

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

MARCELO LAPIS ELY - 00208607

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE  
PARA COMPONENTES DE  
MÁQUINAS AGRÍCOLAS: ESTUDO  
DE CASO COMPARATIVO NO  
DISCO DE EMBREAGEM DE UM  
TRATOR**

Porto Alegre  
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

MARCELO LAPIS ELY - 00208607

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE  
PARA COMPONENTES DE  
MÁQUINAS AGRÍCOLAS: ESTUDO  
DE CASO COMPARATIVO NO  
DISCO DE EMBREAGEM DE UM  
TRATOR**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-CCA)  
apresentado à COMGRAD-CCA da Universi-  
dade Federal do Rio Grande do Sul como parte  
dos requisitos para a obtenção do título de *Ba-  
charel em Eng. de Controle e Automação* .

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Aurélio Tergolina Salton

Porto Alegre  
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

MARCELO LAPIS ELY - 00208607

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE  
PARA COMPONENTES DE  
MÁQUINAS AGRÍCOLAS: ESTUDO  
DE CASO COMPARATIVO NO  
DISCO DE EMBREAGEM DE UM  
TRATOR**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina de TCC do curso *Eng. de Controle e Automação* e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Aurélio Tergolina Salton, UFRGS  
Doutor pela Universidade de Newcastle – Newcastle, Austrália

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aurélio Tergolina Salton, UFRGS  
Doutor pela Universidade de Newcastle – Newcastle, Austrália

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre, Brasil)

Prof. Dr. Pedro Rafael Bolognese Fernandes, UFRGS  
Doutor pela Universidade de Dortmund – Dortmund, Alemanha

\_\_\_\_\_  
Alceu Heinke Frigeri  
Coordenador de Curso  
Eng. de Controle e Automação

Porto Alegre, Fevereiro 2024

## DEDICATÓRIA

Decido este trabalho ao meu pai, Lauro, que na hora do aperto não me deixou sozinho e me ajudou em todos os momentos, à minha mãe, Anna Sicilia, que me aconselhou, acalmou e me forneceu métodos para tentar controlar minhas animosidades, além de aguentar minhas ocasionais palavras agressivas. Aos meus quatro avós, Paolo, Anita, Marlene e Albino, esse último, em especial por ler e corrigir meu trabalho mais de uma vez. Ao meu tio, Renato, que tal qual meu pai, na hora do aperto sentou e me ajudou a fazer tudo que faltava, sem ele muito provavelmente não teria sido possível.

Ao meu melhor amigo, José Roberto "JackPitel" Moreira Lopes Junior, que me aguenta, ampara, ri comigo das coisas que não podemos rir e das coisas que podemos e é a minha base há mais de 14 anos nessa vida. Sem ti, mesmo que tu não faça ideia, eu não sei se teria aguentado 30% do que aguntei. *"Come on, Sora. We made it this far by sticking together. You can't go alone."* Essa é por nós e por todos as bobagens que rimos. Te amo, "Jackzinho".

Também aos amigos que o Sarandi, a Alvorada, a Internet e os jogos me deram. Vocês todos me alegraram nos momentos mais inapropriados e nos mais apropriados também. Em especial, em ordem de sorteio, a: Jonathan "Doriak" Coimbra, Ana Carolina "Drown My Demons" Jorge, Henrique "Sasteplogo" Santos, Izaias "Painful Death" Lemos, Leonardo "UberBlack" Chacon Hor, Altobeli "Terra Samba" Machado, William "CrioloDoido" Heinz. Mesmo vocês sendo a trupe mais esquisita que já convivi na vida, vocês são a minha trupe e não conseguiria suportar 30% das coisas que passo sem algum de vocês me xingando e me dando suporte. Amo vocês.

A minha panelinha da faculdade, ou amigos que o curso me trouxe, André Monteiro, Andrews Santos, Brian Kisaki, Daniel Martins, Leonardo Real e Thalles Gomes. Sem vocês talvez o ERE não tivesse sido tão tolerável quanto foi. E, especialmente, ao André Zary que na hora que eu quase surtei, em mais de uma situação, me fez ficar quieto e não agir na impulsividade. Provavelmente se não fosse um carregando o outro, a gente ainda estaria preso em cadeiras muito mais antigas.

E, por fim, a três personagens de ficção que me mostraram três características muito importantes para a vida. Kasuga Ichiban com a frase "O fundo do poço não é tão ruim quanto parece, se você olhar para cima, vai ver a luz e ter esperança. Sempre é possível recomeçar. E se estiver perdido, precisar de alguém pra conversar, pode me chamar" e Kiryu Kazuma que me mostrou o quão importante é se sacrificar por quem ama e nem sempre as situações certas a serem feitas são as mais fáceis. E, por fim, a Rudeus Greyrat com a frase *"Pode ser um sonho, eu não me importo, todos conseguimos. Se viver, der seu máximo igual todo mundo, se levantar quando cair e continuar olhando pra frente... então você conseguirá viver uma vida sem arrependimentos"*

## RESUMO

O presente trabalho investiga a análise de confiabilidade de dois tipos de discos de embreagem de um trator, com o objetivo de validar a substituição de um pelo outro. A análise de confiabilidade é uma abordagem sistemática fundamental para avaliar a capacidade de um sistema em desempenhar suas funções consistentemente ao longo do tempo, em diversas condições. A pesquisa revisa conceitos essenciais da análise de confiabilidade e explora sua aplicação em diversos campos da engenharia. A metodologia adotada inclui o tratamento de dados e a utilização de software específico para gerar gráficos que são discutidos para evidenciar que a substituição do primeiro disco de embreagem pelo segundo foi uma decisão acertada. Por fim, uma análise de custo é realizada, demonstrando a vantagem da substituição do componente e propondo ações para mitigar possíveis falhas durante o período de garantia.

**Palavras-chave:** Análise de Confiabilidade, Trator, Disco de Embreagem, Validação.

## **ABSTRACT**

The present work investigates the reliability analysis of two types of clutch discs of a tractor, aiming to validate the replacement of one with the other. Reliability analysis is a fundamental systematic approach to assess the ability of a system to perform its functions consistently over time, under various conditions. The research reviews essential concepts of reliability analysis and explores its application in various engineering fields. The adopted methodology includes data treatment and the use of specific software to generate graphs, which are discussed to demonstrate that replacing the first clutch disc with the second was a sound decision. Finally, a cost analysis is conducted, showing the advantage of component replacement and proposing actions to mitigate possible failures during the warranty period.

**Keywords:** Reliability Analysis, Tractor, Clutch Disk, Validation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Curva de Fundo de Banheira . . . . .	19
2	Diferentes Cenários de $h(t)$ para a Distribuição de Weibull de Três Parâmetros. . . . .	26
3	Função de Risco da Distribuição Lognormal para $\mu = 1$ e $\sigma = 0,5$ . . . . .	27
4	Fluxograma Para a Análise de Confiabilidade. . . . .	31
5	Fluxograma Para o Processo de Tratamento de Dados . . . . .	33
6	Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Weibull, Lognormal, Exponencial e Loglogística para a Primeira Embreagem . . . . .	38
7	Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Weibull de Três Parâmetros, Lognormal de Três Parâmetros, Exponencial de Dois Parâmetros e Loglogística de Três Parâmetros para a Primeira Embreagem . . . . .	39
8	Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Menor Valor Extremo, Normal e Logística para a Primeira Embreagem . . . . .	39
9	Função Sobrevivência para a Primeira Embreagem . . . . .	40
10	Função Densidade de Probabilidade de Falha para a Primeira Embreagem	41
11	Função Cumulativa de Falhas computando até 10000 Horas para a Primeira Embreagem . . . . .	42
12	Função Cumulativa de Falhas computando até 90000 Horas para a Primeira Embreagem . . . . .	43
13	Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo para a Primeira Embreagem	44
14	Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Weibull, Lognormal, Exponencial e Loglogística para a Segunda Embreagem . . . . .	45
15	Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Weibull de Três Parâmetros, Lognormal de Três Parâmetros, Exponencial de Dois Parâmetros e Loglogística de Três Parâmetros para a Segunda Embreagem . . . . .	45
16	Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Menor Valor Extremo, Normal e Logística para a Segunda Embreagem. . . . .	46
17	Função de Sobrevivência para a Segunda Embreagem . . . . .	47
18	Função de Sobrevivência para a Segunda Embreagem . . . . .	47
19	Função Densidade de Probabilidade de Falha para a Segunda Embreagem	48
20	Função Densidade de Probabilidade de Falha para a Segunda Embreagem Contabilizando até 25000 Horas para Melhor Visualização do Gráfico .	49

21	Função Cumulativa de Falhas Computando até 25000 horas para Segunda Embreagem .....	50
22	Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo para a Segunda Embreagem	51

## LISTA DE TABELAS

1	Distribuições de Falha e coeficiente de correlação com a Amostra da Primeira Embreagem . . . . .	40
2	Tabela de Horas e Porcentagem de Quantas Embreagens Sobrevivem .	41
3	Tabela de Horas e Taxa de Densidade de Probabilidade de Falha para a Primeira Embreagem . . . . .	42
4	Tabela de Horas e Porcentagem de Falhas Acumuladas até 10800 Horas.	43
5	Distribuições de Falha e coeficiente de correlação com a Amostra da Segunda Embreagem. . . . .	46
6	Tabela de Horas e Porcentagem de Quantas Embreagens Sobrevivem .	48
7	Tabela de Horas e Taxa de Densidade de Probabilidade de Falha para a Segunda Embreagem. . . . .	49
8	Tabela de Horas e Porcentagem de Falhas Acumuladas até 10800 Horas.	50
9	Tabela Comparativa de RF e MTTF . . . . .	53
10	Custos de Garantia, por máquina, para a Embreagem 1 ao considerar as falhas, em média, ocorrendo no MTTF . . . . .	55
11	Custos de Garantia, por máquina, para a Embreagem 2 ao considerar as falhas, em média, ocorrendo no MTTF . . . . .	55
12	Custos de Garantia, mês a mês, para a Embreagem 1 . . . . .	56
13	Custos de Garantia, mês a mês, para a Embreagem 2 . . . . .	56
14	Número de Falhas, mês a mês, para as Embreagens 1 e 2 . . . . .	57
15	Custos Totais Relacionados a Garantia. . . . .	57

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>MTTF</b>	Tempo Médio Até a Falha
<b>MTBF</b>	Tempo Médio Entre Falhas
<b>RF</b>	Frequência de Reparo
<b>FDP</b>	Função Densidade de Probabilidade
<b>FCF</b>	Função Cumulativa de Falhas
<b>IPCA</b>	Índice de Preço ao Consumidor Amplo
<b>IGPM</b>	Índice Geral de Preço de Mercado
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
$P_o$	Preço de Oferta

## LISTA DE SÍMBOLOS

$R(t)$	Função de Confiabilidade
$\lambda(t)$	Taxa de Falha
$h(t)$	Função de Risco
$f(t)$	Função Densidade de Probabilidade
$c$	Parâmetro Base na Distribuição Lognormal de Três Parâmetros
$\sigma$	Desvio de Distribuição Lognormal de Três Parâmetros
$\mu$	Parâmetro de Média da Distribuição Lognormal de Três Parâmetros
$\tau$	Parâmetro de Deslocamento da Distribuição Lognormal de Três Parâmetros
$\gamma$	Parâmetro de Forma da Distribuição de Weibull de Três Parâmetros
$\theta$	Parâmetro de Escala da Distribuição de Weibull de Três Parâmetros
$k$	Parâmetro de Localização da Distribuição de Weibull de Três Parâmetros
$\bar{M}_w$	Média da Distribuição de Weibull de Três Parâmetros
$\Gamma(t)$	Função Gama
$\Phi(t)$	Função Parâmetro da Distribuição Lognormal de Três Parâmetros
$\phi(t)$	Função Parâmetro da Distribuição Lognormal de Três Parâmetros
$F(t)$	Função de Falhas Cumulativas

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	14
3	CONCEITOS .....	17
3.1	Conceitos Básicos .....	17
3.1.1	Confiabilidade .....	17
3.1.2	Falha .....	18
3.1.3	Taxa de Falha .....	18
3.1.4	Tempo Médio Até a Falha (MTTF) .....	19
3.1.5	Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) .....	20
3.1.6	Frequência de Reparo (RF) .....	20
3.2	Funções da Análise de Confiabilidade .....	21
3.2.1	Função de Sobrevivência .....	21
3.2.2	Função de Densidade Probabilidade .....	21
3.2.3	Função de Falhas Cumulativas .....	22
3.2.4	Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo .....	23
3.3	Distribuição de Probabilidade .....	23
3.3.1	Distribuição de Weibull de Três Parâmetros .....	24
3.3.2	Distribuição Lognormal de Três Parâmetros .....	26
4	PROBLEMÁTICA .....	28
4.1	Escolha de Máquina Agrícola .....	28
4.2	Escolha do Elemento Analisado .....	29
4.3	Motivação .....	29
5	METODOLOGIA .....	31
5.1	Tratamento de Dados .....	33
5.1.1	Separação de Elementos com Horas de Uso Zeradas .....	33
5.1.2	Exclusão de Elementos que Não Falharam .....	34
5.1.3	Diferença de Horas .....	34
5.1.4	Remoção de Duplicatas .....	35
5.1.5	Cálculo de Horas para Elementos Zerados .....	36
5.1.6	Organizando os Dados .....	36
5.2	Análise de Confiabilidade .....	36

6	DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	38
6.1	Embreagem 1 .....	38
6.1.1	Distribuição de Falha .....	38
6.1.2	Função de Sobrevivência .....	40
6.1.3	Função Densidade de Probabilidade de Falha .....	41
6.1.4	Função Cumulativa de Falhas .....	42
6.1.5	Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo .....	43
6.1.6	RF e MTTF .....	44
6.2	Embreagem 2 .....	44
6.2.1	Distribuição de Falha .....	44
6.2.2	Função de Sobrevivência .....	46
6.2.3	Função Densidade de Probabilidade de Falha .....	48
6.2.4	Função Cumulativa de Falhas .....	49
6.2.5	Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo .....	50
6.2.6	RF e MTTF .....	51
6.3	Comparativo .....	51
6.3.1	Comparativo da Função de Sobrevivência .....	51
6.3.2	Comparativo da Função Densidade de Probabilidade de Falha .....	52
6.3.3	Comparativo da Função Cumulativa de Falhas .....	52
6.3.4	Comparativo das Falhas ao Longo do Tempo .....	52
6.3.5	Comparativo do RF e MTTF .....	52
6.3.6	Análise de Custos .....	53
6.3.7	Ações Propositivas para Melhorar Tempo de Vida Útil da Embreagem	57
7	CONCLUSÕES .....	59
	REFERÊNCIAS .....	60

# 1 INTRODUÇÃO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, representa o resultado final dos trabalhos desempenhados pelo autor durante seu período de graduação no curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O mesmo foi realizado em conjunto com o Estágio Não Obrigatório junto ao time de Confiabilidade no Setor de Validação da AGCO do Brasil. Tem como objeto de estudo a análise de confiabilidade de dois tipos distintos de discos de embreagem, de um trator, com a finalidade de validar a troca de um pelo outro.

A análise de confiabilidade é uma abordagem sistemática para avaliar a capacidade de um sistema, produto ou processo de desempenhar suas funções de maneira consistente ao longo do tempo, em diferentes condições e circunstâncias. Ela oferece uma série de benefícios importantes em várias áreas, tais como engenharia, negócios e operações. A qualidade de um produto se beneficia enormemente de uma análise de confiabilidade, visto que a mesma permite identificar pontos fracos em produtos, reconhecendo a necessidade de melhorias para evitar a ocorrência de falhas. Através da análise, é possível detectar quais componentes tem maior probabilidade de falha apontando quais requerem maior atenção, dessa forma auxiliando na otimização da alocação de recursos, ajuda a evitar falhas inesperadas que podem resultar em custos significativos, como perda de produção, reparos emergenciais, *recall* de produtos e perda de reputação da marca. Ao identificar e mitigar riscos de falha, os custos totais são reduzidos ao longo do ciclo de vida do produto. Ao entender as causas subjacentes das falhas, é possível contribuir para o aumento da vida útil de sistemas.

A base teórica da análise de confiabilidade é amparada pelos métodos amplamente discutidos nas obras de Elsayed (2021), Andrews e Moss (2002), Modarres, Kaminsky e Krivtsov (1999) e Birolini (2017). Usa-se, também, com o apoio dos trabalhos de Vaccaro (1997) e Dall'agnese (2020) diretamente relacionados as aplicações de Engenharia de Confiabilidade em maquinário agrícola para fazer uma análise melhor fundamentada em um componente específico.

Apresenta-se uma Revisão Bibliográfica onde são exploradas algumas aplicações da Análise de Confiabilidade em diferentes campos da Engenharia, desde sistemas, como um todo, até Tecnologia da Informação, no caso de monitoramento de tráfego via câmeras. Destaca-se a análise da literatura através de dissertações observando qual item fora analisado e qual a distribuição de falha utilizada durante o trabalho. Esses estudos contribuem para o entendimento mais aprofundado das aplicações práticas da análise de confiabilidade, evidenciando sua importância em garantir a integridade e o funcionamento eficaz de uma ampla gama de sistemas e estruturas.

Em seguida, no intuito de fornecer uma base sólida para a compreensão do presente trabalho, são apresentados os conceitos fundamentais que constituem a espinha dorsal desta pesquisa. Esses conceitos visam estabelecer uma base teórica essencial para a análise e interpretação dos resultados. Inicialmente, são abordados conceitos como a definição de

Confiabilidade, Falha, Taxa de Falha, Tempo Médio Entre Falhas e Tempo Médio até a Falha, seguidos por definições matemáticas relativas às Distribuições de Falha utilizadas na análise e, por fim, as definições das funções obtidas na Análise de Confiabilidade.

No capítulo da Metodologia, são expostas as razões da escolha do trator, sua funcionalidade e pluralidade de utilizações, evidenciando também a importância do Disco de Embreagem e quão fundamental o mesmo é para o bom desempenho da máquina, para a satisfação do usuário final e para a credibilidade do fabricante. Dada a necessidade urgente da substituição do Disco de Embreagem, torna-se necessário validar quão efetiva essa troca foi, dessa forma, com base nos dados de garantia de ambos os Discos de Embreagem é feita, inicialmente, um tratamento dos dados com metodologias evidenciadas por Batista (2020), Serra, Silva Filho e Macedo (2022) e Elsayed (2021).

