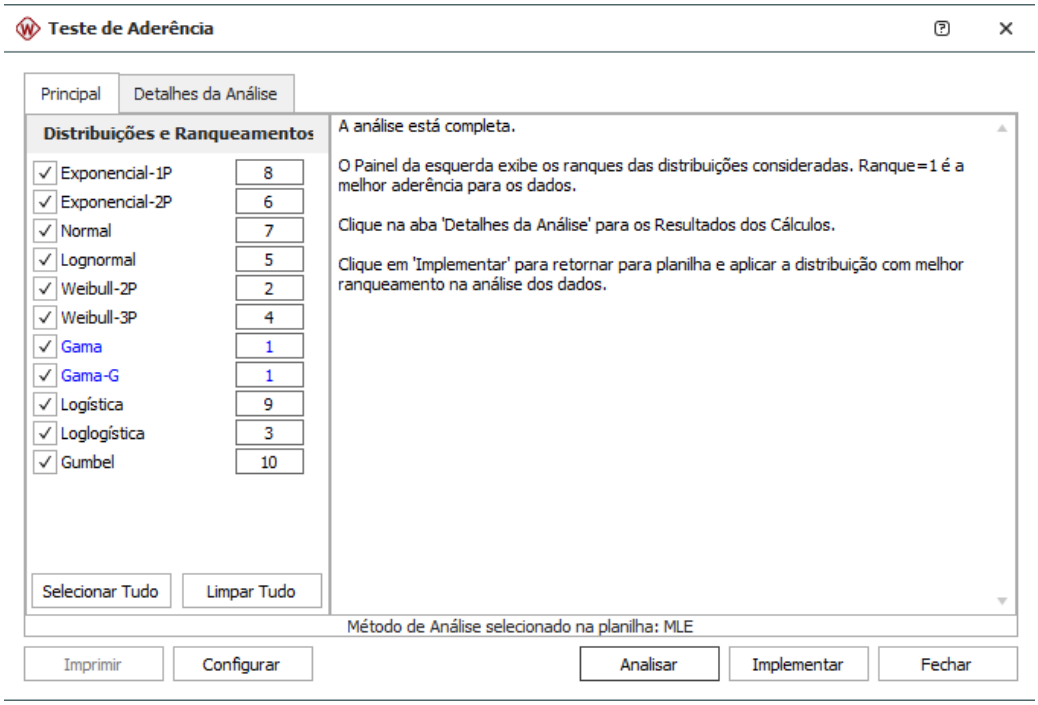
4.1. Simulação

Para conduzir esta análise de confiabilidade, foram adotadas três abordagens distintas, cada uma oferecendo perspectivas valiosas sobre a confiabilidade do

sistema de compressor. A primeira abordagem envolveu a utilização exclusiva dos dados de tempo entre as trocas de equipamento. Neste contexto, foram realizados diversos testes considerando diferentes conjuntos de dados, como toda a população (1) (falhas e suspensões), apenas as últimas falhas e suspensões (2), e somente as falhas (3). Após uma análise minuciosa, foi concluído que a abordagem mais representativa e condizente com a realidade do sistema em questão seria a utilização de toda a população de dados (1), contemplando todos os tempos entre falhas e suspensões. Por outro lado, a segunda abordagem adotada visou enriquecer a análise por meio de simulações. Nesse sentido, foi feita uma simulação em que todos os dados, tanto falhas quanto suspensões, porém considerando o consumo de combustível utilizado por cada locomotiva nos períodos entre as falhas dos equipamentos. Por último, foram incorporadas informações sobre o consumo de diesel de cada locomotiva nos intervalos de trocas dos equipamentos juntamente com o tempo entre as trocas. Essa estratégia permitiu uma comparação mais abrangente e aprofundada, agregando uma dimensão adicional aos resultados obtidos pela primeira abordagem.

Para as simulações, realizou-se o teste de aderência *e* aos modelos matemáticos, ver Figura 4.2. Observa-se que o modelo Gama apresenta a melhor aderência para os dados, mas a escolha recaiu sobre o modelo Weibull-2P.

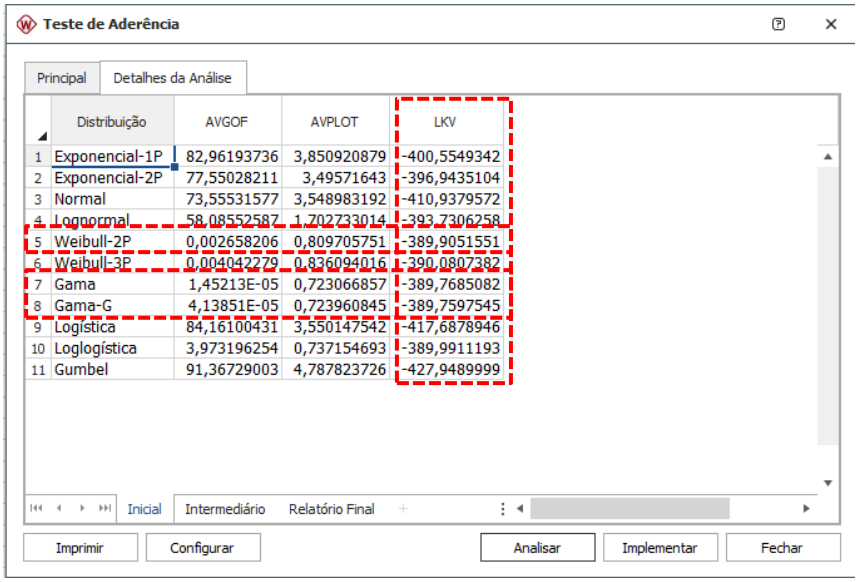
Figura 4.2 – Teste de aderência



Fonte: O Autor, (2023)

A escolha do modelo Weibull-2P sobre o modelo Gama foi fundamentada no teste de aderência realizado no software Weibull++. Embora ambos tenham apresentado valores bastante próximos, ver Figura 4.3, a familiaridade e expertise no manuseio do modelo Weibull-2P influenciaram diretamente na decisão. O conhecimento mais aprofundado sobre as características e aplicabilidade desse modelo proporcionou uma maior confiança na sua escolha para representar a distribuição dos dados do sistema de compressores das locomotivas DASH-9W.

Figura 4.3 – Tabela de dados do Testes de Aderência



Fonte: O Autor, (2023)

A escolha do modelo Weibull-2P é respaldada pelo valor de LKV, que representa a função de verossimilhança. O LKV, ou *likelihood value,* é uma métrica que indica o grau de ajuste dos dados ao modelo estatístico em questão. Ao analisar a Figura 4.3, observou-se que o valor de LKV para o modelo Weibull-2P apresentou uma adequação aos dados tão comparável quanto ao modelo Gama. Esse indicador reforça a decisão estratégica de adotar o modelo Weibull-2P, pois um maior valor de LKV sugere um ajuste mais preciso e confiável dos dados observados no sistema de compressores das locomotivas DASH-9W.

