

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Avaliação da confiabilidade de bombas centrífugas utilizando
dados de acionamento de garantia como falha em campo**

Carolina Victória de Jesus Campos de Azevedo Julio

**Itajubá/MG
2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Carolina Victória de Jesus Campos de Azevedo Julio

**Avaliação da confiabilidade de bombas centrífugas utilizando
dados de acionamento de garantia como falha em campo**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Área de concentração: Engenharia de Produção (Qualidade e Produtos)

Orientadora: Prof. Juliana Helena Daroz Gaudêncio, Dra.^a.

Itajubá/MG
2024

JULIO, Carolina Victória de Jesus Campos de Azevedo

Avaliação da confiabilidade de bombas centrífugas utilizando dados de acionamento de garantia como falha em campo / Carolina Victória de Jesus Campos de Azevedo Julio - Itajubá, MG: Universidade Federal de Itajubá, 2024.

192 f.

Dissertação (mestrado acadêmico em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá: Itajubá/MG, 2024.

Orientador(a): Dra.^a Juliana Helena Daroz Gaudêncio.

1. Confiabilidade; 2. Garantia; 3. Falha em campo; 4. Bombas centrífugas.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Carolina Victória de Jesus Campos de Azevedo Julio

Avaliação da confiabilidade de bombas centrífugas utilizando
dados de acionamento de garantia como falha em campo

Dissertação aprovada por banca examinadora em 13 de
agosto de 2024, conferindo ao autor o título de **Mestre
em Ciências em Engenharia de Produção.**

Banca examinadora:

Dra.^a Juliana Helena Daroz Gaudêncio, IEPG/UNIFEI

Dr. Antônio Fernando Branco Costa, IEPG/UNIFEI

Dra.^a Andressa dos Santos Nicolau, COPPE/UFRJ

Itajubá/MG
2024

À minha família eu dedico a força do meu empenho e do meu trabalho, todos os dias da minha vida. Em especial, dedico este trabalho à minha mãe, Sandra Mendes Campos e ao meu sobrinho David Luccas, o mais novo e amado membro da família.

AGRADECIMENTOS

As histórias que carregamos na jornada da vida podem nos impulsionar à busca pelos tesouros mais preciosos: a sabedoria e o conhecimento. Depois que os achamos, dificilmente os perdemos e, ambos, atrelados, podem guiar a humanidade para o progresso.

Nesta minha busca por conhecimento e sabedoria, precisei de apoio e tive; por isso, gostaria de expressar aqui a minha gratidão a todas essas pessoas e instituições.

A Deus, em quem ponho minha fé, busco forças e a quem dedico meu fôlego de vida. À minha família, em especial Sandra Mendes Campos, Cíntia Acioli de L. Campos Sacramento e Vinícius J. Campos de A. Julio e Luiz Paulo Sacramento. Ao querido Ricardo Sardinha Lourenço, meu companheiro nesta jornada da vida. Ao Francisco Leite de Albuquerque Neto e à Regina Goulart Lourenço, por todo auxílio; eu nunca me esquecerei de tudo o que fizeram por mim. Todos vocês incentivam e também são o motivo da minha busca pelo conhecimento.

À empresa fornecedora dos dados do objeto de estudo desta pesquisa e ao seu presidente, diretores comercial e financeiro e colaboradores (em especial, a equipe de Qualidade e Motobombas) que se mostraram empenhados com a pesquisa a todo momento.

À Profa.^a Dra.^a Juliana Helena Daroz Gaudêncio pelas orientações, cumplicidade e companheirismo; aos professores e doutores Antônio Fernando Branco Costa, Andressa dos Santos Nicolau, Su Jian, Luis Volnei Sudati Sagrilo e Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, importantes no prosseguimento da minha jornada acadêmica e aos demais professores que ao longo da minha formação me ensinaram mais do que apenas disciplinas da ementa educacional.

Sem vocês tudo seria mais difícil ou até mesmo não seria possível. Visto que “[...] *para tudo há um tempo, para cada coisa há um momento debaixo do céu: [...] tempo de plantar e tempo de arrancar o que se plantou.*” (Eclesiastes 3,1-2; Bíblia Sagrada), desejo que no tempo oportuno vocês colham os bons frutos derivados das sementes que vocês têm plantado em minha vida.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG) da Universidade Federal de Itajubá e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, e sem o qual esta pesquisa não poderia ser realizada.

“Quem conheceu a alegria da compreensão conquistou um amigo infalível para a vida. O pensar é para o homem, o que é voar para os pássaros. Não toma como exemplo a galinha quando podes ser uma cotovia.”

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta a condução de uma avaliação de confiabilidade de produto, utilizando dados de acionamento de garantia como base para a análise de falhas em campo. A confiabilidade é a probabilidade de um produto operar sem falhas durante um período específico. Considerando que a imagem da marca e a credibilidade do produto estão ligadas à percepção de qualidade dos clientes, o entendimento da confiabilidade dos produtos torna-se crucial para se manter competitivo no mercado. Muitos fabricantes, ocasionalmente limitados por recursos, lançam produtos sem compreender sua confiabilidade, resultando em altos custos de reparo devido ao retorno na garantia. Neste contexto, os dados de acionamento de garantia podem fornecer uma oportunidade valiosa e de baixo custo para entender a confiabilidade dos produtos no mercado e aplicar o conceito de melhoria contínua, uma vez que oferecem uma visão realista da operação dos produtos e das falhas em campo. A pesquisa se concentra na avaliação da confiabilidade de bombas centrífugas hidráulicas, fabricadas por uma indústria de equipamentos de lazer com mais de 50 anos de mercado. O objetivo foi verificar estatisticamente a confiabilidade do produto, nunca antes avaliada, utilizando dados de falha em campo coletadas pelo Serviço de Atendimento ao Consumidor/Cliente (SAC) por meio do acionamento de garantia, demonstrando assim um método gratuito e oportuno, principalmente para fabricantes que possuem produtos neste contexto. Aplicou-se a Teoria Estatística da Confiabilidade, realizando uma modelagem probabilística dos dados até a primeira falha, considerando um único modo de falha (por limitações dos dados utilizados). Ajustando-os ao modelo de distribuição Weibull, utilizando a estimativa de Máxima Verossimilhança e o teste de qualidade de ajuste Anderson-Darling, o auxílio e demonstração da utilização de recurso computacional com o *software* MINITAB® (código fechado) foi realizada. A mesma análise também foi demonstrada com o *software* RStudio (código aberto) com o intuito de apresentar um recurso acessível. Devido às dificuldades de ajuste dos dados de falha em campo derivados do acionamento de garantia (que são de natureza incerta e censurada), comparou-se os resultados do modelo paramétrico Weibull com os resultados obtidos pelo modelo não-paramétrico Kaplan-Meier, gerados com os mesmos *softwares*. Também foram utilizadas ferramentas como a *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) e a *Fault Tree Analysis* (FTA) para analisar causas e efeitos das falhas, complementando a avaliação e evidenciando possíveis oportunidades de organização dos dados de falha por modo de falha. Os resultados obtidos por meio do método demonstraram valores de confiabilidade aproximados de 40% na metade do tempo de garantia; esse resultado parece não representar com precisão a realidade do produto avaliado e pode ter sido influenciado pela característica incerta e censurada dos dados derivados do acionamento de garantia, e pelas imprecisões observadas nos dados fornecidos pela fabricante. Esses resultados sugerem que, para aproveitamento dos benefícios da aplicação do método, é importante considerar as características de incerteza e censura dos dados de falha em campo obtidos por meio dos registros de acionamento da garantia e minimizá-las para obtenção de resultados mais precisos e coerentes. Neste contexto, a condução de estudos que aprimorem o método é sugerida e incentivada, tendo em vista seus benefícios sólidos (representando falhas no cenário real, sem variáveis de operação controladas, a custo zero) e de impacto social, que auxiliam principalmente pequenas e médias empresas/indústrias/fabricantes na implantação de uma cultura voltada à confiabilidade.

Palavras-chave: *Confiabilidade; garantia; falha em campo; bombas centrífugas.*

ABSTRACT

This paper presents the conduct of a product reliability assessment, using warranty drive data as a basis for analyzing failures in the field. Reliability is the probability that a product will operate fault-free for a specific period of time. Considering that brand image and product credibility are linked to customers' perception of quality, understanding product reliability becomes crucial to remaining competitive in the market. Many manufacturers, occasionally limited by resources, launch products without understanding their reliability, resulting in high repair costs due to warranty returns. In this context, warranty drive data can provide a valuable and low-cost opportunity to understand the reliability of products on the market and apply the concept of continuous improvement, as it offers a realistic view of product operation and failures in the field. The research focuses on assessing the reliability of hydraulic centrifugal pumps, manufactured by a leisure equipment industry with more than 50 years on the market. The aim was to statistically verify product reliability, which has never been assessed before, using field failure data collected by the Customer Service Department (SAC) through warranty claims, thus demonstrating a free and timely method, especially for manufacturers who have products in this context. The Statistical Theory of Reliability was applied, performing a probabilistic modeling of the data up to the first failure, considering a single failure mode (due to limitations of the data used). Fitting them to the Weibull distribution model, using Maximum Likelihood estimation and the Anderson-Darling fit quality test, the aid and demonstration of the use of computational resources with MINITAB® software (closed source) was carried out. The same analysis was also demonstrated using RStudio software (open source) in order to present an accessible resource. Due to the difficulties in adjusting the field failure data derived from the warranty activation (which is of an uncertain and censored nature), the results of the parametric Weibull model were compared with the results obtained by the non-parametric Kaplan-Meier model, generated with the same software. Tools such as Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA) were also used to analyze failure causes and effects, complementing the assessment and highlighting possible opportunities for organizing failure data by failure mode. The results obtained using the method showed reliability values of approximately 40% halfway through the warranty period; this result does not seem to accurately represent the reality of the product being assessed and may have been influenced by the uncertain and censored nature of the data derived from the warranty claim, and by the inaccuracies observed in the data supplied by the manufacturer. These results suggest that, in order to take advantage of the benefits of applying the method, it is important to consider the uncertainty and censorship characteristics of the field failure data obtained from the warranty activation records and minimize them in order to obtain more accurate and coherent results. In this context, studies to improve the method are suggested and encouraged, in view of its solid benefits (representing failures in a real scenario, without controlled operating variables, at zero cost) and social impact, which mainly help small and medium-sized companies/industries/manufacturers to implement a reliability-oriented culture.

Keywords: *Reliability; warranty; field failure; centrifugal pumps.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Ilustração do Protocolo de Revisão da RSL deste estudo	28
Figura 2 - Gráfico com total de estudos identificados	30
Figura 3- Gráfico com panorama da quantidade de estudos identificados por ano de publicação	30
Figura 4 - Percentual de estudos aceitos por base de dados	33
Figura 5 - Representação estrutural do sistema em série	46
Figura 6 - Histograma hipotético	48
Figura 7 - Ilustração do Papel de Probabilidade	49
Figura 8 - Representação ilustrativa da Função Densidade de Probabilidade (FDP)	50
Figura 9 - Representação ilustrativa da Função de Distribuição Acumulada	51
Figura 10 - Ilustração da "Curva de banheira"	56
Figura 11 - Representação ilustrativa da Curva de Sobrevida	58
Figura 12 - Censura de dados	70
Figura 13 - Exemplo de uma Árvore de Falhas Simples	75
Figura 14 - Ilustração do processo cronológico entre a fabricação do produto e o acionamento de garantia	94
Figura 15 - Funcionamento de um sistema de bombeamento com bomba centrífuga	97
Figura 16 - Etapas do método Modelagem e Simulação	102
Figura 17 - Etapas do método de pesquisa	103
Figura 18 - Falhas por produto manufaturado (Gráfico de Pareto)	106
Figura 19 - Detalhamento dos componentes Motobomba com Pré-filtro	107
Figura 20 - Composição de componentes do produto objeto de estudo	108
Figura 21 - Composição de componentes do produto objeto de estudo	108
Figura 22 - Sequência lógica para continuidade da aplicação do modelo científico	110
Figura 23 - Ilustração da disposição dos dados	114
Figura 24 - Passo a passo para cálculo do TTF no MINITAB®	115
Figura 25 - Preenchimento da caixa de diálogo "Calculadora" no MINITAB®	115
Figura 26 - Passo a passo para geração de Estatísticas Descritivas no MINITAB®	116
Figura 27 - Preenchimento da caixa de diálogo "Calculadora" no MINITAB®	116
Figura 28 - Relatório de Estatísticas Descritivas	117
Figura 29 - Novo relatório de Estatísticas Descritivas	118
Figura 30 - Passo a passo 'a' para a verificação de aderência a distribuições estatísticas no MINITAB®	119
Figura 31 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para verificação de aderência a distribuições estatísticas no MINITAB® através do caminho 'a'	119
Figura 32 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para verificação de aderência a distribuições estatísticas no MINITAB® através do caminho 'b'	121
Figura 33 - Passo a passo 'c' para a verificação de aderência a distribuições estatísticas no MINITAB®	121
Figura 34 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para verificação de aderência a distribuições estatísticas no MINITAB® através do caminho 'c'	122
Figura 35 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo no botão "Opções"	122
Figura 36 - Resultados gráficos gerados pelo passo a passo 'c' para a verificação de aderência à distribuição	123
Figura 37 - Passo a passo para análise dos cálculos pela distribuição Weibull	125

Figura 38 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo análise dos cálculos pela distribuição Weibull	125
Figura 39 - Resultados gráficos da estimação de índices de confiabilidade pelo modelo Weibull	126
Figura 40 - Outro passo a passo para análise dos cálculos pela distribuição Weibull	127
Figura 41 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo análise dos cálculos pela distribuição Weibull	128
Figura 42 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para cálculos de Falhas Acumuladas pela distribuição Weibull	128
Figura 43 - Gráfico de Falhas Acumuladas pela distribuição Weibull	129
Figura 44 - Passo a passo para realização da modelagem não paramétrica por meio do método Kaplan-Meier	129
Figura 45 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para cálculos pelo método Kaplan-Meier	130
Figura 46 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para cálculos pelo método Kaplan-Meier	130
Figura 47 - Resultado gráfico de confiabilidade gerados pelo método Kaplan-Meier	131
Figura 48 - Resultado gráfico de Taxa de Falha gerados pelo método Kaplan-Meier	132
Figura 49 - Resultado gráfico de Falhas Acumuladas gerados pelo método Kaplan-Meier	132
Figura 50 - Passo a passo para criar um novo projeto no RStudio	133
Figura 51 - Passo a passo para preenchimento das caixas de diálogo para criar novo projeto no RStudio	134
Figura 52 - Passo a passo para instalação dos pacotes necessários no RStudio	135
Figura 53 - Passo a passo para carregar os pacotes necessários no RStudio	135
Figura 54 - Execução do comando 'read_csv' no RStudio	136
Figura 55 - Passo a passo para armazenamento dos dados no RStudio	137
Figura 56 - Passo a passo para condução no RStudio	137
Figura 57 - Resultado do comando 'fitdist()' do pacote 'fitdistrplus' na condução no RStudio	138
Figura 58 - Resultado do comando 'gofstat()' do pacote 'fitdistrplus' na condução no RStudio	139
Figura 59 - Execução dos comandos para elaboração da Curva de Sobrevivência (R(t)) pela distribuição Weibull no RStudio	140
Figura 60 - Execução dos comandos para elaboração da Taxa de Falha (h(t)) pela distribuição Weibull no RStudio	141
Figura 61 - Execução dos comandos para elaboração da Função Densidade de Probabilidade (f(t)) pela distribuição Weibull no RStudio e Resultado do MTTF	142
Figura 62 - Execução dos comandos para elaboração da Função de Distribuição Acumulada pela distribuição Weibull no RStudio	143
Figura 63 - Condução da análise pelo modelo não-paramétrico Kaplan-Meier	144
Figura 64 - Condução e resultado do MTTF pelo modelo não-paramétrico Kaplan-Meier	145
Figura 65 - Resultados gráficos do Passo 4 - Curva de Sobrevivência Kaplan-Meier	145
Figura 66 - FTA básica do efeito "Bomba não funciona"	148
Figura 67 - FTA básica do efeito "Vibração"	149
Figura 68 - FTA básica do efeito "Vazamento"	150
Figura 69 - Análise da Curva de Sobrevivência por Weibull	153
Figura 70 - Análise da Curva de Sobrevivência por Kaplan-Meier	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proposta de Revisão	27
Tabela 2 - Strings de busca para pesquisa nas bases de dados	29
Tabela 3 - Número de estudos encontrados por base de dados	29
Tabela 4 - Número de estudos aceitos e rejeitados na Seleção de Estudos	31
Tabela 5 - Relação final de estudos aceitos	32
Tabela 6 - Síntese dos resultados da revisão quanto ao método empregado	33
Tabela 7 - Matriz de Ocorrência da FMEA	78
Tabela 8 - Matriz de Severidade da FMEA	78
Tabela 9 - Matriz de Detecção da FMEA	79
Tabela 10 - Classificação do Número de Prioridade de Risco	79
Tabela 11 - Pacotes para a avaliação de confiabilidade no RStudio	81
Tabela 12 - Classificação desta pesquisa científica	101
Tabela 13 - Exemplo da organização de informações	113
Tabela 14 - Resultados gerados pelo passo a passo ‘a’ para a verificação de aderência à distribuição	120
Tabela 15 - Resultados gerados pela estimação por Weibull	126
Tabela 16 - Resultados de confiabilidade gerados pelo método Kaplan-Meier	131
Tabela 17 - Classificação dos componentes de maior impacto no sistema Motobomba com Pré-filtro	151
Tabela 18 - Resumo de resultados de estimação dos índices de confiabilidade utilizando a distribuição de Weibull	152
Tabela 19 - Resumo de resultados de estimação dos índices de confiabilidade utilizando o modelo Kaplan-Meier	154

SUMÁRIO

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Justificativa e relevância da pesquisa	19
1.2. Objetivos	19
1.2.1. Objetivos gerais	19
1.2.2. Objetivos específicos	19
1.3. Delimitações da pesquisa	20
1.4. Estrutura do trabalho	21

Capítulo 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1. Revisão Sistemática da Literatura (RSL)	23
2.1.1. Estrutura da revisão sistemática	24
2.1.2. Resultados da revisão sistemática da literatura	26
2.1.2.1. Estágio I: Planejamento da revisão	26
2.1.2.2. Estágio II: Condução da revisão	28
2.1.2.2.1. Identificação dos estudos	28
2.1.2.2.2. Seleção dos estudos	31
2.1.2.2.3. Avaliação da qualidade dos estudos	32
2.1.2.2.4. Extração, acompanhamento e síntese dos dados	32
2.1.3. Estágio III: Elaboração do relatório e exposição das evidências	35
2.1.3.1. Relatório da Revisão Sistemática da Literatura	35
2.2. Conceitos básicos da literatura científica	39
2.2.1. Falhas	39
2.2.2. A teoria estatística da confiabilidade	40
2.2.2.1. Qualidade, segurança e confiabilidade	40
2.2.2.2. Utilização de dados de campo na modelagem da confiabilidade	41
2.2.2.3. Gestão da confiabilidade	42
2.2.2.4. A probabilidade na confiabilidade	43
2.2.2.4.1. Sistemas em série e em paralelo	43
2.2.2.4.2. Arranjo dos dados	47
2.2.2.4.3. Tempo Até Falha	49
2.2.2.4.4. MTTF e MTBF	52
2.2.2.4.5. Taxa de Falha ($h(t)$)	53
2.2.2.4.6. A Taxa de Falha e a Curva de banheira	55
2.2.2.4.7. Função de Confiabilidade/Sobrevivência ($R(t)$)	57
2.2.2.4.8. Modelagem de dados para resultados matemáticos	59
2.2.2.4.8.1. Modelagem paramétrica	60
2.2.2.4.8.1.1. Distribuições Weibull	60
2.2.2.4.8.1.2. Distribuição Exponencial	63
2.2.2.4.8.1.3. Distribuição Lognormal	64
2.2.2.4.8.1.4. Estimação de parâmetros por Máxima Verossimilhança	66
2.2.2.4.8.1.5. Teste de aderência e Valor P da hipótese (P-value)	67
2.2.2.4.8.2. Censura de dados	69
2.2.2.4.8.3. Modelagem não-paramétrica	71
2.2.2.4.8.3.1. Método Kaplan-Meier	71

2.2.2.5.	A importância do conhecimento de causa e efeito das falhas	72
2.2.2.5.1.	O método Fault Tree Analysis (FTA)	74
2.2.2.5.2.	Método Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	76
2.2.2.6.	Recurso computacional para a avaliação estatística da confiabilidade	79
2.2.2.7.	A garantia como falha em campo	82
2.2.2.7.1.	Autores brasileiros que realizaram a avaliação da confiabilidade com dados de acionamento de garantia com dados de falha em campo	85
2.2.2.7.1.1.	Discussões sobre a aplicação da avaliação da confiabilidade com dados de acionamento de garantia como dados de falha em campo	89
2.2.2.7.2.	Caracterização da censura em dados de garantia como falha em campo	92
2.3.	Proposta de pesquisa baseada fundamentação teórica	95
2.3.1.	Breve fundamentação teórica sobre as características, funcionamento e modo de falha das bombas centrífugas objeto de estudo	96
2.3.1.1.	Caracterização de uma falha em uma bomba centrífuga	96
2.3.2.	Resumo das características da proposta em prol das características dos dados do fabricante objeto de estudo	98

Capítulo 3

3. METODOLOGIA	101
3.1. Método de pesquisa	101
3.1.1. Etapas do método de pesquisa	102
3.2. Aplicação das etapas 1, 2 e 3 da pesquisa baseada no método	104
3.2.1. Situação Real do Problema	104
3.2.1.1. Caracterização e delimitação do produto objeto de estudo	105
3.2.1.2. Componentes do produto objeto de estudo da pesquisa	107
3.2.1.3. Período de garantia do produto objeto de estudo	108
3.2.2. Modelo conceitual - planejamento da avaliação	110
3.2.3. Modelo científico - execução da avaliação	110
3.2.3.1. Coleta e organização da amostra	111
3.2.3.1.1. Discussões sobre a coleta da amostra	111
3.2.3.1.2. Amostra principal e suas características limitantes	112

Capítulo 4

4. DESENVOLVIMENTO PRINCIPAL DO MÉTODO	114
4.1. Condução da modelagem no software MINITAB®	114
4.1.1. Estatísticas descritivas	116
4.1.2. Escolha da distribuição estatística	118
4.1.3. Condução dos cálculos	124
4.1.3.1. Utilizando modelagem paramétrica	124
4.1.3.2. Utilizando modelagem não-paramétrica	129
4.2. Condução da modelagem no software RStudio	133
4.2.1. Estatísticas descritivas	137
4.2.2. Utilizando modelagem paramétrica	138
4.2.2.1. Escolha da distribuição estatística	138
4.2.2.2. Condução dos cálculos	139
4.2.3. Utilizando modelagem não-paramétrica	143
4.3. Condução das análises de causa e efeito das falhas	146
4.3.1. Condução da Fault Tree Analysis (FTA)	146
4.3.1.1. Características da FTA elaborada	146
4.3.1.2. Resolução, construção e resultados	146

4.3.2.	Condução da Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	150
4.4.	Discussão de resultados das etapas 1, 2 e 3	151
4.4.1.	Resultados da condução da estimação pela modelagem paramétrica	151
4.4.2.	Resultados da condução da estimação pela modelagem não-paramétrica	154
4.4.3.	Comparação de resultados entre as modelagens paramétricas e não-paramétrica	155
4.4.4.	Principais contribuições da FTA e do FMEA	156
4.5.	Considerações finais (Etapa 4 - solução pelo modelo)	157
4.5.1.	Adequação da sistemática proposta	157
4.5.2.	Dificuldades encontradas na condução do método	157
4.5.3.	Considerações a respeito resultados	158
4.5.3.1.	Sugestões ao fabricante objeto de estudo	159
4.5.3.2.	Sugestões de aprimoramento do método	160
4.5.4.	Considerações a respeito do uso de recurso computacional na condução das análises estatísticas	161
CONCLUSÃO		162
REFERÊNCIAS		165
APÊNDICES		173
ANEXOS		189

CAPÍTULO 1

Contextualização da pesquisa

1. INTRODUÇÃO

A conjectura da qualidade de um produto vai além da perspectiva da empresa, sendo crucial considerar também a visão do cliente. Clientes satisfeitos têm uma probabilidade significativamente maior de realizar compras repetidas, mantendo a empresa competitiva no mercado. Isso incentiva as empresas/indústrias/fabricantes a concentrarem seus esforços na manutenção da qualidade de seus produtos (Lone e Bhat, 2022).