São mostrados os gráficos gerados através de um *software* específico para a Análise de Confiabilidade, posteriormente eles são discutidos para explicar o que pode ser observado, e evidenciando qual dos discos possui uma melhor Confiabilidade e validando que a substituição do Disco de Embreagem, uma ideia emergencial, foi a ação correta a ser tomada pelo time de Engenharia.

Por fim, faz-se uma análise de custo utilizando o Índice Nacional de Preço ao Consumidor e outros valores relacionados a custos de serviços, preço de componente, manutenção e um estudo hipotético para demonstrar que a substituição do componente, apesar de mais oneroso no instante de aquisição torna-se vantajoso devido a demandar menores custos com garantias e também propõe-se uma ação para mitigar possíveis ocorrências de falhas dentro do período de garantia.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise de confiabilidade é uma abordagem sistemática para avaliar a capacidade de um sistema ou componente em desempenhar suas funções sem falhas ao longo do tempo, considerando as incertezas e variações que podem ocorrer, sendo valiosa em diversos setores, onde a segurança, a qualidade e a eficiência são essenciais. Ela permite tomar decisões informadas sobre o projeto, manutenção e operação de sistemas e componentes, garantindo a confiabilidade ao longo do tempo. Algumas aplicações são:

- **Engenharia de Sistemas:** A análise de confiabilidade é frequentemente usada na engenharia de sistemas para avaliar a confiabilidade de sistemas complexos. Isso pode incluir sistemas mecânicos, elétricos, eletrônicos e de software. Os engenheiros usam técnicas de análise de confiabilidade para identificar possíveis pontos de falha, estimar a probabilidade de falha do sistema e determinar as medidas necessárias para melhorar sua confiabilidade. Conforme Billinton e Allan (1992). A dissertação de Oliva (2006) traz uma análise de confiabilidade e análise da taxa de falhas de um veículo completo, incluindo todos os sistemas mecânicos primordiais para o funcionamento do veículo, utilizando dados de falhas de campo de um modelo específico durante o período de garantia do mesmo em condições distintas de operação, uma vez que os dados advém tanto do mercado brasileiro quanto do mercado argentino. Dessa forma, foi possível avaliar o comportamento do projeto em diferentes aplicações. É utilizada a Distribuição de Weibull para avaliar os sistemas elétrico e mecânico, como se fossem apenas um item para cada sistema, do modelo escolhido. No fim, o trabalho consegue observar que o mesmo modelo, no Brasil, possui maiores custos e menor confiabilidade quando comparado com o modelo na Argentina, no entanto não especifica em maiores detalhes os motivos para essa discrepância.
- **Manutenção Preditiva:** Empresas que dependem de equipamentos críticos muitas vezes realizam análises de confiabilidade para implementar estratégias de manutenção preditiva. Ao monitorar o desempenho e a integridade dos equipamentos ao longo do tempo, é possível identificar sinais de deterioração e tomar medidas antes que ocorram falhas catastróficas. Isso ajuda a minimizar o tempo de inatividade não planejado e os custos de manutenção de acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011). No trabalho de Dall'agnese (2020), a partir da análise do histórico de falhas e consequentes manutenções corretivas de tratores da empresa John Deere, e utilizando a Distribuição de Weibull, fazendo uma análise de confiabilidade foi possível identificar os principais modos de falha em pontos críticos dos equipamentos ao fazer uso da Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA). Posteriormente desenvolveu-se estratégias de contingência para aumentar a disponibilidade do maquinário utilizando métodos de Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) que, por sua vez, eleva a confiabilidade do produto final, tornando o setor de manutenção da empresa mais

eficaz e rentável. O trabalho de Vieira, Santos e Santos (2022) também demonstra a análise de confiabilidade a partir de dados levantados referentes à manutenção de máquinas em condições agressivas. Para este trabalho, é utilizada a Distribuição de Weibull e também utiliza-se de uma Manutenção Centrada em Confiabilidade para aumentar a disponibilidade das máquinas analisadas. De forma geral este trabalho obteve êxito em aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos conjuntos analisados.

- **Indústria Automotiva:** A análise de confiabilidade é crucial na indústria automotiva para garantir a segurança e a confiabilidade dos veículos. Ela é usada para avaliar a confiabilidade de componentes como motores, sistemas de freio, *airbags* e sistemas elétricos, bem como para prever a vida útil dos veículos e planejar revisões de projeto. Na tese de mestrado profissionalizante de Nascimento Filho (2011) é proposto um processo para realização de experimentos computacionais para a análise de confiabilidade, utilizando uma Distribuição Normal de Falhas, em componentes estruturais automotivos, buscando discutir técnicas de predição da confiabilidade e avaliar como essas técnicas podem influenciar no dimensionamento dos componentes. Por fim ainda é aplicado o estudo em um processo prático.
- **Indústria Aeroespacial:** A análise de confiabilidade desempenha um papel fundamental na indústria aeroespacial, onde a segurança e a confiabilidade são absolutamente críticas. Ela é usada para avaliar a confiabilidade de sistemas de lançamento, satélites, aeronaves e componentes aeroespaciais em geral de acordo com Smith (2005). Na dissertação de Duek (2005), é analisada a confiabilidade de um componente mecânico pouco confiável, responsável pelo controle aerodinâmico da parte traseira da aeronave, que demandava manutenção regular a cada 200 horas, do Caça-Bombardeiro subsônico A-1. Inicialmente o componente apresentava uma confiabilidade e desempenho inferiores quando comparados com os dados contidos nos manuais. Foi realizada uma coleta de dados e então feita uma análise de confiabilidade do componente utilizando a Distribuição Normal. Em seguida são feitas modificações no componente, aprimorando as embalagens de transporte do mesmo, efetuando ajustes, reforço nos treinamentos de técnicos envolvidos e regulagens na bancada de manutenção. Devido a pouca possibilidade de obter uma significativa quantidade de amostras para a validação dessas alterações, ajustou-se a censura para falha em um terço dos componentes e, na segunda análise de confiabilidade, dessa vez utilizando a Distribuição de Weibull de Três Parâmetros, obteve uma melhor performance e confiabilidade, qualificando a interferência como benéfica, no entanto não sendo possível quantificar o desempenho da mesma de maneira eficiente.
- **Setor de Energia:** Na indústria de energia, a análise de confiabilidade é usada para avaliar a confiabilidade de redes elétricas, usinas de energia, turbinas eólicas, painéis solares e outros componentes. Isso ajuda a garantir que o fornecimento de energia seja estável e seguro conforme Billinton e Allan (1992). No texto de Marques (2016), é desenvolvida uma metodologia para a análise e cálculo da confiabilidade de sistemas de distribuição de energia utilizando o tempo de inoperatividade - ou reestabelecimento do serviço elétrico - e a taxa de falha, ambos critérios no planejamento de sistemas elétricos. Devido a utilização de uma matriz lógico-estrutural acaba não sendo utilizada nenhuma distribuição de falhas para este trabalho. Com base nessa metodologia foi possível observar torna-se possível projetar indicadores de confiabilidade a partir de diferentes configurações da rede elétrica, no entanto o

método não exclui outras avaliações que devem ser feitas durante o planejamento e consiste apenas uma ferramenta adicional para avaliar a confiabilidade quando aliada a outros métodos já estabelecidos.

- **Setor de Saúde:** Equipamentos médicos críticos, como dispositivos de suporte à vida, requerem alta confiabilidade. A análise de confiabilidade é usada para garantir que esses dispositivos funcionem corretamente quando necessário, minimizando os riscos para os pacientes de acordo com Modarres, Kaminsky e Krivtsov (1999). Na dissertação de Reis (2014) é feita uma análise de confiabilidade de equipamentos médico-assistenciais (EMAs). A primeira etapa do trabalho consiste na busca pelos indicadores de falhas através de questionários e ordens de serviço, este último capaz de coletar informações quanto ao gerenciamento do ciclo de vida dos equipamentos. Também é utilizado o histórico de manutenções dos equipamentos para organizar o histórico de falhas de cada EMA. Posteriormente houve a necessidade de classificar as falhas em três categorias: infraestrutura, recursos humanos e tecnologia. As duas primeiras são descartadas para a análise de confiabilidade das EMAs uma vez que elas não representam o desenvolvimento do projeto, mas estão relacionadas ao ambiente na qual a mesma está instalada e ao manuseio do operador, respectivamente. Em seguida são calculados os indicadores e parâmetros da Distribuição de Weibull para que seja possível observar as funções de Confiabilidade dos aparelhos, também é calculado o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) e o Tempo Médio Até a Falha (MTTF) de cada máquina.
- **Tecnologia da Informação:** A análise de confiabilidade é aplicada na avaliação de sistemas de tecnologia da informação, como servidores, redes e sistemas de software. Isso ajuda a prever e gerenciar falhas potenciais, evitando interrupções nos serviços e minimizando os riscos de segurança cibernética. O texto de Branco (2018), no estudo de confiabilidade de câmeras de monitoramento de tráfego são analisados o histórico de falhas, separado por modo de falha e cliente, e utilizando a Distribuição de Weibull foi possível obter os gráficos de Confiabilidade, Taxa de Falha, Probabilidade de Falha. No fim também é realizada uma comparação entre clientes para observar como comporta-se a Confiabilidade para cada usuário final, evidenciando como a diferença na condição de uso do equipamento pode influenciar nos parâmetros de Confiabilidade e Disponibilidade do produto.
- **Setor Bélico:** Sistemas de armas complexos, como mísseis balísticos, submarinos nucleares e sistemas de defesa aérea, passam por análises de confiabilidade extensivas para garantir que sejam eficazes e confiáveis. (UNITED STATES OF AMERICA, 2011)

## 3 CONCEITOS

### 3.1 CONCEITOS BÁSICOS

Esta seção apresenta os conceitos mais importantes utilizados na Engenharia da Confiabilidade, que busca uma forma de gerenciar centrada na qualidade, com enfoque em sucesso a longo prazo através da satisfação de clientes beneficiando todos os membros de uma organização e sociedade.

#### 3.1.1 Confiabilidade

A confiabilidade de um item é a medida da probabilidade do mesmo desempenhar sua função designada, seja por meio de ações passivas ou ativas, em condições específicas dentro de um determinado período de tempo, segundo ISO-9000 (2015). Normalmente, é representada pela variável  $R$ . De maneira qualitativa, a confiabilidade pode ser entendida como a capacidade de um item permanecer funcional. "Confiabilidade é uma característica de um item, expressa pela probabilidade de que o mesmo performe suas funções em dadas condições por um período de tempo"(BIROLINI, 2017).

"Um item é uma unidade funcional ou estrutural de complexidade arbitrária (por exemplo, componente, parte, dispositivo, montagem, equipamento, subsistema, sistema) que pode ser considerada inteiramente para investigações"(BIROLINI, 2017). Podem consistir de *hardware*, *software* ou ambos. Para um item de *hardware* ser considerado confiável, o mesmo deve fazer mais do que cumprir um desempenho inicial de fábrica ou uma especificação de qualidade - deve funcionar satisfatoriamente durante um período de tempo especificado na aplicação efetiva a que se destina.

A função designada refere-se à tarefa atribuída a um item. A partir dela, é possível determinar a ocorrência de falhas, tornando-a o ponto de partida para qualquer análise de confiabilidade. É importante ressaltar a importância de especificar cuidadosamente as condições de operação, uma vez que elas exercem grande influência na confiabilidade, de acordo com Andrews e Moss (2002).

Tanto a função designada quanto as condições de operação podem variar ao longo do tempo. Em casos como esses, é necessário estabelecer uma função capaz de representar esse comportamento. A partir disso, todas as afirmações relacionadas à confiabilidade estão ligadas a essa função. A representação dessa função deve ser fornecida nas especificações do item. Normalmente, a duração da missão é definida pelo parâmetro  $t$ , e a função de confiabilidade é representada por  $R(t)$ , que indica a probabilidade de não ocorrerem falhas no intervalo de tempo  $(0, t]$ . Assume-se que não há falhas no instante inicial, ou seja,  $R(0) = 1$ .

Os conceitos de confiabilidade e qualidade são comumente confundidos entre si. A principal diferença é que a confiabilidade incorpora em sua definição a passagem do tempo, não ocorrendo o mesmo com a qualidade, uma característica estática de um dado item.

### 3.1.2 Falha

Uma falha ocorre quando um item pára de executar sua função, sendo esta uma variável aleatória, logo é imprevisível determinar previamente seu acontecimento. Falhas podem ser caracterizadas por seu modo, causa, efeito e mecanismo.

"O modo de falha é o sintoma, ou efeito local, pelo qual a falha pode ser observada"(FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Em componentes mecânicos, por exemplo, são fratura fragilidade, rutura, fluência, fissuração, gripagem ou fadiga.

A causa da falha pode ser intrínseca, devido a características do item como fraqueza, ou gastos, ou extrínseca, devido a mau uso nas etapas de concepção, montagem ou utilização. Causas extrínsecas geralmente ocasionam falhas sistemáticas, de natureza determinística, e devem ser consideradas como defeitos. Defeitos podem se apresentar nos instantes iniciais da confiabilidade, em  $t = 0$ .

Os efeitos da falha geralmente se diferem quando se considera apenas o item ou o sistema de forma completa. Uma categorização bastante usada é a classificação dos efeitos em não relevante, parcial, completo ou crítico. Como uma falha pode causar falhas subsequentes, é sempre bom ter uma distinção entre falha primária e falha secundária.

O mecanismo de uma falha é um processo pelo qual resulta a falha, podendo ser físico, químico ou de outra origem.

### 3.1.3 Taxa de Falha

O conceito mais relevante dentro da análise de confiabilidade é a Taxa de Falha ( $\lambda$ ), também conhecida como Função de Risco ( $h(t)$ ). Ela é interpretada como a quantidade de risco associada a um item no tempo  $t$ , sendo bastante útil na análise do risco a que um item está exposto ao longo do tempo, servindo como base comparativa entre itens com características distintas.

Faz-se necessário salientar que a Taxa de Falha é parte importante da Função de Confiabilidade, uma vez que a primeira é um dos coeficientes presentes na equação matemática que descreve a segunda. Segundo Birolini (2017), a Taxa de Falha pode ser subdividida e classificada em três fases.

Taxa de Falha Decrescente, em que a incidência de risco diminui conforme a progressão do tempo. Falhas nesta etapa são geralmente atribuídas a características do material ou processos de produção. Dessa forma, este tipo de Taxa de Falha está associado ao período de vida inicial de um item. Falhas não são causadas por mau uso operacional, e são distribuídas de forma aleatória. É nesta etapa que Análises de Confiabilidade e Garantia de produtos tem maior enfoque, uma vez que os períodos de garantia costumam abranger somente o período de vida inicial do item. Estas falhas prematuras são indesejadas para o fabricante uma vez que a organização tem de arcar com custos de reparo do período de garantia.

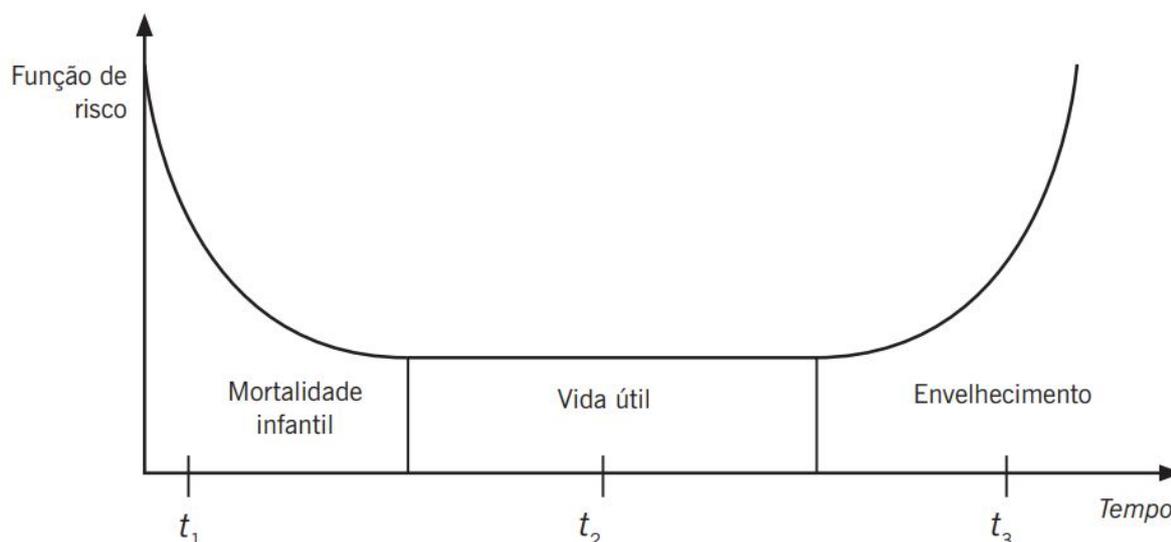
Taxa de Falha Constante ou Estacionária, em que o item está sujeito a um mesmo risco de falha em qualquer instante do tempo. A Função de Risco se mantém, aproximadamente, constante durante esta etapa. A presença de uma Taxa de Falha constante num período dado permite a alocação de falhas seguindo uma Distribuição de Poisson; caso um item seja sucessivamente reparado, é possível utilizar a Cadeia de Markov também, segundo United States of America (2011). Este tipo de Taxa de Falha é, na maioria das vezes, atribuído ao período de vida útil de um item. Nesta etapa a maior parte das falhas

ocorrem devido a condições desconhecidas, resultado de condições extremas no ambiente de operação ou mau uso de produto, de acordo com Elsayed (2021).

Taxa de Falha Crescente, em que a incidência de risco cresce com o tempo. A Função de Risco, neste momento, cresce conforme a progressão do tempo. Falhas neste período são, em sua maioria, atribuídas a envelhecimento, gasto, fadiga e degradação do item. Diz-se nesta etapa, que o item já está ultrapassando sua vida útil. Segundo (DALL'AGNESE, 2020), a Taxa de Falha tende a aumentar rapidamente à medida que o produto se aproxima do final de sua vida e a manutenção de equipamentos que tenham atingido esta fase tende a se tornar onerosa.

Produtos manufaturados costumam apresentar uma Taxa de Falha dada pela combinação sucessiva das três classificações anteriores. Conforme pode ser observado na Figura 1, conhecida como "Curva de Fundo de Banheira".

**Figura 1:** Curva de Fundo de Banheira



Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011)

Nota: Evidenciando as três fases da evolução da Taxa de Falha de um item qualquer.