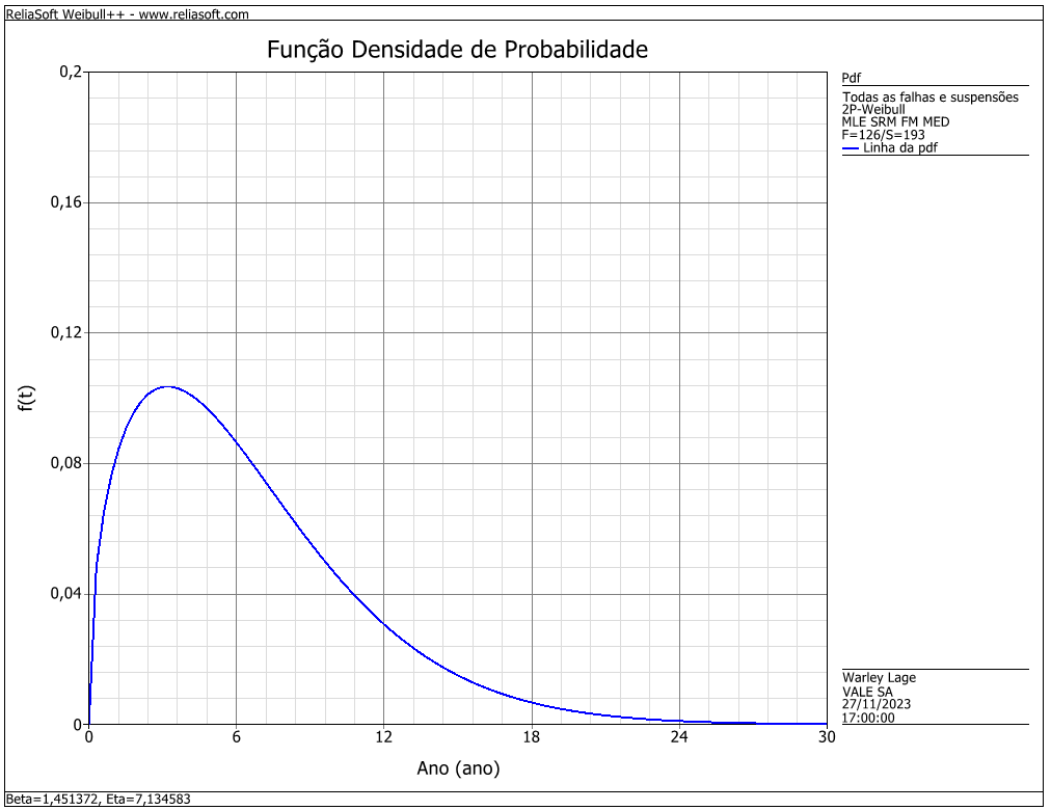
4.2. Análise gráfica

Na fase de análise gráfica, serão apresentados os resultados obtidos por meio da simulação de dados, considerando o tempo entre falhas, consumos entre falhas e a relação entre vida e consumo. Os gráficos gerados fornecerão informações importantes sobre o comportamento do sistema de compressores das locomotivas DASH-9W, permitindo uma compreensão mais aprofundada das variáveis envolvidas e suas interações. Essa análise visual ajuda bastante na interpretação dos dados simulados, oferecendo uma representação gráfica clara e facilitando a identificação de tendências e padrões relevantes.

- PDF (Função Densidade de Probabilidade):

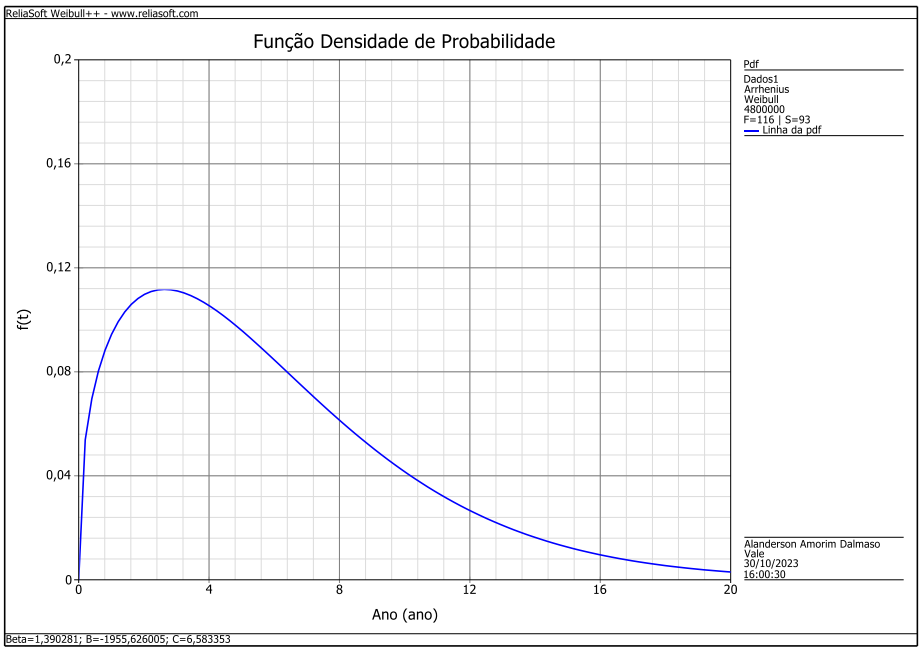
A análise da função densidade de probabilidade (PDF) proporciona uma visão detalhada da distribuição de probabilidade dos dados. A partir das Figuras 4.4 a 4.6, é possível identificar a forma da distribuição e avaliar como os dados estão distribuídos em torno dos parâmetros do modelo escolhido, ver Figuras 4.4 a 4.6.

Figura 4.4 - Gráfico da PDF (Tempo entre falhas)



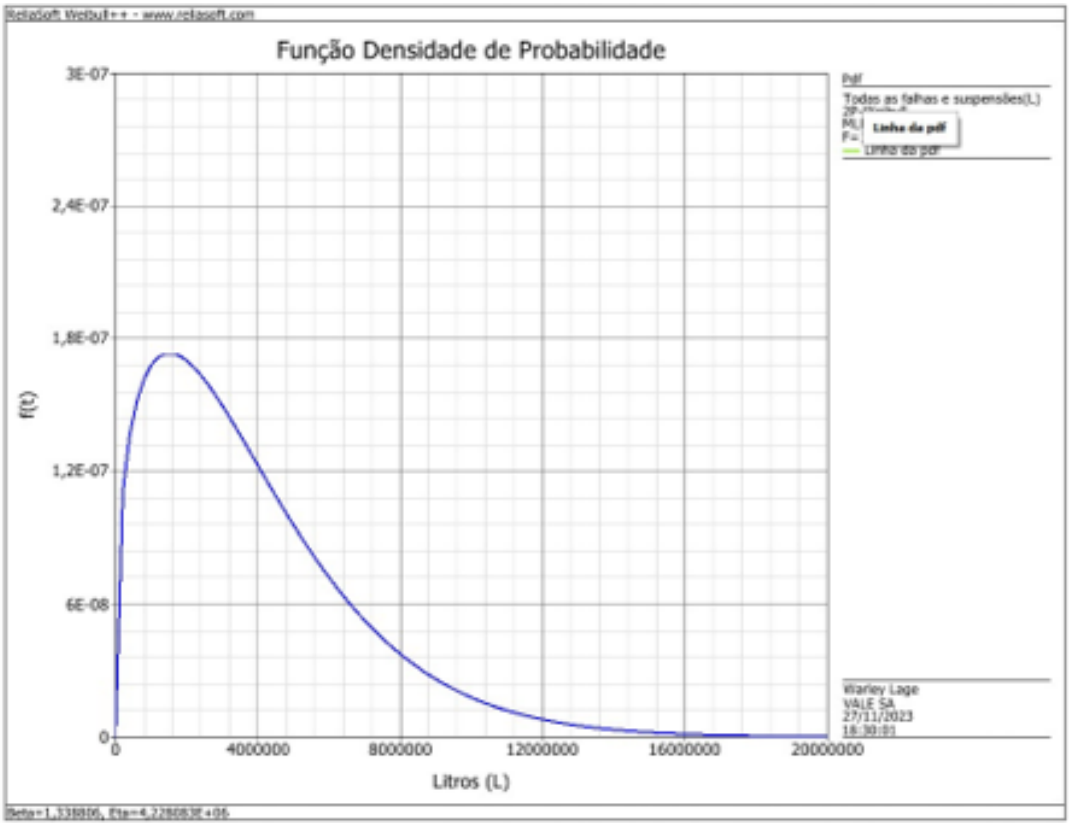
Fonte: O Autor, (2023)

Figura 4.5 - Gráfico da PDF (vida vs Consumo)



Fonte: O Autor, (2023)

Figura 4.6 - Gráfico da pdf (Consumo)



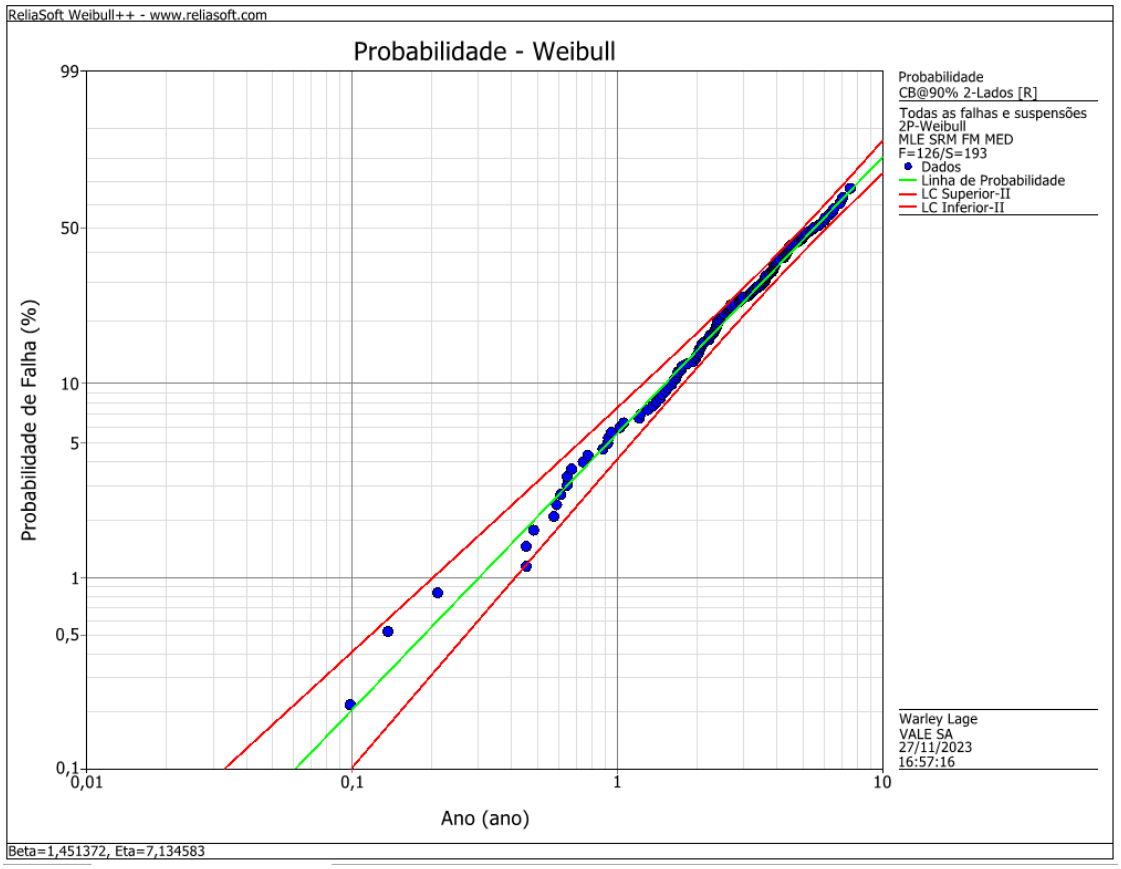
Fonte: O Autor, (2023)