A qualidade do produto não apenas impacta positivamente na satisfação e fidelização do cliente, mas também exerce uma influência significativa na imagem da marca e na confiança depositada nela. Da mesma forma, a imagem e a confiança na marca têm efeitos positivos e significativos na satisfação do cliente (Diputra e Yasa, 2021), o que caracteriza a qualidade percebida.

Uma das características da qualidade que os clientes requerem perceber de um produto manufaturado é a operação sem falhas (Elsayed, 2021) e uma falha é caracterizada por uma impossibilidade de desempenho requerido; a credibilidade de um produto no mercado está diretamente relacionada à sua capacidade de desempenhar funções de maneira confiável.

Ao adquirir um produto, o cliente está ciente de que ele pode falhar em algum momento no futuro; entretanto, é essencial que o cliente tenha certeza de que o produto adquirido é capaz de desempenhar as funções propostas (Oliveira e Turrioni, 2016). A confiabilidade não é uma característica perceptível imediatamente; por isso, esse atributo é frequentemente acompanhado por uma garantia, permitindo ao cliente reivindicar falhas que possam ocorrer dentro de um período especificado (O'Connor, 1988, apud Junior, 1996; Oliveira e Turrioni, 2016).

A probabilidade de um produto desempenhar suas funções sem falhas durante um período de tempo determinado é denominada confiabilidade (ABNT NBR 5264:1994) e pode ser vista como uma projeção da qualidade ao longo do tempo (Altaleb e Zoltán, 2020). A compreensão estatística dos parâmetros de confiança no desempenho dos produtos assume um papel crucial, sendo uma característica estratégica na conquista de mercado e na redução de

custos empresariais principalmente relacionados ao fornecimento adequado da garantia baseado na confiança operacional do produto (Oliveira e Turrioni, 2016; Pasetto, 2002).

Em geral, pequenos fabricantes, sob pressão para desenvolver produtos rapidamente e com recursos financeiros e humanos limitados, frequentemente desconhecem ou negligenciam a avaliação da confiabilidade antes de lançar seus produtos no mercado. Isso pode resultar em previsões de garantia incorretas ou em custos substanciais no período de garantia fornecido (Pasetto, 2002); principalmente tendo em vista que, uma vez no mercado, os produtos podem apresentar um elevado número de falhas e acarretar diversas consequências, desde inconveniências e até potenciais lesões pessoais (Altaleb e Zoltán, 2020).

No entanto, ao obter registros de acionamento de garantia, surge uma excelente oportunidade para coletar informações relevantes sobre a confiabilidade do produto em questão. Ao aproveitá-la adequadamente, é possível gerar benefícios significativos, como a redução de custos com garantia e a melhoria contínua do produto. Essa abordagem é crucial para manter e aumentar a competitividade no mercado, pois as falhas registradas durante o acionamento de garantia fornecem informações reais sobre a operação do produto em campo. A aplicação da Teoria Estatística da Confiabilidade, baseada nessas falhas observadas em campo, oferece uma estrutura valiosa para essa avaliação (Junior, 1996).

As falhas observadas em campo são geralmente coletadas pelo setor de Serviço de Atendimento ao Consumidor/Cliente (SAC) através de solicitações de assistência técnica. Quando são registradas e processadas de maneira adequada, as informações provenientes do acionamento de garantia permitem estimar parâmetros de confiabilidade do produto sem gerar custos excessivos ao fabricante. Esses dados fornecem um *feedback* crucial sobre a confiabilidade do produto, detalhando a quantidade e a natureza das falhas, o que é fundamental para análises de causa raiz e implementação de contramedidas (Dillenburg, 2005).

Aplicar soluções tecnicamente viáveis a problemas em escala empresarial/industrial, fabril permite reduzir a distância entre teoria e realidade (Ushakov, 2000, apud Altaleb e Zoltán, 2020). A análise de confiabilidade a partir de informações de garantia representa um ponto de partida conveniente e de impacto para a implementação gradual de um programa de confiabilidade, ajudando a disseminar e consolidar a cultura do "pensamento de confiabilidade" nas empresas/indústrias/fabricantes (Dillenburg, 2005), especialmente aquelas que nunca realizaram a modelagem de confiabilidade de seus produtos. Isso motiva a adesão a

um programa de confiabilidade, que envolve a execução de diversas tarefas em cada fase do ciclo de vida do produto, desde o projeto conceitual até a fase de suporte à manutenção, com o objetivo de entregar ao cliente um produto confiável (Junior, 1996).

Esta pesquisa tem como objetivo realizar uma avaliação da confiabilidade utilizando dados de acionamento de garantia, considerando esses dados como falhas em campo provenientes das solicitações de Assistência Técnica do setor de Serviço de Atendimento ao Cliente (SAC). O estudo exemplifica a aplicação para um caminho viável e de baixo custo para modelagem da confiabilidade. Especificamente, a avaliação será focada em bombas centrífugas hidráulicas, denominadas pelo fabricante de “Motobombas Com Pré-filtro”, destinadas principalmente ao bombeamento de água em piscinas. Esses produtos são fabricados por uma empresa de equipamentos de lazer localizada no estado do Rio de Janeiro, Brasil.

A proposta de pesquisa baseia-se na Teoria Estatística da Confiabilidade, que avalia a probabilidade de produtos funcionarem sem falhas em condições específicas por um período determinado e pode ser expressa quantitativamente pela probabilidade de ocorrências bem sucedidas durante esse período (Cavalvante, 2015; Altaleb e Zoltán, 2020).

Além disso, reconhece-se que a confiabilidade não se limita à probabilidade de um item não falhar, mas também envolve o estudo de todos os fatores que contribuem para a ocorrência da falha (Junior, 1996). Com isso, como objetivos específicos, visando também contribuir com a identificação desses fatores e auxiliar na identificação de possíveis melhorias na confiabilidade das bombas, esta pesquisa também realizará a análise de causa e efeito das falhas através de uma aplicação básica e generalizada dos métodos FMEA (Análise de Modo e Efeitos de Falha, do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*) e FTA (Análise de Árvore de Falhas, do inglês *Fault Tree Analysis*).

É conhecido na literatura que trabalhar com dados de falha em campo, como os dados de garantia, apresenta desafios devido à própria natureza e origem desses dados. Pesquisadores como Fogliatto e Ribeiro (2011), por exemplo, discutem esses problemas há algum tempo e propõem métodos para amenizá-los (Oliveira e Turrioni, 2016). Neste contexto, este trabalho realizará uma revisão bibliográfica para embasar a situação de pesquisa e discutir caminhos futuros para abordar esses desafios.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Modelar a confiabilidade de produtos utilizando dados de acionamento de garantia representa uma grande oportunidade para viabilizar estudos de confiabilidade em empresas/indústrias/fabricantes que lançaram seus produtos no mercado sem um entendimento aprofundado deste importante parâmetro. Além de refletirem bem o comportamento de operação do produto em campo, geralmente as informações sobre falhas em garantia já são registradas nessas empresas/indústrias/fabricantes para controle de custos na área de assistência técnica, controle e planejamento de produção, além de previsão de faturamento. Isso possibilita a realização de tais estudos a um custo acessível e permite que sejam conduzidos até mesmo por pessoal não especializado (Falcetta, 2000). Dessa forma, a condução de uma avaliação de confiabilidade utilizando dados de falha em campo resultantes das informações de falha obtidas nos registros da assistência técnica (acionamento de garantia), torna-se de grande relevância.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

O principal objetivo desta pesquisa é conduzir uma avaliação onde estima-se a confiabilidade de bombas centrífugas fabricadas por uma indústria do ramo de equipamentos de lazer, utilizando dados de acionamento de garantia como dados de falha em campo.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, este trabalho visa detalhar a utilização de dados de acionamento da garantia na modelagem da confiabilidade, apresentando uma metodologia preliminar para a avaliação da confiabilidade. Essa metodologia é destinada principalmente a empresas/indústrias/fabricantes que enfrentam dificuldades, desconhecem ou nunca realizaram a avaliação de confiabilidade de seus produtos; embora possa ser utilizada também em outros contextos. O propósito é auxiliar essas empresas/indústrias/fabricantes na adoção de uma cultura voltada para a qualidade de seus produtos e a segurança de seus clientes.

Além disso, como a avaliação da confiabilidade engloba o estudo aprofundado de todos os fatores que contribuem para a ocorrência da falha (Junior, 1996), este trabalho

também busca demonstrar esses fatores por meio dos métodos FMEA (Análise de Modo e Efeito de Falha, do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*) e FTA (Análise de Árvore de Falhas, do inglês *Fault Tree Analysis*), fornecendo uma visão geral sobre os modos de falhas no produto, de forma básica e generalizada. Isso permitirá uma melhor organização dos dados de falha, além de proporcionar uma compreensão abrangente dos elementos que influenciam a confiabilidade do produto, auxiliando no processo de melhoria contínua desta confiabilidade e do método de avaliação da confiabilidade.

1.3 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa concentra-se na avaliação de confiabilidade de produto em uma fabricante de equipamentos de lazer situada no estado do Rio de Janeiro, Brasil. Dentro da ampla gama de produtos fabricados por essa indústria, a análise priorizará um dos produtos carro-chefe e de maior volume de falhas, segundo os responsáveis da empresa e do SAC: as bombas centrífugas hidráulicas, utilizadas principalmente para o bombeamento de água em piscinas. Isso permitirá uma avaliação representativa e abrangente, concentrando esforços na variante mais frequentemente acionada pelos consumidores.

Desta forma, uma das limitações desta pesquisa está relacionada ao local de aplicação e aos dados utilizados, sendo realizada em um fabricante específico e com dados deste fabricante, o que impede a generalização do método aplicado e de seus resultados para outras empresas/indústrias/fabricantes do setor ou a sistemas que aparentemente possuam características similares.

A natureza imprecisa e censurada dos dados de falha em campo derivados do acionamento de garantia, não constitui exatamente uma limitação do trabalho, mas sim uma dificuldade encontrada em seu desenvolvimento. Esta dificuldade é imposta pela metodologia proposta, que assume que todas as falhas ocorridas são levadas ao conhecimento do fabricante e incluídas no estudo, o que tipicamente só ocorre no período de garantia; além de variadas características evidenciadas ao longo da pesquisa que podem fazer com que a estimativa de confiabilidade não venha a refletir completamente a realidade. Nenhum mecanismo para contornar esta dificuldade foi abordado neste trabalho; no entanto, sugestões de pesquisas futuras considerando a natureza incerta e censurada desses dados são mencionadas.

Embora a pesquisa considere a modelagem não-paramétrica na avaliação, outros modelos não-paramétricos, como o método Nelson-Aalen, não foram utilizados na modelagem dos dados de falha existentes.

Esta pesquisa não considera discussões específicas das áreas de conhecimento da Ciência Matemática e Estatística ou da Ciência de Dados, mas sim uma aplicação pura e superficial da Teoria Estatística da Confiabilidade em termos de aplicações relacionadas à Ciência da Engenharia de Produção conduzidas por meio de *softwares* de códigos fechado e aberto.

Nesta pesquisa, não foi investigado o uso de técnicas quantitativas estatísticas avançadas na execução da FMEA e da FTA, nem foi explorada a robustez nestes métodos em estudo aprofundado sobre todos os tipos de modo de falhas, efeitos ou causas, possíveis e interligadas logicamente, em uma bomba centrífuga hidráulica.

Não foram consideradas análises de confiabilidade por componentes para o entendimento da confiabilidade do sistema como um todo, devido a limitações nos dados fornecidos pelo fabricante objeto de estudo.

Ainda devido às limitações impostas pelos dados do fabricante, embora haja acionamentos de garantia que se caracterizam falhas, mas não se caracterizam como garantia, não foram utilizados dados de falha onde não houve concessão de garantia, o que pode aumentar a censura dos dados e impactar nos resultados.

A última limitação está relacionada ao caráter teórico, quanto à Revisão Sistemática da Literatura (RSL) realizada. Embora exista um grande número de referências sobre confiabilidade, a maioria do material encontrado apresenta exemplos teóricos que não consideram aspectos práticos da utilização de dados de acionamento de garantia. Por isso, não foram explorados o uso de todos os métodos encontrados através da RSL; bem como a extensão das pesquisas na RSL, com alterações na *string* de busca para comparação dos resultados obtidos ou obtenção de pesquisas mais direcionadas ao tema, não pôde ser realizado devido o prazo de conclusão da pesquisa.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para facilitar a leitura e compreensão das informações desta pesquisa, este trabalho está estruturado em 4 capítulos, sendo eles apresentados resumidamente, a seguir:

- A. **Capítulo 1 (Contextualização da pesquisa):** Detém a contextualização da pesquisa em geral, apresentando os objetivos gerais e específicos, justificativa e delimitações da pesquisa, além da estrutura organizacional do trabalho.
- B. **Capítulo 2 (Fundamentação teórica da pesquisa):** Apresenta uma revisão sistemática da literatura, impulsionada pela busca de métodos, ferramentas e conhecimento no campo literário e teórico aplicáveis à avaliação da confiabilidade no contexto da pesquisa. Além disso, são expostos conceitos básicos de confiabilidade amplamente difundidos no meio acadêmico, proporcionando contexto e embasamento para a condução da pesquisa.
- C. **Capítulo 3 (Explicação metodológica da pesquisa):** Aborda a metodologia científica da pesquisa, detalhando o estudo do método, o planejamento das etapas e a descrição do objeto de estudo. Também aborda os primeiros passos para desenvolvimento do método englobando a coleta de dados.
- D. **Capítulo 4 (Desenvolvimento principal do método):** Apresenta o desenvolvimento principal do método, com a condução das análises estatísticas e análises de causa e efeito das falhas. Neste capítulo também há a exposição dos resultados, as ponderações das discussões por estes geradas e as considerações finais da pesquisa.
-

CAPÍTULO 2

Fundamentação teórica da pesquisa

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo proporcionar o embasamento científico necessário para a pesquisa. Nele, são apresentados o processo de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), realizado para contextualizar o estudo e examinar práticas no meio acadêmico-científico relacionadas às tendências na avaliação da confiabilidade de produtos. Além disso, são discutidos conceitos básicos da literatura, delineados em prol do alcance dos objetivos geral e específicos desta pesquisa, essenciais também para a compreensão e desenvolvimento do tema central, que foca principalmente na avaliação da confiabilidade através da análise de dados de acionamento de garantia.

2.1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA (RSL)

É amplamente reconhecido que o processo de revisão da literatura é um método fundamental utilizado para gerenciar a diversidade de conhecimento em uma investigação acadêmica específica e organizar os conceitos na literatura relevante (Rowley e Slack, 2004).

A crescente ênfase na efetividade e na demanda por práticas baseadas em evidências, sublinhada pela necessidade de métodos rigorosos e válidos na análise de políticas e práticas públicas (Davies et al., 2000 apud Tranfield et al., 2003), impulsionou o movimento de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) desde os anos 1980. Essa abordagem destaca-se de outros tipos de revisões ao adotar um processo replicável e detalhado (Cook et al., 1997).

Tendo em vista a extensão de pesquisas que são realizadas sobre confiabilidade e considerando que a RSL é reconhecida como um método de alta qualidade para identificar e avaliar extensas literaturas de forma mais precisa (Mulrow, 1994, apud Tranfield et al., 2003), esta pesquisa adota esse método como ferramenta para examinar as práticas no meio acadêmico-científico e resultados relativos à avaliação da confiabilidade de produtos, especialmente no que diz respeito à percepção do cliente.

A utilização da RSL nesta pesquisa, tem por objetivo fundamentar as ações e decisões com base nas descobertas e tendências nesse campo, de modo a (Rowley e Slack, 2004):

- I. Descobrir métodos/ferramentas que possam ser úteis a esta pesquisa;
- II. Desenvolver a compreensão de conceitos teóricos;
- III. Identificar a literatura para qual a pesquisa contribuirá e contextualizar a pesquisa dentro desta literatura.

2.1.1. Estrutura da revisão sistemática

Segundo Tranfield et al., (2003), na revisão sistemática, a qualidade das evidências deve ser prioritária; evidências inadequadas ou incompletas prejudicam a formulação e implementação de políticas metodológicas. Os mesmos autores demonstraram uma estrutura coerente e robusta para conduzir o mapeamento e avaliação do conhecimento científico atual sobre as questões de pesquisa, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões e ações relacionadas a essas questões.

Após a identificação da necessidade de realização de uma RSL, eles sugerem que esta deve ser estruturada em estágios e fases, seguidas precisamente e respectivamente da seguinte forma:

- I. Estágio I: Planejamento da revisão
 - A. Fase 0 (Identificação da Necessidade de Revisão): Esta etapa refere-se à identificação da necessidade de realizar uma revisão sistemática como embasamento para uma pesquisa.
 - B. Fase I (Preparação da Proposta de Revisão): Esta fase compreende a organização do processo de pesquisa. Durante esse estágio, é crucial definir o escopo da revisão, abordando debates históricos, teóricos, práticos e/ou metodológicos. Além disso, devem ser estabelecidos critérios claros de inclusão e exclusão para documentos científicos, determinar as bases de dados de pesquisa e elaborar as *strings* de busca. Estas últimas consistem em conjuntos de palavras-chave e operadores lógicos, dispostos de maneira sequencial e lógica, que delineiam os objetivos da busca e serão empregados na localização de documentos nas bases de dados.
 - C. Fase II (Desenvolvimento do Protocolo de Revisão): Essa etapa consiste em elaborar as etapas sequenciais da revisão. Qualquer protocolo de revisão
-

gerencial pode incluir uma discussão conceitual do problema de pesquisa e uma declaração sobre a relevância do problema, em vez de uma questão de pesquisa definida.

II. Estágio II: Condução da revisão

- A. Fase III (Identificação dos Estudos): Nesta etapa, procede-se à busca de estudos nas bases de dados. O resultado almejado é uma lista abrangente de estudos, considerados como contribuições principais, que servirão como base para a revisão.
- B. Fase IV (Seleção dos Estudos): Nesta etapa, realiza-se a seleção dos estudos. Apenas os estudos que atendem a todos os critérios de inclusão especificados no protocolo de revisão e que não apresentam nenhum dos critérios de exclusão devem ser incorporados à revisão, sendo crucial declarar explicitamente o número de fontes incluídas e excluídas em cada etapa da revisão. Essa declaração deve abordar os motivos das exclusões.
- C. Fase V (Avaliação da Qualidade dos Estudos): A avaliação da qualidade concentra-se na validade interna de um estudo. A relevância de um estudo para a revisão também está vinculada à pertinência de suas questões de pesquisa e à qualidade de sua metodologia. Estudos excluídos aqui também devem ser documentados com os motivos da exclusão.
- D. Fase VI (Extração de Dados e Acompanhamento do Progresso): O procedimento de extração de dados e acompanhamento do progresso demanda a documentação de todas as etapas realizadas e seus resultados.
- E. Fase VII (Síntese dos Dados): Execução de síntese dos dados extraídos.

III. Estágio III: Elaboração do relatório e divulgação dos resultados

- A. Fase VIII (Relatório e Recomendações): Nesta etapa, procede-se à elaboração da documentação de pesquisa, contemplando todas as informações obtidas ao longo da revisão sistemática e recomendações/discussões, caso haja. “A redação da revisão da literatura pode ser iniciada depois que uma estrutura ampla tiver sido definida.” (Rowley e Slack, 2004).
-

B. Fase IX (Exposição das Evidências na Prática): Nessa fase, os resultados da pesquisa são tornados públicos, proporcionando a divulgação das evidências encontradas.

[Observação: Nesta pesquisa, a exposição das evidências se dará a partir do momento em que esta pesquisa se tornar pública. Isto ocorrerá após a avaliação e aprovação de doutores(as) especialistas.].

Com base nessas informações e visando facilitar a condução da revisão sistemática, o presente estudo utilizou o *software online* Parsif.al.