### 3.1.4 Tempo Médio Até a Falha (MTTF)

O tempo médio até a falha, designado por MTTF (do inglês *Mean Time to Failure*), é o valor médio até a falha, sendo obtido pela razão do tempo total na amostra pelo número de falhas na amostra de itens durante o período sob condições fixadas, de acordo com Smith (2005). Segundo a norma BS4778 citada por O'Connor e Kleyner (2012), pode ser calculado da seguinte forma:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (1)$$

### 3.1.5 Tempo Médio Entre Falhas (MTBF)

No caso de um item reparável, tem-se o tempo médio entre falhas, MTBF (do inglês *Mean Time Between Failures*). Segundo Birolini (2017), os valores de MTBF são frequentemente usados para projetar a probabilidade de uma única unidade falhar dentro de um certo período de tempo. É importante salientar que não é incluído o tempo de reparo no MTBF, ou seja, só é levado em conta o período entre a entrada em operação até a falha.

No entanto, o MTBF é mais consagrado e é utilizado mesmo quando o item não sofre reparo, mas é trocado por outro quando falha, segundo O'Connor e Kleyner (2012). Ainda, muitos produtos após o reparo possuem uma distribuição de vida útil diferente da primeira, desta forma a vida média também é diferente, bem como outras vidas após os reparos subsequentes. Contudo o MTBF pressupõe o retorno às mesmas condições após cada reparo.

### 3.1.6 Frequência de Reparo (RF)

A frequência de reparo (RF) é uma medida essencial que descreve a frequência com que um sistema ou componente requer manutenção ou reparo para mantê-lo em funcionamento adequado, de acordo com Elsayed (2021). Em outras palavras, é a taxa com que um sistema falha ao longo do tempo, exigindo intervenção para restaurar sua funcionalidade.

A frequência de reparo é uma das métricas importantes utilizadas para avaliar a confiabilidade de um sistema ou equipamento. Ela é particularmente relevante em setores onde a disponibilidade contínua do sistema é crucial, como na indústria, na aviação, na área da saúde e em infraestruturas críticas, como redes de energia e transporte, conforme cita Modarres, Kaminsky e Krivtsov (1999)

Para calcular ou estimar a frequência de reparo, os engenheiros de confiabilidade geralmente consideram dados históricos, testes de confiabilidade e dados de campo.

A análise cuidadosa da frequência de reparo e de outras métricas de confiabilidade permite que os engenheiros determinem o tempo médio de disponibilidade de um sistema, programem a manutenção preventiva, identifiquem pontos fracos no projeto ou no processo de fabricação e, em última instância, garantam um funcionamento mais seguro e eficiente dos sistemas em questão. Essas informações são valiosas para empresas e organizações que desejam otimizar os custos de manutenção, minimizar o tempo de inatividade e melhorar a satisfação do cliente.

De uma forma simplista, é muito mais fácil calcular a frequência de reparo que o tempo médio até a falha ou tempo médio entre falhas, uma vez que ela está diretamente relacionada ao tempo médio de uso anual, tornando-se, dessa forma, um dado essencial para a obtenção dos outros dois valores. A forma mais fácil de calcular o RF, para produtos correntes, se dá pela seguinte métrica:

$$RF = \frac{\text{Número de Falhas}}{\text{Número Distinto de Máquinas}} = \frac{\text{Uso Médio Anual}}{MTTF} \quad (2)$$

## 3.2 FUNÇÕES DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A análise de confiabilidade é feita com base na interpretação das funções e gráficos gerados com o auxílio do *software* estatístico *Minitab*. Uma vez observado em qual distribuição de falhas as mesmas melhor se encaixam, é possível obter as seguintes funções.

### 3.2.1 Função de Sobrevivência

A função de sobrevivência, também conhecida como função de confiabilidade, descreve a probabilidade de um item ou sistema continuar funcionando por um determinado período de tempo. Em outras palavras, ela mede a porcentagem de itens que sobrevivem em função das horas de uso ou da idade.

A análise de confiabilidade é fundamental para diversas áreas, desde a engenharia e indústria até a medicina e economia. Ao compreender a função de sobrevivência de um produto, é possível tomar decisões informadas sobre manutenção, substituição, garantia e planejamento de recursos.

Ao analisar os dados de garantia, a função de sobrevivência desempenha um papel crucial. Através dela, é possível determinar a probabilidade de um item falhar dentro de um determinado período de garantia. Essa informação é valiosa para fabricantes e consumidores, pois permite avaliar a confiabilidade e durabilidade do produto e estabelecer políticas de garantia adequadas.

Por exemplo, suponha que uma empresa ofereça uma garantia de um ano para um determinado dispositivo eletrônico. Ao analisar a função de sobrevivência desse produto com base em dados históricos, é possível estimar a probabilidade de falha durante esse período. Isso auxilia a empresa a definir políticas de garantia mais justas e confiáveis, além de ajudar os consumidores a tomar decisões de compra melhor informadas.

A função de sobrevivência também é útil para prever o desempenho futuro de um produto. Com base nos dados de confiabilidade coletados ao longo do tempo, é possível fazer projeções sobre a vida útil esperada, planejar a manutenção preventiva e otimizar o ciclo de vida do produto.

Existem várias técnicas estatísticas e modelos matemáticos para estimar a função de sobrevivência, como a análise de regressão, os modelos de risco proporcional de Cox e as distribuições de probabilidade, como a Distribuição Exponencial e a Distribuição de Weibull, de acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011).

A maneira mais simples para calcular Função de Sobrevivência, representada muitas vezes pela variável  $S(t)$ , é através da expressão abaixo, onde  $F(t)$  denota a Função de Falhas Cumulativas, explicada a seguir.

$$S(t) = 1 - F(t) \quad (3)$$

### 3.2.2 Função de Densidade Probabilidade

A função densidade de probabilidade (FDP) desempenha um papel fundamental na análise de confiabilidade de garantia. A análise de confiabilidade de garantia é um processo utilizado para avaliar a probabilidade de um produto ou sistema falhar durante

um determinado período de tempo, levando em consideração uma variedade de fatores, como o desgaste, o envelhecimento e as condições de operação.

A FDP é uma função estatística que descreve a probabilidade de ocorrência de um evento em uma distribuição contínua de valores. Em outras palavras, ela permite calcular a probabilidade de um evento específico ocorrer em uma faixa contínua de valores.

Na análise de confiabilidade de garantia, a FDP é usada para modelar a distribuição das falhas ao longo do tempo. Com base em dados históricos de falhas ou informações sobre o desempenho do produto, é possível ajustar uma FDP adequada que represente a taxa de falha do sistema.

Existem diferentes tipos de distribuições de probabilidade que podem ser utilizadas na análise de confiabilidade, dependendo das características do sistema em estudo. Alguns exemplos comuns são a distribuição exponencial, a distribuição Weibull e a distribuição normal. Cada uma dessas distribuições possui propriedades e parâmetros específicos que permitem modelar diferentes tipos de comportamento de falha.

Com base na FDP ajustada, é possível realizar diversas análises de confiabilidade, como a estimativa da taxa média de falha, a previsão do tempo médio até a falha (MTTF), a determinação da probabilidade de falha em um determinado período de tempo e a análise de confiabilidade em um ponto específico do tempo.

Essas análises são de extrema importância para a garantia de produtos e sistemas, pois fornecem informações essenciais para tomar decisões relacionadas à melhoria da qualidade, manutenção preventiva, planejamento de estoque de peças de reposição e estabelecimento de políticas de garantia.

Além disso, a FDP também é útil para realizar a análise de confiabilidade em diferentes estágios do ciclo de vida do produto, desde o desenvolvimento até a fase de operação. Isso permite identificar pontos fracos, aprimorar o projeto, monitorar o desempenho ao longo do tempo e garantir que o produto atenda às expectativas dos clientes em termos de confiabilidade.

É possível calcular, matematicamente, a FDP a partir da Equação abaixo.

$$f(t_i) = P(t \geq t_i) = \int_{-\infty}^{t_i} R(t) \delta t \quad (4)$$

### 3.2.3 Função de Falhas Cumulativas

A função cumulativa de falhas (FCF) é uma ferramenta amplamente utilizada na análise de confiabilidade e no estudo da vida útil de sistemas. Ela descreve a probabilidade acumulada de que um componente, sistema ou processo falhe em um determinado ponto no tempo ou em um intervalo de tempo específico.

A FCF é frequentemente representada pela letra  $F(t)$  ou  $R(t)$ , onde "t" é o tempo. A função cumulativa de falhas é derivada da função de densidade de falhas (ou taxa de falhas) e está relacionada à probabilidade de falha em um determinado momento. Ela fornece uma medida da confiabilidade de um sistema ou componente ao longo do tempo.

A FCF é geralmente calculada usando modelos estatísticos, como distribuições de probabilidade, que descrevem o comportamento das falhas ao longo do tempo. Alguns modelos comuns incluem a distribuição exponencial, a distribuição de Weibull e a distribuição normal.

A função cumulativa de falhas é especialmente útil na análise de confiabilidade de sistemas complexos, nos quais múltiplos componentes interagem. Nesses casos, a FCF pode

ser usada para determinar a probabilidade de falha do sistema como um todo, com base nas probabilidades de falha dos componentes individuais e em suas interações.

Além disso, a FCF pode ser usada para avaliar a confiabilidade de sistemas em diferentes estágios de vida útil. Por exemplo, em um estudo de confiabilidade de um produto, a FCF pode ser usada para analisar a probabilidade de falha durante a fase de desenvolvimento, a fase de vida útil normal e a fase de desgaste final.

É importante ressaltar que a FCF é uma ferramenta probabilística e não fornece uma garantia absoluta de que um sistema não irá falhar. Em vez disso, ela fornece uma estimativa estatística da confiabilidade do sistema com base em dados e modelos disponíveis.

### **3.2.4 Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo**

A curva de distribuição de falhas ao longo do tempo é útil para vários propósitos na análise de confiabilidade. Ela permite identificar os períodos em que a taxa de falhas é alta e, portanto, pode ser necessário realizar manutenção ou substituição preventiva de componentes. Também fornece informações sobre a vida útil esperada de um sistema, bem como a confiabilidade ao longo do tempo.

Além disso, a curva de distribuição de falhas pode ser usada para comparar diferentes sistemas ou componentes e determinar qual deles tem uma confiabilidade mais alta ou uma taxa de falha mais baixa.

É importante observar que a curva de distribuição de falhas é baseada em modelos estatísticos e pressupõe que as falhas ocorrem de acordo com uma distribuição específica. Na prática, é essencial validar esses modelos com dados reais e ajustar os parâmetros conforme necessário para melhorar a precisão das previsões de confiabilidade.

## **3.3 DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE**

A definição mais comum de confiabilidade de uma unidade (seja componente ou sistema) baseia-se na probabilidade de que ela sobreviva até um determinado tempo de interesse. Essa probabilidade pode ser obtida ao modelar os tempos até a falha da unidade em análise. Ao conhecer a distribuição de probabilidade que melhor se adequa a esses tempos, é possível estimar a probabilidade de sobrevivência da unidade em qualquer momento, além de outras medidas de confiabilidade, como o tempo médio até a falha e a função de risco. A modelagem dos tempos até a falha é, portanto, um aspecto fundamental nos estudos de confiabilidade

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2011) existem cinco - não contabilizando suas variações com parâmetros adicionais - tipos de distribuição de probabilidade comumente utilizados para descrever o tempo até a falha de unidades. As representações para a distribuição são usadas nos estudos de confiabilidade. São elas:

- **f(t)**: Função de Densidade de Probabilidade;

A PDF descreve a probabilidade de uma variável aleatória contínua tomar um determinado valor. Ela fornece a distribuição de probabilidades das possíveis falhas ao longo do tempo.

- **R(t)**: Função de Confiabilidade

A função de confiabilidade é complementar à PDF e representa a probabilidade de um sistema ou componente continuar funcionando sem falhar até um determinado ponto no tempo. Ela pode ser equacionada conforme a Equação abaixo:

$$R(t) = e^{-\int_0^t f(u) du} \quad (5)$$

- **h(t)**: Função de Risco, ou Taxa de Risco;

A função de risco é uma medida da taxa instantânea de falha em um dado ponto no tempo. Ela pode ser equacionada conforme abaixo.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6)$$

- **MTTF**: Tempo Médio Até a Falha;

O MTTF é uma medida média de quanto tempo um sistema ou componente pode ser esperado para operar antes de falhar. Ele se relaciona com a Função de Confiabilidade conforme explicitada na Equação 1.

Para descrever o comportamento de um sistema ou equipamento, em um número maior ou menor de detalhes, são utilizadas fórmulas matemáticas onde a característica principal é a função matemática ou probabilística. A partir dela é possível identificar e resolver problemas, compreender o padrão de vida de um produto, avaliar se um processo está cumprindo seus objetivos de confiabilidade e reconhecer potenciais causas da falha.

Através da descrição do comportamento de dados e da utilização de modelos de distribuição estatística pode-se prever comportamentos e antecipar ações de melhoria. Devido à impossibilidade de determinar com confiança quais são as distribuições que deverão ser utilizadas no trabalho, decidiu-se por uma revisão bibliográfica das Distribuições mais utilizadas, são elas: a Distribuição Exponencial, Distribuição Exponencial de Dois Parâmetros, Distribuição Normal, Distribuição de Weibull, Distribuição de Weibull de Três Parâmetros, Distribuição Gama e Distribuição Lognormal e Distribuição Lognormal de Três Parâmetros. Como, na análise de confiabilidade, utilizou-se apenas as Distribuições de Weibull de Três Parâmetros e Distribuição Lognormal de Três Parâmetros, estas são mais detalhadas a seguir.

### **3.3.1 Distribuição de Weibull de Três Parâmetros**

A Distribuição de Weibull de Três Parâmetros é, indiscutivelmente, a distribuição de probabilidade mais utilizada na Engenharia de Confiabilidade segundo Kececioglu (1998). Sua grande vantagem em relação às outras distribuições é a possibilidade de se adaptar a diversas situações apenas com o ajuste de seus parâmetros, podendo apresentar funções de risco decrescentes, constantes e crescentes.

Sua importância está apoiada em sua flexibilidade e na capacidade de representação de amostras de tempo até a falha com comportamentos distintos. Este modelo é comumente utilizado quando a função taxa de risco não pode ser representada linearmente ao longo

do tempo. O modelo é bastante aplicado para análise de fadiga mecânica e sistemas eletromecânicos, de acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011) e Bilal e Richard (2011).

Ambos os parâmetros da Distribuição de Weibull podem ser calculados da seguinte forma, de acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011), onde  $t_i$  são os tempos de falha para diferentes amostras:

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i^\gamma \ln t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^\gamma} - \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i = 0 \quad (7)$$

$$\theta = \left( \frac{\sum_{i=1}^n t_i^\gamma}{n} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (8)$$

$$k = \bar{M}_w - \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{1}{1 - \frac{P}{100}} \right) \quad (9)$$

A estimativa para  $\gamma$  é obtida iterativamente, pois é impossível isolar o parâmetro de forma independente na Equação 7. Em seguida é substituído na Equação 8, resultando na estimativa de  $\theta$ . No cálculo do parâmetro de localização  $k$ , através da Equação 9,  $P$  representa a porcentagem associada, nesse caso, a porcentagem de elementos que espera-se ainda estarem funcionais, e  $\bar{M}_w$  representa o valor médio da distribuição.

As representações de confiabilidade da Distribuição de Weibull, para  $t \geq 0$  são fornecidas a seguir:

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left( \frac{t-k}{\theta} \right)^{(\gamma-1)} e^{-\left(\frac{t-k}{\theta}\right)^\gamma} \quad (10)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-k}{\theta}\right)^\gamma} \quad (11)$$

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left( \frac{t-k}{\theta} \right)^{\gamma-1} \quad (12)$$

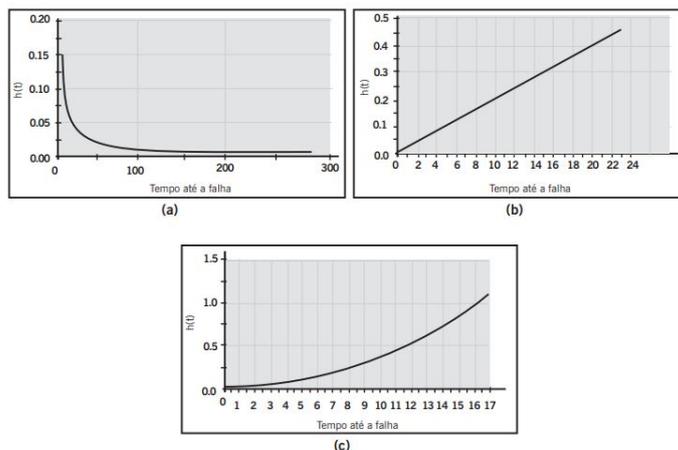
$$MTTF = \theta \Gamma(t) \text{ para } t = 1 + \frac{1}{\gamma} \quad (13)$$

Onde  $\Gamma(t)$  designa a função Gama, uma integral indefinida tabelada, onde  $t$  representa o tempo e  $x$  é apenas uma variável qualquer a ser integrada para obtenção da função.

$$\Gamma(t) = \int_0^\infty x^{t-1} e^{-x} dx \quad (14)$$

A Distribuição de Weibull de Três Parâmetros modela adequadamente uma ampla variedade de situações em que unidades apresentam funções de risco distintas. O tipo de função de risco é definido pelo seu parâmetro de forma. Quando  $\gamma < 1$ , a função de risco é decrescente, quando  $\gamma = 1$ , a mesma é constante e a Distribuição de Weibull de Três Parâmetros transforma-se na Distribuição Exponencial, podendo ser observado um caso mais geral dessa distribuição. Analogamente quando  $\gamma > 1$ ,  $h(t)$  é crescente. Existem dois casos especiais que merecem atenção, quando  $\gamma = 2$ ,  $h(t)$  é uma reta com inclinação  $\left(\frac{2}{\theta}\right)^2$  e a Distribuição transforma-se na Distribuição de Rayleigh, pouco utilizada na Engenharia de Confiabilidade, e quando  $\gamma = 3,26$ , neste caso a Distribuição de Weibull apresenta função de densidade com formato similar a Distribuição Normal. Alguns casos dos cenários para  $h(t)$  comentados anteriormente são ilustrados na figura abaixo.

**Figura 2:** Diferentes Cenários de  $h(t)$  para a Distribuição de Weibull de Três Parâmetros.



Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011)

Nota:  $h(t)$  quando (a)  $\gamma = 0,5$ , (b)  $\gamma = 2,0$  e (c)  $\gamma = 3,26$ .