Os gráficos de Função Densidade de Probabilidade (PDF) revelam uma concentração significativa de eventos em torno de três anos apontando para um ponto crítico na ocorrência desses fenômenos, para ambas as simulações e para o caso do consumo observa-se que há uma maior concentração em torno de 3 milhões de litros, ou seja, aproximadamente três. A notável diminuição após esse pico sugere uma mudança ou redução na frequência desses eventos, proporcionando informações temporais cruciais para estratégias de manutenção e tomada de decisões.

- Probabilidade para Uso Normal Weibull:

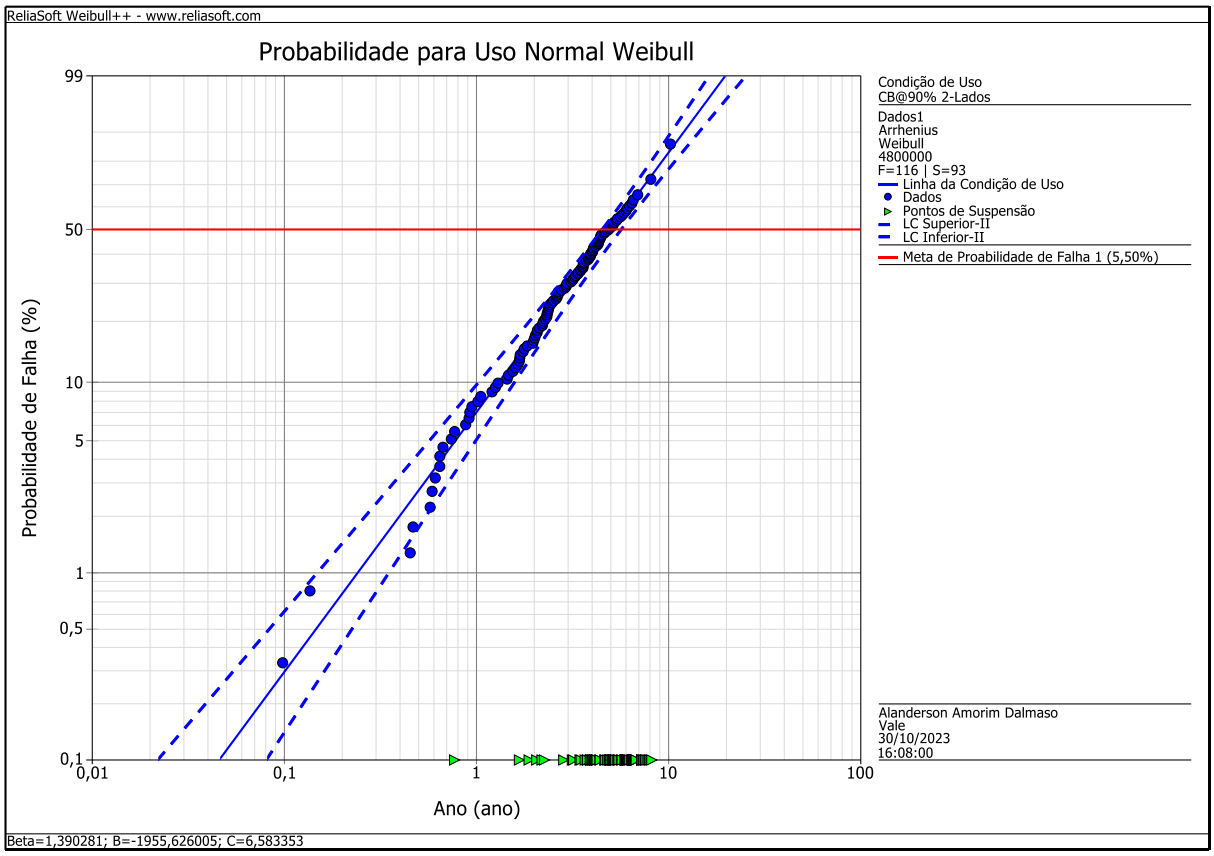
Este gráfico compara a probabilidade para uso normal com a distribuição Weibull conforme Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9. A visualização permite identificar divergências ou convergências entre essas distribuições, fornecendo informações sobre a adequação do modelo escolhido. Observa-se que praticamente todos os dados se encontram entres as linhas de limite superior e inferior, indicando assim uma boa aderência ao método utilizado.

Figura 4.7 - Probabilidade para Uso Normal Weibull (Tempo entre falhas)



Fonte: O Autor, (2023)

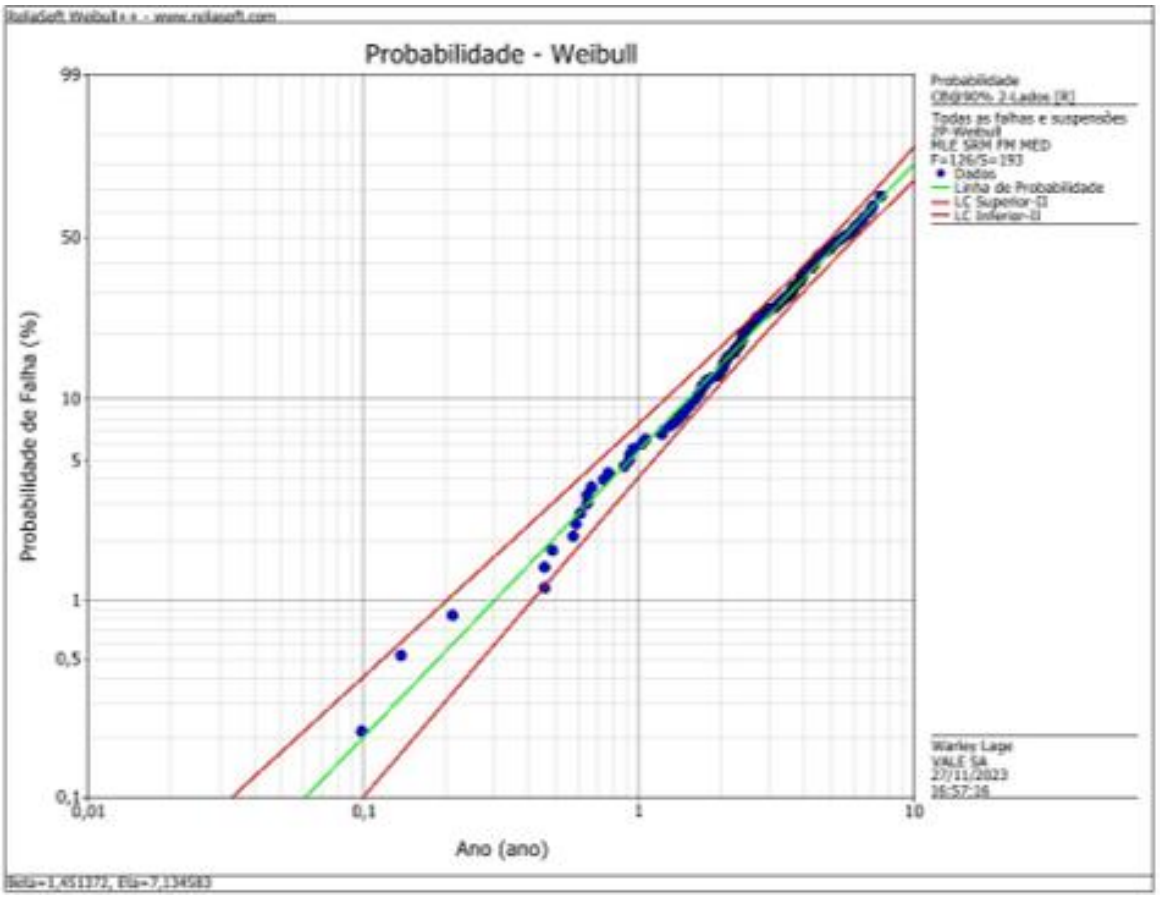
Figura 4.8. - Probabilidade para Uso Normal Weibull (Vida vs Consumo)



Fonte: O Autor, (2023)

Nesse gráfico, foi traçada uma reta de meta de probabilidade de falha, indicando que poucos eventos atingiriam esse patamar. Essa referência é essencial para avaliar a probabilidade de falha do equipamento em relação aos dados observados. A meta de probabilidade de falha é um ponto de referência no gráfico que indica a probabilidade desejada de que o equipamento falhe em um determinado período. Nesse contexto, a linha de meta de probabilidade de falha em 50% sugere o ponto em que metade dos eventos de falha esperados ocorreriam, proporcionando uma referência crucial para a análise da confiabilidade do equipamento.