Parsif.al é uma ferramenta *online* e gratuita, desenvolvida com intuito de ajudar pesquisadores na realização de revisões sistemáticas da literatura a partir da organização de etapas, principalmente na área de Engenharia de Software, de acordo com o próprio site do software.

Há indícios de que este software *online* tenha sido desenvolvido por volta do ano de 2015, no Brasil, a partir da pesquisa de Souza (2015), na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFMG - Minas Gerais, Brasil). Estes indícios derivam das publicações realizadas no *blog* do *software online* pelo próprio autor da pesquisa mencionada, datadas de 2014 em diante.

Este *software* foi considerado na condução desta pesquisa por oferecer etapas de planejamento, condução e organização dos dados de forma semelhante às etapas propostas por Tranfield et al. (2003), uma vez que é embasado no artigo de Kitchenham (2007), que também defendeu que as etapas da revisão sistemática envolviam planejar, conduzir e relatar a revisão.

Assim, os resultados da revisão são apresentados a seguir.

2.1.2. Resultados da revisão sistemática da literatura

2.1.2.1. Estágio I: Planejamento da revisão

Após a identificação da necessidade da realização de uma revisão sistemática (Fase 0), esta pesquisa procedeu com a realização das seguintes fases 1, 2 e 3, sendo respectivamente, a “Preparação da Proposta de Revisão” e o “Desenvolvimento de um Protocolo de Revisão”.

A Tabela 1, demonstra o resultado da Preparação da Proposta de Revisão.

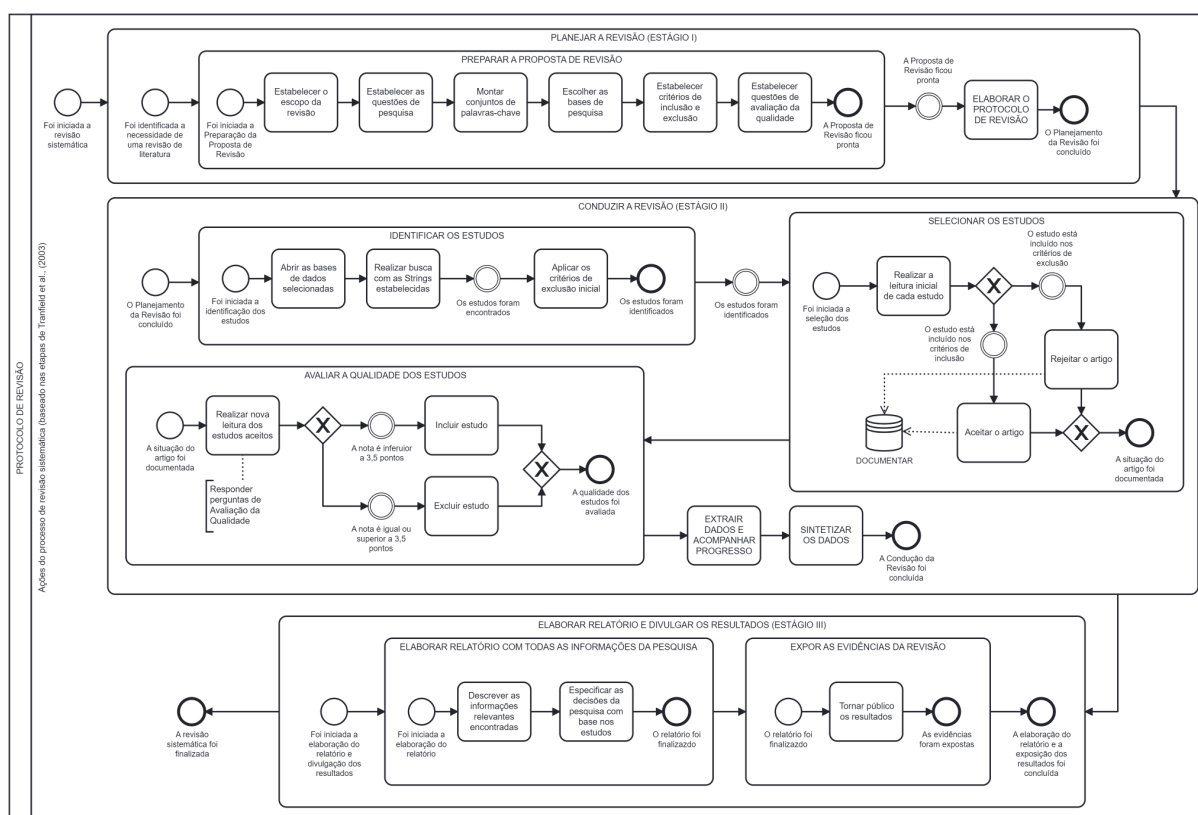
Tabela 1 - Proposta de Revisão

PREPARAÇÃO DA PROPOSTA DE REVISÃO	
Escopo:	Buscar documentos científicos que auxiliem na compreensão do panorama atual das ferramentas utilizadas na avaliação da confiabilidade de produtos (ou bombas centrífugas, conforme o objetivo específico desta pesquisa), além da FMEA e da FTA, que são amplamente utilizados. Investigar abordagens que considerem a análise dos dados de acionamento de garantia como indicadores de falhas em campo.
Questões de pesquisa:	Como calcular a confiabilidade de um produto utilizando dados de acionamento de garantia como falha em campo? Qual (quais) ferramenta(s)/método(s) os pesquisadores estão utilizando para realizar a avaliação da confiabilidade de produtos atualmente? O que vem sendo aplicado no que tange a natureza imprecisa dos dados de acionamento de garantia como dados de falha em campo na avaliação da confiabilidade? Como aplicar a FMEA e a FTA na avaliação da confiabilidade?
String de pesquisa (principal):	<i>("reliability assessment" OR "reliability") AND ("mean time between failures"; "MTBF") AND ("product") OR ("centrifugal pump?"; "hydraulic pump?"; "pump?") AND ("field failure"; "warranty") OR ("failure mode effect analysis"; "failure mode effects and criticality analysis"; "FMEA"; "FMECA"; "fault tree analysis"; "FTA").</i>
Bases de dados:	ISI Web of Science; ScienceDirect; Scopus.
CrITÉRIOS de inclusão:	- Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas. - Estudos que utilizam a confiabilidade para estudar o tempo de garantia. - Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade. - Estudos que utilizam dados de falha em campo para a avaliação da confiabilidade. - Estudos que utilizam dados de acionamento de garantia para a avaliação da confiabilidade.
CrITÉRIOS de exclusão:	Estudos duplicados; estudos fora do escopo; estudos anteriores à 2019 (últimos cinco anos)*; estudos com acesso fechado*; estudos que não forem artigos, artigos de congresso ou artigos de revisão.*
Avaliação da Qualidade:	- O artigo tem classificação A1, A2, A3, A4 ou B1 na tabela do Qualis CAPES/Scopus? (<i>Destacado como aspecto importante por Turrioni e Mello (2012)</i>). - O artigo é bem citado ("SIM" para mais do que 10 citações - "PARCIALMENTE" para menos que 10 e diferente de 0 - "NÃO" se for 0)? - A fundamentação do estudo contribui para o embasamento desta pesquisa? - O método do estudo foi bem utilizado e explicado? (opinião) - O método desse estudo é de alguma forma interessante para esta pesquisa? - O estudo trouxe alguma ferramenta ou método aplicável a esta pesquisa? - Os resultados desse estudo são relevantes para esta pesquisa?
- Pontuação para as respostas: Sim (1,0 ponto); Parcialmente (0,5 ponto); Não (0 ponto)	

*CrITÉRIOS de exclusão inicial: critérios que podem ser aplicados ainda na busca realizada nas bases de dados.

Na elaboração do Protocolo de Revisão foi utilizado o software *online* Cawemo®. O Protocolo foi modelado em notação BPMN (Modelagem e Notação de Processos de Negócio, do inglês *Business Process Model and Notation*) e está ilustrado na Figura 1. O modelo pode ser melhor visualizado no Apêndice 1 desta pesquisa, onde também consta uma legenda para leitura da simbologia utilizada no BPMN elaborada para exemplificar esta etapa. O Protocolo de Revisão consistiu em elaborar etapas lógicas baseadas nas etapas de Tranfield et al., (2003).

Figura 1- Ilustração do Protocolo de Revisão da RSL deste estudo



2.1.2.2. Estágio II: Condução da revisão

Na Condução da revisão foram realizadas as fases 3, 4, 5, 6, e 7, sendo elas, respectivamente: “Identificação dos Estudos”; “Seleção dos Estudos”; “Avaliação da Qualidade dos Estudos”; “Extração de Dados e Acompanhamento do Progresso” e “Síntese dos Dados”.

2.1.2.2.1. Identificação dos estudos

Na busca realizada nas bases de dados, os critérios “Estudos anteriores à 2019 (últimos cinco anos)”; “Estudos com acesso fechado” e “Estudos que não forem artigos, artigos de congresso ou artigos de revisão” foram adotados como critérios de exclusão inicial. Os demais critérios foram observados na primeira avaliação e serão demonstrados posteriormente, no tópico 2.1.2.2.2 desta fundamentação. A *string* de busca foi adaptada para cada base de dados, com base nas suas especificações de busca avançada; cada uma ficou da seguinte forma (Tabela 2):

Tabela 2 - *Strings* de busca para pesquisa nas bases de dados

ISI Web of Science:	TI=((("RELIABILITY ASSESSMENT")) AND ALL=((("mean time between failures" OR "MTBF") AND ("product" OR "centrifugal pump?" OR "hydraulic pump?" OR "pump?") AND ("field failure" OR "warranty") OR ("fault mode effect analysis" OR "Failure mode effects and criticality analysis" OR "FMEA" OR "FMECA" OR "fault tree analysis" OR "FTA")) and 2019 or 2020 or 2021 or 2022 or 2023 (Publication Years) and Article or Proceeding Paper (Document Types) and All Open Access (Open Access)
Science Direct:	("reliability assessment" OR "reliability") AND ("mean time between failures";"MTBF") AND ("product") OR ("centrifugal pump?";"hydraulic pump?";"pump?") AND ("field failure";"warranty") OR ("failure mode effect analysis";"failure mode effects and criticality analysis";"FMEA";"FMECA";"fault tree analysis";"FTA") Observação dos refinamentos: “Acesso aberto & Arquivo aberto”; “Anos 2019; 2020; 2021; 2022; 2023; 2024”; Tipo do artigo “Artigo de revisão”; “Artigo de pesquisa”; Área de assunto “Engenharia”.
Scopus:	TITLE ("reliability assessment" OR "reliability") AND ALL (("mean time between failures" OR "MTBF") AND ("product" OR "centrifugal pump?" OR "hydraulic pump?" OR "pump?") AND ("field failure" OR "warranty") OR ("fault mode effect analysis" OR "Failure mode effects and criticality analysis" OR "FMEA" OR "FMECA" OR "fault tree analysis" OR "FTA")) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (OA , "all"))

Na *String* da base de dados ScienceDirect ainda foi utilizado o refinamento (a exclusão) de áreas de estudo que não fossem voltados à Engenharia. Os estudos duplicados também foram descartados. Na Tabela 3 é possível visualizar o número de estudos encontrados por base de dados com a quantidade de estudos duplicados.

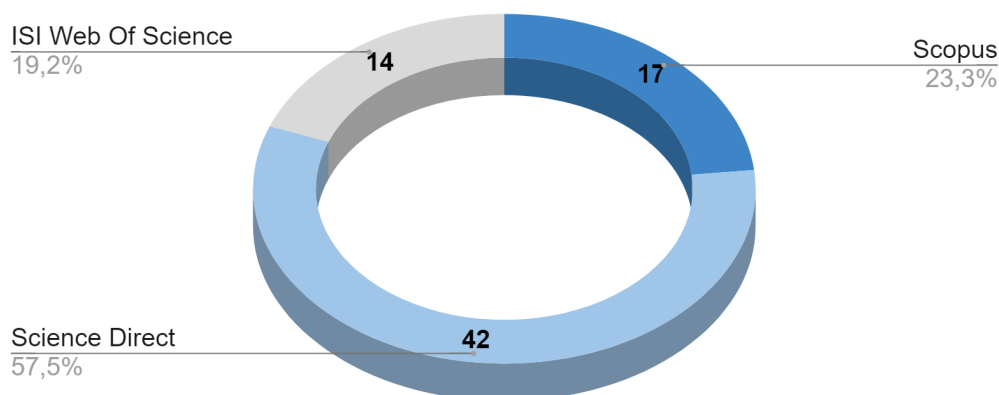
Tabela 3 - Número de estudos encontrados por base de dados

NOME DA BASE DE DADOS	NÚMERO DE ESTUDOS ENCONTRADOS
SCOPUS	18
SCIENCEDIRECT	42
ISI WEB OF SCIENCE	14
SOMATÓRIO DOS ESTUDOS DAS BASES:	74
ESTUDOS DUPLICADOS:	1*
TOTAL DE ESTUDOS RESTANTE:	73

*O estudo duplicado foi removido da base de dados Scopus.

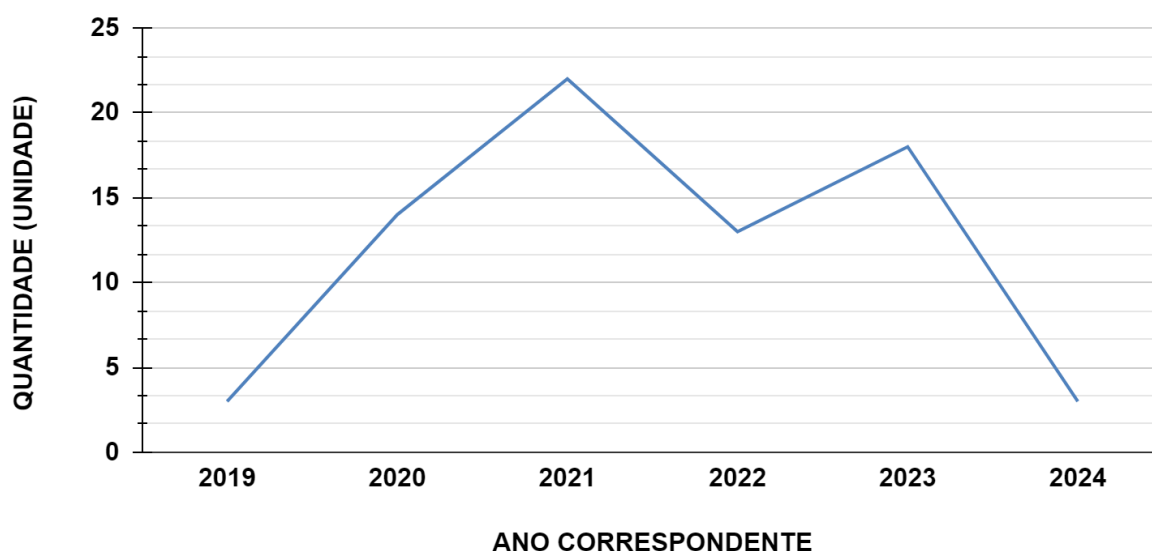
Como demonstrativo, a Figura 2 apresenta o número percentual de estudos encontrados por base de dados; sendo, 57,5% da base de dados ScienceDirect, 23,3% da base de dados Scopus e 19,2% da base de dados Web Of Science.

Figura 2 - Gráfico com total de estudos identificados



A Figura 3 exibe o panorama da quantidade de publicações identificadas por ano nesta pesquisa bibliográfica. É possível observar que o número de publicações relacionadas ao tema estava em crescimento até 2021, apresentando uma queda em 2022 e um aumento novamente em 2023. Vale ressaltar que o ano de 2024 não foi considerado, pois esta pesquisa está sendo conduzida no início deste.

Figura 3- Gráfico com panorama da quantidade de estudos identificados por ano de publicação



O Apêndice 2 desta pesquisa apresenta a lista de todos os estudos identificados, seguindo a recomendação de Tranfield et al. (2003). Cada estudo é detalhado com título, nome do primeiro autor e ano de publicação. Com o intuito de facilitar a apresentação de dados posteriores em formato de tabela, os estudos foram enumerados em ordem alfabética crescente.

Com os estudos identificados, pôde ter início a fase posterior a esta atual, denominada de “Seleção dos Estudos”.

2.1.2.2.2. *Seleção dos estudos*

A primeira análise de reprovação ou aceitação do estudo refere-se à fase “Seleção dos Estudos”. Por meio da leitura dos resumos dos estudos, considerando todos os critérios de reprovação e aceitação estabelecidos, obteve-se que 26 estudos foram rejeitados e 47 aceitos. A Tabela 4 apresenta o detalhamento do número de estudos aceitos e rejeitados por base de dados.

Tabela 4 - Número de estudos aceitos e rejeitados na Seleção de Estudos

NOME DA BASE DE DADOS	Nº DE ESTUDOS TOTAL	Nº DE ESTUDOS ACEITOS	Nº DE ESTUDOS REJEITADOS
SCOPUS	17	16	1
SCIENCE DIRECT	42	18	24
WEB OF SCIENCE	14	12	2
Total de estudos aceitos: 46			
Total de estudos rejeitados: 27			

Nesta altura da revisão sistemática, pelo Planejamento da Revisão, restou apenas a rejeição de estudos por um único critério: “Estudos fora de escopo”. Encaixaram-se neste critério àqueles que: (a) não avaliaram a confiabilidade de um produto (ou sistema); (b) envolvem modelos matemáticos muito específicos de uma área da ciência diferente da área da área deste estudo; (c) a ênfase da pesquisa desviava-se bastante do tema central, que é a confiabilidade de produtos, inclinando-se mais para áreas como manutenção centrada na confiabilidade ou confiabilidade humana específica.

Dessa forma, o Apêndice 3 apresenta os estudos listados juntamente com os motivos para aceitação e rejeição, identificados pela numeração estabelecida no Apêndice 2.

2.1.2.2.3. Avaliação da qualidade dos estudos

A avaliação da qualidade dos estudos foi realizada por meio da pontuação atribuída às questões de avaliação estabelecidas no Planejamento da Revisão. Os estudos que receberam uma pontuação inferior a 3,5 foram considerados rejeitados, e essa relação de pontuações está detalhada no Apêndice 4.

2.1.2.2.4. Extração, acompanhamento e síntese dos dados

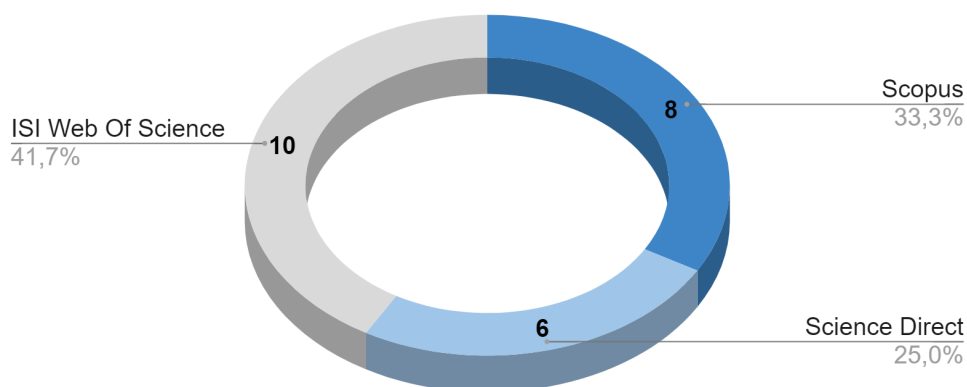
Nesta pesquisa, a extração de dados foi realizada e demonstrada durante a apresentação dos resultados de cada etapa. Como resultado, a Tabela 5 apresenta a relação final de estudos aceitos na revisão sistemática da literatura conduzida neste estudo.

Tabela 5 - Relação final de estudos aceitos

Nº	QUALIS	Nº DE CIT.	BASE DE DADOS	ANO	DOI
3	Não identificado	0	ScienceDirect	2024	10.1016/j.geits.2024.100164
6	A1	9	ISI Web of Science	2020	10.3390/jmse8020074
9	A3	2	ScienceDirect	2023	10.1016/j.oceaneng.2023.113766
11	A1	4	ISI Web of Science	2021	10.17531/ein.2021.4.1
19	A2	23	ISI Web of Science	2023	10.1080/15567036.2019.1670287
20	A4	7	ScienceDirect	2021	10.1016/j.microrel.2021.114059
22	A2	0	Scopus	2022	10.3390/en15165774
25	A2	5	ScienceDirect	2020	10.1016/j.promfg.2020.10.217
37	B1	0	Scopus	2022	10.1109/AERO53065.2022.9843234
40	A4	0	Scopus	2023	10.3390/systems11120556
42	A2	0	ScienceDirect	2023	10.1016/j.gloi.2023.11.010
43	A3	0	Scopus	2023	10.3390/electronics12244952
44	B4	1	Scopus	2021	10.1088/1742-6596/2101/1/012024
46	B4	0	Scopus	2021	10.1088/1742-6596/1874/1/012021
47	A3	2	Scopus	2021	10.3390/electronics10233006
48	A3	10	Scopus	2021	10.3390/electronics10010087
49	A3	2	ISI Web of Science	2020	10.1155/2020/2829084
50	A3	7	ScienceDirect	2021	10.1016/j.cja.2020.07.026
52	A1	0	ScienceDirect	2024	10.1016/j.jmsy.2023.11.001
53	A1	18	ISI Web of Science	2020	10.1016/j.renene.2020.02.017
56	A2	4	ISI Web of Science	2021	10.1155/2021/6530541
60	A4	2	Scopus	2022	10.3901/JME.2022.06.289
67	B4	2	Scopus	2020	10.46300/9106.2020.14.140
68	A1	11	ISI Web of Science	2021	10.1016/j.measurement.2021.109191

No total, foram aceitos 24 estudos, enquanto 49 estudos foram rejeitados. A Figura 4 fornece uma representação percentual para oferecer uma visão panorâmica da quantidade de estudos aceitos por base de dados.

Figura 4 - Percentual de estudos aceitos por base de dados



A síntese dos resultados considerou tanto o método utilizado quanto o objetivo da pesquisa. A Tabela 6 apresenta essa síntese de forma objetiva, de modo a demonstrar os resultados de uma forma sucinta.