### 3.3.2 Distribuição Lognormal de Três Parâmetros

O modelo Lognormal de Três Parâmetros é muito utilizado no ajuste de dados por ter uma grande variedade de formatos. Recomenda-se utilizar estes modelo em dados de intervalo que percorrem uma variada ordem de grandeza. Exemplos que seguem esta distribuição são dados econômicos e de crescimento populacional. Na Engenharia de Confiabilidade, é utilizado em casos de fadiga metálica, vida útil de isolamento elétrico e reparo de certos equipamentos conforme explica Barlow e Proschan (1987) e Fogliatto e Ribeiro (2011). Supõe-se que a probabilidade de completar uma ação de reparo aumenta com o tempo. No caso do reparo demorar para ser concluído há um indicativo de causas especiais sobre o processo, como falha de conhecimento do processos ou falta de materiais para reparo. Desta forma, assume-se que a taxa de reparo se assemelhe à função de risco de uma Distribuição Lognormal.

A distribuição Lognormal de 3 parâmetros é uma extensão da distribuição lognormal padrão que inclui um terceiro parâmetro chamado de "localização" ou "deslocamento", denotado pela variável  $\tau$ . A distribuição lognormal padrão é caracterizada pelos parâmetros  $\mu$  (média da distribuição logarítmica) e  $\sigma$  (desvio padrão da distribuição logarítmica). Adicionar um terceiro parâmetro permite deslocar a distribuição lognormal ao longo do eixo x.

Os parâmetros da Distribuição podem ser calculados conforme abaixo, onde  $n$  se refere ao número de amostras e  $t_i$  ao tempo até a falha de cada amostra.

$$c = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-\mu}{\sigma}\right)^2} ds \quad (15)$$

$$\Phi(t) = \frac{1}{c\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-\mu}{\sigma}\right)^2} ds \quad (16)$$

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (17)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i) \quad (18)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n (\ln(t_i))^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n \ln(t_i))^2}{n} \right] \right) \quad (19)$$

$$\tau = e^{\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (20)$$

As medidas de confiabilidade de interesse para a Distribuição Lognormal são:

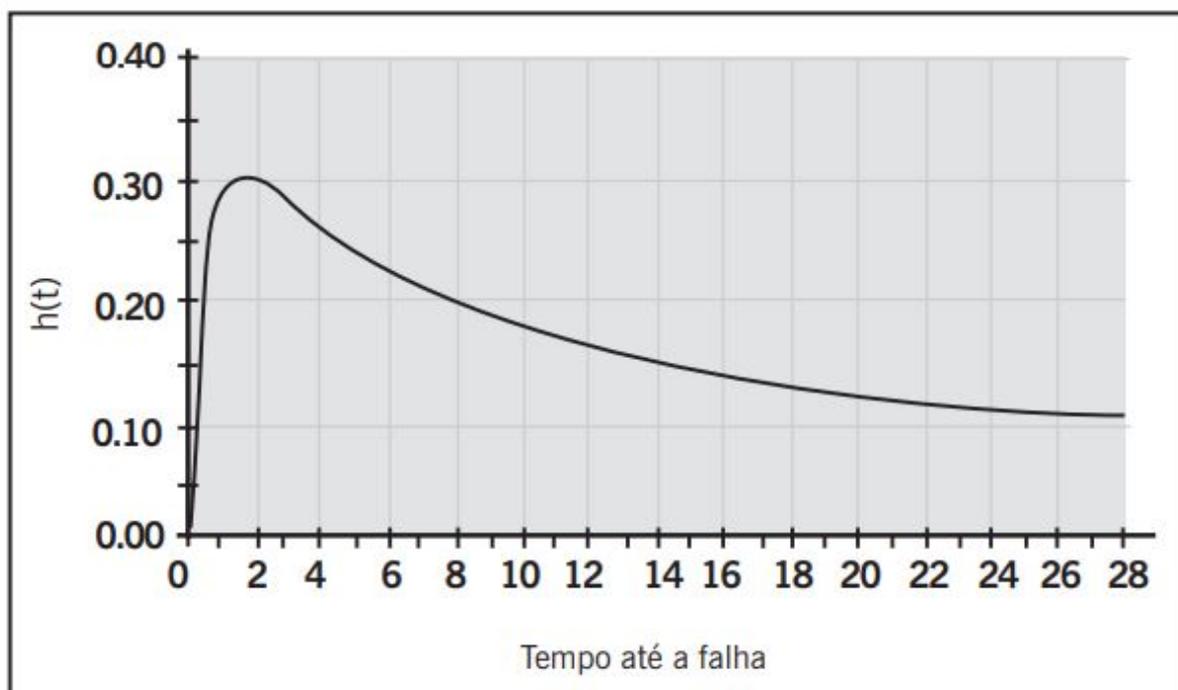
$$f(t) = \frac{1}{\sigma(t - \tau)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t - \tau) - \mu}{\sigma} \right)^2} \quad (21)$$

$$R(t) = \Phi \left( \frac{\mu - \ln(t - \tau)}{\sigma} \right) \quad (22)$$

$$h(t) = \frac{\phi \left[ \left( \frac{\mu - \ln(t - \tau)}{\sigma} \right) \right]}{\sigma(t - \tau)\Phi \left[ \left( \frac{\mu - \ln(t - \tau)}{\sigma} \right) \right]} \quad (23)$$

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

**Figura 3:** Função de Risco da Distribuição Lognormal para  $\mu = 1$  e  $\sigma = 0,5$ .



Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011)

## 4 PROBLEMÁTICA

### 4.1 ESCOLHA DE MÁQUINA AGRÍCOLA

Tanto a relevância quanto a função de um trator agrícola residem em sua capacidade de executar uma ampla gama de tarefas essenciais no campo, contribuindo para aumentar a produtividade e eficiência das atividades agrícolas.

O trator agrícola desempenha um papel central na mecanização da agricultura, substituindo o trabalho manual e animal por uma força motriz potente e versátil. Com sua potência e tração, ele pode executar uma variedade de tarefas, como preparo do solo, plantio, pulverização, colheita, transporte e manuseio de materiais agrícolas.

Uma das funções principais do trator agrícola é o preparo do solo. Por meio de implementos como arados, grades e subsoladores, ele realiza a aração, nivelamento e descompactação do solo, tornando-o adequado para o plantio de culturas. Essa tarefa é essencial para a criação de um ambiente favorável ao desenvolvimento das plantas, permitindo um melhor aproveitamento dos nutrientes do solo e uma maior taxa de germinação das sementes.

Além disso, o trator agrícola é utilizado na semeadura e no plantio de culturas. Com implementos específicos, como semeadoras e plantadeiras, ele distribui as sementes de maneira uniforme e precisa, controlando a profundidade e o espaçamento adequados. Isso garante um estabelecimento uniforme das plantas, resultando em maior eficiência no uso de sementes e melhores condições de crescimento.

Outra função importante é a realização de operações de pulverização. Com pulverizadores acoplados, o trator agrícola é capaz de aplicar defensivos agrícolas, como inseticidas, herbicidas e fungicidas, de forma eficiente e precisa. Isso contribui para o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, protegendo as culturas e maximizando sua produtividade.

Na colheita, o trator agrícola desempenha um papel crucial. Ele pode ser equipado com implementos como colheitadeiras, enfardadeiras e plataformas de corte, permitindo a colheita eficiente de diferentes culturas, como grãos, forragens e vegetais. Essa capacidade de mecanização da colheita reduz a dependência de trabalho manual, acelera o processo de colheita e minimiza as perdas pós-colheita.

Além das funções diretamente relacionadas à produção agrícola, os tratores também desempenham um papel essencial no transporte e no manejo de materiais no campo. Eles podem ser usados para rebocar reboques, carrinhos e implementos, permitindo o transporte eficiente de colheitas, fertilizantes, adubos e outros insumos agrícolas. Isso economiza tempo e esforço, facilitando a logística agrícola e contribuindo para a eficiência operacional.

A relevância de um trator agrícola na agricultura moderna é inegável. Sua função abrangente e versátil permite realizar uma variedade de tarefas essenciais, desde o preparo do solo até a colheita e o transporte de culturas.

Dito isso, escolheu-se o trator da marca *Massey Ferguson*, modelo *4292 XTRA*, uma iniciativa que veio para substituir o trator da mesma marca de nome *4292*. Esta atualização trouxe um novo motor, desta vez de três cilindros, maior versatilidade na área do operador, uma maior vazão hidráulica para melhor operação dos implementos, maior potência elétrica e mecânica, conforme os manuais do operador publicados pela AGCO (2013) e AGCO (2019).

## 4.2 ESCOLHA DO ELEMENTO ANALISADO

Ao analisarmos os dados de garantia do trator em questão, é possível observar que, aproximadamente, 25% de todas as reclamações se concentram em um único item, ou *part number*, o disco de embreagem, enquanto o segundo tem uma taxa de reclamação próxima a 3%. É necessário salientar que, em uma grande quantidade dessas reclamações advindas do disco de embreagem o trator ficou inutilizado, pois a falha envolvia a quebra do disco e era necessário substituí-lo. Dessa forma optou-se por fazer uma análise de confiabilidade do disco de embreagem para avaliar melhor o comportamento do mesmo.

É necessário compreender antes da análise o quão importante é o disco de embreagem para o maquinário. Uma das peças cruciais para o funcionamento adequado de um trator é o disco de embreagem. A embreagem é um componente do sistema de transmissão do trator e sua função principal é transmitir ou interromper a transferência de potência do motor para a caixa de câmbio e, posteriormente, para as rodas.

A embreagem é uma peça composta por um disco revestido com material de atrito em ambos os lados, geralmente feito de metal ou cerâmica. Ele é montado entre o volante do motor e o platô da embreagem. Quando a embreagem está engatada, o disco é pressionado contra o volante do motor pelo platô da embreagem, permitindo a transmissão de potência do motor para a caixa de câmbio.

Quando o pedal da embreagem é acionado, o disco de embreagem é liberado do volante do motor, interrompendo a transferência de potência. Isso permite que o motorista troque de marcha, pare o trator ou realize outras operações que necessitem da descontinuidade da potência transmitida. Ao soltar o pedal da embreagem, o disco é pressionado novamente contra o volante do motor, permitindo a transmissão de potência e o movimento do trator.

A relevância do disco de embreagem está na sua capacidade de transmitir eficientemente a potência do motor para o sistema de transmissão do trator. Ele deve ser capaz de suportar altos níveis de torque e desgaste ao longo do tempo. A durabilidade e a qualidade do disco de embreagem são fundamentais para garantir um desempenho adequado do trator e para evitar falhas e interrupções no trabalho.

Além disso, o disco de embreagem também contribui para o conforto do operador do trator. Um disco de embreagem bem dimensionado e em bom estado de funcionamento permite uma operação mais suave, com transições suaves entre as marchas e redução de vibrações e ruídos indesejados.

## 4.3 MOTIVAÇÃO

Diante do cenário marcado por uma elevada frequência de falhas, uma vez que do ponto de vista da Engenharia não é aceitável quase um quarto das reclamações envolvendo

garantia pertencerem a um único elemento da máquina, a equipe de Transmissões da Engenharia tomou a decisão estratégica de substituir o Disco de Embreagem original por um componente de maior resistência já validado para condições mais adversas, portanto já havia relativa confiança que o substituto poderia ser funcional e substituir plenamente o primeiro componente que estava a prejudicar não apenas financeiramente a empresa como também a confiança do consumidor final. Tal escolha revelou-se imperativa dadas as circunstâncias urgentes que permeavam o projeto.

Assim sendo, a análise de confiabilidade realizada em colaboração com o time de Validação tem como propósito principal validar a eficácia dessa alteração e avaliar os benefícios que a mesma proporcionou à empresa. Este processo de validação busca assegurar não apenas a efetividade da mudança implementada, mas também sua contribuição positiva para o desempenho e a durabilidade dos sistemas, alinhando-se às necessidades e metas organizacionais.

## 5 METODOLOGIA

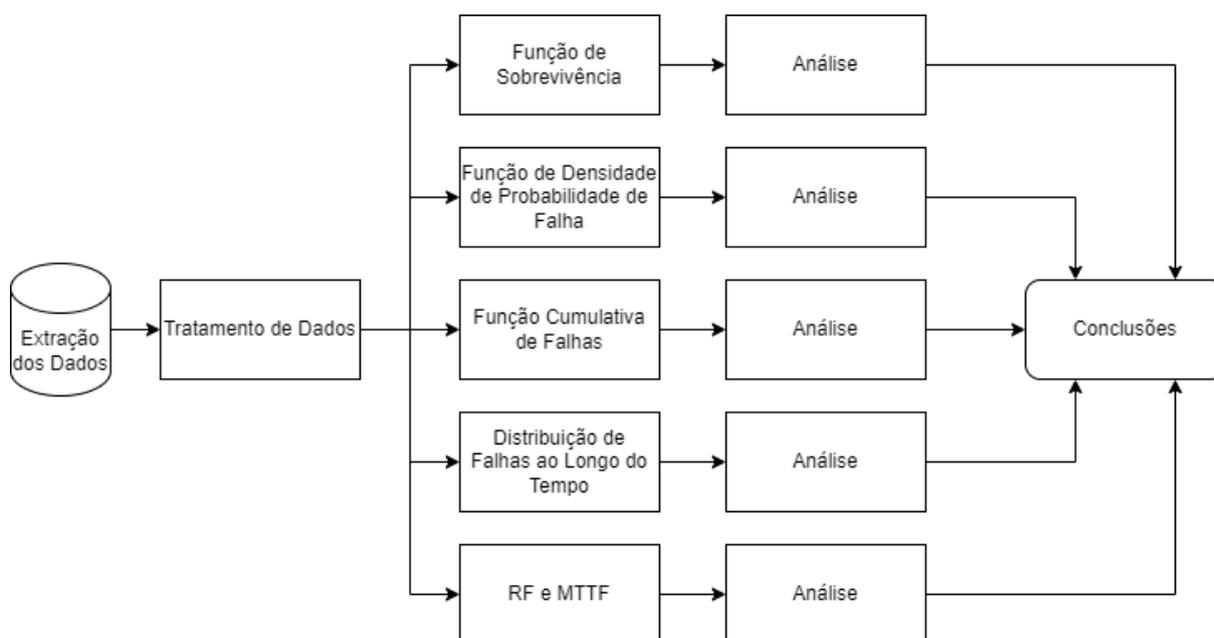
O primeiro passo antes de iniciar a Análise de Confiabilidade é a extração dos dados, para isso é preciso extrair diferentes massas de dados. A primeira é o histórico de tratores produzidos a serem analisados. A seguir é necessário extrair o histórico de falhas de garantia do trator, para isso são extraídos os históricos de garantia das falhas de ambos os discos de embreagem presentes apenas no modelo do trator escolhido.

Após extraídos os dados, precisa-se trabalhar os mesmos, para então utilizá-los e assim identificar quais as Distribuições de Falha mais apropriadas para determinar as Funções de Confiabilidade de caráter preditivo para compreender o comportamento futuro de ambas as amostras dos Discos de Embreagem.

Após o tratamento de dados, é feita uma análise individual do comportamento de cada uma das Funções de Confiabilidade. Com base nessas análises, é possível inferir quão bem a embreagem está se comportando dentro do contexto de garantia e operação do trator escolhido.

Na Figura 4, tem-se um Fluxograma simples desde a extração dos dados até as conclusões. Cabe salientar que serão feitas análises individuais de cada uma das funções, visto que cada uma das curvas traz informações diferentes e úteis.

**Figura 4:** Fluxograma Para a Análise de Confiabilidade



Fonte: Autoria Própria

É necessário compreender que o período de garantia para máquinas agrícolas não é baseado em datas, mas em quanto tempo as mesmas já operaram. Dessa forma o principal

indicador para avaliar se o maquinário ainda está coberto pela garantia é o horímetro. Este valor varia de máquina para máquina, de modelo para modelo e de potência do motor para potência do motor, dessa forma podem existir máquinas com a mesma potência do motor com diferentes períodos de garantia. Essas horas de garantia são baseadas no tempo médio anual que as máquinas operam, por exemplo, uma colheitadeira, geralmente, opera em torno de 250 a 350 horas por ano, dessa forma seu período de garantia tende a ser próximo de 350 a 400 horas.

Para o modelo de trator analisado, o período de garantia é de 1000 horas, ou seja, nesse período espera-se que o trator já tenha operado por aproximadamente um ano desde que foi entregue ao consumidor final. É essencial que uma boa e significativa parcela das máquinas se mantenha funcional durante esse período de tempo, não havendo uma incidência de falhas que causem a parada total da máquina de mais de 15%.

Já se tem conhecimento de que o disco de embreagem original performou de forma insatisfatória, falhando - com 1000 horas de uso - em quase 34% das máquinas que haviam sido comercializadas em diferentes locais do Brasil, dessa forma comprovando não haver correlação com tipo de solo ou cultura com a quebra, mas sim que o problema era da concepção inicial do projeto.

A partir disso, decidiu-se por utilizar uma outra embreagem mais robusta, já utilizada em tratores de maior potência, na fabricação de novos tratores, capaz de suportar condições mais severas para o pleno funcionamento da máquina e atender os usuários.

Após investigações descobriu-se que a embreagem original não era apta para performar com um motor de três cilindros por ter esse tipo de motor a tendência de gerar mais vibrações e irregularidades de torque quando comparado com motores de quatro cilindros, o que pode resultar em estresse adicional na embreagem durante as mudanças de marcha e acelerações. Essas forças excessivas podem causar um desgaste acelerado do disco de embreagem, reduzindo sua vida útil.

Outro fator que contribui para o desgaste e quebra prematuros do disco de embreagem é a potência do motor em relação ao tamanho e peso do trator. O trator em questão é produzido dentro da modalidade de baixa potência de tratores enquanto motores de três cilindros são geralmente menores e mais leves, o que pode levar os fabricantes a aumentarem a potência do motor para compensar a falta de cilindros e proporcionar um desempenho adequado ao trator. Como resultado, a embreagem pode ser subdimensionada para suportar o alto torque gerado pelo motor mais potente, causando falhas prematuras no disco da embreagem sob cargas pesadas e operação contínua.

Além disso, a manutenção praticamente inexistente durante o período de vida inicial, uma vez que o trator é novo, e não deveria demandar de alguma manutenção durante o período de vida inicial, também pode agravar o desgaste do disco de embreagem em tratores com motores de três cilindros. A falta de ajustes e lubrificação periódica da embreagem pode levar a um engate irregular e ao deslizamento excessivo da embreagem, o que, por sua vez, aumenta o atrito e o desgaste do disco.