Figura 4.9 - Probabilidade para Uso Normal Weibull (Consumo)



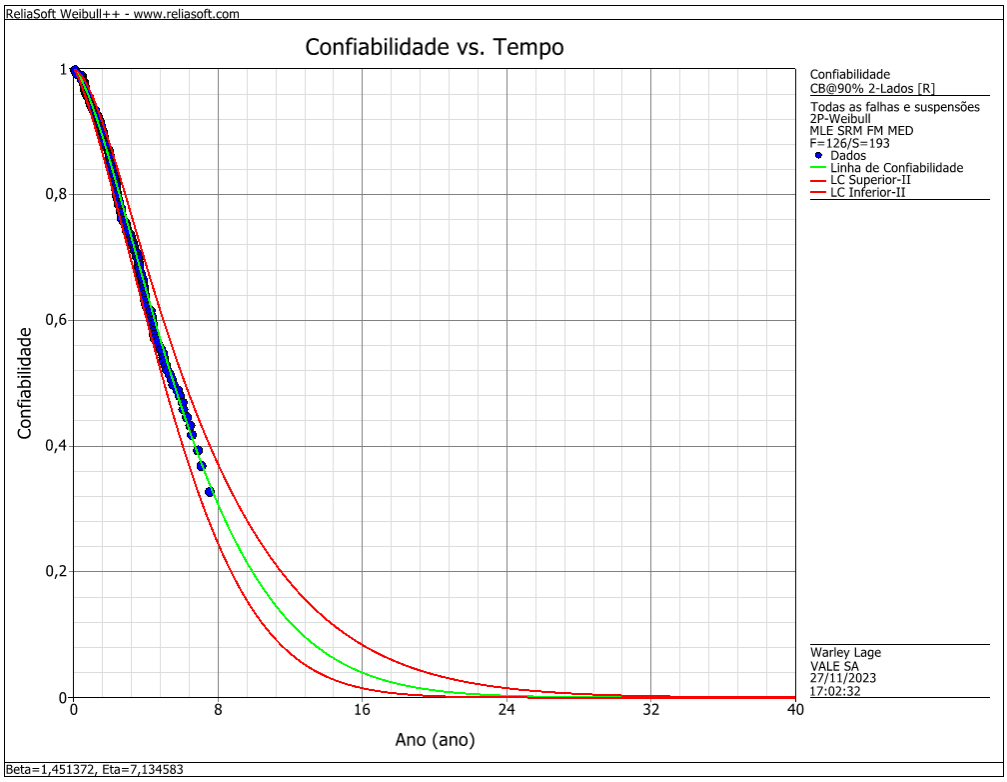
Fonte: O Autor, (2023)

No contexto da análise dos gráficos de probabilidade de falha, é evidente que em ambas as simulações os dados apresentam uma aderência satisfatória às curvas, mantendo-se dentro dos limites de confiança estabelecidos. Contudo, é importante observar a presença de alguns *outliers*, pontos que se afastam da tendência principal, indicando possíveis eventos ou condições excepcionais.

- Confiabilidade vs Tempo

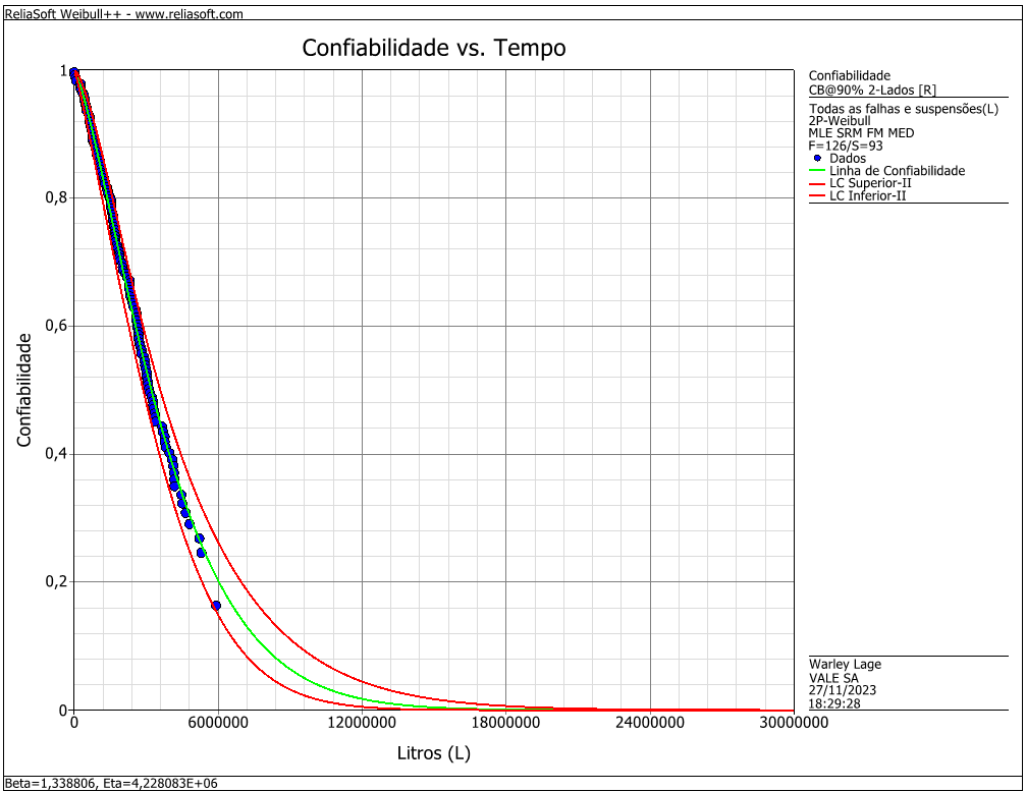
Agora, adentrando aos gráficos de confiabilidade em função do tempo, é essencial ressaltar que essas representações foram geradas para duas das simulações realizadas, especificamente para os dados de tempo entre falhas e consumo entre falhas. Notavelmente, a simulação Vida vs Consumo não proporciona essa visualização direta da confiabilidade ao longo do tempo, pois está centrada na relação entre vida útil e consumo de diesel, ver Figuras 4.10 e 4.11.

Figura 4.10 – Confiabilidade vs Tempo (Tempo entre falhas)



Fonte: O Autor, (2023)

Figura 4.11 – Confiabilidade vs Tempo (Consumo)



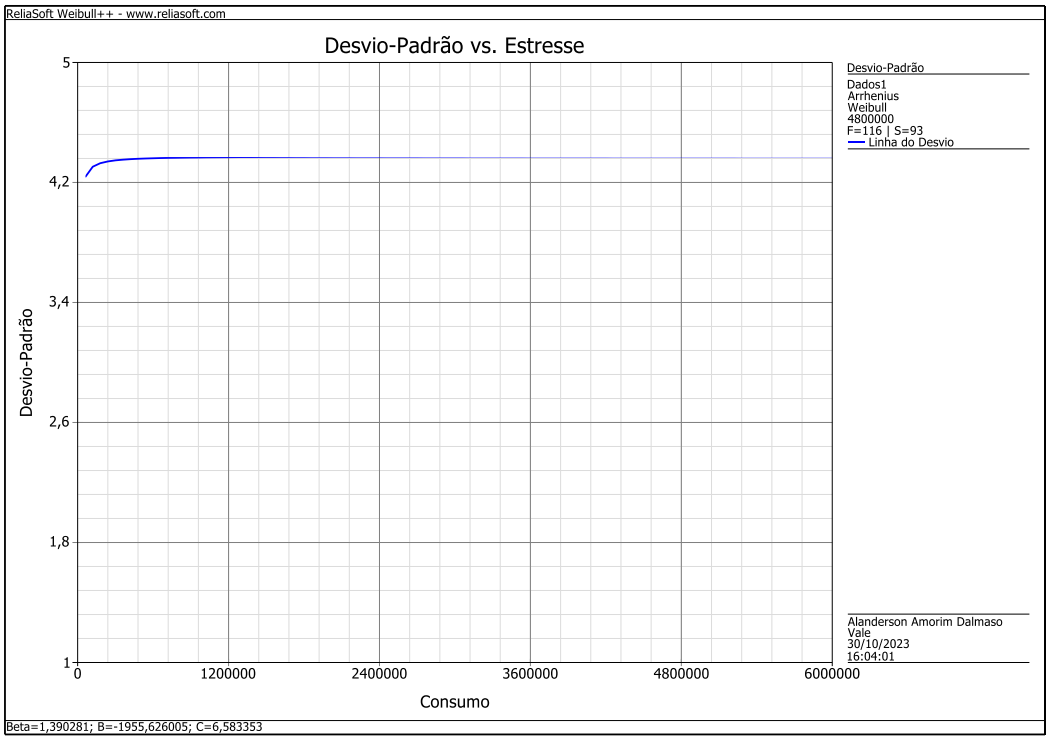
Fonte: O Autor, (2023)