Tabela 6 - Síntese dos resultados da revisão quanto ao método empregado

Nº	AUTOR(es)	ANO	MÉTODO	OBJETIVO
3	Gui et al.,	2022	Dinâmica de Árvore de Falhas (DFTA); rede bayesiana dinâmica (DBN); Lógica Difusa (<i>Fuzzy</i>) e o método de Monte Carlo (MC)	Avaliar a confiabilidade dinâmica do sistema digital de controle de potência de um reator nuclear em uma usina.
6	Shi et al.,	2024	Revisão da literatura	Compreender aspectos da avaliação de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança (RAMS) em sistemas energéticos de trânsito ferroviário.
9	Jeon et al.,	2020	Avaliação de Modo de Falha e Análise de Efeitos (FMEA)	Avaliar a segurança e confiabilidade do sistema de energia híbrido baseado em célula de combustível para aplicação em navios.
11	Lazarova-Molnar et al.,	2020	Análise de Árvore de Falhas Orientada por Dados (DDFTA)	Extrair e analisar árvores de falhas a partir de dados de séries temporais de um sistema.
19	Nobakhti et al.,	2021	Análise de Árvore de Falhas (FTA) e Lógica Difusa (<i>Fuzzy</i>)	Estimar a resposta de confiabilidade em função de variáveis de operação frequentes.

20	Kabir et al.,	2023	Análise de Árvore de Falhas (FTA) e redes bayesianas dinâmicas (DBN)	Avaliar a confiabilidade de sistemas
22	He et al.,	2021	Diagrama de blocos de confiabilidade (RBD)	Prever a confiabilidade de uma fonte de alimentação.
25	Abadi et al.,	2022	Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) e Análise de Criticalidade (CA); Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD)	Analisar a confiabilidade de um sistema focado principalmente em um componente, concentrando-se na identificação de falhas e na determinação dos impactos das falhas.
37	Dias et al.,	2020	Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA)	Aprimorar o desempenho de Microscópios Eletrônicos de Transmissão (TEM) utilizados em processos de detecção de amianto em um contexto empresarial.
40	Timperley et al.,	2022	Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA); Análise de Árvore de Falhas (FTA); Monte Carlo (MC)	Desenvolver uma análise de confiabilidade para aplicações em satélites.
42	Breznická et al.,	2023	Revisão da literatura	Estabelecer uma base matemática para subindicadores na análise de confiabilidade com objetivo de assegurar alta confiabilidade ao longo do ciclo de vida do produto, com ênfase na avaliação de indicadores durante o período de operação.
43	Li et al.,	2023	Análise de Árvore de Falhas (FTA); Monte Carlo (MC) e Cadeia de Markov	Analisar a confiabilidade de dispositivos de proteção cruciais para projetos de subestações.
44	Lee et al.,	2023	Análise de Árvore de Falhas (FTA)	Avaliar adequação de inversores, com foco em confiabilidade.
46	Alshaari e Nor	2021	Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA)	Avaliar a confiabilidade de bombas de água de um sistema de abastecimento em Johor, na Malásia, a partir de dados registrados de 2014 a 2018, derivados de bombas antigas e novas.
47	Kwak et al., (a)	2021	Falha por Contagem de Peças (PCA) e Análise de Árvore de Falhas (FTA)	Avaliar a Taxa de Falha e o tempo médio entre falhas (MTBF) de inversores de 3 pernas e 4 pernas.
48	Kwak et al., (b)	2021	Falha por Contagem de Peças (PCA) e Análise de Árvore de Falhas (FTA)	Avaliar a confiabilidade em conversores.
49	Dong et al.,	2023	Análise de Árvore de Falhas (FTA)	Calcular as probabilidades dos eventos básicos dos componentes, visa substantivar as alegações relacionadas à segurança do sistema analisado.
50	Gong et al.,	2020	Método GO* e o método de Análise de Árvore de Falhas (FTA)	Avaliação de confiabilidade baseado no método GO para o sistema de tração do metrô.
52	Wang et al.,	2021	Análise de Modo de Falhas, Mecanismos e efeitos (FMMEA);	Propor uma abordagem avançada que leve em conta produtos complexos e perfis de missão incertos para avaliar o Tempo Médio entre Falhas (MTBF) durante a fase de projeto.
53	Friederich e Lazarova-Molnar	2024	Revisão da literatura	Fornecer uma visão abrangente dos avanços e tendências na avaliação da confiabilidade de sistemas de manufatura, nos aspectos da análise de confiabilidade de sistemas ciberfísicos.

56	Li, et al,	2020	Análise de Árvore de Falhas Dinâmica <i>Fuzzy</i> (FDFTA)	Avaliar realisticamente a confiabilidade do sistema hidráulico, a partir de um modelo de confiabilidade baseado em compartilhamento de carga usando assinatura de sobrevivência.
60	Mohammadi et al.,	2021	Análise de Árvore de Falhas (FTA); redes bayesianas (BN); Lógica Fuzzy e cadeia de Markov	Estabelecer um nível adequado de confiabilidade e segurança nas operações de pontes rolantes.
67	Gu et al.,	2020	Processo Homogêneo de Poisson (HPP) e o processo de Poisson não homogêneo (NHPP); Modelo de Processo Estocástico	Apresentar os resultados da aplicação de diversos modelos para estimar a confiabilidade de câmaras de testes ambientais.
68	Ibrahim et al.,	2021	Análise de Árvore de Falhas (FTA) e redes bayesianas (BN)	Estimar confiabilidade atrelada à vida útil de lâmpadas de Diodo Emissor de Luz (<i>Light-Emitting Diode</i> - LED).

O método GO é eficaz na análise de confiabilidade de sistemas com múltiplos estados e séries temporais, sendo especialmente adequado para sistemas complexos eletromecânicos integrados, como sistemas de energia, abastecimento de água, transporte, manufatura e energia nuclear (Gong et al., 2020)

2.1.3. Estágio III: Elaboração do relatório e exposição das evidências

Este tópico sintetiza e discute os resultados obtidos na revisão sistemática da literatura (RSL). Conforme mencionado anteriormente, a apresentação das evidências ocorrerá após a divulgação pública desta pesquisa, que está prevista para ocorrer após a avaliação e aprovação por doutores especialistas.

2.1.3.1. Relatório da Revisão Sistemática da Literatura

Notavelmente, a aplicação da avaliação de confiabilidade abrange diversas áreas científicas. Na revisão, é evidente a utilização da análise de confiabilidade em diferentes campos, principalmente através dos métodos FMEA (Análise de Modo e Efeito de Falhas - do inglês *Failure Mode and Effects Analysis*) e suas variantes, e FTA (Análise de Árvore de Falhas - do inglês *Fault Tree Analysis*) e suas variações.

Alshaari e Nor (2021) avaliaram a confiabilidade das bombas de água de um sistema de abastecimento em Johor, na Malásia, utilizando dados registrados de 2014 a 2018, provenientes de bombas antigas e novas. Eles realizaram avaliações de confiabilidade nas bombas de água utilizando índices básicos, como o Tempo Médio entre Falhas (MTBF) —

conceito que será explicado posteriormente no tórpico 2.2.2.4.4 desta fundamentação — e sugeriram estratégias para melhorar a confiabilidade das bombas através de uma abordagem derivada da FMEA, conhecida como FMECA (Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade, do inglês *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*).

Timperley e Berthoud (2022) realizaram uma análise de confiabilidade voltada para aplicações em satélites, utilizando abordagens como FMECA e FTA. Segundo estes pesquisadores, a FTA é uma abordagem de cima para baixo que analisa as falhas de uma perspectiva sistêmica, enquanto a FMEA é uma abordagem de baixo para cima que investiga as falhas a nível de componente. Embora a FTA seja eficaz na avaliação dos efeitos combinados das falhas, pode apresentar limitações ao tentar abordar todas as possíveis causas. Por outro lado, a FMEA é eficaz em descrever a maioria das causas de falhas em um sistema, mas enfrenta dificuldades ao explorar como os efeitos podem se combinar. Isso sugere que a combinação desses métodos pode proporcionar uma identificação mais abrangente das causas de falha e sugestões para melhorias no produto estudado.

Dentro da revisão sistemática da literatura (RSL) desta pesquisa, foram identificadas três revisões que se concentravam na busca por aspectos contemporâneos da avaliação da confiabilidade, embora não exclusivamente para produtos.

Shi et al. (2024) conduziram uma revisão sistemática da literatura sobre o desenvolvimento da avaliação de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança (RAMS - do inglês *Reliability, Availability, Maintainability and Security*) em sistemas energéticos de trânsito ferroviário. No contexto apresentado, os autores ressaltam a importância de métodos como FMEA e FTA para analisar a confiabilidade dos componentes e funções principais do produto (sistema), destacando mais uma vez estes métodos.

Breznická et al. (2023) conduziram uma revisão abrangente da literatura focada na avaliação e determinação de indicadores de confiabilidade e segurança. Os autores destacam a diversidade de análises possíveis, englobando abordagens qualitativas e quantitativas, indutivas e dedutivas, determinísticas e estocásticas. As análises qualitativas investigam tipos, causas, dependências, manifestações e consequências de falhas, enquanto as quantitativas expressam numericamente o estado do produto ou sistema. Abordagens indutivas avançam de problemas específicos para questões mais gerais, enquanto as dedutivas seguem o caminho oposto. Além disso, as análises determinísticas tratam parâmetros como constantes, enquanto as estocásticas consideram distribuições de probabilidade. Todas essas características são utilizadas em combinação, oferecendo análises mais completas.

Friederich e Lazarova-Molnar (2024), como resultado de sua revisão de literatura, destacam que a integração de diversos métodos de avaliação e o uso de dados para automatizar o processo pode aumentar a precisão dos modelos de confiabilidade desenvolvidos.

Deste modo, conforme destacado por Friederich e Lazarova-Molnar (2024), a automatização do processo de avaliação é essencial, sendo também relevante a utilização de *softwares* para implementar esses métodos. Na revisão sistemática da literatura (RSL), observa-se o uso de recursos computacionais para conduzir análises estatísticas complexas de confiabilidade. Por exemplo, Dias et al. (2020) empregaram o software MINITAB® para ajustar dados coletados do desempenho de Microscópios Eletrônicos de Transmissão a distribuições estatísticas, optando pela distribuição Weibull devido ao bom ajuste obtido e à relevância na consideração do modo de falha. A sugestão de utilizar *softwares* na análise da confiabilidade pode ser um recurso valioso, especialmente como facilitador auxiliar nas análises complexas de confiabilidade.

Timperley e Berthoud (2022) realizaram uma análise de confiabilidade voltada para aplicações em satélites, utilizando abordagens como FMECA, FTA e simulação de Monte Carlo, implementadas através do *software* MATLAB®. Da mesma forma, Gui et al. (2022) também empregaram o *software* MATLAB® para implementar o método de simulação Monte Carlo (MC), com o objetivo de avaliar a confiabilidade dinâmica do sistema digital de controle de potência de um reator nuclear em uma usina.

Outros métodos comumente empregados e que puderam ser observados na RSL incluem: Lógica *Fuzzy* (Ou difusa, no português) para tratativas com dados censurados de falha; o método de simulação Monte Carlo (MC); Redes Bayesianas, tanto comuns (BN - do inglês *Bayesian Networks*) quanto dinâmicas (DBN - do inglês *Dynamic Bayesian Network*); aplicações considerando Falha por Contagem de Peças (PCA - do inglês *Parts Count Failure*); e Cadeia de Markov.

Foi observado que a utilização dos métodos FMEA e FTA é frequente como ferramentas principais para auxiliar na avaliação da confiabilidade, compreensão e prevenção de falhas, o que favorece a contextualização dos objetivos específicos desta pesquisa.

No contexto da revisão sistemática da literatura (RSL), não foram encontrados estudos que tenham proposto um processo de pesquisa semelhante ao delineado neste estudo para alcançar o objetivo geral, que é a avaliação da confiabilidade utilizando dados de garantia como dados de falha em campo. Isso pode sugerir que há uma lacuna na área da pesquisa

relacionada às aplicações e avanços tecnológicos neste tema específico, ou possivelmente dificuldades na obtenção e utilização de dados de acionamento de garantia. Ajustes na estratégia de busca, como alteração da *string* e/ou remoção do filtro de busca por documentos dos últimos cinco anos, podem ser necessários para encontrar resultados mais parecidos e relevantes para o tema central desta pesquisa onde se busca utilizar dados reais de falha coletados por meio dos registros de acionamento de garantia para avaliar a confiabilidade dos produtos.

A escassez de pesquisas atuais encontradas não diminui a relevância do tema desta pesquisa, considerando que a maior exigência dos consumidores quanto à qualidade e segurança, a rápida evolução de novos materiais e novos métodos para análise de sistemas complexos contribuem para que análises de confiabilidade tenham sejam importantes no desenvolvimento de produtos (Falcetta, 2000). Além disso, ao utilizar dados de garantia nas avaliações de confiabilidade, além de retratar bem a realidade de operação do produto em campo e a realidade percebida pelo cliente (Pasetto, 2002; Falcetta, 2000), muitas empresas/indústrias/fabricantes que anteriormente não realizavam essa análise devido a limitações operacionais ou financeiras (Dillenburg, 2005) podem passar a realizá-la.

Com a apresentação deste relatório de pesquisa, avança-se então para a revisão dos conceitos fundamentais da literatura científica relacionados à confiabilidade. O objetivo é compreender a abordagem para a avaliação da confiabilidade dos produtos em estudo, utilizando dados de falha provenientes do acionamento de garantia do produto. Os princípios essenciais extraídos da literatura sobre confiabilidade, destacados especialmente neste relatório de RSL, servirão como base para a elaboração da proposta de pesquisa que será derivada deste capítulo.

2.2. CONCEITOS BÁSICOS DA LITERATURA CIENTÍFICA

Para um completo entendimento do tema abordado nesta pesquisa, especialmente no que se refere à confiabilidade e aos dados associados ao acionamento de garantia, torna-se essencial a definição de alguns conceitos fundamentais. Esses conceitos abrangem temas como: compreensão das definições de falha e falha em campo; explicação e aspectos da teoria estatística da confiabilidade (incluindo sua relação com o conceito de qualidade) e gestão da confiabilidade; índices de confiabilidade e soluções estatísticas; métodos para auxiliar na compreensão de causa e o efeito das falhas; recursos computacionais para auxiliar na

modelagem estatística e compreensão da definição de garantia e a contextualização de sua utilização em casos de falha em campo.

2.2.1. Falhas

Conceitualmente, uma falha pode ser definida como a incapacidade de um sistema¹ de desempenhar sua função especificada sob condições operacionais normais, ou como a perda de disponibilidade de um sistema para realizar sua função requerida (Hoyland e Rausand, 1994, apud Falcetta, 2000). A função especificada ou requerida de um sistema pode ser uma única função ou a combinação de funções necessárias para fornecer um serviço específico (Falcetta, 2000).

As falhas podem ser eventos pontuais ou processos graduais que levam à degradação do desempenho, podendo estar associadas a erros de projeto, defeitos de fabricação, desgaste e envelhecimento, condições ambientais ou uso incorreto do sistema (Blashe, 1994 apud Junior, 1996; Falcetta, 2000; Altaleb e Zoltán, 2020).

Em produtos (sistemas manufaturados), por exemplo, a ocorrência de falhas implica em insatisfação nos usuários (clientes) e acarreta custos significativos para as empresas/indústrias/fabricantes. Esses custos podem ser mensuráveis, como reposição de componentes ou do produto inteiro, mão-de-obra para reparos, logística e, frequentemente, a necessidade de um departamento exclusivo para atender solicitações de substituições ou reparos de produtos em campo. No entanto, há também custos de difícil mensuração associados às falhas, como a perda de novos negócios e danos à imagem do produto e da empresa perante os consumidores (Falcetta, 2000).

Considerando esta perspectiva, a avaliação estatística de confiabilidade é fundamental para avaliar o desempenho de sistemas, além de auxiliar na redução de falhas (Jones e Hayes, 1997). Essa avaliação tem diversas finalidades e pode ser aplicada a diversos tipos de sistemas (Fogliatto e Ribeiro, 2011). Essa abordagem é vital para empresas/indústrias/fabricantes que almejam estratégias de redução de custos, aumento da satisfação dos clientes e expansão em seu mercado principal (Pasetto, 2002). Além disso, ela proporciona um entendimento mais profundo do projeto, conferindo maior segurança nas decisões que afetam a qualidade do produto (Bonetti, 2009).

¹A definição de sistema será abordada posteriormente, no tópico 2.2.2.4.1 desta fundamentação.

2.2.2. A teoria estatística da confiabilidade

A definição formal de "confiabilidade" é inversamente proporcional à de "falha", diferenciando-se ainda pela consideração do fator tempo. De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 5462 (1994), confiabilidade refere-se à capacidade de um sistema desempenhar suas funções adequadamente por um período específico e sob condições determinadas, sem falhas (ABNT NBR 5462, 1994; Elsayed, 2021; Ruifeng et al., 2024).

A Teoria Estatística da Confiabilidade, que estima a probabilidade de sistemas funcionarem sem falhas em condições específicas por um período determinado, foi impulsionada pelas indústrias aeronáutica e nuclear (Santos, 2011). Após a Primeira Guerra Mundial, a análise de confiabilidade avançou ao comparar acidentes por hora de voo em aviões com diferentes números de motores. Na década de 1970, o foco mudou para os riscos das usinas nucleares, marcando um período crucial para a confiabilidade (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

A Teoria Estatística da Confiabilidade consolidou-se em várias áreas da ciência, incluindo a Engenharia de Produção, sendo excelente ferramenta para (Santos, 2011; Fogliatto e Ribeiro, 2011):

- A. Análise de risco e segurança: Identificação das causas de falhas e mitigação dos riscos, suportando a gestão da qualidade conforme as normas ISO-9000, 9001, etc.
- B. Qualidade: Contribuição para a gestão da qualidade, dada a interligação entre qualidade e confiabilidade.
- C. Projeto de produtos: Apoio às decisões para melhorias e garantia da confiabilidade durante o projeto.

2.2.2.1. *Qualidade, segurança e confiabilidade*

Conforme destacado por Fogliatto e Ribeiro (2011), há uma distinção entre confiabilidade e qualidade. Enquanto qualidade representa uma descrição estática de um item, a confiabilidade está intrinsecamente ligada ao tempo. Nesse contexto, a confiabilidade é considerada uma componente inerente à qualidade, contribuindo significativamente para análises de risco e segurança, referindo-se sobretudo a uma qualidade que deve ser mantida e

percebida durante o período de uso para o qual o produto foi projetado (Muthy, 2007 apud Oliveira e Turrioni, 2016).

Dentre as várias definições de qualidade, uma das mais difundidas é a de que a qualidade é aquilo que é definido pelo usuário (Pasetto, 2002). Um baixo índice de confiabilidade (ou seja, um alto índice de falhas) de um sistema, além de gerar custos significativos (Souza, 1999), pode prejudicar a confiança dos clientes e a reputação da empresa (Schneider, 2001; Altaleb e Zoltán, 2020).

Os conceitos de qualidade e confiabilidade se entrelaçam, especialmente porque a qualidade está associada à capacidade de projetar sistemas com características otimizadas para atender às necessidades e desejos dos usuários, além de reduzir a variabilidade nas características de desempenho, durante a vida útil deste. Essa relação destaca a importância de considerar ambas as dimensões na busca de sistemas eficientes e satisfatórios (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Em 2015, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) incorporou diretrizes adicionais, introduzindo a aplicação da chamada "mentalidade de risco" na norma ABNT NBR ISO 9001 - Sistemas de Gestão da Qualidade (SGQ). Essa abordagem recomenda que as organizações planejem e implementem ações para lidar com riscos e oportunidades, visando prevenir efeitos negativos a respeito da qualidade. O termo "oportunidades" refere-se a situações que possam favorecer a obtenção de um resultado de qualidade desejado. Nesse contexto, a Teoria Estatística da Confiabilidade pode ser uma ferramenta valiosa para compreender oportunidades de melhoria e prevenir efeitos negativos na percepção de qualidade ocasionados pelas falhas, auxiliando na implementação e conformidade com essa diretriz da ISO 9001.

2.2.2.2. *Utilização de dados de campo na modelagem da confiabilidade*

A avaliação da confiabilidade de sistemas envolve a aquisição, exame e organização de dados específicos sobre falhas (Breznická et al., 2023), sendo considerada multidisciplinar e exigindo (Falcetta, 2000; Santos, 2008a): (a) Conhecimento detalhado dos aspectos técnicos do sistema e dos mecanismos de falha; (b) Compreensão dos conceitos matemáticos/estatísticos e métodos de análise; (c) Disponibilidade e coleta de dados reais de falha para estimar parâmetros e validar modelos; (d) Acesso a programas computacionais adequados para analisar sistemas complexos.

Considerando a disponibilidade e coleta de dados reais de falha, nos estágios iniciais do projeto do sistema, as estimativas de Tempo Até Falha² podem ser menos precisas, mas tendem a se refinar à medida que o projeto avança.

Nesses estágios iniciais, os dados reais de falha podem ser obtidos de várias maneiras (Elsayed, 1996 apud Falcetta, 2000), incluindo: testes de vida funcional (geralmente realizados em protótipos durante o desenvolvimento, sob as condições ambientais esperadas para a operação), testes de *burn-in* (onde o sistema é submetido a condições rigorosas de operação por um curto período), e testes acelerados (que simulam o ciclo de vida previsto para o sistema em um tempo reduzido).

Após o início da operação real do sistema, as previsões de confiabilidade podem ser ajustadas com base nos dados provenientes da utilização em campo, resultando em estimativas mais parecidas com a realidade (Pasetto, 2002). Isso ocorre porque tais dados consideram a operação real do sistema em condições normais, sob a influência de diversas variáveis aleatórias, livres das limitações das variáveis controladas em laboratório (Oliveira e Turrioni, 2016; Oh e Bai, 2001; Karim e Suzuki, 2007 apud Limon e Yadav, 2017).

As falhas em campo são cruciais para compreender o desempenho do sistema, ajudando a capturar o comportamento de uso do produto combinado com as exposições ambientais que um produto passou durante seu uso real que são difíceis de simular em laboratório (Alam e Suzuki, 2009; Rai e Singh, 2003).