Tem-se, também, conhecimento que essa segunda embreagem performa muito melhor e - até então - quase 90% dos tratores com o novo disco de embreagem sobrevivem até o fim do período de garantia.

Compara-se os resultados para comprovar que a segunda embreagem é mais eficaz que a primeira por ter maior durabilidade e analisa-se os benefícios econômicos que a troca do componente trouxe para o maquinário agrícola.

## 5.1 TRATAMENTO DE DADOS

Antes de iniciar a Análise de Confiabilidade, é necessário realizar o tratamento adequado dos dados provenientes da garantia do componente. Esses dados incluem informações como horas até a falha, número de série do componente e uma breve descrição da falha.

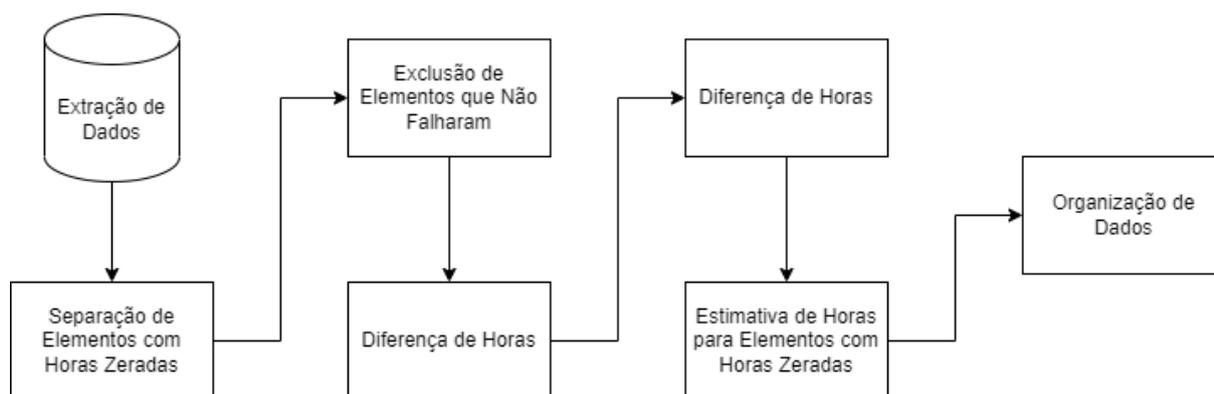
O tratamento dos dados envolve várias etapas, conforme Barlow e Proschan (1987) e Bilal e Richard (2011). Primeiramente, é importante separar elementos com horas zeradas, pois isso indica que não houve tempo suficiente para a ocorrência de uma falha. Em seguida, é necessário remover elementos duplicados, garantindo que cada observação seja única e representativa.

No estágio inicial da análise de confiabilidade, é comum excluir elementos que ainda não apresentaram falhas. Essa exclusão é feita para que o modelo estatístico seja aplicado apenas aos elementos que já falharam, permitindo uma análise mais precisa da distribuição de falhas. Posteriormente estes elementos que ainda não falharam são utilizados para determinar a taxa de elementos que sobreviveram quando se calcula o uso médio anual do componente.

Uma vez concluído o tratamento dos dados, obtém-se o modelo mais apropriado para a distribuição de falhas. Esse modelo estatístico é utilizado para estimar a função de confiabilidade, que indica a probabilidade de um componente operar sem falhas ao longo do tempo. Além disso, a função de distribuição de probabilidade é calculada para fornecer informações sobre a probabilidade de uma falha ocorrer em determinado intervalo de tempo.

A Figura 5 detalha de forma simplificada o passo a passo para o tratamento de dados para posteriormente ser possível realizar a Análise de Confiabilidade com o auxílio do *software Minitab17*.

**Figura 5:** Fluxograma Para o Processo de Tratamento de Dados



Fonte: Autoria Própria

### 5.1.1 Separação de Elementos com Horas de Uso Zeradas

Elementos com horas zeradas são, dentro do tratamento de dados, como são chamadas as entradas de máquinas que, por quaisquer motivos que sejam, possuem zero horas de utilização, por conclusão, este elementos ainda não falharam e não podem ser considerados para a análise de falhas. No entanto, cabe salientar que estes ainda serão

utilizados, posteriormente, a partir de uma estimativa de uso médio diário para determinar, probabilisticamente, quantas horas os mesmos devem ter rodados entre o dia em que foram vendidos e o dia da extração dos dados.

Um aspecto fundamental dessa análise é a correta separação dos elementos com horas de uso zeradas, ou seja, aqueles que ainda não apresentaram falhas. Esses componentes são vitais para a criação de um modelo confiável de análise, pois fornecem uma linha de base para compreender o desgaste e a degradação ao longo do tempo.

Ao isolar os elementos sem histórico de falhas, podemos aplicar algoritmos matemáticos para calcular quantas horas esses componentes operaram até o momento atual. Essa informação é crucial para estabelecer uma métrica confiável de confiabilidade, permitindo estimar com maior precisão a vida útil dos componentes que ainda estão em operação.

Além disso, a análise de elementos com horas de uso zeradas fornece *insights* valiosos sobre a qualidade dos produtos ou sistemas em questão. Se um grande número de componentes falha prematuramente, isso pode indicar problemas de fabricação ou design que precisam ser abordados para melhorar a confiabilidade geral do sistema.

### **5.1.2 Exclusão de Elementos que Não Falharam**

Para realizar uma análise confiável, é importante considerar a exclusão de elementos que ainda não falharam, isso se baseia no fato de que a falha de um componente é uma fonte de informação valiosa para a análise de confiabilidade. Ao considerar apenas os elementos que ainda não falharam, não há dados suficientes para determinar a taxa de falha ou a vida útil do sistema, o que compromete a precisão dos resultados obtidos.

A inclusão de elementos que ainda não falharam na análise de confiabilidade pode levar a estimativas excessivamente otimistas, mascarando potenciais problemas e riscos que podem surgir no futuro. Ignorar a possibilidade de falha de um componente pode levar a consequências negativas, como acidentes, danos à reputação da empresa e custos de manutenção e reparação imprevistos.

Além disso, é importante ressaltar que muitos sistemas e componentes sofrem um maior risco de falha no início de sua vida útil, durante o chamado período de "infância". Esse período é caracterizado por maior probabilidade de defeitos de fabricação, falhas decorrentes de erros de montagem ou ajustes inadequados. Ao não excluir elementos que ainda não falharam, perdemos a oportunidade de identificar e corrigir problemas recorrentes nesse estágio crucial.

Embora a exclusão de elementos que ainda não falharam seja importante, é necessário ressaltar a importância de acompanhar continuamente esses componentes ao longo do tempo. À medida que mais dados são coletados e a vida útil do sistema se estende, a inclusão desses elementos na análise de confiabilidade pode se tornar relevante, pois as informações sobre seu desempenho e durabilidade contribuirão para uma análise mais completa.

### **5.1.3 Diferença de Horas**

O algoritmo aplicado à análise de confiabilidade baseado na diferença de horas até uma falha é uma abordagem interessante para avaliar o desempenho e a confiabilidade de um sistema. Esse algoritmo utiliza informações temporais para identificar a ocorrência de falhas em diferentes peças do sistema.

Inicialmente, o algoritmo coleta os dados referentes às horas de operação de cada componente a partir do banco de dados de garantia.

Após a coleta dos dados, o algoritmo realiza a comparação das horas de cada componente. Caso as horas sejam iguais, o algoritmo indica que aquela peça falhou. Isso significa que, em um dado momento, o componente falhou e não pode mais desempenhar sua função. Nesse caso, será necessário substituí-lo ou repará-lo.

Por outro lado, se as horas forem diferentes, conclui-se que a peça com menos horas de uso ainda não falhou, enquanto a peça com o maior número de horas já. Essa diferença de horas indica que a peça com menor tempo de operação ainda possui uma vida útil restante e poderá continuar desempenhando sua função por mais algum tempo.

Assim, o algoritmo proporciona uma forma de identificar as peças que já atingiram o limite de suas vidas úteis, nesse caso falharam, bem como as peças que ainda estão em condições de continuar operando.

#### **5.1.4 Remoção de Duplicatas**

A remoção de elementos repetidos é uma etapa essencial na análise de confiabilidade de dados. Ao lidar com conjuntos de dados extensos, é comum encontrar duplicatas, o que pode levar a resultados imprecisos e enviesados. Portanto, a remoção cuidadosa desses elementos repetidos é crucial para obter conclusões confiáveis e precisas.

Existem várias abordagens e técnicas disponíveis para remover elementos repetidos. Uma das estratégias mais simples é realizar uma comparação direta entre os elementos, identificando e eliminando aqueles que são exatamente iguais. Isso pode ser feito usando algoritmos de comparação eficientes, como a comparação de *hashes* ou a ordenação dos dados para facilitar a identificação das duplicatas.

Além disso, a remoção de elementos repetidos também pode envolver uma análise mais complexa, especialmente quando os dados são estruturados ou apresentam variações sutis entre as duplicatas. Nesses casos, algoritmos de aprendizado de máquina e técnicas de processamento de linguagem natural podem ser empregados para identificar duplicatas com base em características semelhantes, mesmo que não sejam exatamente idênticas.

É importante ressaltar que a remoção de elementos repetidos deve ser realizada com cuidado, a fim de preservar a integridade dos dados originais. Antes de eliminar uma duplicata, é recomendável avaliar a relevância do elemento em relação à análise em questão. Em alguns casos, a presença de elementos repetidos pode indicar um padrão ou um dado importante, sendo necessário investigar mais a fundo antes de remover completamente.

Além disso, é essencial documentar e registrar todas as etapas de remoção de elementos repetidos, garantindo a transparência e a reprodutibilidade do processo. Isso inclui manter um registro de quais elementos foram removidos, os critérios utilizados para a remoção e qualquer análise adicional realizada para validar a decisão.

A remoção de elementos repetidos é uma etapa crítica na análise de confiabilidade de dados. Ao eliminar duplicatas de forma adequada e documentada, é possível garantir resultados mais precisos e confiáveis. No entanto, é importante ter cautela ao remover elementos repetidos, para evitar a perda de informações relevantes ou a introdução de vieses indesejados.

### **5.1.5 Cálculo de Horas para Elementos Zerados**

Para os itens com horas zeradas, no caso, que ainda não houveram reclamações ou nenhuma evidência de falha, é necessário estimar o valor de horas por dia em que as máquinas estão em operação. Dessa forma, a partir dos dados obtidos das máquinas que já falharam e tem-se uma quantidade de horas calcula-se essa média de horas por dia. Como tem-se as informações de quantas horas, até então. Tendo-se as informações do número de horas e de dias de operação de uma máquina, é possível calcular a média de uso diário.

Além disso, uma análise semelhante é realizada para os itens que apresentaram falhas. Aqui, calcula-se a média de horas por dia até a falha. Essa informação é valiosa, pois permite compreender melhor o desempenho dos sistemas e identificar possíveis padrões ou fatores que contribuam para as falhas.

Para estimar o valor médio de horas trabalhadas por dia das máquinas que ainda não falharam, ou seja, constam com zero horas trabalhadas pois não houve reclamações da mesma e não existe um acompanhamento contínuo, utiliza-se uma média das médias obtidas anteriormente. Essa média agregada é uma aproximação útil para calcular a quantidade esperada de horas trabalhadas diariamente pelas máquinas que não registraram falhas até o momento.

É importante ressaltar que, nesse contexto, considera-se o período inicial de trabalho da máquina como o dia da venda e o dia final como o último dia em que os dados foram obtidos para análise. A suposição é que as máquinas que não falharam nesse intervalo de tempo permanecerão livres de falhas posteriormente.

Essa abordagem permite uma estimativa confiável das horas trabalhadas diariamente. No entanto, é fundamental acompanhar continuamente o desempenho dessas máquinas e atualizar regularmente as análises de confiabilidade à medida que novos dados se tornem disponíveis.

### **5.1.6 Organizando os Dados**

Após a aplicação de todas as etapas, tem-se três massas de dados tratadas básicas. Os dados advindos da etapa do Cálculo de Diferença de Horas, onde já tem-se classificado se o item falhou ou não. Por outro lado, os itens que sobreviveram, com suas horas, vem dos Elementos que não Falharam e dos Elementos Zerados, das quais ainda não houve registro de falha.

Com os dados tratados de forma correta, organiza-se os mesmos para posterior inserção no *Minitab17* e iniciar a análise de confiabilidade. Cabe salientar que cada análise é feita separadamente e posteriormente comparada.

## **5.2 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE**

Após a etapa de tratamento de dados, abre-se a porta para uma análise de confiabilidade das embreagens dos tratores. Nessa etapa são analisadas as funções de Sobrevivência, de Densidade Probabilidade, de Falhas Cumulativas e a Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo, também são calculados a Frequência de Reparo e, com base no uso médio anual, tempo médio até a falha de cada uma das embreagens.

Com essas funções analisadas separadamente, são comparados os resultados para que seja possível comparar as duas empreagens e tomar a decisão de qual traz maiores benefícios não apenas do ponto de vista de qualidade do produto, mas também do ponto de vista de *marketing* e do ponto de vista econômico, uma vez que os dados de custos envolvidos na garantia também estão presentes na amostra de dados extraídos.

## 6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

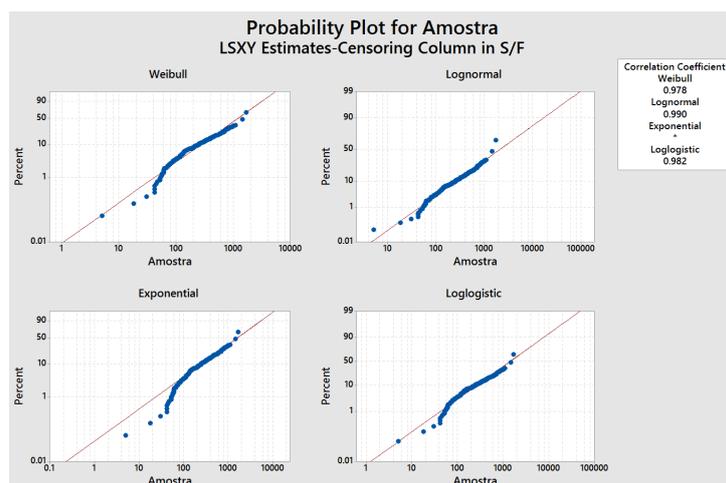
### 6.1 EMBREAGEM 1

A seguir, tem-se os resultados gerados a partir do tratamento de dados da primeira amostra, referente a ao Disco de Embreagem 1.

#### 6.1.1 Distribuição de Falha

É possível observar na Figura 6 o comportamento dos dados da Primeira Embreagem e o coeficiente de correlação quando inseridos nas Distribuições de Weibull, Lognormal, Exponencial e Loglogística. Ao analisar, também, as quatro primeiras linhas da Tabela 1, o valor do coeficiente de correlação para as distribuições mencionadas.

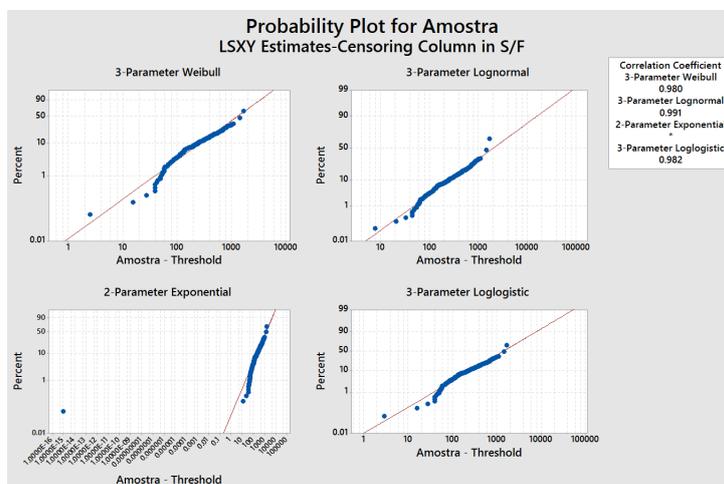
**Figura 6:** Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Weibull, Lognormal, Exponencial e Loglogística para a Primeira Embreagem



Fonte: Autoria Própria

Analogamente, na Figura 7, o comportamento dos dados e coeficiente de correlação quando inseridos nas Distribuições de Weibull de Três Parâmetros, Lognormal de Três Parâmetros, Exponencial de Dois Parâmetros e Loglogística de Três Parâmetros. Ao observar a Tabela 1, a partir da quinta linha até a oitava linha, tem-se o coeficiente de correlação para estas distribuições.

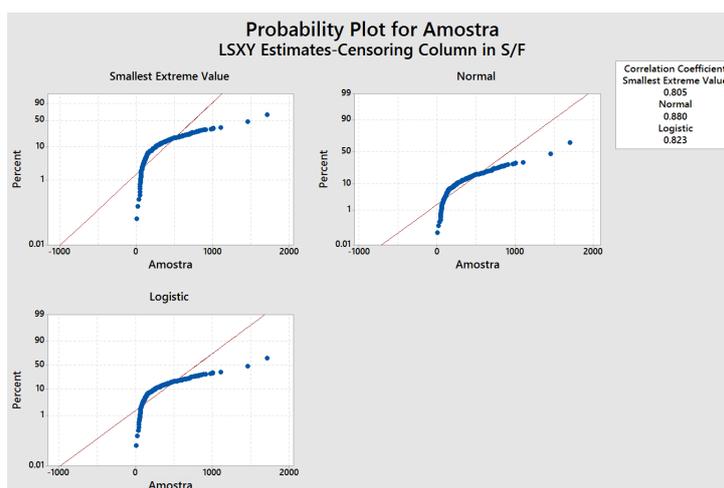
**Figura 7:** Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Weibull de Três Parâmetros, Lognormal de Três Parâmetros, Exponencial de Dois Parâmetros e Loglogística de Três Parâmetros para a Primeira Embreagem



Fonte: Autoria Própria

Por fim, na Figura 8, tem-se o comportamento e coeficiente de correlação quando a amostra de dados da Primeira Embreagem é inserida nas Distribuições de Menor Valor Extremo, Normal e Logística. Também, na Tabela 1, nas últimas três linhas, o coeficiente de correlação para as mesmas.