Mais uma vez, ao observar-se os gráficos de confiabilidade em função do tempo para as simulações de tempo entre falhas e consumo entre falhas, destaca-se a notável aderência dos dados às curvas de confiabilidade. Essa concordância, evidenciada dentro dos limites de confiança, fortalece a confiabilidade das análises realizadas e reforça a robustez dos modelos estatísticos adotados.

- Desvio Padrão vs. Estresse:

A relação entre o desvio padrão e o estresse é explorada na Figura 4.12. Ele destaca como a variabilidade dos dados (representada pelo desvio padrão) se comporta em diferentes níveis de estresse, oferecendo informações valiosas sobre a estabilidade do sistema em condições diversas.

Figura 4.12 – Desvio-Padrão vs Estresse (Vida vs Consumo)



Fonte: O Autor, (2023)

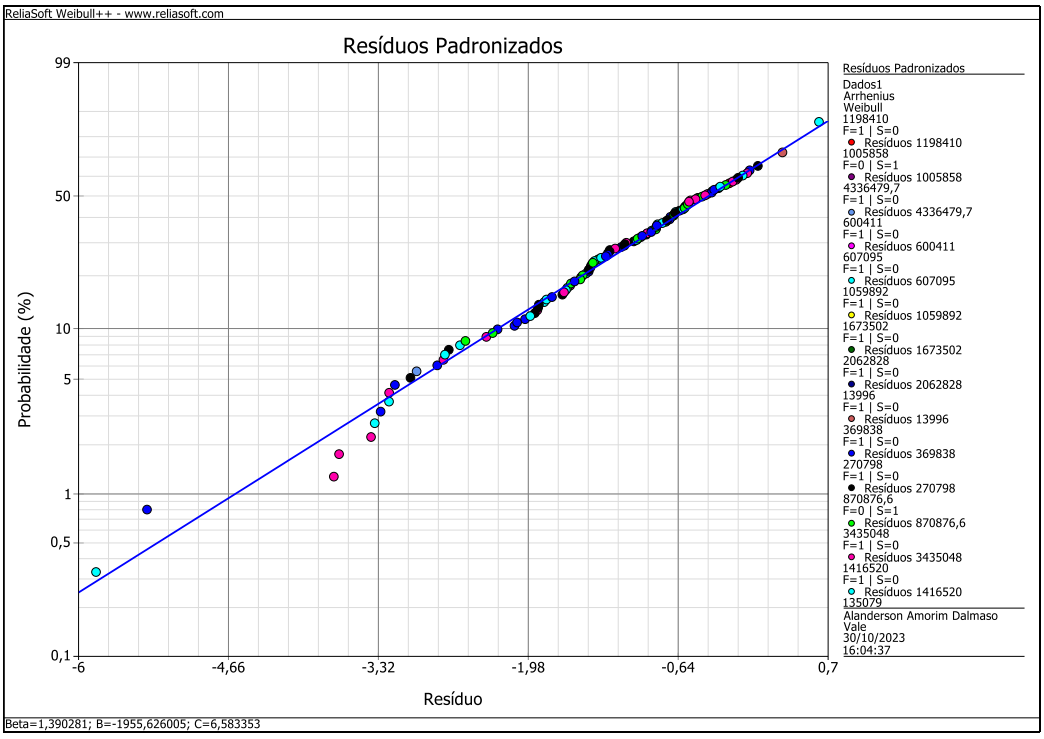
No gráfico de desvio padrão em relação ao consumo, observa-se uma linha que se mantém estável em torno de 4.2, estabilizando em 4.3. Essa estabilidade sugere uma consistência na variabilidade dos dados em relação à média para diferentes níveis de consumo. Em termos práticos, isso indica que, independentemente das variações nos

consumos de diesel, a dispersão nos tempos entre as trocas dos compressores permanece relativamente constante em torno desses valores de desvio padrão. Essa regularidade pode ser interpretada como uma previsibilidade no desempenho do sistema, indicando uma relação consistente entre o consumo de diesel e a confiabilidade do equipamento, evidenciando uma resposta estável do sistema às diferentes condições de operação.

- Resíduos Padronizados:

Os resíduos padronizados, conforme Figura 4.13, são analisados para verificar a qualidade do ajuste do modelo escolhido. Este gráfico é fundamental para identificar padrões ou discrepâncias nos resíduos, contribuindo para a validação do modelo estatístico.

Figura 4.13 – Resíduos Padronizados.



Fonte: O Autor, (2023)

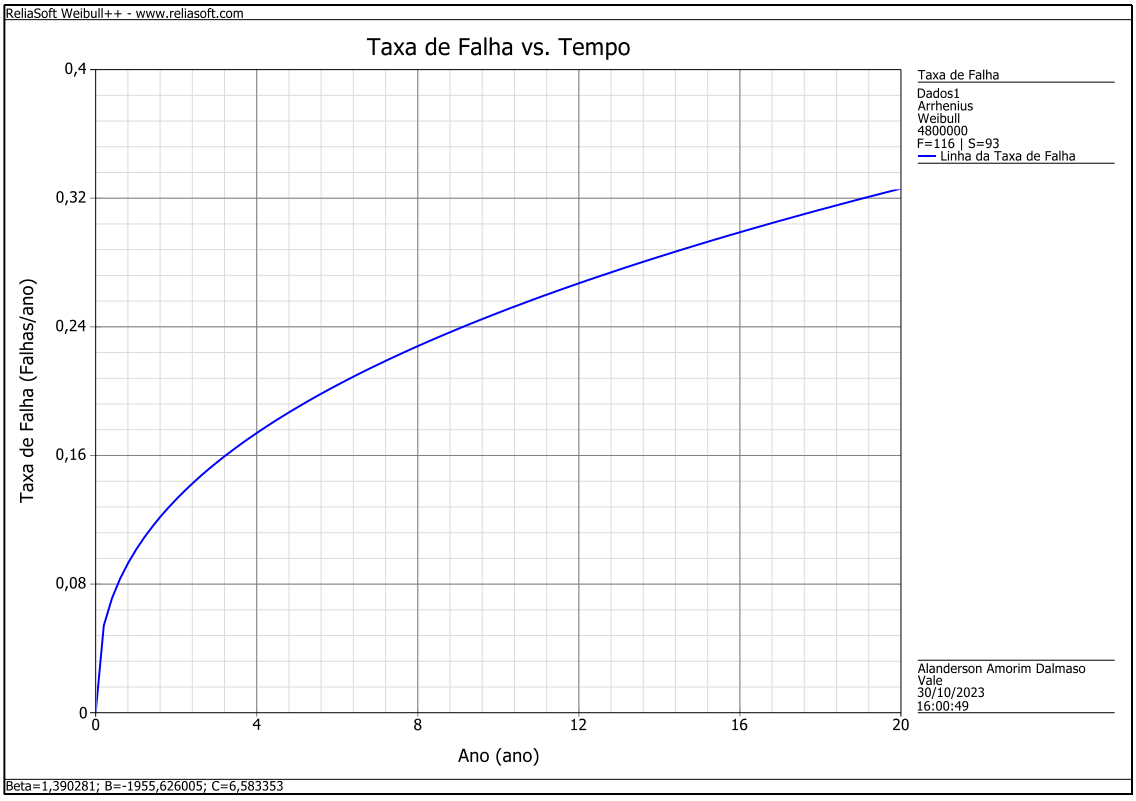
A observação de todos os pontos dos resíduos padronizados localizados próximos à linha de referência, com apenas alguns poucos pontos se distanciando dela, sugere

que o modelo utilizado para a análise está adequadamente ajustado aos dados. Os resíduos padronizados representam a diferença entre os valores observados e os valores esperados pelo modelo, divididos pelo desvio padrão esperado. A proximidade dos pontos à linha de referência, indica que o modelo tem uma boa capacidade de explicar a variabilidade nos dados. Os pontos mais afastados podem representar casos em que o modelo não é tão preciso, esses "*outlier*" são alguns casos em que o equipamento teve uma avaria precoce ou caso do tipo, mas, no geral, a distribuição próxima à linha de referência indica um ajuste satisfatório do modelo estatístico aos dados observados.