Adotado como método de suporte para a melhoria contínua, o tema de confiabilidade e falhas de campo proporciona à empresa/fabricante a previsão de falhas futuras, a identificação da necessidade de melhorias e o monitoramento do efeito externo e condições de uso sobre a confiabilidade (Junior, 1996; Dillenburg, 2005; Souza, 1999).

2.2.2.3. *Gestão da confiabilidade*

Antes de ser vista como uma medida de comparação, a confiabilidade deve ser interpretada como uma oportunidade de melhoria e gerenciada (Santos, 2008a; Fogliatto e Ribeiro, 2011).

A gestão da confiabilidade visa monitorar o desempenho do sistema em relação às falhas por meio de uma eficiente coleta e análise de dados, construindo um ciclo sólido de

² A definição do conceito será abordada posteriormente, no tópico 2.2.2.4.3 desta fundamentação.

melhoria contínua da confiabilidade. Suas atribuições podem ser aplicadas em diferentes fases de um sistema (Fogliatto e Ribeiro, 2011) e incluem investigar fatores que afetam a confiabilidade, qualificar esses fatores, aplicar teorias de confiabilidade, determinar metodologias e avaliar testes, além de gerenciar os dados de falha. A eficiência na coleta e organização desses dados impacta substancialmente o conhecimento real dos resultados de confiabilidade gerados (Falcetta, 2000).

No contexto já apresentado, que ressalta a confiabilidade como um componente inerente à qualidade, é essencial que o programa de gestão da qualidade incorpore também um programa de gestão da confiabilidade. A implementação de um programa de confiabilidade permitirá estabelecer responsabilidades, estrutura organizacional, procedimentos e uma cultura voltada à confiabilidade (Dillenburg, 2005).

2.2.2.4. *A probabilidade na confiabilidade*

Conforme mencionado, a confiabilidade é entendida como uma probabilidade e, por isso, exige quantificação por meio da análise estatística dos dados de falhas (O'Connor, 1991, apud Souza, 1999; Santos, 2011). A seguir, serão abordados alguns conceitos essenciais para o entendimento dos principais índices probabilísticos de confiabilidade.

Neste tópico, para facilitar o entendimento teórico das análises metodológicas, serão apresentadas as definições de sistemas (reparáveis e não reparáveis) arranjo e distribuições de dados; índices de confiabilidade ou distribuições estatísticas de tempo de vida [Tempo Até Falha; Função Densidade de Probabilidade; Função de Distribuição Acumulada; Tempo Médio Entre Falhas (MTBF - do inglês *Mean Time Between Failures*); Tempo Médio Até a Falha (MTTF - do inglês *Mean Time to Failure*); Taxa de Falha (ou Função de Risco) e Função de Confiabilidade/Sobrevivência]. Além disso, serão discutidas a modelagem através de distribuições estatísticas paramétricas e não-paramétricas, a estimação de parâmetros, os testes de aderência (ou qualidade de ajuste) e os conceitos básicos sobre censura de dados.

2.2.2.4.1. *Sistemas em série e em paralelo*

A avaliação da confiabilidade tem diversas finalidades e pode ser aplicada a diversos tipos de sistemas, sejam eles processos, operações, produtos, equipamentos, manutenção

preditiva de equipamentos e melhoria de unidades fabris (Fogliatto e Ribeiro, 2011). Antes de iniciar a avaliação deve-se entender sobre o tipo de sistema avaliado.

Um sistema é caracterizado como um conjunto de componentes logicamente relacionados por interdependência entre suas partes, visando desempenhar uma função específica. Ou seja, um sistema é composto de subsistemas ou componentes organizados de forma a desempenhar sua função de projeto, com índices aceitáveis de desempenho e confiabilidade (Fogliatto e Ribeiro, 2011; Elsayed, 2021). Como visto, a função especificada ou requerida de um sistema pode ser uma única função ou a combinação de funções dos componentes, necessárias para fornecer um serviço específico (Falcetta, 2000).

A importância da confiabilidade se manifesta na garantia da operação eficaz e consistente de todos os componentes do sistema e do próprio sistema como um todo. A implementação de avaliações de confiabilidade eficazes é crucial para alcançar o desempenho ótimo do sistema, conforme destacado por Ruifeng et al. (2024). Além disso, tais avaliações desempenham um papel essencial no suporte à tomada de decisões para a melhoria contínua, assegurando segurança, economia e eficiência nos sistemas avaliados, como ressaltado por Altaleb e Zoltán (2020).

A avaliação da confiabilidade de um sistema pode ocorrer de duas formas distintas: de maneira genérica, utilizando dados de falha do sistema como um todo, ou de maneira específica, considerando dados de falha dos componentes individuais (Schneider, 2001).

Na área da confiabilidade, os sistemas podem ser classificados de acordo com a estrutura (em série, em paralelo ou mistos) e quanto à possibilidade de reparo (Elsayed, 2021).

Nos sistemas em paralelo, os componentes funcionam independentemente, e o sistema opera enquanto pelo menos um componente está operacional. Já nos sistemas em série, os componentes estão em sequência, e o sistema opera apenas se todos os componentes estiverem operacionais. Os sistemas mistos são uma união das configurações em série e em paralelo (Elsayed, 2021; Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Em relação ao reparo, os sistemas não-reparáveis são aqueles difíceis de reparar (“descartáveis/substituíveis”) ou com longos tempos de inatividade. Os sistemas reparáveis, por sua vez, são caracterizados por serem facilmente recuperados, com tempos mínimos de inatividade; esses sistemas estão sujeitos a ações de manutenção corretiva, cujas determinações são conduzidas por meio dos processos estocásticos que compõem a teoria da renovação; esses conceitos específicos não serão abordados neste estudo, uma vez que o foco

não inclui aprofundamento em tempos de reparo ou o acompanhamento de um único produto ao longo do tempo.

Para esta pesquisa, destaca-se o sistema reparável na configuração em série. Nessa configuração, o sucesso da função do sistema está diretamente condicionado à operação normal dos componentes (Dhillon, 2006 apud Cavalcante, 2015; Elsayed, 2021; Fogliatto e Ribeiro, 2011). Assim, a confiabilidade do sistema reparável e em série pode ser expressa conforme mencionado por Fogliatto e Ribeiro (2011) (Equação 1):

Equação (1)

$$R_s = P(x_1 \cap x_2 \cap \dots \cap x_n)$$

Onde

“ R_s ” é a confiabilidade do sistema em série;

$x_1, x_2 \dots x_n$ são as confiabilidades individuais dos componentes do sistema em série.

Existe uma relação de dependência do desempenho do equipamento em relação à confiabilidade de cada componente, denominada de lei da probabilidade ou regra do produto em confiabilidade, para produtos com componentes em série, estabelece que a confiabilidade de um sistema em série é o produto das confiabilidades de suas partes componentes (Fogliatto e Ribeiro, 2011). Apenas para exemplificação supondo componentes de um sistema em série e com modos de falha independentes entre si (ou seja, a falha de um componente não afeta a probabilidade de falha dos demais - situações práticas, em que o efeito da falha de um componente sobre os demais é desprezível, não considerando a realidade de dependências entre componentes), obtemos a expressão usual para a confiabilidade de um sistema em série, conforme descrito por Fogliatto e Ribeiro (2011) (Equação 2):

Equação (2)

$$R_s = P(x_1) * \dots P(x_n) = \prod_{i=1}^n R_i$$

Onde,

R_s é a confiabilidade do sistema em série;

$P(x_1) * \dots P(x_n)$ são as probabilidades de não falha dos componentes individuais;

$\prod_{i=1}^n R_i$ representa o produto das confiabilidades individuais dos componentes em série.

A aplicação prática da regra do produto em confiabilidade, conduz a um cenário no qual a confiabilidade do sistema decresce rapidamente à medida que o número de componentes aumenta. O limite superior na confiabilidade do sistema é dado pelo componente menos confiável do conjunto em série. A Equação 3 destaca que a confiabilidade global do sistema em série é limitada pela confiabilidade do componente menos confiável presente no arranjo, isto é (Fogliatto e Ribeiro, 2011):

Equação (3)

$$R_s \leq \min\{R_i\}$$

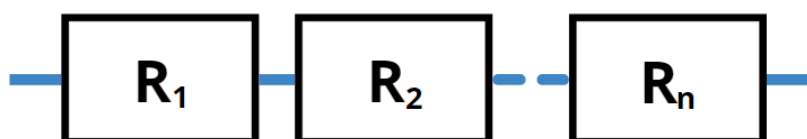
Onde,

R_s é a confiabilidade do sistema em série;

$\min\{R_i\}$ representa o mínimo das confiabilidades individuais dos componentes.

Para representar estruturalmente um sistema em série, o método mais difundido é o uso do diagrama de blocos de confiabilidade. Esse diagrama oferece uma representação gráfica da interconexão dos componentes do sistema, sendo útil na avaliação, especialmente quando se utiliza o método de cálculo de confiabilidade por componentes e na combinação dessas confiabilidades para avaliar o sistema como um todo; para isso, é essencial ter dados de falha disponíveis para cada componente (Elsayed, 2021; Fogliatto e Ribeiro, 2011); a maioria das empresas/indústrias/fabricantes não dispõe desse tipo de informação (Falcetta, 2000). A Figura 5 apresenta um esquema representativo de um diagrama de blocos de uma associação em série, onde a falha de um componente resulta na falha de todo o sistema, ou aumenta significativamente a probabilidade de falha do sistema como um todo.

Figura 5 - Representação estrutural do sistema em série



2.2.2.4.2. Arranjo dos dados

Após entender o tipo de sistema de trabalho e o método de avaliação com base nos dados disponíveis (global ou por componente), além de definir o(s) critério(s) de falha(s), é crucial coletar dados sobre o Tempo Até a Falha³ ou o Tempo Entre Falhas⁴ para realizar a avaliação da confiabilidade. Esses dados podem ser completos, incluindo todas as observações de uma população inteira, ou amostrais, que representam apenas uma parte das observações possíveis da população (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Então, esses dados devem ser organizados. É conhecido que um arranjo de dados se refere à disposição dos dados coletados em uma pesquisa, experimento ou estudo que visa analisar dados estatísticos. Geralmente, os dados são organizados em uma tabela (ou matriz), onde cada linha representa uma observação ou caso individual, e cada coluna representa uma variável específica ou característica medida referente a esta (Montgomery e Runger, 2012).

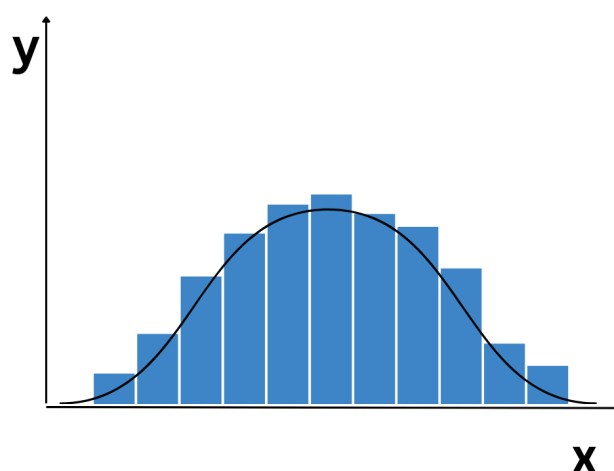
Estatisticamente, um conjunto de dados proveniente de um determinado fenômeno possui características (parâmetros) como forma (simetria da distribuição), localização (centralidade, média e mediana) e escala (dispersão, frequência e densidade dos dados). Esses parâmetros formam uma distribuição de dados, que se refere à maneira como os valores de um conjunto de dados estão organizados e espalhados ao longo de uma escala. A distribuição descreve a regularidade com que diferentes valores ou intervalos de valores ocorrem em um conjunto de dados (Montgomery e Runger, 2012).

Graficamente, uma distribuição pode ser representada de várias maneiras, incluindo o histograma, que é um tipo de gráfico de barras. Os histogramas são úteis para visualizar a forma, a dispersão e a centralidade dos dados, permitindo uma análise rápida de sua distribuição (Montgomery e Runger, 2012). O eixo X (horizontal) representa os intervalos de valores dos dados numéricos e o eixo Y (vertical) representa a frequência ou a contagem de observações dentro desses intervalos numéricos. A Figura 6, representa uma situação hipotética de uma distribuição de dados representada em um histograma.

³ O conceito será explicado posteriormente, no tópico 2.2.2.4.3 desta fundamentação.

⁴ O conceito será explicado posteriormente, no tópico 2.2.2.4.4 desta fundamentação.

Figura 6 - Histograma hipotético



Existem vários modelos de distribuições de probabilidade bem conhecidos, nos quais a maioria dos dados segue parâmetros específicos. Ao buscar a semelhança de um conjunto de dados com um modelo de distribuição de probabilidade conhecido, é possível realizar análises estatísticas mais precisas e isso será abordado posteriormente, a partir do tópico 2.2.2.4.8.1 desta fundamentação e seus subtópicos. Essa semelhança é determinada pela estimação dos parâmetros de forma, localização e escala (Montgomery e Runger, 2012). Alguns modelos de distribuição serão abordados posteriormente, a partir do tópico 2.2.2.4.8.1, juntamente com uma breve explicação sobre a estimação de parâmetros.

Um método amplamente utilizado, que possibilita uma análise gráfica da semelhança dos parâmetros de um conjunto de dados com distribuições hipotetizadas, é conhecido como Papel de Probabilidade. Este procedimento transforma a Função Acumulada da Distribuição⁵ em um gráfico linear e é utilizado em avaliações de teste de ajuste de bondade⁶ (Falcetta, 2000). Embora não seja detalhada essa transformação nesta dissertação, o entendimento visual deste método permite compreender a saída de dados de *softwares* atuais utilizados na avaliação da confiabilidade.

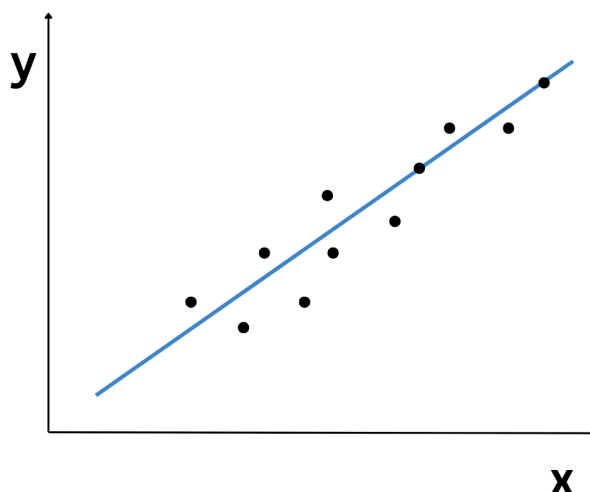
Visualmente, o Papel de Probabilidade converte a distribuição parabólica em uma forma linear (reta), permitindo verificar a semelhança no comportamento dos dados, além de possibilitar uma observação facilitada de *outliers* (valor atípico ou resultado que foge da média) e eliminá-los, uma vez que devem ser removidos (Limon e Yadav, 2017; Falcetta, 2000; Freitas e Colosimo, 1997, apud Guimarães, 2002). Quanto mais próximos os dados

⁵ A definição deste conceito será abordada no tópico 2.2.2.4.3 desta fundamentação.

⁶ A definição deste conceito será abordada no tópico 2.2.2.4.8.1.5 desta fundamentação.

transformados estiverem da distribuição linear, melhor será o seu ajuste à distribuição hipotetizada. Os Papéis de Probabilidade variam conforme a distribuição utilizada, e a implementação manual pode ser trabalhosa (Fogliatto e Ribeiro, 2011). A Figura 7 ilustra um exemplo visual de um gráfico de papel de probabilidade.

Figura 7 - Ilustração do Papel de Probabilidade



2.2.2.4.3. *Tempo Até Falha*

O Tempo Até Falha (TTF) é um índice calculado na avaliação da confiabilidade e entende-se como o intervalo transcorrido desde o momento em que um sistema é colocado em operação até a sua primeira falha, onde $t = 0$ representa o início da operação do sistema. Ou seja, esses são os chamados ‘dados de falha’, sendo a diferença entre as datas de início e falha de operação do sistema, calculada em função do tempo (milésimos de segundos, segundos, minutos, horas, dias ou anos) (Fogliatto e Ribeiro, 2011; Falcetta, 2000; Guimarães, 2002; Elsayed, 2021). O TTF é expresso como uma variável aleatória, que representa o tempo até a ocorrência da falha.

A partir de um conjunto de dados de TTF de um sistema coletados e organizados é possível, por meio da Função Densidade de Probabilidade de Falha (FDP), representada por $f(t)$, estimar a probabilidade de falha deste sistema em um intervalo de tempo qualquer especificado (T). A definição de uma FDP pode ser expressa através da seguinte relação (Santos, 2011; Schneider, 2001) (Equação 4):

Equação (4)

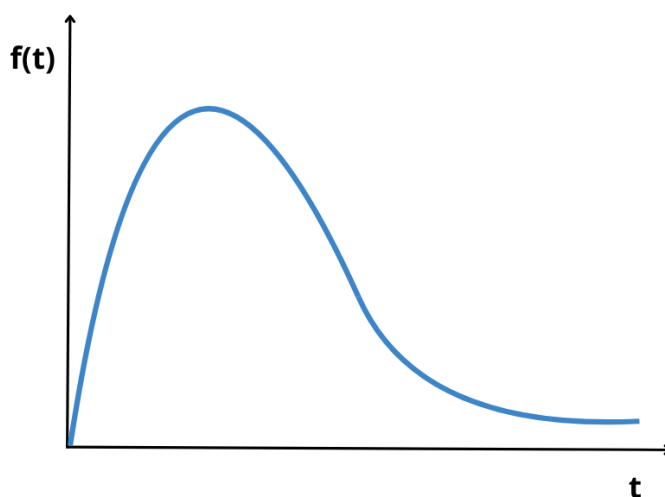
$$f(t) = P \{ t < T < \Delta t + t \}$$

Onde,

$f(t)$ é uma medida da probabilidade de que uma falha ocorra dentro de um intervalo de tempo específico a partir do tempo t ; e a notação $P\{t < T < t + \Delta t\}$ indica a probabilidade de que o tempo especificado (T) esteja entre um tempo inicial e um tempo final t e $t + \Delta t$.

A Figura 8 é uma representação do comportamento hipotético característico de uma Função Densidade de Probabilidade; no entanto, este comportamento varia de acordo com os parâmetros da distribuição dos dados de TTF (Escobar e Meeker, 1998; Fogliatto e Ribeiro, 2011; Elsayed, 2021).

Figura 8 - Representação ilustrativa da Função Densidade de Probabilidade (FDP)



A Função Densidade de Probabilidade é interpretada como a frequência relativa da ocorrência de falha por unidade de tempo, descrevendo a distribuição do tempo de falha. Sendo a probabilidade de um evento variando de 0 a 1, a FDP deve sempre ser positiva ou zero.

A partir da FDP, pode-se definir a Função de Probabilidade Acumulada ou Função de Distribuição Acumulada (FDA), representada por $F(t)$, assumindo diferentes formas de acordo com o perfil da variável aleatória (Cavalcante, 2015).

Escrevendo a equação FDP relacionando-a a FDA, temos que (Mood et al., 1974 apud Falcetta, 2000; Guimarães, 2002; Elsayed, 2021) (Equação 5):

Equação (5)

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t}$$

Onde,

$f(t)$ é uma medida da probabilidade de que uma falha ocorra dentro de um intervalo de tempo específico Δt a partir do tempo t ; e $F(t + \Delta t) - F(t)$ é a relação FDA que é o mesmo que a notação $P\{t < T < t + \Delta t\}$ e indica a probabilidade de que o tempo até a falha (T) esteja entre t e $t + \Delta t$.

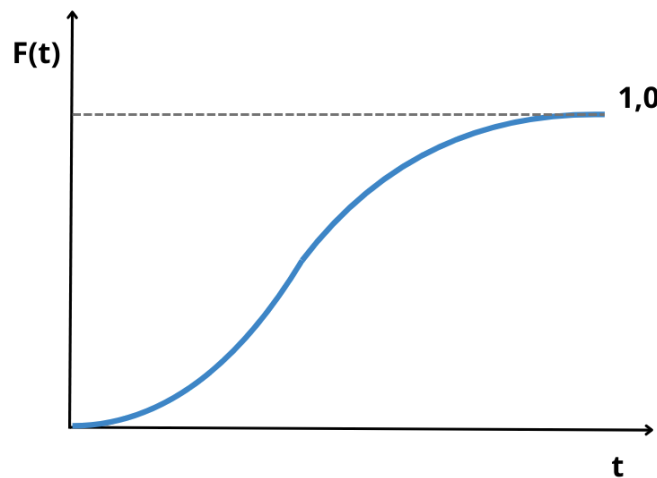
Sendo $F(t)$ a Função de Distribuição Acumulada, tem-se que (Cavalcante, 2015; Santos, 2011) (Equação 6):

Equação (6)

$$F(t) = P\{T < t\} = \int_0^t f(u)du$$

A Equação (6) expressa que $F(t)$ é a probabilidade de que o TTF seja menor que t . Em outras palavras, $F(t)$ fornece a probabilidade acumulada de que uma falha ocorra antes do tempo t . Esta função é crescente com o tempo, atingindo um valor unitário quando t tende ao infinito (Santos, 2011). A Figura 9 expressa uma característica comportamental de uma Função de Distribuição Acumulada, no entanto esta pode assumir diferentes formas de acordo com o perfil da variável aleatória contínua (Cavalcante, 2015; Escobar e Meeker, 1998; Fogliatto e Ribeiro, 2011; Elsayed, 2021).

Figura 9 - Representação ilustrativa da Função de Distribuição Acumulada



2.2.2.4.4. *MTTF e MTBF*

O valor médio de uma distribuição estatística, representado por (μ), desempenha um papel crucial como parâmetro. Quando se trata de uma FDP, o cálculo do valor médio é realizado pela seguinte expressão (Santos, 2011) (Equação 7):

Equação (7)

$$\mu = \int_0^{\infty} x t f(x) dt$$

Onde, μ é dado pela integral definida da multiplicação de (x) pela função densidade de probabilidade $f(x)$ em relação a (t), variando de 0 até ∞ .

O resultado dessa integral fornece o valor médio da distribuição, indicando o ponto central em torno do qual os valores da variável aleatória se distribuem.