**Figura 8:** Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Menor Valor Extremo, Normal e Logística para a Primeira Embreagem



Fonte: Autoria Própria

Dessa forma, escolhe-se, para a Primeira Embreagem, a Distribuição Lognormal de Três Parâmetros, devido a um coeficiente de correlação de 0,991, ou seja, para esta distribuição há uma maior relação linear entre a amostra e a distribuição.

Na análise de confiabilidade entre uma amostra e uma distribuição de falha, um coeficiente de correlação próximo de 1 indica uma correspondência muito forte entre os dados observados (amostra) e a distribuição teórica de falha que está sendo considerada.

Isso implica que a distribuição teórica é uma boa representação dos dados reais e que o modelo de confiabilidade utilizado é altamente confiável para prever o comportamento futuro do sistema.

**Tabela 1:** Distribuições de Falha e coeficiente de correlação com a Amostra da Primeira Embreagem

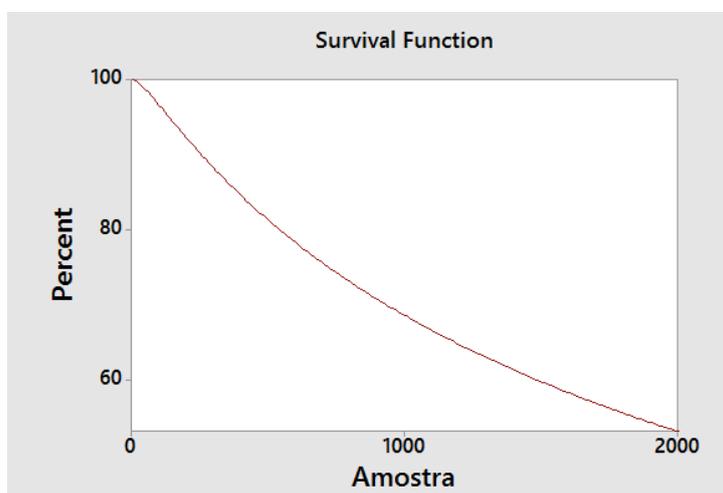
Distribuição	coeficiente de correlação (0 a 1)
Weibull	0,978
Lognormal	0,990
Exponencial	—
Loglogístico	0,982
Weibull de Três Parâmetros	0,980
<b>Lognormal de Três Parâmetros</b>	<b>0,991</b>
Exponencial de Dois Parâmetros	—
Loglogístico de Três Parâmetros	0,982
Menor Valor Extremo	0,805
Normal	0,880
Logístico	0,823

Fonte: Autoria Própria

### 6.1.2 Função de Sobrevivência

A partir do gráfico da Figura 9 e da Tabela 2, é possível observar que a Taxa de Sobrevivência da Primeira Embreagem decresce numa velocidade muito alta, o que, do ponto de vista mercadológico, é inaceitável. Observa-se, principalmente, que para 1000 horas, o tempo usual de garantia para um modelo de baixa potência simples, não pertencente à linha *premium*. É possível prever que, aproximadamente, apenas 66% dos discos de embreagem estão funcionais, ou seja, 34% dos tratores produzidos se encontram inoperantes.

**Figura 9:** Função Sobrevivência para a Primeira Embreagem



Fonte: Autoria Própria

**Tabela 2:** Tabela de Horas e Porcentagem de Quantas Embreagens Sobrevivem

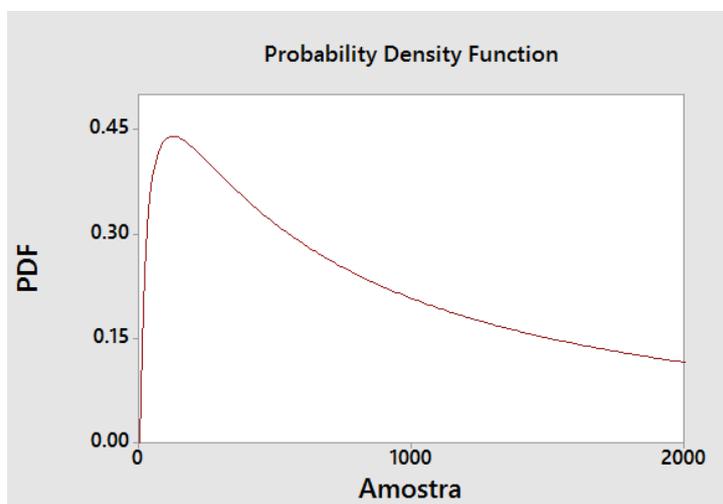
Horas	Taxa de Sobrevivência (%)	Horas	Taxa de Sobrevivência (%)
0	100	2000	51,95
200	91,89	2200	49,73
400	83,92	2400	47,70
600	77,47	2600	45,84
800	72,08	2800	44,12
<b>1000</b>	<b>66,72</b>	3000	42,53
1200	63,60	3200	41,06
1400	60,17	3400	39,69
1600	57,12	3600	38,40
1800	54,40	3800	37,20

Fonte: Autoria Própria

### 6.1.3 Função Densidade de Probabilidade de Falha

É possível observar, na Figura 10, que nas primeiras horas há maior concentração de eventos de falha. Dessa forma, é possível concluir, a partir desta etapa, que a maior parte das falhas ocorrem durante o período de garantia da máquina.

**Figura 10:** Função Densidade de Probabilidade de Falha para a Primeira Embreagem



Fonte: Autoria Própria

**Tabela 3:** Tabela de Horas e Taxa de Densidade de Probabilidade de Falha para a Primeira Embreagem

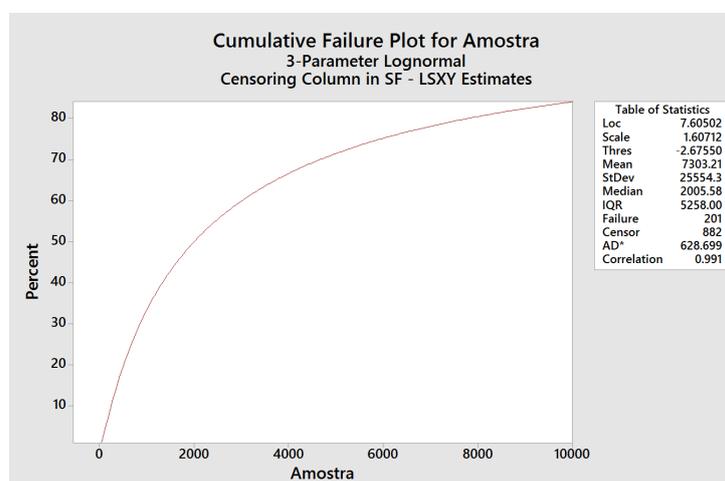
Horas	Taxa Densidade de Probabilidade de Falha	Horas	Taxa Densidade de Probabilidade de Falha
0	0	2000	0,1110
200	0,4376	2200	0,1015
400	0,3849	2400	0,0932
600	0,3148	2600	0,0860
800	0,2237	2800	0,0797
<b>1000</b>	<b>0,1937</b>	3000	0,0741
1200	0,1701	3200	0,0691
1400	0,1510	3400	0,0646
1600	0,1353	3600	0,0606
1800	0,1221	3800	0,0570

Fonte: Autoria Própria

#### 6.1.4 Função Cumulativa de Falhas

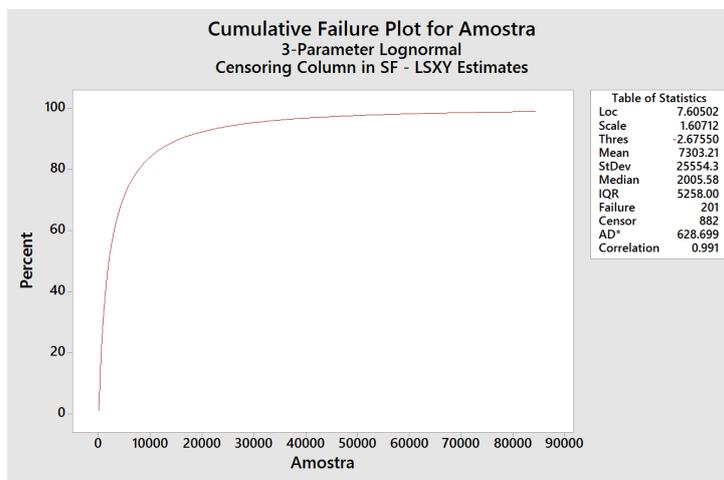
Pode-se observar na Figura 11 e através da Tabela 4 que, aproximadamente, em 1000 horas, tem-se em torno de 35% das amostras falhando, em um perfil de crescimento bastante acentuado, demonstrando, mais uma vez, o alto índice de falhas nas horas iniciais do modelo. Também é possível notar, ao analisarmos a Figura 11 junto da Figura 12 que o crescimento rápido se dá na fase de mortalidade infantil da Embreagem, período de garantia do trator.

**Figura 11:** Função Cumulativa de Falhas computando até 10000 Horas para a Primeira Embreagem



Fonte: Autoria Própria

**Figura 12:** Função Cumulativa de Falhas computando até 90000 Horas para a Primeira Embreagem



Fonte: Autoria Própria

**Tabela 4:** Tabela de Horas e Porcentagem de Falhas Acumuladas até 10800 Horas.

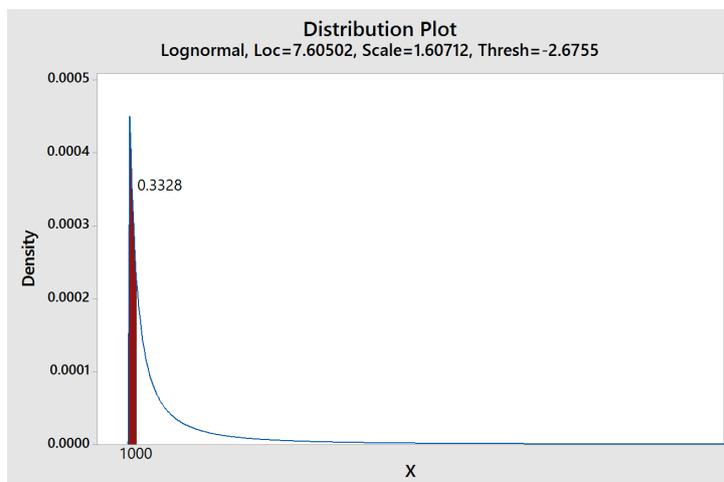
Horas	Falhas Acumuladas (%)	Horas	Falhas Acumuladas (%)
0	0	5400	73,8392
600	28,4124	6000	75,8567
<b>1000</b>	<b>35,3078</b>	6600	77,6120
1200	41,1647	7200	79,1532
1800	49,9309	7800	80,5172
2400	56,4082	8400	81,7327
3000	61,4248	9000	82,8226
3600	65,4411	9600	83,8051
4200	68,7373	10200	84,6951
4800	71,4953	10800	85,5049

Fonte: Autoria Própria

### 6.1.5 Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo

Na Figura 13 é possível observar que 33,28% das falhas do disco de embreagem, não considerando outros componentes que podem falhar, ocorreram antes das 1000 horas de uso, período de garantia da máquina.

**Figura 13:** Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo para a Primeira Embreagem



Fonte: Autoria Própria

### 6.1.6 RF e MTTF

Para a primeira embreagem, a partir da amostra de dados, tem-se um total de 874 falhas ocorridas dentro do período de garantia para um total de 491 tratores. Dessa forma, utilizando a Equação 2, tem-se um RF de 1,780 considerando apenas falhas envolvendo o primeiro disco de embreagem.

A partir do RF, pode-se calcular o MTTF através do uso médio anual das máquinas, para este trator, com base, também, nos dados de garantia obtidos, tem-se um uso médio anual próximo de 1300 horas. Fazendo uso novamente da Equação 2 tem-se um Tempo Médio até a Falha (MTTF) de 730,38 horas.

Como se sabe que o período de garantia para o modelo em questão é de 1000 horas, e o MTTF é inferior a este período, é possível comentar que o Disco de Embreagem analisado é insuficiente e ineficaz para o modelo, exigindo-se uma adaptação para um modelo mais robusto.

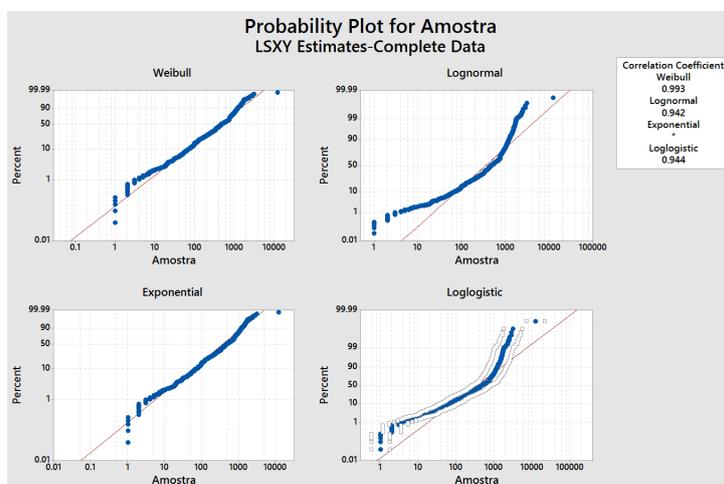
## 6.2 EMBREAGEM 2

A seguir tem-se os resultados para a Segunda Embreagem.

### 6.2.1 Distribuição de Falha

É possível observar na Figura 14 o comportamento dos dados da Segunda Embreagem e o coeficiente de correlação quando inseridos nas Distribuições de Weibull, Lognormal, Exponencial e Loglogística. Ao analisar, também, as quatro primeiras linhas da Tabela 5, o valor do coeficiente de correlação para as distribuições mencionadas.

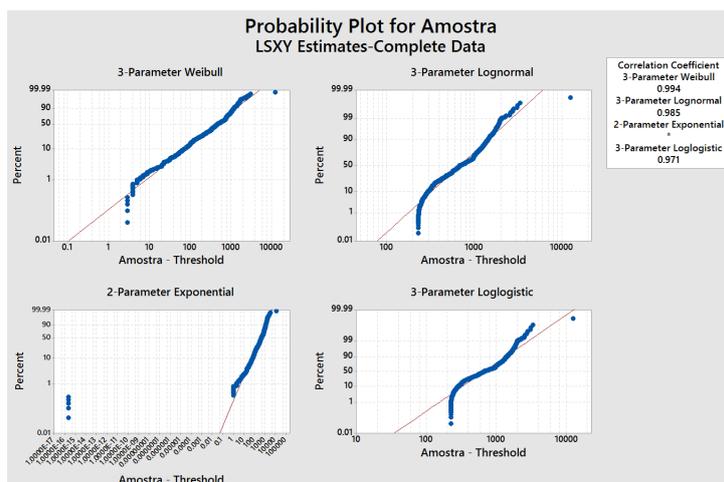
**Figura 14:** Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Weibull, Lognormal, Exponencial e Loglogística para a Segunda Embreagem



Fonte: Autoria Própria

Analogamente, na Figura 15, o comportamento dos dados e coeficiente de correlação quando inseridos nas Distribuições de Weibull de Três Parâmetros, Lognormal de Três Parâmetros, Exponencial de Dois Parâmetros e Loglogística de Três Parâmetros. Ao observar a Tabela 5, a partir da quinta linha até a oitava linha, tem-se o coeficiente de correlação para estas distribuições.

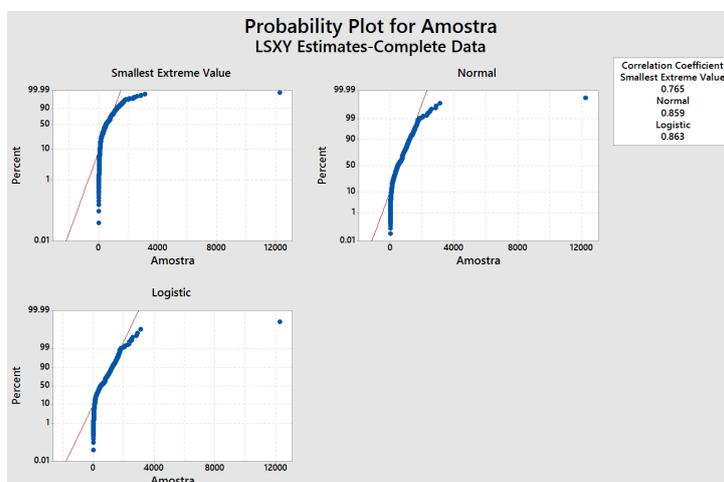
**Figura 15:** Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Weibull de Três Parâmetros, Lognormal de Três Parâmetros, Exponencial de Dois Parâmetros e Loglogística de Três Parâmetros para a Segunda Embreagem



Fonte: Autoria Própria

Por fim, na Figura 16, tem-se o comportamento e coeficiente de correlação quando a amostra de dados da Primeira Embreagem é inserida nas Distribuições de Menor Valor Extremo, Normal e Logística. Também, na Tabela 5, nas últimas três linhas, o coeficiente de correlação para as mesmas.

**Figura 16:** Gráfico de Probabilidade com Estimativa e coeficiente de correlação para as Distribuições de Menor Valor Extremo, Normal e Logística para a Segunda Embreagem



Fonte: Autoria Própria

Dessa forma, escolhe-se, para a Segunda Embreagem, a Distribuição de Weibull de Três Parâmetros, devido a um coeficiente de correlação de 0,994, ou seja, para esta distribuição há uma maior relação linear entre a amostra e a distribuição.

**Tabela 5:** Distribuições de Falha e coeficiente de correlação com a Amostra da Segunda Embreagem

Distribuição	coeficiente de correlação (0 a 1)
Weibull	0,993
Lognormal	0,942
Exponencial	—
Loglogístico	0,944
<b>Weibull de Três Parâmetros</b>	<b>0,994</b>
Lognormal de Três Parâmetros	0,985
Exponencial de Dois Parâmetros	—
Loglogístico de Três Parâmetros	0,971
Menor Valor Extremo	0,765
Normal	0,859
Logístico	0,863

Fonte: Autoria Própria

### 6.2.2 Função de Sobrevivência

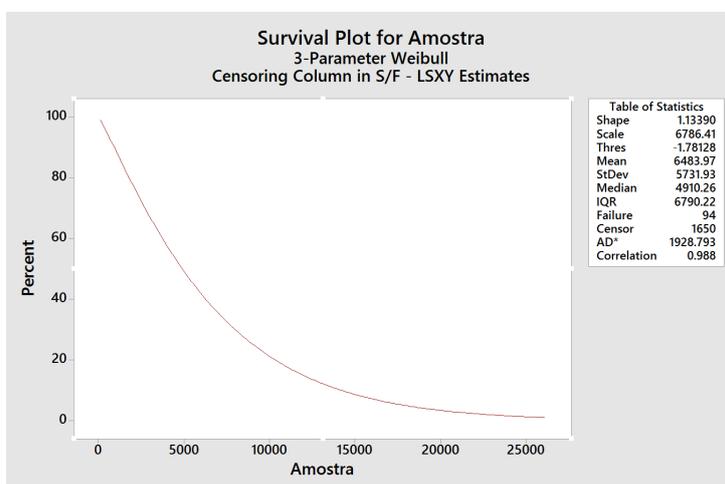
A partir das Figuras 17 e 18 e com o auxílio da Tabela 6, pode-se notar que a Taxa de Sobrevivência para a Segunda Embreagem é melhor se comparada com a Primeira Embreagem. Observa-se que, para 1000 horas, tem-se 89,20% dos Discos de Embreagem ainda funcionais.