- Taxa de Falha por Tempo:

A relação entre a taxa de falha e o tempo é representada no gráfico da Figura 4.14. Ele destaca como a taxa de falha varia ao longo do tempo, permitindo uma compreensão mais detalhada do comportamento do sistema em diferentes estágios de sua vida útil.

Figura 4.14 – Curva da Taxa de Falha.



Fonte: O Autor, (2023)

A análise do gráfico de taxa de falha versus tempo revela informações cruciais sobre o comportamento do equipamento ao longo de sua vida útil. A curva logarítmica, começando em zero, sugere que inicialmente o equipamento experimenta uma taxa de falha mais elevada, ou seja, pelo fato de a taxa de falha ser a tangente do ponto em questão, pode-se observar que no período inicial tem-se uma tangente ao ponto mais inclinada, nesse caso a taxa de falha é maior, que diminui ao longo do tempo, taxa de falha menor, tangente com menor inclinação. Essa tendência pode indicar uma fase inicial de falhas rápidas, típica da "infância" do equipamento. No entanto, o fato de a taxa de falha não convergir para zero pode apontar para um cenário desafiador.

A ausência de manutenção preventiva constante pode ser um fator contribuinte. O equipamento, submetido a um estresse constante sem intervenções regulares, pode apresentar uma aceleração na taxa de falha, indicando uma propensão a falhas mais rápidas. Essa observação destaca a importância da manutenção preventiva na gestão da confiabilidade do equipamento, influenciando diretamente sua performance ao longo do tempo. Esses *insights* reforçam a necessidade de estratégias proativas para prolongar a vida útil e otimizar o desempenho operacional do sistema.

- Vida vs. Estresse:

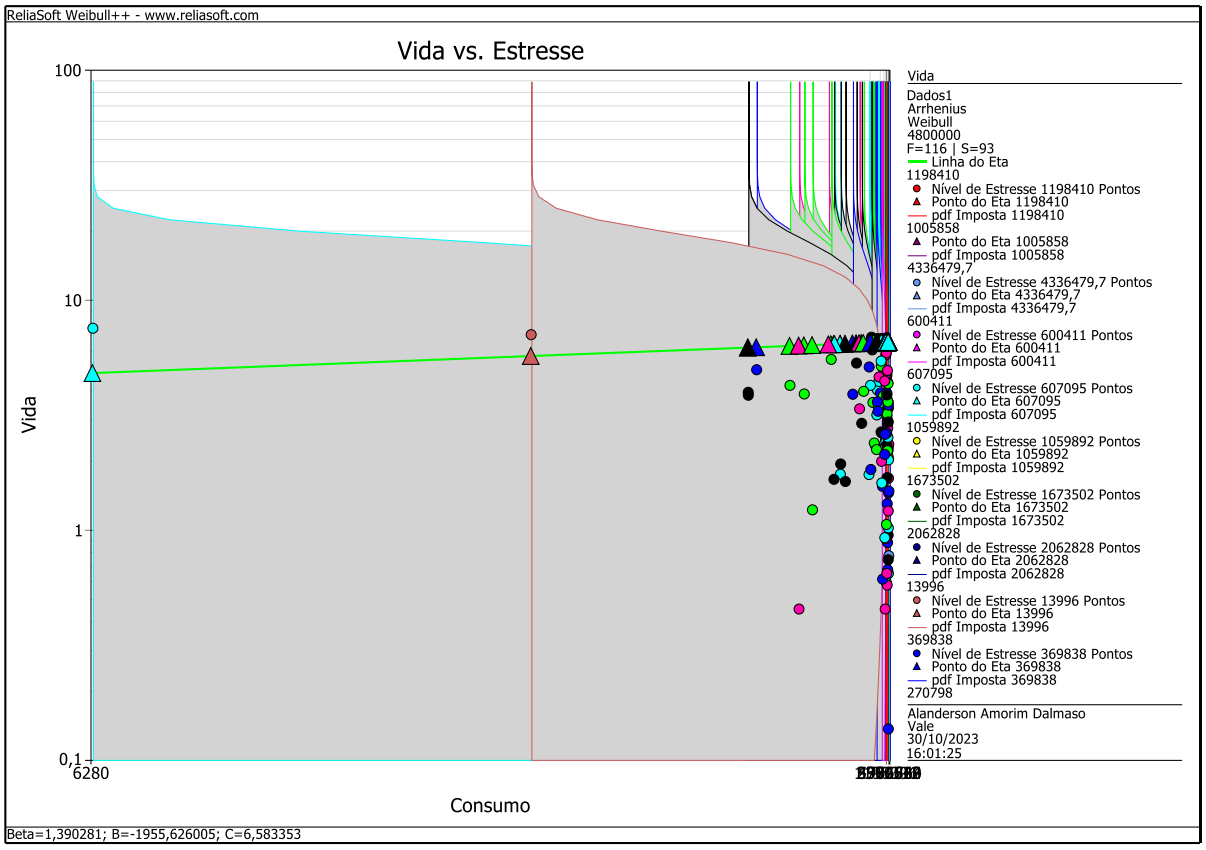
O último gráfico, apresentado na Figura 4.15, explora a relação entre a vida útil do equipamento e o estresse aplicado. Isso fornece informações sobre como diferentes níveis de estresse impactam a durabilidade do sistema, contribuindo para a tomada de decisões informadas em relação à manutenção e operação.

O gráfico Vida vs. Estresse é uma representação visual da relação entre a vida útil de um componente e o nível de estresse a que está sujeito. No contexto da análise de confiabilidade, o estresse refere-se a qualquer fator que possa influenciar a durabilidade ou a taxa de falha de um equipamento. Pode ser uma carga, temperatura, vibração, pressão, entre outros, dependendo do contexto específico da aplicação.

O gráfico normalmente mostra como a vida útil de um componente diminui à medida que o estresse aumenta. Ele é particularmente útil para identificar padrões de desgaste ou falha em resposta a diferentes condições operacionais. Ao analisar esse gráfico, é possível determinar em que ponto o componente começa a apresentar uma

taxa significativa de falhas e como esse comportamento se relaciona com as variações no estresse ao longo do tempo.

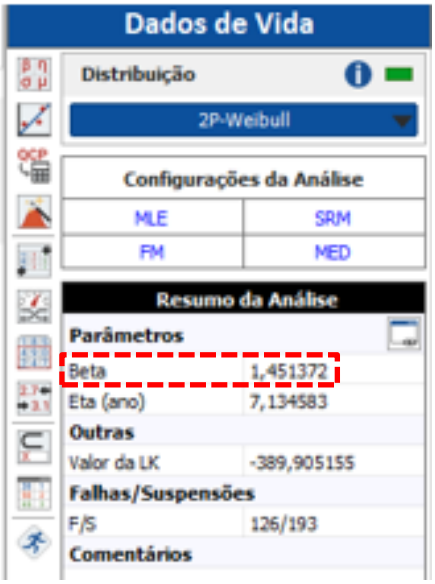
Figura 4.15 – Vida vs Estresse



Fonte: O Autor, (2023)

No desfecho da análise gráfica, destaca-se a identificação dos parâmetros para os dados, sendo o beta um dos elementos-chave de avaliação. Observou-se um valor de 1,45 para o parâmetro beta conforme Figura 4.16, indicando que os dados em questão estão enquadrados na Região 3 da curva da banheira de confiabilidade, ver Figura 3.6. Essa região é caracterizada pelo desgaste e envelhecimento dos equipamentos, sugerindo previamente que os compressores das locomotivas DASH-9W estão operando em uma fase de degradação. Essa informação é fundamental para embasar estratégias de manutenção mais eficazes e direcionadas, considerando o atual estado de degradação dos equipamentos.