Especialmente para a avaliação da confiabilidade o (μ) é representado pelos índices “Tempo Médio Até a Falha” (MTTF, do inglês *Mean Time To Failure*) ou “Tempo Médio Entre Falhas” (MTBF, do inglês *Mean Time Between Failures*) (Equação 8):

Equação (8)

$$\text{MTTF ou MTBF} = \mu = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

A integral $\left(\int_0^{\infty} t f(t) dt \right)$ é uma média ponderada do tempo até a falha, onde cada valor de t multiplicado por $f(t)$ contribui para a média de acordo com a probabilidade associada $f(t)$; sendo assim, o modo de cálculo do MTBF e do MTTF varia de acordo com o tipo de distribuição dos dados e com os parâmetros estimados⁷, diferindo do MTT calculado instantaneamente com os dados de Tempo Até Falha (Fogliatto e Ribeiro, 2011). O intervalo de integração (0; ∞) indica que se integra a função densidade de probabilidade $f(t)$ em relação ao tempo (t), de (0) até o infinito, ou seja, considerando todos os possíveis tempos até a falha.

Quanto menor o MTTF ou o MTBF, menor é a confiabilidade do produto e, conseqüentemente, maior é a probabilidade de ocorrência de falhas (Pasetto, 2002).

O MTTF representa o tempo médio até a ocorrência da falha em um sistema não-reparável ou até a primeira falha em um sistema reparável (Souza, 1999; Elsayed, 2021). Por outro lado, o MTBF representa o tempo médio decorrido entre sucessivas falhas de um

⁷ A definição será explicada posteriormente, no tópico 2.2.2.4.8.1.4 desta fundamentação.

sistema reparável (Souza, 1999; Elsayed, 2021), ou seja, é o intervalo temporal médio que separa instâncias consecutivas de falhas do produto (Ruifeng et al., 2024).

A diferença entre esses dois índices é teórica e é crucial utilizá-los corretamente conforme o contexto da metodologia de avaliação da confiabilidade. Geralmente, o MTBF é aplicado para sistemas reparáveis; enquanto o MTTF é aplicado para sistemas não-reparáveis (Falcetta, 2000). No entanto, há casos onde o MTTF pode ser calculado até mesmo para sistemas reparáveis (Dillenburg, 2005), o que será abordado posteriormente, no tópico 2.2.2.7.1 desta fundamentação.

De maneira exemplar, supondo que n sistemas idênticos não-reparáveis são observados até a ocorrência de falhas nos tempos $t_1, t_2, \dots, t_n$, ou que n sistemas idênticos reparáveis possuem seus intervalos entre falhas observados; a média dos tempos até falha, MTTF, ou a média dos tempos entre falhas, MTBF, será estimada como (Elsayed, 1996 apud Falcetta, 2000) (Equação 9):

Equação (9)

$$\text{MTTF ou MTBF} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

Onde,

MTTF representa o Tempo Médio Até a Falha;

t representa a variável de tempo decorrido até a ocorrência da falha;

$f(t)$ é a Função Densidade de Probabilidade (FDP).

Em outras palavras, a soma total do tempo de vida de uma população (tempo operacional acumulado do sistema em um período definido), dividida pelo número total de falhas ocorridas durante o período medido (Souza, 1999; Altaleb e Zoltán, 2020).

2.2.2.4.5. Taxa de Falha ($h(t)$)

A Função de Risco ($h(t)$) pode ser considerada a medida de confiabilidade mais difundida na prática. Tal função pode ser interpretada como a quantidade de risco associada a uma unidade no tempo t . A Função de Risco é também conhecida como Taxa de Falha (termo adotado nesta pesquisa) ou taxa de risco (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Este conceito encapsula a densidade de probabilidade condicional que descreve o desempenho de um sistema, que permanece sem falhas até um ponto específico no tempo ' t ',

após o qual a probabilidade de falha aumenta (Altaleb e Zoltán, 2020; Santos, 2011). Uma Taxa de Falha mais baixa indica que a probabilidade de um componente sofrer uma falha dentro de um intervalo de tempo específico é menor.

A Taxa de Falha segue como sendo a probabilidade de que o sistema falhará em um determinado tempo $T < t + \Delta t$, dado que ainda não falhou até o tempo $T = t$. Essa probabilidade condicional é expressa da seguinte forma (Santos, 2011) (Equação 10):

Equação (10)

$$h(t) = P(T < t + \Delta t | T > t)$$

Onde,

Δt é o intervalo de tempo $(t - 1, t)$;

$h(t)$ é a Taxa de Falha;

Com base na definição de probabilidade condicional tem-se que (Santos, 2011) (Equação 11):

Equação (11)

$$P(T < t + \Delta t | T > t) = \frac{P\{(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\}}{P(T > t)}$$

A Taxa de Falha também pode ser definida em termos da própria confiabilidade e segue como sendo a probabilidade de que o sistema falhará em um determinado tempo $T < t + \Delta t$, dado que ainda não falhou até o tempo $T = t$. O numerador desta equação é a própria função densidade de probabilidade e o denominador é a função de confiabilidade. A Taxa de Falha Instantânea é expressa pela seguinte relação (Santos, 2011) (Equação 12):

Equação (12)

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} = \frac{-R'(t)}{R(t)} = f(t) / R(t)$$

Onde,

Δt é o intervalo de tempo $(t - 1, t)$.

$f(t)$ a Função Densidade de Probabilidade de falha;

$R(t)$ a Função de Confiabilidade.

A Taxa de Falhas ainda pode ser expressa como (Elsayed, 1996 apud Falcetta, 2000) (Equação 13):

Equação (13)

$$h(t) = \frac{n_f(\Delta t)}{n_s(t-1)\Delta t}$$

Onde,

$n_f(\Delta t)$ é o número de falhas no intervalo Δt ;

$n_s(t - 1)$ é o número de sobreviventes no início do intervalo t ;

Δt é o intervalo de tempo $(t - 1, t)$.

2.2.2.4.6. A Taxa de Falha e a Curva de banheira

A Taxa de Falha pode ser classificada em três categorias fundamentais (Fogliatto e Ribeiro (2011): (i) Função de Risco Crescente (FRC) (nessa classificação, a incidência de risco aumenta com o tempo); (ii) Função de Risco Decrescente (FRD) (onde a incidência de risco diminui à medida que o tempo avança); e (iii) Função de Risco Constante ou Estacionária (FRE) (nesta classificação, a unidade está exposta a uma quantidade constante de risco em qualquer momento do tempo).

Sistemas manufaturados geralmente exibem uma Taxa de Falha que combina sucessivamente as três classificações mencionadas, formando o que é conhecido como a “Curva da banheira”. A curva reflete a variação da Taxa de Falha ao longo do ciclo de vida do sistema. Cada região da curva tem características específicas:

- A. Região 1 (Falha Precoce ou mortalidade infantil) (FRD): Nesta região, a Taxa de Falha decresce inicialmente, indicando falhas precoces associadas a problemas no processo de fabricação. Normalmente, a distribuição que melhor modela as falhas nesta região é a Weibull. (Santos, 2011; Souza, 1999; Cavalcante, 2015; Fogliatto e Ribeiro, 2011). Nos sistemas manufaturados, as falhas iniciais são diretamente responsáveis por custos significativos. Esses custos podem incluir problemas relacionados à garantia excessiva, impactando negativamente a situação financeira da empresa/fabricante (Hegde, 2023; Santos, 2011; Souza, 1999).

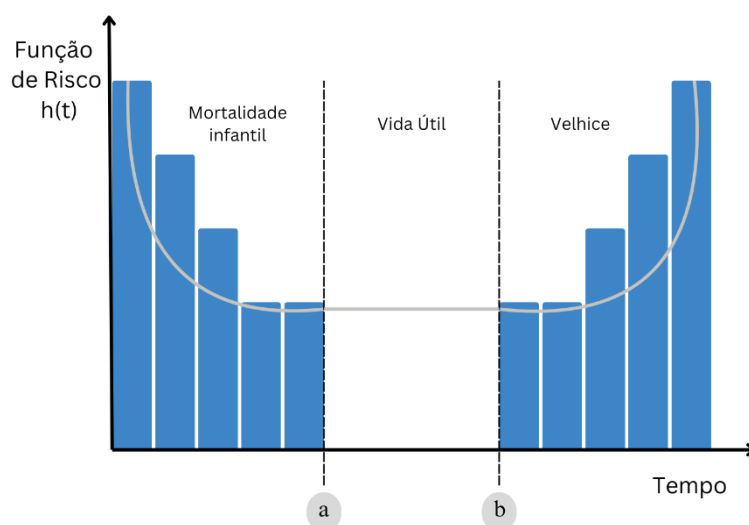
2. Região 2 (Falhas Aleatórias) (FRE): Esta é a região intermediária da curva, onde as Taxas de Falha são menores, especialmente durante o período de operação do sistema. As falhas nesta fase são consideradas aleatórias, originadas de defeitos do produto ou solicitações inesperadas do sistema. A distribuição exponencial é frequentemente usada para representar falhas aleatórias (Santos, 2011; Souza, 1999; Cavalcante, 2015; Fogliatto e Ribeiro, 2011).

3. Região 3 (Envelhecimento) (FRC): Na Região 3, a Taxa de Falhas é crescente devido ao desgaste do equipamento, conhecido como envelhecimento. As falhas nesta fase tendem a ser de natureza cumulativa, como desgaste por atrito ou trincas por fadiga. As distribuições que melhor modelam os dados nesta fase incluem a Weibull e a Lognormal (Santos, 2011; Souza, 1999; Cavalcante, 2015; Fogliatto e Ribeiro, 2011).

As falhas iniciais estão muitas vezes relacionadas a problemas de fabricação, montagem ou materiais de baixa qualidade, enquanto as falhas na Região 3 estão associadas ao desgaste e envelhecimento do componente (Santos, 2011; Souza, 1999; Hegde, 2023). Em sistemas mecânicos, por exemplo, é comum observar preferencialmente as Taxas de Falha de Regiões 1 e 3.

A Figura 10 demonstra uma ilustração da “Curva de banheira”.

Figura 10 - Ilustração da "Curva de banheira"



Fonte: Adaptado de Hoyland e Rausand (1994 apud Falcetta, 2000)

2.2.2.4.7. Função de Confiabilidade/Sobrevivência ($R(t)$)

A Função de Confiabilidade, também conhecida como Função de Sobrevivência, descreve a probabilidade de sobrevivência do item ao longo do tempo (Leemis, 1995 apud Cavalcante, 2015; Fogliatto e Ribeiro, 2011; Elsayed, 2021). Em outras palavras, confiabilidade é usada para medir o sucesso operacional do sistema (Elsayed, 1992 apud Bonetti, 2009). A confiabilidade ($R(t)$) pode ser expressa pela seguinte relação (Santos, 2011) (Equação 14):

Equação (14)

$$R(t) = P \{ T > t \}; \text{ onde } t \geq 0$$

Onde,

$R(t)$ é a probabilidade de que um sistema ou item ainda esteja operacional após um período de tempo t ;

A notação $T > t$ significa que a vida útil do item é maior do que t , ou seja, o item não falhou até o momento t .

Considerando uma situação onde ao final de um tempo t temos: (i) n_0 = número total de componentes testados; (ii) $n_j(t)$ = número de componentes que falharam durante o teste no período t ; (iii) $n_s(t)$ = número de componentes que não falharam durante o teste no período t sendo que $n_0 = n_j(t) + n_s(t)$; a função confiabilidade $R(t)$ é definida como a função acumulada de sucesso no tempo t (Elsayed, 1996 apud Falcetta, 2000) da seguinte forma (Equação 15):

Equação (15)

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_j(t)} = \frac{n_s(t)}{n_0}$$

Um fato importante a ser ressaltado é a relação de complemento existente entre a FDA e a Função de Confiabilidade $R(t)$. Se a função de distribuição acumulada $F(t)$ for conhecida, podemos calcular a Função de Confiabilidade $R(t)$ usando a seguinte relação (Cavalcante, 2015) (Equação 16):

Equação (16)

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

Onde,

$R(t)$ é a Função de Confiabilidade, que representa a probabilidade de um sistema ou componente não falhar até o tempo t ;

$F(t)$ é a Função de Distribuição Acumulada, que representa a probabilidade de um sistema ou componentes falhar até o tempo t ;

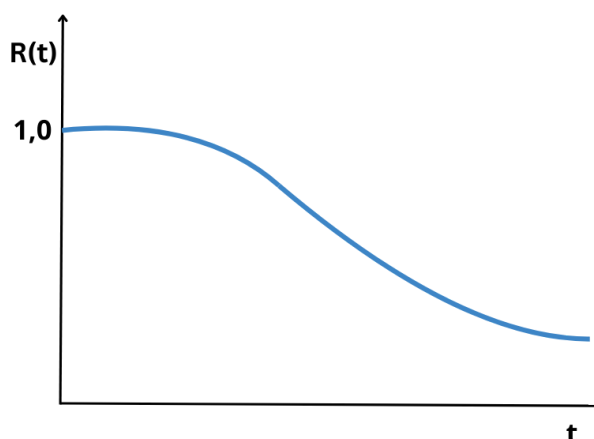
$f(t)$ é a Função Densidade de Probabilidade, que representa a densidade de probabilidade de a falha ocorrer no tempo t .

O intervalo de integração $\int_t^{+\infty} f(t)dt$ indica que estamos integrando $f(t)$ a partir do

tempo t até o infinito. Isso representa a probabilidade acumulada de o sistema falhar em algum momento após o tempo t . Ou seja, a probabilidade de sobrevivência do sistema além do tempo t .

Segundo Shingley (2001, apud Bonetti, 2009), a confiabilidade de um sistema “R” pode ser expressa em um valor numérico $0 < R < 1$. Quanto mais próxima a função de confiabilidade estiver de 1, maior é a confiabilidade do item. Se um produto possui confiabilidade de 0,90 em um determinado momento, indica que o mesmo possui 90% de chances de durar além deste tempo. A configuração gráfica da Função de Confiabilidade/Sobrevivência pode ser vista na Figura 11 e é conhecida como Curva de Sobrevivência.

Figura 11 - Representação ilustrativa da Curva de Sobrevivência



Em decorrência da definição de Função de Distribuição Acumulada, tem-se que (Santos, 2011) (Equação 17):

Equação (17)

$$R(t = 0) = 1 \text{ e } R(t = \infty) = 0$$

Essa relação implica que, no início da operação ($t = 0$), a confiabilidade é máxima, indicando que o item está em perfeito estado. Por outro lado, à medida que o tempo de operação aumenta infinitamente ($t = \infty$), a confiabilidade tende a zero.

Esta dinâmica pode ser observada na Figura 11, onde a confiabilidade diminui ao longo do tempo de operação. À medida que o sistema opera por mais tempo, a probabilidade de ocorrência de falhas acumula, impactando diretamente a confiabilidade do sistema (Santos, 2011). Essa interpretação é crucial para compreender a evolução da confiabilidade ao longo do tempo e é fundamental para a gestão eficaz de sistemas.

2.2.2.4.8. *Modelagem de dados para resultados matemáticos*

Toda tentativa de usar a matemática para estudar um fenômeno real, como a confiabilidade, deve começar com a construção de um modelo matemático (Hoyland & Rausand, 1994 apud Falcetta, 2000). Embora nenhum modelo matemático represente em sua totalidade o comportamento real e correto de todos os tipos de fenômenos (Box et al., 1978 apud Falcetta, 2000), utilizar um modelo de distribuição estatística para representar um conjunto de dados pode simplificar a análise e facilitar a interpretação.

Visto que os tempos de falha obtidos são variáveis aleatórias, utilizando uma função de distribuição de probabilidade, é possível representar sua dispersão (Fuentes-Huerta et al., 2021). Isso permite a obtenção de todos os indicadores de estimação de confiabilidade apresentados (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Após coletar os dados de falha, para analisar a confiabilidade de um sistema, o analista deve deduzir um modelo de distribuição de dados que descreva o sistema em questão ou escolher um modelo de distribuição de dados já desenvolvido que se adapte ao sistema. Para ser realista, o modelo de distribuição de dados adotado deve descrever as funções essenciais do sistema, sem necessidade de precisão absoluta nessa descrição. Em outros termos, um modelo matemático de distribuição de dados será apropriado se não ignorar detalhes relevantes para a compreensão do fenômeno estudado, permitindo a dedução de resultados e relevância prática (Hoyland e Rausand, 1994 apud Falcetta, 2000). A solução do problema matemático pode estar correta e ainda assim não corresponder à realidade, simplesmente

porque a suposição original do modelo matemático diverge das condições práticas do problema considerado (Falcetta, 2000).

No caso de estudos de confiabilidade de sistemas, há modelos paramétricos e não-paramétricos comumente utilizados, sendo os principais: Weibull, Exponencial, Lognormal e Gamma (Paramétricos); Kaplan-Meier e Nelson-Aalen (Não-paramétricos) (Dillenburg, 2005; Fogliatto e Ribeiro, 2011; Schneider, 2001).

2.2.2.4.8.1. Modelagem paramétrica

Os modelos de distribuição de dados paramétricos são representações matemáticas predefinidas que oferecem uma descrição sucinta dos parâmetros que caracterizam a distribuição adotada. Utilizados na análise de confiabilidade, esses modelos estimam parâmetros (de localização, forma e escala) por meio do ajuste dos dados de Tempo Até Falha fornecidos (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Ao optar por um modelo paramétrico, é possível realizar previsões de confiabilidade através da extrapolação temporal ao longo da distribuição, resultando em uma estimativa suave da confiabilidade (Meeker, 2003 apud Dillenburg, 2005).

A seleção do modelo adequado para um conjunto de dados baseia-se em critérios que englobam considerações estatísticas, juntamente com análises de conformidade a modelos previamente empregados com sucesso em estudos semelhantes (Elsayed, 2021; Fogliatto e Ribeiro, 2011)

2.2.2.4.8.1.1. Distribuições Weibull

A distribuição Weibull, nomeada em homenagem ao engenheiro sueco Waloddi Weibull, conhecido por suas contribuições pioneiras em confiabilidade e análise de vida (Altaleb e Zoltán, 2020), é uma generalização da distribuição Exponencial, que será abordada posteriormente, no tópico 2.2.2.4.8.1.2 desta fundamentação.

Amplamente utilizada em estudos de confiabilidade, ela se destaca pela capacidade de se adaptar a diferentes formatos de dados e modelar Taxas de Falha crescentes e decrescentes (Fogliatto e Ribeiro, 2011). Essa versatilidade contribui significativamente para sua adoção em análises de sistemas, especialmente em configurações onde a falha de qualquer

componente ou subsistema resulta na falha total (sistemas em série), conforme mencionado por Dillenburg (2005) e Fogliatto e Ribeiro (2011).

A distribuição Weibull é definida por dois parâmetros principais: o parâmetro de forma (γ) e o parâmetro de escala (η). Além disso, há um terceiro parâmetro, o parâmetro de localização (δ). Este último representa o deslocamento da distribuição ao longo do tempo, oferecendo maior flexibilidade na representação de processos que não apresentam falhas nos estágios iniciais. A distribuição Weibull de dois parâmetros é comumente utilizada, assumindo ($\delta = 0$) (Dillenburg, 2005).

O comportamento da Taxa de Falha na distribuição Weibull é determinado pelo parâmetro de forma (γ), influenciando diretamente no comportamento da distribuição (Pasetto, 2002; Dillenburg, 2005; Fogliatto e Ribeiro, 2011; Lafraia, 2001 apud Cavalcante, 2015):

- Quando ($\gamma < 1$), $h(t)$ é decrescente, indicando a região de mortalidade infantil.
- Para ($\gamma=1$), $h(t)$ é constante, transformando a Weibull na distribuição exponencial.
- Quando ($\gamma > 1$), $h(t)$ é crescente, correspondendo à fase de desgaste da curva banheira.

O parâmetro de escala (η), também conhecido como vida característica, representa o tempo no qual 63% das unidades já falharam. E o parâmetro de localização (δ) (terceiro parâmetro) representa a distância da origem até o início da primeira falha; como mencionado, muitas vezes, as análises envolvendo a distribuição Weibull são apresentadas sem o parâmetro de localização (Lafraia, 2001 apud Cavalcante, 2015; Dillenburg, 2005).

Matematicamente, os índices de confiabilidade, para o modelo de distribuição Weibull, assumem as seguintes equações (Fogliatto e Ribeiro, 2011; Montgomery e Runger, 2012):

- Função Densidade de Probabilidade (Equação 18):

Equação (18)

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

Onde,

$f(t)$ representa a Função Densidade de Probabilidade;

t é a variável de tempo;

γ é o parâmetro de forma da distribuição Weibull;

η é o parâmetro de escala da distribuição Weibull;

- Função de Confiabilidade (Equação 19):

Equação (19)

$$R(t) = e^{\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\gamma\right]}$$

Onde,

$R(t)$ representa a Função de Confiabilidade;

γ é o parâmetro de forma da distribuição Weibull;

η é o parâmetro de escala da distribuição Weibull;

t é a variável de tempo.

- Taxa de Falha (Equação 20):

Equação (20)

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

Onde,

$h(t)$ representa a Taxa de Falha;

γ é o parâmetro de forma da distribuição Weibull;

η é o parâmetro de escala da distribuição Weibull;

t é a variável de tempo;

- MTTF (Equação 21):

Equação (21)

$$MTTF = \eta \Gamma\left(\frac{1+\gamma}{\gamma}\right)$$

Onde,

MTTF é o Tempo Médio Até a Falha;

η é o parâmetro de escala da distribuição Weibull;

γ é o parâmetro de forma da distribuição Weibull;

$\Gamma(.)$ designa a função gama, uma integral indefinida tabelada.

Os valores para γ e η , os parâmetros de forma e escala de Weibull, são fornecidos pela estimativa da Máxima Verossimilhança, que será discutido posteriormente, no tópico 2.2.2.4.8.1.4 desta pesquisa (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

2.2.2.4.8.1.2. Distribuição Exponencial

Para Fogliatto e Ribeiro (2011), a simplicidade matemática das expressões derivadas da Exponencial difundiu o seu uso na área. A distribuição exponencial tem esse nome dado ao comportamento exponencial da Função Densidade de Probabilidade. Matematicamente, a distribuição Exponencial é expressa pelas equações (Cavalcante, 2015; Fogliatto e Ribeiro, 2011):

- Função Densidade de Probabilidade (Equação 22):

Equação (22)

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

Onde,

$f(t)$ representa a Função Densidade de Probabilidade;

λ é a taxa constante de falhas ao longo do tempo, ou seja, número de falhas dividido pelo número total de horas de operação.