**Figura 17:** *Função de Sobrevivência para a Segunda Embreagem*



Fonte: Autoria Própria

**Figura 18:** *Função de Sobrevivência para a Segunda Embreagem*



Fonte: Autoria Própria

**Tabela 6:** Tabela de Horas e Porcentagem de Quantas Embreagens Sobrevivem

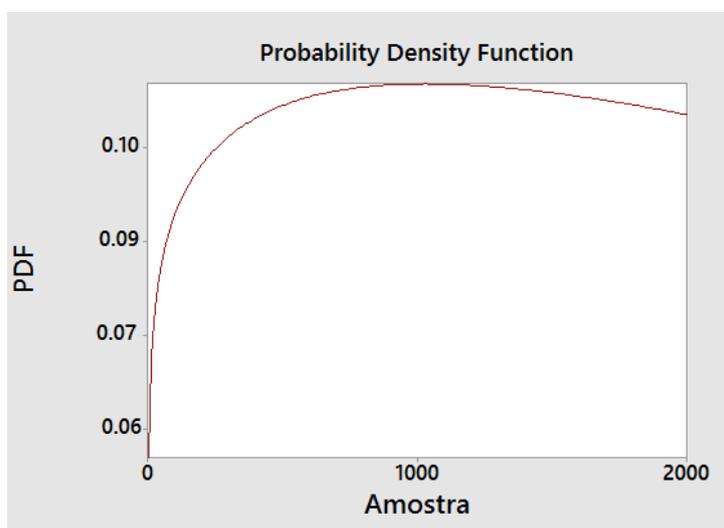
Horas	Taxa de Sobrevivência (%)	Horas	Taxa de Sobrevivência (%)
0	100	2000	77,84
200	98,16	2200	75,65
400	96,03	2400	73,49
600	93,79	2600	71,38
800	91,51	2800	69,23
<b>1000</b>	<b>89,20</b>	3000	67,26
1200	86,89	3200	65,27
1400	84,60	3400	63,32
1600	82,32	3600	61,41
1800	80,07	3800	59,55

Fonte: Autoria Própria

### 6.2.3 Função Densidade de Probabilidade de Falha

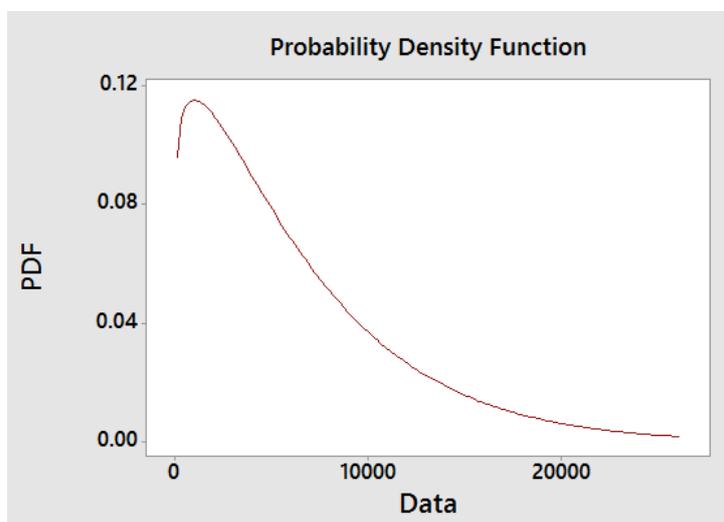
É possível observar a partir da análise da Tabela 7 que a Taxa de Densidade de Probabilidade de Falha tem pouca alteração entre 200 e 3000 horas, tendo seu pico próximo de 1000 horas. É possível observar que as falhas estão bem distribuídas entre as primeiras 3000 horas, não estando acumuladas unicamente dentro do prazo de garantia.

**Figura 19:** Função Densidade de Probabilidade de Falha para a Segunda Embreagem



Fonte: Autoria Própria

**Figura 20:** Função Densidade de Probabilidade de Falha para a Segunda Embreagem Contabilizando até 25000 Horas para Melhor Visualização do Gráfico



Fonte: Autoria Própria

**Tabela 7:** Tabela de Horas e Taxa de Densidade de Probabilidade de Falha para a Segunda Embreagem

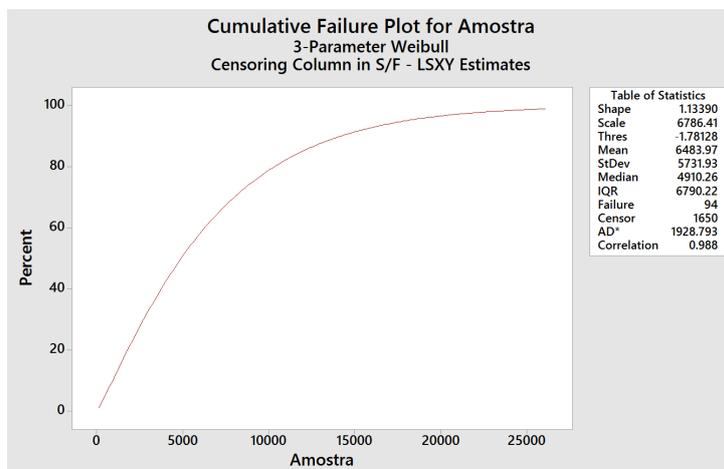
Horas	Taxa Densidade de Probabilidade de Falha	Horas	Taxa Densidade de Probabilidade de Falha
0	0	2000	0,1104
200	0,1024	2200	0,1087
400	0,1099	2400	0,1069
600	0,1133	2600	0,1049
800	0,1149	2800	0,1029
<b>1000</b>	<b>0,1154</b>	3000	0,1008
1200	0,1152	3200	0,0986
1400	0,1144	3400	0,0965
1600	0,1134	3600	0,0943
1800	0,1120	3800	0,0921

Fonte: Autoria Própria

#### 6.2.4 Função Cumulativa de Falhas

Para a Segunda Embreagem, a partir da Figura 21 e Tabela 8, pode-se perceber uma distribuição mais uniforme das falhas ocorrendo ao longo do tempo, uma vez que, para 1000 horas, tem-se apenas 10,80% das quebras ocorrendo. Pode-se perceber um crescimento na quantidade de falhas menos acentuada nas primeiras horas.

**Figura 21:** Função Cumulativa de Falhas Computando até 25000 horas para Segunda Embreagem



Fonte: Autoria Própria

**Tabela 8:** Tabela de Horas e Porcentagem de Falhas Acumuladas até 10800 Horas.

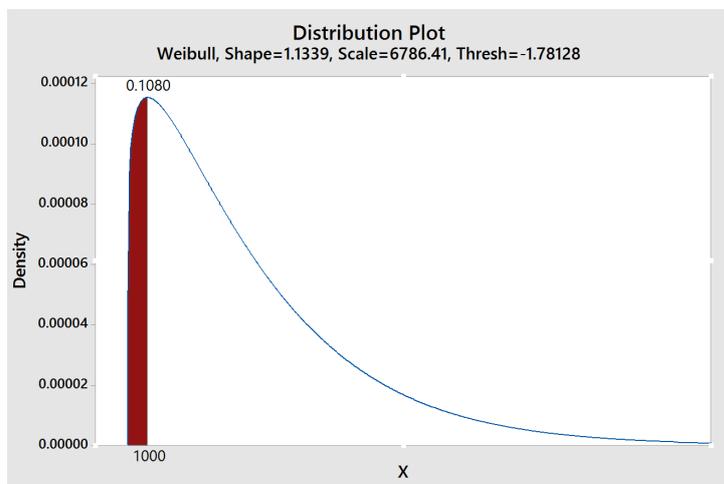
Horas	Falhas Acumuladas (%)	Horas	Falhas Acumuladas (%)
0	0	5400	53,7920
600	6,2096	6000	58,1028
<b>1000</b>	<b>10,8027</b>	6600	62,0617
1200	13,1032	7200	65,6882
1800	19,9327	7800	69,0031
2400	26,5053	8400	72,0272
3000	32,7367	9000	74,7811
3600	38,5884	9600	77,2861
4200	44,0466	10200	79,5584
4800	49,1114	10800	81,6196

Fonte: Autoria Própria

### 6.2.5 Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo

Para a Figura 22 é possível observar que, aproximadamente, 11% das falhas ocorreram antes das 1000 horas de uso, período de garantia da máquina.

**Figura 22:** Distribuição de Falhas ao Longo do Tempo para a Segunda Embreagem



Fonte: Autoria Própria

### 6.2.6 RF e MTTF

Em razão da implementação da nova embreagem ainda ser algo recente dentro da indústria, cerca de apenas um ano, tem-se apenas 210 falhas registradas em 188 diferentes máquinas, ou seja, uma Frequência de Reparo de 1,12.

Devido a ser o mesmo trator, apenas com uma embreagem mais robusta, o tempo de uso médio de um trator desse modelo se mantém em 1300 horas. Dessa forma, pode-se calcular o Tempo Médio até a Falha (MTTF) obtendo 1160,71 horas.

Para o segundo Disco de Embreagem, o MTTF é superior ao tempo de garantia, logo é uma solução válida do ponto de vista econômico, uma vez que, em média, ocorre a falha após o período de garantia não acarretando prejuízos maiores à empresa. Entende-se que o Disco não deveria falhar com esse tempo, uma vez que para outros modelos os discos de embreagem duram cerca de 2500 horas, mais que o dobro do tempo de garantia. Apesar de eficaz dentro do período de garantia, esta solução, do ponto de vista da Engenharia de Confiabilidade, atende aos critérios iniciais de "se manter viva até o final do período de garantia", no entanto do ponto de vista mercadológico ela é ineficiente e pouco durável.

## 6.3 COMPARATIVO

### 6.3.1 Comparativo da Função de Sobrevivência

Ao observar as Tabelas 2 e 6 - oriundas dos gráficos das Figuras 9 e 17 - pode-se perceber que, por exemplo, em 1000 horas, quando ocorre o fim da garantia do modelo, a Primeira Embreagem tem uma probabilidade de ainda estar funcional em apenas 66,72% dos casos enquanto a Segunda Embreagem tem a probabilidade de estar funcional em 89,20% dos casos, uma diferença de 33,68%. Esse dado comprova que a substituição pela Segunda Embreagem, mesmo que ainda não obtendo valores satisfatórios do ponto de vista de negócios - uma vez que o Disco de Embreagem, para o cliente, não deveria quebrar nunca -, tem uma significativa melhora em questão de sobrevivência diminuindo em um terço a probabilidade de falha do disco de embreagem e subsequente reposição do trator.

### **6.3.2 Comparativo da Função Densidade de Probabilidade de Falha**

Ao comparar as Tabelas 3 e 7 - cujos dados são originários dos gráficos presentes nas Figuras 10, 19 e 20, pode-se perceber que, para a Primeira Embreagem, há maior densidade de probabilidade na ocorrência da falha, ou seja, as chances do Disco de Embreagem da Primeira Embreagem falhar são maiores. Especificamente para essa análise, pode-se afirmar que, para a Primeira Embreagem, há maiores chances de falha dentro do período de garantia, enquanto que para a Segunda Embreagem essa probabilidade é reduzida significativamente. Dessa forma pode-se concluir que a segunda falha menos dentro do período de vida inicial, dessa forma reduzindo os custos com a garantia da peça.

### **6.3.3 Comparativo da Função Cumulativa de Falhas**

Ao analisarmos tanto as Figuras 12 e 21 como as Tabelas 4 e 8 é possível perceber que a Primeira Embreagem tem um crescimento no número de falhas bastante elevado se comparado com o crescimento da primeira embreagem, uma vez que, para 50% das amostras danificadas, para a Primeira Embreagem tem-se aproximadamente 1800 horas enquanto para a Segunda Embreagem tem-se 4800 horas.

Também é importante salientar que, para o período de garantia de 1000 horas, a primeira embreagem tem quase o triplo de falhas, em termos relativos, se comparada com a segunda embreagem. Novamente este fato evidencia que a substituição foi uma boa modificação.

### **6.3.4 Comparativo das Falhas ao Longo do Tempo**

Ao observar as áreas sob os gráficos das Figuras 13 e 22 que, para a Primeira Embreagem, tem-se uma maior área para 1000 horas, evidencia-se mais uma vez que a escolha pela Segunda Embreagem foi uma boa decisão.

### **6.3.5 Comparativo do RF e MTTF**

Quando compara-se o RF, para a confiabilidade, quanto menor o valor do mesmo, melhor e mais confiável o objeto analisado é. É possível observar que, apesar de haver significativamente menos máquinas produzidas - e conseqüentemente menos discos de embreagem - o RF da segunda embreagem é quase 40% inferior, uma diferença bastante significativa quando se analisa junto do MTTF. A partir do MTTF pode-se analisar que o tempo médio até a falha do primeiro disco de embreagem fica próximo de 730 horas, ou seja, em média os discos falham dentro do período de garantia, dessa forma acarretando prejuízos. No entanto, o segundo disco falha com 1160 horas, em média, um valor acima do tempo de garantia, não inferindo prejuízos. Entende-se que esse valor ainda é longe do ideal uma vez que, para o interesse do consumidor final, um disco de embreagem não deveria quebrar independente de quantas horas de trabalho sejam realizadas.

**Tabela 9:** *Tabela Comparativa de RF e MTTF*

–	Primeira Embreagem	Segunda Embreagem
RF	1,78	<b>1,12</b>
MTTF	730,38	<b>1160,71</b>

Fonte: Autoria Própria

### 6.3.6 Análise de Custos

No presente item deste trabalho compara-se o custo de cada uma das alternativas de disco de embreagem analisadas, para isso considera-se:

- Preço inicial, incluso no valor da máquina;
- Custo incorrido nos serviços de garantia, a saber:
  - Valor total das peças;
  - Mão de obra para abertura do motor, retirada da peça danificada e instalação da peça nova;
  - Troca de óleo da caixa de transmissão - indispensável para evitar que o óleo antigo tenha partículas sólidas em suspensão, advindas do disco anterior, comprometendo a função;
  - Juntas de Vedação;
- Período de garantia oferecido de 1000 horas, que, para facilitar os cálculos, e com base no uso médio anual, é equivalente a 10 meses de uso, para ambas as alternativas de disco de embreagem.
- Prazo médio de durabilidade da primeira embreagem de 730 horas ou, aproximadamente, 7 meses, com base no tempo médio até a falha (MTTF).
- Prazo médio de durabilidade da segunda embreagem de 1160 horas, ou, aproximadamente, 11 meses, com base no tempo médio até a falha (MTTF).

Para trazer a valor presente, considerou-se um custo financeiro atual como o do Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), medido no país e divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do ano de 2023, equivalente a 4,63% de acordo com IBGE (2024).

Desta forma adotou-se os seguintes valores:

- Preço da Embreagem 1: R\$1190,00 - preço que o fabricante paga ao fornecedor;
- Preço da Embreagem 2: R\$5750,00 - preço que o fabricante paga ao fornecedor;
- Período de Garantia de 1000 horas, ou, aproximadamente, 10 meses, considerando uso distribuído igualmente ao longo de período de um ano. Este período é padrão que o fabricante utiliza na venda de máquinas desse porte.

- Uso médio anual do trator de 1300 horas, valor que difere da garantia uma vez que parte do tempo em que a máquina está funcionando ela não está propriamente trabalhando, mas sim se locomovendo de um ponto a outro. Dessa forma, o trator trabalha cerca de 108 horas ao mês.
- Prazo médio de quebra da Embreagem 1 de 730 horas de um total de 1300 horas que o equipamento opera por ano, ou seja, a avaria ocorre dentro do período de garantia, em média no sétimo mês após a compra.
- Prazo médio de quebra da Embreagem 2 de 1160 horas, ocorrendo em média 11 meses de uso após a compra do produto, ou seja, a avaria ocorre quando o período de garantia já está finalizado.
- Valor das peças de reposição - discos de embreagem - é igual ao valor inicial.
- Mão de Obra Calculada através de:
  - 14 horas técnicas para desmontar o motor;
  - 2 horas técnicas para abrir e limpar a caixa de embreagem, substituir o componente danificado e repor o óleo;
  - Preço da hora técnica: R\$265,00, valor médio gasto no serviço de garantia do fabricante de acordo com AGCO Dealers (2024).
- Troca do óleo - 45 litros, de acordo com o Manual do Operador, AGCO (2019), custando R\$24,75 o litro, segundo AGCO Parts (2024).
- Juntas de Vedação - conjunto custando R\$212,00, conforme pesquisa junto a AGCO Parts (2024).

Para trazer as despesas a valor presente, consultou-se a economista Larissa Gedeon, da equipe BF Capital Assessoria de Operações Financeiras, em São Paulo, com vasta experiência na estruturação de projetos e no desenvolvimento de estudos de viabilidade econômico-financeira. Sugeriu-se utilizar um dos índices oficiais: o Índice Geral de Preços de Mercado (IGPM) ou o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA). Desta forma adotou-se, entre ambos os indicadores, o de maior valor, o IPCA, medido em 2023, com um valor de 4,62%, de acordo com o IBGE (2024), com um valor médio mensal de 0,377% e acumulado em 7 meses de 2,67% e em 10 meses de 3,77%.

A partir dessas informações, calculou-se o valor financeiro para o fabricante para a máquina com a Embreagem 1. O custo total para a empresa, considerando o tempo médio de quebra, é de R\$7745,00, dos quais R\$1190,00 são relativos a aquisição do primeiro disco de embreagem, já no produto, e o restante, um montante de R\$6575,00, é relativo à respectiva substituição, mão de obra, compra e subsequente troca de óleo e juntas de vedação.