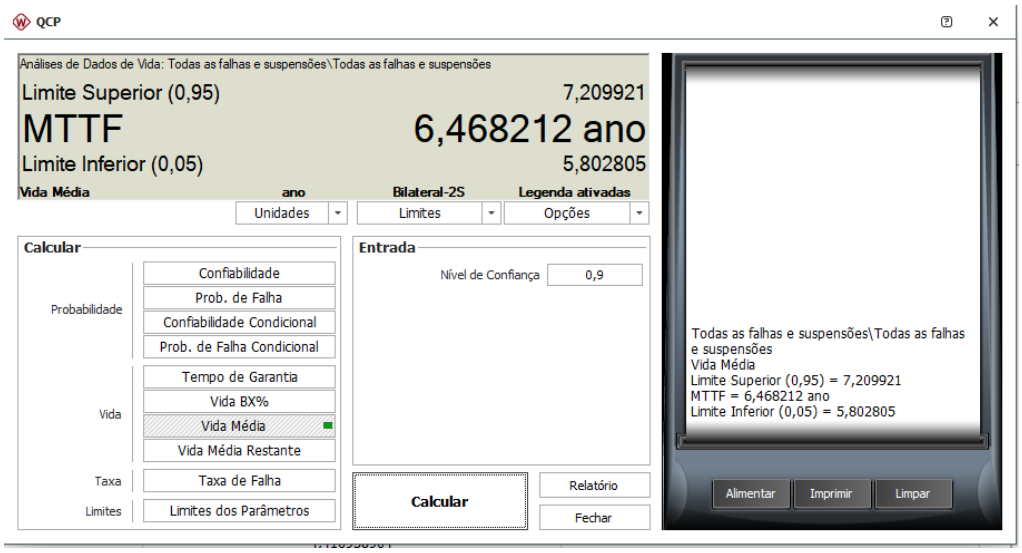
Figura 4.16 – Dados da Simulação



Fonte: O Autor, (2023)

Com base nos gráficos e considerando a atual situação de manutenção, que é projetada para ocorrer a cada 5 milhões de litros de consumo, originalmente pensada para um consumo anual de 1 milhão de litros, os cálculos da vida média do equipamento foram executados inicialmente sob a premissa desse intervalo de tempo, ver Figuras 4.17 e 4.18. Essa abordagem proporciona uma avaliação abrangente da durabilidade média dos compressores, considerando o plano de manutenção estabelecido e os padrões de consumo projetados para o sistema de compressores das locomotivas DASH-9W.

Figura 4.17 – Vida Média (Tempo entre falhas)



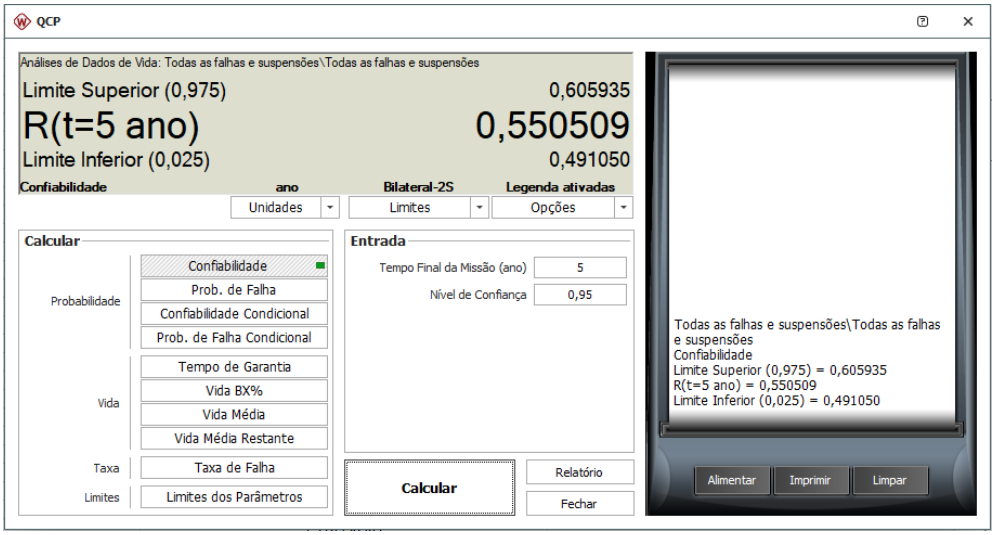
Fonte: O Autor, (2023)

Figura 4.18 – Vida Média (Consumo)

Fonte: O Autor, (2023)

Para a frequência de manutenção do plano preventivo dos compressores, a confiabilidade é mostrada ao fim do período de cinco anos, na Figura 4.19.

Figura 4.19 – Confiabilidade (Plano de 5 anos)



Fonte: O Autor, (2023)

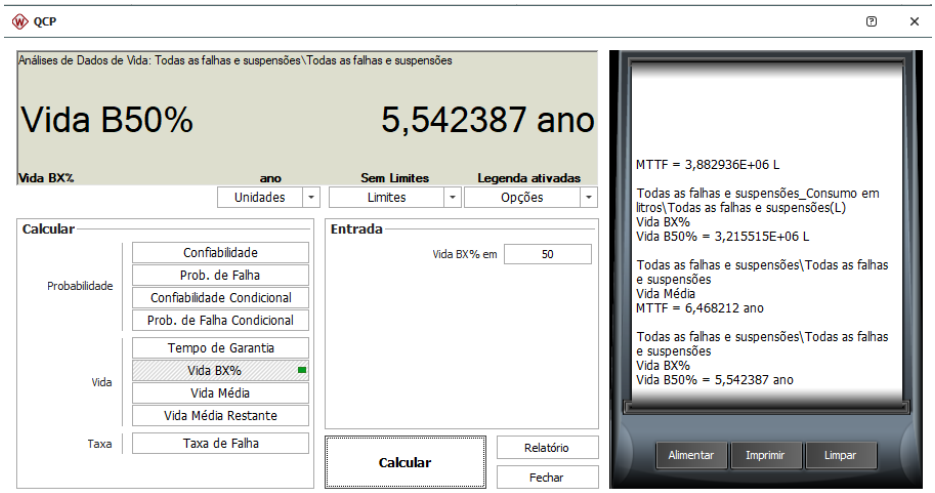
Com base em um plano de cinco anos, os resultados indicam uma confiabilidade de 55,05% para os compressores.

Considerando a premissa de que a substituição do conjunto do compressor deve ocorrer como uma unidade, ou seja, no plano preventivo, ao retirar um compressor para manutenção, todo o conjunto é substituído. Estabeleceu-se uma confiabilidade

objetivo de 50% para os compressores considerando o cenário atual de desgastes do equipamento.

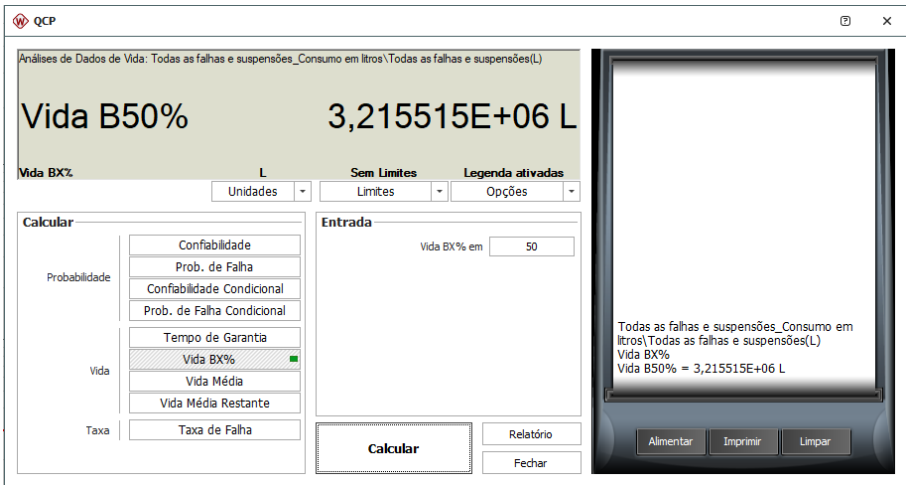
Esse valor de confiabilidade de 50% é adotado como referência para determinar a periodicidade do plano de manutenção preventiva. Assim, foi calculada a vida B50% para os compressores, representando o tempo de operação em que 50% dos compressores podem falhar, mantendo uma confiabilidade de 50%, conforme apresentado na Figura 4.20 e 4.21. Esse indicador é fundamental para orientar a gestão do ciclo de vida dos compressores e otimizar as estratégias de manutenção preventiva.

Figura 4.20 – Vida B50% (Tempo entre falhas)



Fonte: O Autor, (2023)

Figura 4.21 – Vida B50% (Litros entre falhas)



Fonte: O Autor, (2023)

Os resultados dos cálculos de vida para os compressores foram compilados cobrindo uma variedade de confiabilidades, desde 10% até 100%, conforme Figura 4.22 e 4.23. Essa abordagem proporciona uma visão abrangente das possíveis durações operacionais associadas a diferentes níveis de confiabilidade. Tanto considerando o tempo de operação quanto o consumo, as informações contidas nesta tabela serão essenciais para orientar as decisões estratégicas de manutenção e fornece uma base sólida para o gerenciamento eficiente da frota de compressores. A análise desses dados contribui para uma compreensão mais aprofundada da vida útil dos compressores em diferentes cenários operacionais, permitindo uma tomada de decisão embasada em dados concretos.