- Função de Confiabilidade (Equação 23):

Equação (23)

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

Onde,

$R(t)$ representa a Função de Confiabilidade;

λ é a taxa constante de falhas ao longo do tempo, ou seja, número de falhas dividido pelo número total de horas de operação.

- Taxa de Falha (Equação 24):

Equação (24)

$$h(t) = \lambda$$

Onde,

$h(t)$ representa a Taxa de Falha;

λ é a taxa constante de falhas ao longo do tempo, ou seja, número de falhas dividido pelo número total de horas de operação.

- MTTF (Equação 25):

Equação (25)

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

Onde,

MTTF é o Tempo Até a Falha;

λ é a taxa constante de falhas ao longo do tempo, ou seja, número de falhas dividido pelo número total de horas de operação.

2.2.2.4.8.1.3. Distribuição Lognormal

A distribuição Lognormal é um caso especial do modelo Weibull. Ela surge como o produto de um conjunto de variáveis aleatórias e no caso da distribuição Lognormal não há distinção clara entre parâmetro de forma e escala (Dillenburg, 2005). Esta distribuição é representada por uma variável aleatória cujo logaritmo segue a distribuição normal, sendo limitada à esquerda (Fogliatto e Ribeiro, 2011). Ela é definida pela média como parâmetro de escala e o desvio-padrão como parâmetro de forma. Matematicamente, a distribuição Lognormal é expressa pelas equações (Cavalcante, 2015; Fogliatto e Ribeiro, 2011; Montgomery e Runger, 2012):

- Função Densidade de Probabilidade (Equação 26):

Equação (26)

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(\ln t - \mu)}{\sigma} \right]^2 \right\}$$

Onde,

$f(t)$ representa a Função Densidade de Probabilidade;

μ é a média (ou localização) da distribuição logarítmica da variável de interesse;

σ é o desvio padrão (ou escala) da distribuição Lognormal;

t é a variável de tempo.

- Função de Confiabilidade (Equação 27):

Equação (27)

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

Onde,

$R(t)$ representa a Função de Confiabilidade;

t é a variável de tempo;

μ é o média (ou localização) da distribuição Lognormal;

σ é o desvio padrão (ou escala) da distribuição Lognormal;

$\Phi(x)$ é o valor da função distribuição normal padronizada avaliada em x .

- Taxa de Falha (Equação 28):

Equação (28)

$$h(t) = \frac{\emptyset [(\mu - \ln t) / \sigma] / \sigma t}{\Phi [(\mu - \ln t) / \sigma]}$$

Onde:

$h(t)$ representa a Taxa de Falhas;

$\Phi(x)$ é o valor da função distribuição normal padronizada avaliada em x ;

$\emptyset(x)$ é o valor da função densidade normal padronizada avaliada em x ;

μ é a média da distribuição Lognormal;

σ é o desvio padrão da distribuição Lognormal.

- MTTF (Equação 29):

Equação (29)

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

Onde,

MTTF é o Tempo Médio Até a Falha;

μ é a média da distribuição Lognormal;

σ é o desvio padrão da distribuição Lognormal.

2.2.2.4.8.1.4. *Estimação de parâmetros por Máxima Verossimilhança*

Os métodos de estimação de parâmetros são técnicas estatísticas utilizadas para calcular valores desconhecidos que descrevem uma distribuição de dados. Alguns métodos comuns incluem, por exemplo, o Método dos Momentos, o método da Máxima Verossimilhança (MLE - do inglês *Maximum Likelihood Estimates*) e o método de estimação bayesiana e *Bootstrap* (Elsayed, 2021). Cada método tem suas vantagens e é escolhido com base nas características específicas do problema e na natureza dos dados.

Nesta pesquisa será exemplificada a Máxima Verossimilhança, um dos métodos mais utilizados na análise de dados de confiabilidade, segundo Elsayed (2021).

O método de estimativa por Máxima Verossimilhança é um procedimento analítico de maximização aplicável a todas as formas de dados (censurados⁸ ou completos), apresentando propriedades desejáveis na análise de grandes amostras, visto que à medida que o tamanho da amostra cresce, a estimativa se torna não tendenciosa; para amostras pequenas, com menos de 10 falhas, a estimativa torna-se tendenciosa (Fogliatto e Ribeiro, 2011; Dillenburg, 2005).

Considerado também como um dos melhores métodos para obter estimadores pontuais de parâmetros de uma distribuição populacional ou amostral; um estimador de Máxima Verossimilhança será dado pelo valor do parâmetro que maximiza a Função de Verossimilhança correspondente ao resultado obtido na população de dados ou amostra. (Fogliatto e Ribeiro, 2011; Montgomery e Runger, 2012).

De modo a exemplificar, retirada uma amostra de uma população, a configuração dessa amostra irá depender das características da população e, particularmente, do valor do parâmetro desconhecido θ que se deseja estimar (Guimarães, 2002; Falcetta, 2000; Fogliatto e Ribeiro, 2011; Montgomery e Runger, 2012).

Supondo que variáveis aleatórias de tempo (t) de uma amostra aleatória n , que seguem uma distribuição de probabilidade possuem como θ um parâmetro desconhecido, a função de verossimilhança da amostra é (Fogliatto e Ribeiro, 2011) (Equação 30):

Equação (30)

$$L(\theta) = f(t_1, \theta) * f(t_2, \theta) * \dots * f(t_n, \theta)$$

Onde,

θ representa o parâmetro desconhecido e $L(\theta)$ é o valor de θ que maximiza.

⁸ A definição do conceito será abordada posteriormente, no tópico 2.2.2.4.8.2 desta fundamentação.

As equações da estimativa de MLE variam de acordo com a distribuição adotada e com a presença de censura⁹, necessitando até mesmo de correções caso a censura seja considerada grande (Dillenburg, 2005); mais detalhes podem ser vistos em Fogliatto e Ribeiro (2011). Dessa forma, a solução das equações pode se tornar complexa, demandando o uso de programas estatísticos ou métodos iterativos em planilhas de cálculo.

Apenas para exemplificar a aplicação do MLE nesta pesquisa, considerando uma distribuição Weibull de dois parâmetros, para dados completos ou censurados, a estimativa MLE é obtida pela solução das respectivas equações (Dillenburg, 2005) (Equação 31 e 32):

Equação (31)

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

Equação (32)

$$\theta = \left[\frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\gamma}}{r} \right]^{\frac{1}{\gamma}}$$

Onde,

θ representa o parâmetro desconhecido θ ;

t_i são os tempos de falha ordenados;

r é o número de falhas

n é o número total de observações, censuradas e não censuradas.

2.2.2.4.8.1.5. *Teste de aderência e Valor P da hipótese (P-value)*

Após a escolha de uma distribuição, deve-se verificar a compatibilidade (ou aderência) dos valores estimados da distribuição ao conjunto de dados de falha amostral ou populacional que se deseja trabalhar. As duas formas mais comuns de verificação de ajuste de dados a distribuições hipotetizadas são: graficamente (através de histogramas de frequência e Papéis

⁹ A definição do conceito será abordada posteriormente, no tópico 2.2.2.4.8.2 desta fundamentação.

de Probabilidade, como já mencionado) e analiticamente, através de testes de qualidade de ajuste, conhecidos como teste de ajuste de bondade (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Esses testes envolvem comparações estatísticas entre a distribuição empírica dos dados com a(s) distribuição(ões) teórica(s) especificada(s), de modo a testar a hipótese de que uma determinada distribuição se ajusta ao conjunto de dados fornecidos (Falcetta, 2000). Se o ajuste for bom, há confiança na representatividade da distribuição; caso contrário, pode ser necessário reconsiderar a escolha ou explorar modelos mais complexos.

Alguns testes comuns incluem (Falcetta, 2000; Fogliatto e Ribeiro, 2011; Santos, 2008a): Teste do Qui-Quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling (AD); sendo este último amplamente utilizado na análise de confiabilidade envolvendo *softwares* mais atuais, como o MINITAB®, por exemplo, utilizado por Dias et al. (2020), conforme observado na Revisão de Literatura desta pesquisa.

Baseado no princípio fundamental de testes de ajuste de bondade, os valores do teste são dependentes dos parâmetros que foram estimados no procedimento analítico de estimação de parâmetros.

O teste de Anderson-Darling (AD) permite verificar estatisticamente a hipótese de ajuste dos dados de Tempo Até Falha observados a uma distribuição de probabilidade já predefinida (Santos, 2008a). As hipóteses gerais são (Fogliatto e Ribeiro, 2011; Montgomery e Runger, 2012):

- A. H_0 (hipótese nula): os dados seguem a distribuição de probabilidade predefinida; ou seja, dado que $F_0(x)$ é uma distribuição predefinida, e $F(x)$ é a distribuição de dados de Tempo Até Falha observados, então $H_0: F_0(x) = F(x)$.
- B. H_1 (hipótese alternativa): os dados não seguem uma distribuição de probabilidade predefinida, ou seja, dado que $F_0(x)$ é uma distribuição predefinida, e $F(x)$ é a distribuição de dados de Tempo Até Falha observados, então $H_1: F_0(x) \neq F(x)$.

Considera-se que a hipótese nula (H_0) não é rejeitada quando o Valor-p (*P-value*) (que é a probabilidade de observar os dados amostrais ou resultados mais extremos, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira) é maior que o nível de significância, comumente definido como 0,05 (ou 5%). Isso significa que, assumindo um nível de confiança de 95% na análise, não haveria evidências estatisticamente significativas para afirmar que os dados não seguem a

distribuição analisada. Portanto, a probabilidade de cometer erro ao rejeitar erroneamente a H_0 é maior que 5%, se assumirmos um índice de confiança de 95% (Montgomery e Runger, 2012).

Em situações em que H_0 é rejeitada, prevalece para análise o menor valor de Anderson-Darling. A estatística teste de ajuste de bondade Anderson-Darling (AD) é expressa por (Anderson e Darling, 1954; Arshad et al., 2003) (Equação 33):

Equação (33)

$$AD^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))]$$

Onde,

n é tamanho da amostra;

F é a Função de Distribuição Acumulada da distribuição analisada;

i é a i -ésima amostra quando os dados estão ordenados em ordem crescente.

Para pequenas amostras ($n \leq 200$), o valor de AD é ajustado para (Equação 34):

Equação (34)

$$AD^* = AD \left(1 + \frac{0,75}{n} + \frac{2,25}{n^2} \right)$$

Onde n é tamanho da amostra.

2.2.2.4.8.2. Censura de dados

Na avaliação da confiabilidade, é desejável utilizar a maior quantidade de dados disponíveis, mas frequentemente esses dados são incompletos ou incertos. Em geral, os dados de Tempo Até Falha gerados por meio de experimentos podem ser classificados como completos (quando todas as informações sobre o Tempo Até Falha estão disponíveis) ou censurados/truncados (quando há falta de informações sobre Tempo Até Falha) (Reliasoft, 2004 apud Dillenburg, 2005; Fogliatto e Ribeiro, 2011). Entretanto, os dados censurados devem ser utilizados porque a omissão das censuras afeta as estimativas de confiabilidade (Freitas e Colosimo, 1997 apud Bonetti, 2009).

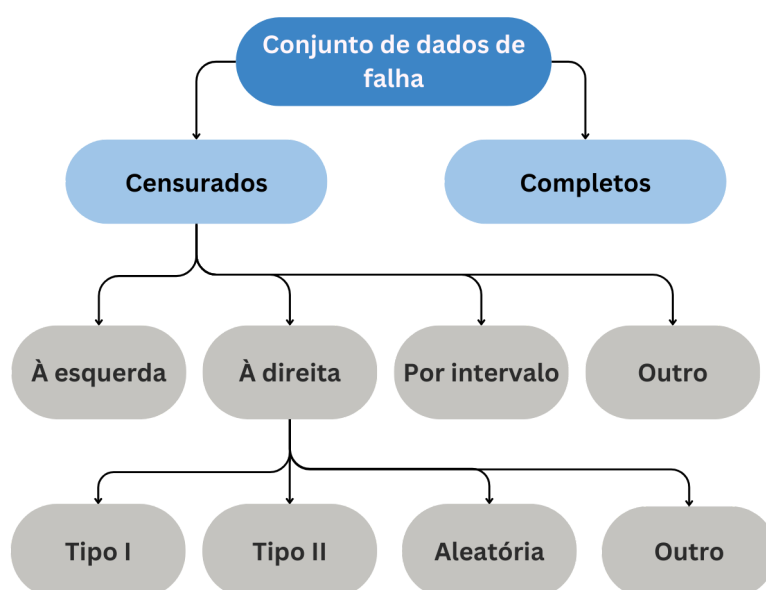
O tipo mais frequente de censura é a censura à direita, que ocorre quando o tempo de falha não é conhecido, mas sabe-se que o sistema sobreviveu até um determinado momento sem falhas. Três tipos de censura à direita ocorrem com maior frequência: censura tipo I, censura tipo II e censura aleatória (Fogliatto e Ribeiro, 2011). Se os registros de tempo até a falha estão limitados a um tempo máximo, tem-se a censura do tipo I. Se os dados de tempo até a falha são limitados a um número máximo de falhas, tem-se a censura do tipo II. Na censura aleatória, sabe-se que a falha não ocorreu até um certo tempo de observação, mas não se sabe exatamente quando a falha ocorrerá, pois o evento de interesse não foi observado dentro do período de estudo (Rai e Singh, 2003; Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Dados censurados à esquerda são menos comuns e ocorrem quando o tempo exato da falha é desconhecido, mas sabe-se que a falha ocorreu em algum momento (Dillenburg, 2005; Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Outra forma de censura é a censura por intervalo, onde os dados são agrupados em intervalos, geralmente em investigações onde não é possível determinar com precisão o momento da falha devido ao esquema de coleta dos dados (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Em algumas situações, uma combinação de tipos de censura pode ocorrer de forma simultânea; nesses casos, os resultados obtidos são ditos multicensurados, segundo Fogliatto e Ribeiro (2011). A Figura 12 demonstra um esquema com os tipos de censura existentes.

Figura 12 - Censura de dados



Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011)

Fogliatto e Ribeiro (2011) citam Leemis (1995) ao descrever três abordagens para tratar dados censurados: (1) ignorar os valores censurados; (2) esperar até que todos os dados censurados falhem e tratar probabilisticamente os dados censurados; ou (3) incluí-los na Função de Máxima Verossimilhança para estimar os parâmetros da distribuição que descreve os Tempos Até a Falha. As duas primeiras abordagens apresentam limitações significativas, podendo levar à subestimação dos parâmetros de confiabilidade ou serem impraticáveis, como observado também por Freitas e Colosimo (1997 apud Bonetti, 2009).

Embora modelos paramétricos possam ser aplicados na presença de censura de dados (Falcetta, 2000; Dillenburg, 2005), Fogliatto e Ribeiro (2011) recomendam a abordagem não-paramétrica como a ideal.

2.2.2.4.8.3. Modelagem não-paramétrica

Os modelos não-paramétricos são frequentemente utilizados para lidar com dados censurados, que são situações onde a estrutura dos dados é desconhecida ou difícil de especificar; embora também seja possível modelar dados censurados a partir de modelos paramétricos (Fogliatto e Ribeiro, 2011). Na presença de observações incompletas, podem ser aplicados métodos como Kaplan-Meier e Nelson-Aalen (Dillenburg, 2005; Sharma e Rai, 2021). Este trabalho abordará exclusivamente a explicação do estimador Kaplan-Meier.

2.2.2.4.8.3.1. Método Kaplan-Meier

O método de Kaplan-Meier, também conhecido como estimador produto-limite, estima de maneira singular a função de confiabilidade (Oliveira e Turrioni, 2016).

É recomendada a utilização do método Kaplan-Meier para modelagem envolvendo dados multicensurados (Fogliatto e Ribeiro, 2011; Last e Halpert, 2015) e dados na presença de múltiplos modos de falha (Dillenburg, 2005), devido ao fato de considerar a ocorrência de eventos de probabilidade de forma independente, ou seja, os resultados não são estimados a partir de parâmetros de forma, escala ou localização dos dados, o que favorece o uso a partir de observações incompletas.

No método, o cálculo da Taxa de Falha em um determinado tempo t_i depende do número de falhas e da população em risco neste tempo. A Taxa de Falha então, é calculada da seguinte forma (Dillenburg, 2005;) (Equação 35):

Equação (35)

$$h(t) = \frac{r_i}{NR_i}$$

Onde,

$h(t)$ é a Taxa de Falhas;

NR_i é o número de unidades em risco imediatamente antes de t_i ;

r_i é o número de falhas em t_i .

Como consequência, a confiabilidade é estimada utilizando o produto das probabilidades de falha até um tempo t_i e pode ser vista na Equação 36:

Equação (36)

$$R(t) = \prod_{t_i \leq t}^{t_i} (1 - h(t_i))$$

Onde,

$R(t)$ é a Função de Confiabilidade;

$h(t_i)$ são as Taxas de Falha calculadas nos instantes t_i até a idade t .

2.2.2.5. A importância do conhecimento de causa e efeito das falhas

Breznická et al. (2023), como visto na RSL, apontou que cada vez mais as pesquisas voltadas à confiabilidade vêm combinando outros métodos qualitativos, quantitativos, indutivos e dedutivos de forma complementar à modelagem estatística determinística e/ou estocástica convencional. Muitos desses métodos são aplicados principalmente ao conhecimento formal resultante da análise das falhas, que proporciona uma ampla variedade de contextos para aplicação da engenharia de confiabilidade (Cavalcante, 2015).

Como as falhas podem ter origem em causas especiais, comuns ou a uma conjugação de ambas (Santos, 2008b), para evitar e gerenciar falhas, é fundamental adquirir

conhecimento sobre como o sistema opera, e qual seria seu modo de falha principal e os modos de falha dos componentes que o compõem (Falcetta, 2000).

Como mencionado neste trabalho, a maioria das empresas/indústrias/fabricantes não dispõe desse tipo de informação, o que dificulta a avaliação de confiabilidade por modo de falha para estimação posterior da confiabilidade do sistema como um todo, levando a resultados mais realistas (Falcetta, 2000; Fogliatto e Ribeiro, 2011; Elsayed, 2021).

Uma causa especial é o fator ou conjunto de fatores mais fundamentais que, se corrigidos ou removidos, evitam a recorrência da falha principal. Por isso, identificar as causas especiais é a principal meta da análise do mecanismo de falha, e a precisão dos resultados é crucial para prevenir a ocorrência de falhas semelhantes no futuro (Kapur e Pecht, 2014, apud He et al., 2015).

Para alcançar níveis satisfatórios de confiabilidade em sistemas, técnicas como Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA, do inglês *Failure Modes and Effect Analysis*) e Análise de Árvore de Falha (FTA, do inglês *Fault tree analysis*) vêm sendo comumente utilizadas durante seu desenvolvimento, como já visto na RSL desta pesquisa.

A escolha entre preferir a aplicação da FMEA ou da FTA depende do problema em estudo, sendo que cada método tem suas vantagens específicas no processo de desenvolvimento e análise de confiabilidade (Fogliatto e Ribeiro, 2011). No entanto, devido às suas finalidades complementares, FMEA e FTA são frequentemente empregadas em conjunto (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

Um exemplo de integração dessas metodologias foi apresentado por Santos (2011), que utilizou a FMEA em conjunto com a FTA. Segundo ele, essa abordagem híbrida permitiu a seleção dos itens mais críticos na análise qualitativa da FMEA, seguida por uma análise quantitativa pelo FTA dos componentes mais críticos, para compreender a probabilidade de ocorrências. Essa combinação visa oferecer uma representação mais realista dos problemas analisados e contribuir para a busca contínua pela melhoria do produto em estudo.

Enquanto a FMEA analisa detalhadamente os modos de falha e seus efeitos, a FTA modela as relações lógicas entre eventos que podem levar a uma falha específica. Uma explicação sintetizada para os métodos, seriam (Fogliatto e Ribeiro, 2011):

- FMEA: Partindo de um item inicial (como um componente ou uma operação), identificam-se diversos modos e efeitos de falha associados classificando-os conforme o impacto no sistema.
-

- FTA: Partindo de um efeito indesejável (evento de topo), estabelecem-se as relações que podem envolver vários componentes ou operações, definindo os eventos que contribuem para esse efeito.

2.2.2.5.1. O método Fault Tree Analysis (FTA)

A Análise de Árvores de Falhas (FTA, *do inglês Fault Tree Analysis*) é um método sistemático que transforma um sistema físico em um diagrama lógico booleano, sendo altamente eficaz na avaliação de riscos e confiabilidade. Este método dedutivo utiliza diagramas para representar as causas potenciais que podem resultar em um efeito indesejado (falha), permitindo a priorização das contribuições para a falha, identificação de melhorias e quantificação da probabilidade de ocorrência.

Embora inicialmente desenvolvida para verificar projetos de aeronaves, a FTA tem sido amplamente utilizada na análise de diversos tipos de contextos (Fogliatto e Ribeiro, 2011), auxiliando na identificação das causas que levam ao efeito de estudo através de um diagrama lógico (Ehiagwina et al., 2022; Santos, 2011).

O método começa com a identificação do evento de uma falha principal, denominado “Evento Principal”, “Evento de Topo” ou “Evento Indesejado”, que é um efeito ou sintoma de uma falha específica de um sistema ou componente. Em seguida, desenvolve-se uma sequência de falhas secundárias, denominadas “Causas Secundárias”, que estão associadas aos modos de falha e que levam à falha principal. Finalmente, identificam-se as “Causas Primárias”, que são as causas especiais que contribuem para a ocorrência da falha principal. Os eventos e causas são representados por símbolos booleanos.

A FTA pode utilizar tanto dados qualitativos quanto quantitativos, para determinar a probabilidade de ocorrência de falhas (Lazarova-Molnar et al., 2020; Vesely et al., 2002).