É importante ressaltar que tais despesas são incorrida em função de que a embreagem precisa ser repostada, ou consertada, durante o período em que a máquina como um todo está protegida pela garantia. No caso da segunda embreagem, os serviços de substituição de embreagem ocorrem, em média 1160 horas após o início das operações, sendo que o valor dos custos efetivos para o fabricante, dessa forma, limitam-se ao preço inicial da peça, na origem da aquisição.

Desta forma, como pode se observar nas Tabelas 10 e 11, conclui-se que, a substituição do primeiro disco de embreagem pelo segundo disco é favorável ao fabricante, apesar de um custo de aquisição inicial superior, se considerar os já indicados custos de manutenção no âmbito de garantia técnica contratual, os gastos reduzem-se de R\$7725,00 para R\$5750,00, tudo na mesma base do preços de oferta ( $P_o$ ), também chamado de preço inicial, uma vez que o tempo médio para a falha do segundo disco de embreagem é superior ao período de garantia do mesmo.

**Tabela 10:** Custos de Garantia, por máquina, para a Embreagem 1 ao considerar as falhas, em média, ocorrendo no MTTF

Unid	Total	Data Zero	MESES													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
<b>Embreagem 1</b>			Garantia 10 meses	Quebra, em média, em 7 meses de acordo com MTTF.												
Valor Compra	R\$	1.170	1.170													
Custo da Garantia		6.755	-	-	-	-	-	-	-	6.755	-	-	-	-	-	-
Peças	R\$	1.190								1.190						
Mao de Obra	R\$	4.240								4.240						
Toca de Óleo	R\$	1.113								1.113						
Juntas de Vedação	R\$	212								212						
Total a Valores Historicos	R\$	7.945	1.190	-	-	-	-	-	-	6.755	-	-	-	-	-	-
Taxa Mensal de descontos		0,3770%								180						
Valor Desconto Anual	R\$															
Total a Po	R\$	7.765	1.190	-	-	-	-	-	-	6.575	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 11:** Custos de Garantia, por máquina, para a Embreagem 2 ao considerar as falhas, em média, ocorrendo no MTTF

Unid	Total	Data Zero	MESES													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
<b>Embreagem 2</b>			Garantia 10 meses	Quebra, em média, em 11 meses de acordo com o MTTF - após a garantia												
Valor Compra	R\$	5.750	5.750													
Custo da Garantia		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Peças	R\$	-														
Mao de Obra	R\$	-														
Toca de Óleo	R\$	-														
Juntas de Vedação	R\$	-														
Total a Valores Historicos	R\$	5.750	5.750	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Taxa Mensal de descontos		0,3770%														
Valor Desconto Anual	R\$															
Total a Po	R\$	5.750	5.750	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria Própria

Para ilustrar, de outra forma, que a troca de componentes foi uma escolha acertada e economicamente viável, em um cenário onde são produzidas 200 máquinas, igualmente divididas onde 100 possuem o primeiro disco de embreagem e as outras 100 possuem o segundo disco, utilizando, também, os dados tanto das Funções de Sobrevivência e Função Densidade de Probabilidade de Falha, calculou-se, mês a mês, o custo para a manutenção de garantia de cada máquina. Esses dados podem ser observados na Tabela 12 para a primeira embreagem e na Tabela 13 para a segunda embreagem.

Tabela 12: Custos de Garantia, mês a mês, para a Embreagem 1

Mês de Operação		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Horas de Uso		0	108	219	325	433	541	646	761	866	976	1083
Valor de Compra (R\$) Disco de Embreagem		1190,00										
Custos de Garantia (R\$)												
Peça		0,00	1190,00	1190,00	1190,00	1190,00	1190,00	1190,00	1190,00	1190,00	1190,00	1190,00
Mão de Obra		0,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00
Troca de Óleo		0,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00
Juntas de Vedação		0,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00
Total a Valores Históricos	68740,00		6755,00	6755,00	6755,00	6755,00	6755,00	6755,00	6755,00	6755,00	6755,00	6755,00
Taxa Mensal de Desconto	0,3770%		25,47	50,93	76,40	101,87	127,33	152,80	178,26	203,73	229,20	254,66
Preço Total por máquina		0,00	6729,53	6704,07	6678,60	6653,13	6627,67	6602,20	6576,74	6551,27	6525,80	6500,34

Fonte: Autoria Própria

Nota: Projeção de possíveis custos, mês a mês, para uma unidade utilizando a Embreagem 1 caso seja acionada a garantia.

Tabela 13: Custos de Garantia, mês a mês, para a Embreagem 2

Mês de Operação		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Horas de Uso		0	108	219	325	433	541	646	761	866	976	1083
Valor de Compra (R\$) Disco de Embreagem		5750,00										
Custos de Garantia (R\$)												
Peça		0,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00
Mão de Obra		0,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00	4240,00
Troca de Óleo		0,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00	1113,00
Juntas de Vedação		0,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00
Total a Valores Históricos	118900,00		11315,00	11315,00	11315,00	11315,00	11315,00	11315,00	11315,00	11315,00	11315,00	11315,00
Taxa Mensal de Desconto	0,3770%		42,66	85,32	127,97	170,63	213,29	255,95	298,60	341,26	383,92	426,58
Preço Total por máquina		0,00	11272,34	11229,68	11187,03	11144,37	11101,71	11059,05	11016,40	10973,74	10931,08	10888,42

Fonte: Autoria Própria

Nota: Projeção de possíveis custos, mês a mês, para uma unidade utilizando a Embreagem 2 caso seja acionada a garantia.

Com o auxílio da Tabela 9 e Tabela 17, pode-se observar que, para cada 100 máquinas produzidas com os discos de embreagem, 34 delas não estão mais funcionais em se tratando do primeiro disco, enquanto para o segundo componente tem-se apenas 11 inoperantes.

A partir do *software Reliasoft*, ao informar o número de máquinas totais e a taxa de sobrevivência, é possível, junto da Função de Probabilidade Densidade de Falha determinar, aproximadamente, quantas avarias ocorrem dentro de um intervalo de tempo. Para a montagem da Tabela 14 estimou-se que a máquina opera por volta de 108 horas a cada mês, a mesma métrica utilizada para as Tabelas 12 e 13.

**Tabela 14:** Número de Falhas, mês a mês, para as Embreagens 1 e 2

Embreagem 1				Embreagem 2			
Total:	100	Mês	Falhas	Total	100	Mês	Falhas
Taxa de Falha:	0,3368	0	0	Taxa de Falha	0,108	0	0
Máquinas Inoperantes	34	1	2	Máquinas Inoperantes	11	1	1
		2	5			2	1
		3	5			3	1
		4	4			4	1
		5	4			5	1
		6	4			6	1
		7	3			7	1
		8	3			8	1
		9	2			9	1
		10	2			10	2
		Total	34			Total	11

Fonte: Autoria Própria

Apesar de os custos iniciais para a montagem do trator serem substancialmente superiores quando compara-se o segundo disco de embreagem com o primeiro, é possível observar junto da Tabela 15 que essa diferença acaba sendo benéfica economicamente para o fabricante uma vez que a ocorrência de falhas é significativamente inferior e impacta e uma visível economia em custos para o setor de Pós-Vendas uma vez que, em um estudo hipotético para 100 máquinas produzidas com cada um dos discos de embreagem, é possível observar uma economia de mais de R\$100000,00 quando observa-se os custos totais de garantia para o modelo com o segundo disco se comparado com o primeiro disco.

**Tabela 15:** Custos Totais Relacionados a Garantia.

Meses de Operação	Horas de Uso	Embreagem 1		Embreagem 2	
		Número de Falhas	Custo por Máquina	Número de Falhas	Custo por Máquina
0	0	0	R\$ 0,00	0	R\$ 0,00
1	108	2	R\$ 6.729,53	1	R\$ 11.272,34
2	219	5	R\$ 6.704,07	1	R\$ 11.229,68
3	325	5	R\$ 6.678,60	1	R\$ 11.187,03
4	433	4	R\$ 6.653,13	1	R\$ 11.144,37
5	541	4	R\$ 6.627,67	1	R\$ 11.101,71
6	646	4	R\$ 6.602,20	1	R\$ 11.059,05
7	761	3	R\$ 6.576,74	1	R\$ 11.016,40
8	866	3	R\$ 6.551,27	1	R\$ 10.973,74
9	976	2	R\$ 6.525,80	1	R\$ 10.931,08
10	1083	2	R\$ 6.500,34	2	R\$ 10.888,42
11	1192	FORA DE GARANTIA			
12	1300	FORA DE GARANTIA			
	Total	34	R\$ 225.340,72	11	R\$ 121.692,24

Fonte: Autoria Própria

### 6.3.7 Ações Propositivas para Melhorar Tempo de Vida Útil da Embreagem

Algumas ações poderiam ser indicadas, no Manual do Operador, para aumentar a sobrevivência de um Disco de Embreagem, independente do modelo, no entanto, para

prolongar a vida útil e diminuir custos com a troca do componente é possível sugerir vistorias diárias e pré operacionais no exterior da caixa de embreagem, observando se há presença de vazamentos de óleo ou danos a mesma.

Uma alternativa seria indicar, no manual do operador, testes semanais relativos a condição do óleo da caixa de embreagem uma vez que é de fácil acesso, dessa forma fazendo uma análise simples de viscosidade e, em caso seja possível perceber algum particulado sólido na amostra coletada, levar a máquina a concessionária o mais rápido possível uma vez que este pode ser um sinal que a embreagem está próxima de quebrar.

Outro ponto que pode ser abordado é, diariamente, observar se é perceptível algum ruído sonoro bruto durante a troca da embreagem, uma vez que isso pode indicar possíveis indícios de danos estruturais ao componente.

Por fim, utilizando os valores observados na Figura 17 e na Figura 19, é proposta uma revisão mais minuciosa, em concessionária autorizada, a cada 250 horas de trabalho, período escolhido devido a um decréscimo quase que constante na taxa de sobrevivência, como visto na Tabela 6, para os primeiros momentos da Segunda Embreagem e também pela quase constante Densidade de Probabilidade de Falha observada na Tabela 7. Salienta-se que as quatro primeiras revisões seriam custeadas pelo fabricante, uma vez que a máquina ainda está coberta pelo período de garantia, no entanto seria aconselhado manter essa revisão por, pelo menos, 3000 horas, no entanto a partir da quarta revisão a cada 500 horas, uma vez que o custo para essa revisão é de R\$3710,00. Para garantir, também, a satisfação do consumidor final, seria proposto que as quatro revisões subsequentes, a cada 500 horas, fossem divididas entre 75% para o fabricante e 25% para o proprietário, mantendo uma boa relação com o cliente. A revisão a cada 250 horas do período de garantia acarretaria em um incremento do preço do trator - que não refletiria no valor do produto - de quase R\$14841,00, enquanto as revisões subsequentes acarretariam em um aumento de custo em R\$11131,00, totalizando um montante de R\$25972,00.

Essa última medida visa proteger não apenas os interesses do consumidor final como também o prestígio da marca, uma vez que esse aumento em custos impacta em quase R\$26000 na lucratividade do produto.

Sabe-se que a margem de lucro para cada máquina vendida com o segundo disco de embreagem é pouco menos de R\$30000, dessa forma, a solução proposta em relação a custos de revisão ainda seria uma alternativa financeiramente saudável uma vez que essa alternativa poderia diminuir o número de reclamações de garantia em se tratando unicamente do Disco de Embreagem.

## 7 CONCLUSÕES

Este estudo, centrado na análise da confiabilidade de dois discos de embreagem de tratores, solidifica a importância crucial desses componentes em um contexto mais amplo. Os tratores, desempenhando um papel fundamental no setor agrícola são essenciais para o aumento da eficiência nas atividades agrícolas. Contudo, muitas queixas relacionadas ao funcionamento do modelo escolhido convergem para o disco de embreagem, peça vital para o funcionamento pleno dos tratores.

Problemas recorrentes, como falhas de funcionamento na estrutura, não apenas comprometem a operação cotidiana, mas também ressaltam a necessidade de soluções robustas. Do ponto de vista da engenharia, a tolerância para um número elevado de falhas é inaceitável, e, nesse contexto, a substituição do disco de embreagem por um componente de maior resistência e funcionalidade emerge como uma solução imperativa e mais fácil de ser realizada.

A análise de confiabilidade realizada neste trabalho valida integralmente a eficácia dessa alteração, transformando a mudança implementada em uma decisão assertiva. Os dados de garantia, minuciosamente analisados, não apenas respaldam a escolha de trocar o primeiro disco pelo segundo, mas também revelam um aumento substancial no desempenho do sistema. Este ganho não é apenas quantitativo, mas também se alinha de maneira precisa às necessidades específicas da organização, refletindo-se em melhorias palpáveis nas operações agrícolas.

Ao longo desta pesquisa, reforça-se a noção de que componentes de um sistema podem, de fato, apresentar falhas. No entanto, a substituição criteriosa desses elementos não apenas resolve os problemas imediatos, mas também contribui para a vida útil sustentável do sistema como um todo. Essa perspectiva vai além da esfera técnica, abraçando a ideia de que a manutenção eficaz, fundamentada em análises de confiabilidade, é um investimento estratégico para a longevidade e desempenho otimizado de equipamentos agrícolas cruciais, como os tratores em questão.

Também é analisada e demonstrada que a troca traz um benefício econômico para o fabricante, uma vez que, mesmo que os custos iniciais de produção da máquina sejam superiores, a longo prazo os custos com garantias ocorrem em menor quantidade, dessa forma trazendo benefícios também econômicos.

Em síntese, este estudo não apenas valida a decisão específica de substituir o primeiro disco pelo segundo, mas também reforça a importância contínua da análise de confiabilidade na gestão eficaz de equipamentos, destacando sua relevância na busca incessante por eficiência e confiabilidade.

## REFERÊNCIAS

- AGCO. *Manual do Operador MF 4200Xtra: MF4280 Xtra, MF4283 Xtra, MF4290 Xtra, MF4292 Xtra*. Canoas, Brasil, 2019.
- AGCO. *Manual do Operador MF4200: MF4292, MF4297, MF4298 e MF4299*. Canoas, Brasil, 2013.
- AGCO DEALERS. AGCO Service. Acesso em 8 de Fevereiro de 2024. 2024. Disponível em: <<https://www.agco.com.br/about/working-with-agco/dealers.html>>.
- AGCO PARTS. AGCO Parts. Acesso em 8 de Fevereiro de 2024. 2024. Disponível em: <<https://www.agco.com.br/brands/agco-parts.html>>.
- ANDREWS, J. D.; MOSS, T. R. *Reliability and Risk Assessment*. Wiltshire, United Kingdom: Professional Engineering Publishing, 2002. ISBN 1-86058-290-7.
- BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F. *Mathematical Theory of Reliability*. Philadelphia, Pennsylvania: Society for Industrial e Applied Mathematics, 1987. ISBN 978-0-8987-1369-5.
- BATISTA, W. A. F. *A Importância da Manutenção de Implementos Agrícolas para o Agroindustrial*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Universidade Pitágoras Unopar, Bandeirantes.
- BILAL, M. A.; RICHARD, H. M. *Probability, Statistics, And Reliability For Engineers And Scientists*. Boca Raton, Florida: Taylor Francis Group, 2011. ISBN 978-1-4398-9533-7.
- BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*. Berlin, Germany: Springer, 1992. ISBN 978-03-064-4063-2.
- BIROLINI, A. *Reliability Engineering: Theory and Practice*. New York: Springer, 2017. ISBN 978-3-662-54208-8.
- BRANCO, H. K. *Estudo da Confiabilidade de Equipamento de Monitoramento de Veículos*. 2018. Monografia de Especialização – Especialização em Engenharia de Confiabilidade, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- DALL'AGNESE, M. A. *Análise de Confiabilidade da Manutenção em Tratores de uma Empresa de Produção Agrícola*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- DUEK, C. *Análise de Confiabilidade na Manutenção de Componente Mecânico de Aviação*. 2005. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração de Qualidade e Produtividade, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

- ELSAYED, E. A. *Reliability Engineering*. Reading, MA: John Wiley Sons, Inc, 2021. ISBN 978-1-11-966589-2.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Elsevier, 2011. ISBN 978-85-352-5188-3.
- IBGE. Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo Especial. Acesso em 8 de Fevereiro de 2024. 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas%3E>>.
- ISO-9000. *ISO-9000: Quality management systems — Fundamentals and vocabulary*. Geneva, Switzerland, 2015.
- KECECIOGLU, D. *Reliability Engineering Handbook*. New Jersey, United States: Prentice Hall, 1998. ISBN 978-0-1377-2294-5.
- MARQUES, L. D. *Metodologia para Análise de Confiabilidade no Planejamento de Sistemas de Distribuição Utilizando Matrizes Lógico Estruturais*. 2016. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- MODARRES, M.; KAMINSKY, M.; KRIVTSOV, V. *Reliability Engineering and Risk Analysis*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1999. ISBN 0-8247-2000-8.
- NASCIMENTO FILHO, A. C. C. *Análise de Confiabilidade de Componente Estrutural Automotivo*. 2011. Tese (Mestrado Profissionalizante em Gestão e Tecnologia Industrial) – Faculdade de Tecnologia SENAI - CIMATEC, Salvador.
- O’CONNOR, P. D. T.; KLEYNER, A. *Practical Reliability Engineering*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley Sons, Ltd., 2012. ISBN 978-11-199-6127-7.
- OLIVA, R. D. R. *Comparativo de Confiabilidade Automotiva Baseado em Falhas de Serviço*. 2006. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- REIS, C. S. DOS. *Metodologia de Análise de Confiabilidade de Equipamentos Médico-Assistenciais na Fase de Utilização*. 2014. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SERRA, D. D. S.; SILVA FILHO, I. C.; MACEDO, T. P. R. DE. *Vantagens e Aplicação da Manutenção Preventiva de Máquinas Agrícolas*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia, Universidade da Ânima, Jataí.
- SMITH, D. *Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers including Reliability Centred Maintenance and Safety-Related Systems*. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 978-07-506-6694-7.
- UNITED STATES OF AMERICA, D. O. D. *Department of Defense Handbook Reliability Growth Management*. United States of America, 2011.
- VACCARO, G. L. R. *Modelagem e Análise da Confiabilidade de Sistemas*. 1997. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VIEIRA, A. R.; SANTOS, J. G. F.; SANTOS, M. H. A. *Confiabilidade nos Processos de Manutenção*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Centro Universitário UNA, Itabira.