Figura 4.22 – Confiabilidade e probabilidade de falha (Tempo entre falhas)

Tempo (A):	1,51	2,54	3,51	4,49	5,54	6,71	8,1	9,91	12,67	20,43
Confiabilidade (%):	90	80	70	60	50	40	30	20	10	1
Probabilidade de Falha (%):	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99

Fonte: O Autor, (2023)

Figura 4.23 – Confiabilidade e probabilidade de falha (Consumo)

Consumo(L):	787.314	1.379.046	1.957.584	2.560.014	3.215.515	3.960.818	4.856.897	6.032.754	7.883.061	13.229.530
Confiabilidade (%):	90	80	70	60	50	40	30	20	10	1
Probabilidade de Falha (%):	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99

Fonte: O Autor, (2023)

Os valores destacados nas Figuras 4.22 e 4.23 representam de maneira específica os dados apresentados nas Figuras 4.20 e 4.21, oferecendo uma visão direta e concreta das estimativas de vida para os compressores em diferentes condições de operação.

4.3. Síntese e Conclusão do Capítulo

Neste capítulo, as simulações foram conduzidas utilizando o *software* Weibull ++, onde os melhores testes de aderência foram ajustados para garantir a confiabilidade dos resultados. Após a aplicação dos modelos estatísticos e análise dos gráficos gerados, os resultados obtidos em ambas as simulações foram considerados altamente satisfatórios, demonstrando coerência e consistência nas análises.

É relevante ressaltar que o processo de simulação envolveu uma avaliação minuciosa dos dados, incluindo uma análise detalhada dos gráficos e resultados gerados pelo *software*. A escolha cuidadosa dos modelos estatísticos e o ajuste adequado dos parâmetros permitiram uma representação fiel do comportamento do equipamento ao longo do tempo.

No próximo capítulo, o último desta pesquisa, serão apresentadas as conclusões detalhadas sobre os resultados observados nas simulações. Além disso, serão discutidas propostas para trabalhos futuros, visando aprimorar ainda mais a compreensão e gestão da confiabilidade do sistema em análise.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, a análise de confiabilidade do sistema de compressores das locomotivas da frota DASH-9W proporcionou uma compreensão aprofundada da condição de manutenção desses equipamentos fundamentais para o funcionamento do freio das locomotivas. A escolha estratégica desse componente ressalta a importância desta análise para a gestão eficaz da manutenção.

Durante a pesquisa, diferentes modelos estatísticos, como Weibull, Lognormal e Exponencial, foram explorados, proporcionando uma visão abrangente da confiabilidade do equipamento ao longo do tempo. Os dados provenientes do sistema SAP de SISGAF e de planilhas de controle de consumo diário foram tratados meticulosamente, permitindo uma análise minuciosa.

A comparação entre métodos de avaliação, considerando apenas o tempo entre trocas, consumo e incluindo vida *versus* consumo, revelou perspectivas valiosas. A simulação no *software* Weibull++ resultou em uma vida útil do equipamento em torno de seis anos. No entanto, a identificação do pico da taxa de falha em aproximadamente quatro anos alertou para a necessidade de atenção específica.

A transição do modelo de manutenção preventiva baseada no tempo (cinco anos) para o consumo (cinco milhões de litros) evidenciou o comportamento do equipamento analisado, sujeito a um ciclo de serviço rigoroso, quanto à necessidade de manutenção preventiva. A redução nas notas de manutenção preventiva (YPM) após 2015 e o aumento nas notas de manutenção emergencial (YEM) e corretiva (YCO) após essa data evidenciaram o impacto dessa transição.

Diante desse cenário, a recomendação é retomar o plano de manutenção baseado no tempo, proporcionando uma abordagem mais estável e previsível. Essa mudança visa aprimorar a confiabilidade do sistema de compressores, garantindo uma gestão mais eficiente da manutenção. Medidas adicionais, como a implementação de estratégias de manutenção preditiva baseadas em monitoramento contínuo e tecnologias inovadoras, podem ser exploradas para otimizar ainda mais a gestão da confiabilidade desses equipamentos críticos.

No cenário atual dos ativos, considerar uma mudança de estratégia de manutenção para tempo pode ser uma opção viável. Com base no estudo, uma estratégia de manutenção baseada no tempo poderia ocorrer aproximadamente a cada 5 anos.

Caso essa mudança não seja possível, seria necessária uma reavaliação do consumo para um valor de aproximadamente 3,2 milhões de litros. Essas considerações refletem a importância de uma gestão flexível e adaptável da manutenção, alinhada às condições específicas do equipamento e às demandas operacionais.

Portanto, o estudo de análise de dados de vida atingiu plenamente o seu propósito, permitindo uma avaliação crítica da estratégia atual de manutenção. O alcance dos objetivos gerais e específicos delineados inicialmente é evidente nos resultados obtidos ao longo deste trabalho.

Durante a condução desta pesquisa, identificaram-se desafios no tratamento dos dados provenientes do sistema informatizado de manutenção. Essas dificuldades impactaram significativamente o tempo dedicado ao processamento dos dados. Essa observação ressalta a necessidade de uma revisão na forma de *input* e *download* dos dados no sistema, visando otimizar futuras análises.

Diante dos resultados apresentados, a recomendação sugerida é: recomenda-se a transição da gestão de manutenção para um modelo baseado no tempo, abandonando a dependência do consumo de combustível. Propõe-se reduzir o intervalo para a manutenção preventiva para 5 anos, permitindo um período mais curto para ajustar a condição dos equipamentos. Essa mudança visa aprimorar a confiabilidade do sistema de compressores, garantindo uma gestão mais eficiente da manutenção. Adicionalmente, sugere-se a revisão da política de consumo, considerando a redução do limite de 5 milhões para 3 milhões de litros. Essa medida busca otimizar a gestão da confiabilidade dos compressores, alinhando-a às condições específicas do equipamento e às demandas operacionais.

Como parte das recomendações, destaca-se a importância de mapear e realizar manutenção nos equipamentos com mais de 4 anos em funcionamento. Essa ação proativa visa assegurar uma maior confiabilidade e prevenir falhas prematuras, contribuindo para a eficiência operacional e a segurança das locomotivas.

As conclusões do estudo reforçam a necessidade de uma abordagem mais estável e previsível na gestão da manutenção. A mudança para um modelo baseado no tempo, aliada a ajustes nas práticas de consumo e ações proativas, emerge como a estratégia mais eficaz para melhorar a confiabilidade e prolongar a vida útil dos compressores em locomotivas DASH-9W. Essas decisões visam não apenas otimizar a operação

ferroviária, mas também contribuir para a segurança e sustentabilidade a longo prazo do sistema de transporte ferroviário.

6. TRABALHOS FUTUROS

Para um estudo futuro mais abrangente, recomenda-se a realização de uma análise qualitativa dos modos de falhas associados às trocas de compressores. Embora essa abordagem demande mais tempo e esforço, a aplicação de uma ferramenta de priorização adequada, com modos de falhas bem definidos, resultaria em um estudo mais aprofundado. Tal análise possibilitaria a identificação das causas raiz subjacentes a muitas das falhas prematuras observadas nos ativos, proporcionando uma visão mais completa e estratégica para aprimorar ainda mais as práticas de manutenção.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT, Agência Nacional de Transportes Terrestres. Ferrovias. Disponível em: https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias. Acesso em: 30 jun. 2023.

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

BORBA, José Luiz; BERGANTINI, Mauro Antônio. **Sistema de Locomotivas e Vagões I – Módulo Sistema de Freios**. Vale S.A. Vitória, 2011. Apostila do Treinamento de Trilha Técnica: Ferrovia (Pátio/Tração).

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual De Confiabilidade, Mantenabilidade: E DISPONIBILIDADE.** Qualitymark Editora Ltda, 2001.

LEMES, Danielli V. **Proposta de método de análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos empregando dados de retorno de garantia**, 2006. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**. Oxford: Butterworth Heinemann, 1997.

NELSON, W., **How to Analyze Reliability Data?** Wisconsin: ASQC QualityPress, Milwaukee, EUA, 1982.

SAE – Evaluation Criteria for Reliability-centered Maintenance (RCM) Processes - Norma JA 1011, 1999.

SANTOS, Gustavo F. **Apostila Vagões, Carros de Passageiro e Trens Unidade – revisão 02**. 227 f. Faculdade Estácio de Sá. Vitória, 2019.

SANTOS, Gustavo Ferreira. **ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE VÁLVULAS DE CONTROLE DE FREIO DE VAGÕES FERROVIÁRIOS**. Monografia especializada em confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

SMITH, A.M. **Reliability-centered maintenance** – McGraw-Hill, 1993.

WEIBULL.COM. Life Data Analysis (Weibull Analysis). Disponível em: http://www.weibull.com/basics/lifedata.htm.

WEIBULL.COM. Reliability Glossary. Disponível em: http://www.weibull.com/knowledge/rel_glossary.htm#R.