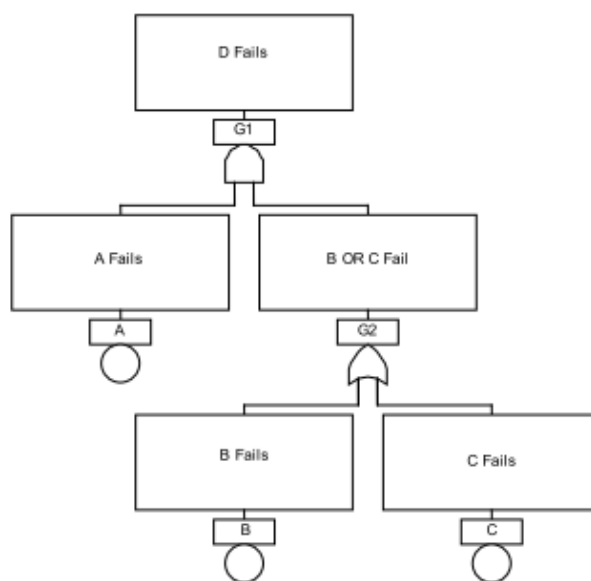
Sua estrutura básica segue da seguinte forma (Vesely et al., 2002; Fogliatto e Ribeiro, 2011):

- **Evento de Principal, de Topo ou indesejado:** Representado no topo da árvore, geralmente por um retângulo. O evento de falha principal deve estar alinhado com o problema a ser resolvido e com os objetivos da análise. Se houver dúvidas sobre o evento principal, é preciso formular definições alternativas e avaliar a aplicabilidade de cada uma.
-

- **Causas Secundárias:** São as falhas ou eventos que contribuem para a ocorrência do evento principal, mas que podem ser decompostos em causas menores. Elas são representadas por combinações de portas lógicas, que mostram como diferentes causas interagem para provocar o evento principal. Geralmente também são representados por um retângulo.
- **Causas Primárias ou Eventos Básicos:** Representam falhas simples ou eventos que não podem ser decompostos em falhas menores, geralmente representados por círculos. Eles são os elementos mais básicos da análise (causas especiais), sendo os pontos de partida para a identificação de falhas principais no sistema.
- **Portas lógicas:** Conectam eventos e determinam a relação lógica entre eles; as mais simples e utilizadas são “E”, e “OU” (Fogliatto e Ribeiro, 2011), geralmente representadas por símbolos específicos. Apesar de variarem de formato a depender do recurso utilizado para elaborar, alguns operadores lógicos booleanos da FTA com uma explicação de seus significados elaborados por Vesely et al. (2002) podem ser vistos no Apêndice 5.

A Figura 13 apresenta um exemplo ilustrativo de uma Árvore de Falhas Simples, apenas com os operadores “E” e “OU” (Vesely et al., 2002).

Figura 13 - Exemplo de uma Árvore de Falhas Simples



Fonte: Vesely et al., (2002)

Uma FTA bem-sucedida é realizada em etapas sequenciais, sendo elas (Vesely et al., 2002; Fogliatto e Ribeiro, 2011):

- A. Identificação do objetivo da FTA e definição da equipe de estudo.
- B. Definição do escopo e das interfaces (limites) do sistema em análise.
- C. Análise preliminar do sistema e definição das informações necessárias.
- D. Definição do Evento Principal (Evento de Topo) da Árvore de Falhas;
- E. Coleta de dados;
- F. Definição da resolução da Árvore de Falhas e das regras básicas;
- G. Construção da Árvore de Falhas;
- H. Revisão da Árvore de Falhas e avaliação das probabilidades de ocorrência das Causas Primárias e do Evento de Topo.
- I. Interpretação e apresentação dos resultados, detalhamento das ações de correção e melhoria;
- J. Acompanhamento das ações de correção e melhoria.

Um manual muito utilizado na aplicação da FTA é denominado de *Fault Tree Handbook*. Desenvolvido pela Comissão de Regulamentação Nuclear dos EUA (*U.S. Nuclear Regulatory Commission*) em parceria com a Universidade de Washington (*University of Washington*) e com o Instituto de Ciências do Sistema (*Institute of System Sciences, Inc.*) em 1981, os autores W. E. Vesely, F. F. Goldberg, N. H. Roberts e D. F. Haasl, demonstraram a aplicação do método qualitativamente e quantitativamente, empregando análises estatísticas e probabilísticas na FTA. Vesely et al., (2002) ainda tratam de outros assuntos relacionados à FTA como diretrizes de validação e de elaboração. Embora não seja abordado nesta dissertação, essas diretrizes podem ser encontradas no trabalho destes pesquisadores.

2.2.2.5.2. Método Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Desenvolvido para o projeto Apollo pela NASA na década de 1960, a Análise de Modo e Efeito de Falha, um tipo de método de avaliação de risco, foi posteriormente adotado por diversas indústrias (Altaleb e Zoltán, 2020). Esta metodologia visa fomentar a prevenção

em detrimento da correção de uma falha (Junior, 1996), através da identificação de defeitos potenciais inerentes ao sistema, avaliação da gravidade de seus efeitos, fornecimento de uma base para estabelecer medidas específicas de solução e melhorias (Souza, 1999).

Embora existam diversos tipos de FMEA, os princípios da análise são os mesmos. Isso inclui funções de cada componente do sistema, modos de falha potenciais para cada componente, efeitos potenciais de cada modo de falha, causas potenciais de cada efeito, controles atuais para cada causa, e ações preventivas essas causas (Fogliatto e Ribeiro, 2011; Bertsche, 2008; Santos, 2011; Souza, 1999).

Um modo de falha pode ser descrito como os eventos ou condições físicas que levam à falha funcional (Falcetta, 2000). É importante identificar todos os modos de falha possíveis no sistema para prever eventos e avaliar seu impacto quando ocorrerem (Moubray, 1997, apud Oliveira, 2022).

É comum que muitos itens apresentem mais de um modo de falha (Dodson e Nolan, 1997, apud Bonetti, 2009). Fatores que contribuem para a falta de confiabilidade em um sistema incluem modos de falha não previstos (Dillenburg, 2005). Os efeitos dos modos de falha são os primeiros a serem percebidos, como sintomas, sendo observados após sua ocorrência, afetando a função principal do sistema (Siqueira 2005, apud Oliveira, 2022).

O método FMEA é dividido em três etapas respectivamente: (1) Preparação, (2) Execução e (3) Conclusão (Bertsche, 2008).

Durante a etapa Execução, são discutidas causas, efeitos, contramedidas e gravidade para cada modo de falha de um componente de sistema ou deste como um todo. As medidas preventivas de gestão de falhas devem sempre focar na causa da falha, isto é, na origem do problema que induziu ou causou a ocorrência de um determinado modo de falha (Oliveira, 2022). Essa discussão é registrada e organizada em uma planilha, indicando Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D) para cada modo de falha (Bertsche, 2008).

O índice de Ocorrência (O) indica a probabilidade de ocorrência de um determinado tipo de falha devido a várias causas relacionadas. O critério de avaliação é a atribuição de um *Score* da Matriz de Ocorrência que é apresentado a seguir, na Tabela 7.

Tabela 7 - Matriz de Ocorrência da FMEA

Matriz de Ocorrência (O) - Qual a chance dessa falha ocorrer?

Score	Possíveis Taxas de Falha	Ocorrência
1	<1 em 10 ⁶	Remota (falha improvável)
2	1 em 200000	Baixa (relativamente poucas falhas)
3	1 em 4000	
4	1 em 1000	
5	1 em 400	Moderada (falhas ocasionais)
6	1 em 80	
7	1 em 40	Alta (falhas frequentes)
8	1 em 20	
9	1 em 8	Muito alta (falhas persistentes)
10	1 em 2	

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011)

O índice de Severidade (S) avalia o impacto que uma falha terá se ocorrer. O critério de avaliação é a atribuição de um *Score* da Matriz de Severidade que é apresentado a seguir, na Tabela 8.

Tabela 8 - Matriz de Severidade da FMEA

Score	Efeito da Severidade	Severidade
1	A falha não teria efeito real no sistema. Provavelmente a falha nem seria notada.	Muito baixa
2	A falha causa pequenos transtornos. Provavelmente será notada, com leves variações no desempenho do sistema.	Baixa
3		
4		
5	A falha ocasiona razoável insatisfação. Será notada a deterioração no desempenho do sistema	Moderada
6		
7	Provoca um alto grau de insatisfação. O sistema se torna inoperante. A falha não envolve riscos à segurança operacional ou descumprimento dos requisitos legais	Alta
8		
9	Envolve riscos à operação segura do sistema e/ou descumprimento dos requisitos legais	Muito alta
10		

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011)

O índice de Detecção (D) é uma estimativa da probabilidade de não reconhecimento de uma falha. O critério de avaliação é a atribuição de um *Score* da Matriz de Detecção que é apresentado a seguir, na Tabela 9.

Tabela 9 - Matriz de Detecção da FMEA

Matriz de Detecção (D) - Qual é a chance de detectar essa falha?

Score	Probabilidade de Detecção	Detecção
1	Certamente será detectada	Muito alta
2	Quase certo de que será detectada	Alta
3	Grande possibilidade de ser detectada	
4	Boa possibilidade de ser detectada	
5	Média possibilidade de ser detectada	Moderada
6	Pequena possibilidade de ser detectada	
7	Muito pequena a possibilidade de ser detectada	
8	Remota possibilidade de ser detectada	Baixa
9	Quase impossível de ser detectada	
10	Impossível de ser detectada	Muito baixa

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011)

Por fim, pode-se obter o índice de Risco, através da multiplicação dos índices de Ocorrência, Severidade e Detecção, podendo assim ser priorizadas ações corretivas e identificadas características críticas do produto (Junior, 1996). O risco se traduz em um índice numérico adimensional, que varia de 0 a 1000 (Oliveira, 2022).

A Tabela 10 representa a classificação de prioridade de Risco de acordo com o RPN calculado, sendo a prioridade estabelecida por um maior número RPN.

Tabela 10 - Classificação do Número de Prioridade de Risco

	A	B	C	D
Risco	Alto	Médio	Baixo	Muito baixo
	≥ 500	$\geq 100 < 500$	$\geq 50 < 100$	< 50

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2022

É indicado que a FMEA seja conduzida por uma equipe multidisciplinar, cujo conhecimento e criatividade são essenciais para sua aplicação bem-sucedida. Por ser um método qualitativo de raciocínio dedutivo, a experiência no trato com o produto é fundamental para o sucesso da FMEA, além do trabalho em equipe e o trabalho sistemático (Souza, 1999; Santos, 2011; Fogliatto e Ribeiro, 2011).

2.2.2.6. *Recurso computacional para a avaliação estatística da confiabilidade*

Dada a complexidade da Teoria Estatística da Confiabilidade, a utilização de recursos computacionais destaca-se principalmente na resolução de problemas matemáticos complexos

e extensivos (Dillenburg, 2005; Falcetta, 2000). Em seu sentido mais amplo, a execução de um modelo matemático aplicado através desses recursos, facilitam a execução e observação dos seus resultados, desempenhando um papel crucial na tomada de decisões e inferências relacionadas ao sistema (Nascimento, 1997 apud Santos, 2011).

Um exemplo da utilização de recursos computacionais é ilustrado na Revisão Sistemática da Literatura realizada nesta pesquisa, através do uso do *software* MINITAB®, como relatado por Dias et al. (2020). Eles utilizaram o *software* para avaliar o modelo de distribuição estatística mais adequado aos dados coletados e simular resultados. Montgomery e Runger (2012) também destacaram o *software* MINITAB® como uma ferramenta estatística intuitiva ao usuário.

Uma solução gratuita para a utilização de recursos computacionais na avaliação da confiabilidade é o *software* RStudio. Segundo Kronthaler e Zöllner (2021), R é uma linguagem de programação criada originalmente por Ross Ihaka e Robert Gentleman no departamento de Estatística da Universidade de Auckland, Nova Zelândia, para a realização de cálculos estatísticos e gráficos. Ao longo do tempo, a linguagem R foi desenvolvida por um esforço colaborativo de pessoas ao redor do mundo (R Core Team, 2024), sendo amplamente utilizada entre estatísticos no desenvolvimento de *softwares* de estatística (Fox e Andersen, 2005; Kronthaler e Zöllner, 2021).

O uso da linguagem R é facilitado pelo do *software* RStudio, uma interface gráfica mais amigável para o R, com muitos recursos úteis que facilitam a visualização do código, a importação de conjuntos de dados, a visualização de figuras, entre outros. Além de ser gratuito, o R oferece várias vantagens na análise de dados, incluindo a disponibilidade de pacotes estatísticos prontos, a facilidade de personalização e a possibilidade de visualização de dados (Kronthaler e Zöllner, 2021).

Na página de internet R-Project [<https://cran.r-project.org/>], é possível visualizar alguns pacotes interessantes para a análise de confiabilidade com suas referências acadêmicas (R Core Team, 2024). No próprio *software* RStudio, escrevendo e executando o comando ‘citation()’ com o nome do pacote entre parênteses, também é possível visualizar referências teóricas para a utilização de cada pacote.

A Tabela 11 demonstra os pacotes que podem ser úteis na avaliação da confiabilidade utilizando o RStudio.

Tabela 11 - Pacotes para a avaliação de confiabilidade no RStudio

Nome do pacote	Função	Referência teórica autoral
ggplot2	Visualização gráfica de dados	Wickham, H. (2024)
flexsurv	Ajuste de distribuições paramétricas	Jackson, C. (2024)
fitdistrplus	Ajuste de distribuições	Delignette-Muller, M. L., e Dutang, C. (2024)
survival	Análise de sobrevivência	Therneau, T. M. (2024)
psych	Estatísticas descritivas	Revelle, W. (2024)
dplyr	Manipulação de dados	Wickham, H., e François, R. (2023)
readr	Leitura de arquivos .csv	Wickham, H. (2024)

Como o RStudio é uma interface para uso da linguagem R, ele deve ser instalado após a instalação do desta linguagem. O R é instalado a partir da página R-Project na internet, cujo endereço é [<https://cran.r-project.org/>] e o RStudio a partir de [<https://www.rstudio.com/>].

Um passo a passo da instalação e outras orientações inerentes ao uso da linguagem no *software* RStudio pode ser acessado na página *online* do Departamento de Estatística da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) [<https://www.est.ufmg.br/>] no seguinte caminho: O Departamento > Serviços > Monitoria > Material Didático > Apostila “Utilizando o R”.

Existe também recurso computacional para a aplicação da FTA. Santos (2011), simulou a configuração quantitativa de uma FTA para parâmetros de confiabilidade utilizando o *software* BlockSim®, que se mostra eficaz para este tipo de análise, como mencionado por Ehiagwina et al. (2022). O sistema avaliado foi modelado em termos de eventos, permitindo calcular a probabilidade de falha do sistema e identificar os principais contribuintes para essas falhas.

Seguindo a apresentação de soluções gratuitas, a ferramenta *online* MIRO, uma plataforma, no formato de um quadro branco colaborativo, na qual podem ser criados mapas conceituais, diagramas, fluxogramas, entre outros (Khusid, 2022). Apesar de não possuir especificamente os desenhos de operadores booleanos de Vesely et al., (2002) uma Árvore de Falhas pode ser elaborada utilizando recursos ilustrativos parecidos. Por tratar-se de um recurso *online*, a única objeção para o uso eficaz da ferramenta é que se tenha acesso pleno à internet, podendo ser acessada através do site [<https://miro.com/>].

2.2.2.7. *A garantia como falha em campo*

Para fins de entendimento e propósito de desenvolvimento deste trabalho, a partir deste tópico, nesta dissertação, "sistema" será entendido como um produto.

Ao adquirir um produto, os clientes estão cientes da possibilidade de falhas futuras, no entanto consideram a adesão associada à percepção de confiabilidade à credibilidade que a empresa/indústria/fabricante. Para compensar e passar esse sentimento de credibilidade, as empresas/indústrias/fabricantes frequentemente vinculam a confiabilidade ao período de garantia oferecido (Santos, 2008a), mesmo que em muitas vezes por exigência legal (O'Connor, 1991, apud Souza, 1999). Quando a garantia é acionada, significa que o produto apresentou algum tipo de falha (Pasetto, 2002).

Oferecida como estratégia de negócio, a garantia é um contrato ou acordo pelo qual o fabricante de um produto ou fornecedor de um serviço concorda em reparar, substituir ou fornecer novamente os serviços, caso uma falha venha a ocorrer dentro de um período de tempo especificado (Elsayed, 1996, apud Guimarães, 2002). Caso o consumidor não siga as recomendações operacionais que acompanham a garantia, o fabricante torna-se isento de responsabilidade. A garantia pode ser interpretada como um critério para a escolha de produtos, agregando valor (Santos, 2008a; Pasetto, 2002) e, auxiliando a empresa/indústria/fabricante a ressaltar a superioridade em qualidade e confiabilidade do produto em comparação com os concorrentes; com os produtos concorrentes cada vez mais similares, pode ser considerada um diferencial, garantindo participação no mercado (Pasetto, 2002; Yu, 2022 apud Chiou, 2023).

No Brasil, os fabricantes podem definir o período de garantia oferecido e os serviços a ela associados, desde que obedeçam aos critérios do Código de Defesa do Consumidor (Lei 8078 de 11 de setembro de 1990), lei que estabelece a responsabilidade do fabricante em reparar os danos causados aos consumidores por quaisquer falhas (Pasetto, 2002). Entretanto, como a definição do período de garantia deve considerar os custos associados à confiabilidade do produto e às condições reais de uso, levando em conta os reparos necessários para falhas ocorridas, a determinação do período de garantia necessita ser estudada e deve ser feita com cautela (Oliveira e Turrioni, 2016).

Uma representação metodológica básica do cálculo do custo do incidente de garantia é composta por duas componentes (Equação 37): (1) custos fixos (estrutura necessária para identificar, coletar, armazenar e operar o reparo) e (2) custos variáveis (custos das peças e

materiais necessários para o reparo, custos de manuseio e alguns custos administrativos). Esses custos, porém, dependem da frequência dos eventos de falha que podem ocorrer durante o período de garantia, demonstrando a total associação dos custos de garantia à confiabilidade do produto (Pasetto, 2002):

Equação (37)

$$G = (CF + CV) * f(x)$$

Onde,

G é o Custo da Garantia

CF são os Custos Fixos do Incidente de Garantia

CV são os Custos Variáveis do Incidente de Garantia

$f(x)$ é a Taxa de Falha do Produto

O conhecimento sobre a confiabilidade do produto permite a elaboração de políticas de garantia mais precisas (Limon et al., 2016) e somente um alto grau de confiabilidade permite associar um período de garantia mais longo (Santos, 2008a; Pasetto, 2002) a custos menores, evitando repasse desses custos aos clientes de modo a encarecer o produto e aumentar o risco de perda de mercado (Pasetto, 2002).

Lançar ou manter produtos no mercado com baixa confiabilidade resulta em custos elevados (principalmente se as falhas ocorrerem no período de garantia) e inconveniências para o cliente (Souza, 1999; Dillenburg, 2005). Caso a confiabilidade seja constatada como mais baixa, a empresa/indústria/fabricante pode, por exemplo, optar por limitar o período de garantia ao período legal, reduzindo assim sua responsabilidade em caso de falhas após o término da garantia estabelecida. Isso pode diminuir os custos com garantia, permitindo que esses recursos sejam investidos na melhoria da confiabilidade do produto, para que, futuramente, garantias maiores possam ser oferecidas (Pasetto, 2002); entretanto o risco de perda de mercado acompanha a decisão.

Torna-se evidenciado então, que técnicas para estimar a confiabilidade dos produtos, devem ser aplicadas, de modo a permitir o monitoramento e aprimoramento desta, proporcionando o mais alto nível de confiabilidade e satisfação do cliente a um custo mais baixo e controlado (Pasetto, 2002). Essas técnicas partem da utilização da Teoria Estatística da Confiabilidade para estimar a confiabilidade e idealizar ações de melhoria contínua desta.

A escolha das fontes de informação para estudos de confiabilidade depende do estágio do produto no ciclo de vida do produto, das condições financeiras e dos riscos a serem

assumidos (Marcorin e Abackerli, 2002 apud Dillenburg, 2005). Mesmo para produtos já consolidados no mercado, diante da dificuldade em prever o que pode ocorrer com o produto no campo, o fabricante pode abordar o problema por uma perspectiva diferente se for possível (Souza, 1999).

As informações de falhas obtidas por meio de testes laboratoriais de confiabilidade, que tentam simular as condições reais de funcionamento do produto, apresentam sempre uma margem de erro devido às diferenças entre as condições reais e as simuladas, por mais precisos que sejam os laboratórios e os procedimentos de teste (Fogliatto e Ribeiro, 2011; Oliveira e Turrioni, 2016). Assim, a obtenção de dados a partir de testes experimentais de confiabilidade sob condições controladas em laboratórios, além de não refletir a realidade, envolve altos custos para as empresas/indústrias/fabricantes, devido ao elevado nível de serviço exigido. Esses custos são frequentemente incorporados ao preço final do produto, o que pode levar a empresa a perder participação de mercado ao praticar preços mais altos que os concorrentes (Pasetto, 2002).

Uma vez que a obtenção de resultados de falha em experimentos de campo exige investimentos substanciais em coleta e análise de dados (Jones e Hayes, 1997), uma alternativa para modelar a confiabilidade é utilizar dados de falha provenientes das informações de campo, através do retorno dos produtos em garantia (Guimarães, 2002; Dillenburg, 2005; Pasetto, 2002).

Após o início da utilização do produto em campo, os dados de falha por acionamento de garantia fornecem informações valiosas às empresas/indústrias/fabricantes sobre o desempenho do produto (Pasetto, 2002; Dillenburg, 2005), especialmente em relação às falhas ocorridas e sua natureza e componentes específicos afetados (Guimarães, 2002).

Essas informações são geralmente registradas com data de venda, data da falha e tipo de defeito apresentado (Kalbfleish et al., 1991 apud Dillenburg, 2005) pelas empresas/indústrias/fabricantes, tipicamente no setor de Serviço de Atendimento ao Consumidor/Cliente (SAC), sem custo adicional, a partir de reclamações durante a cobertura da garantia (Alam e Suzuki, 2009; Oh e Bai, 2001), viabilizado pela assistência técnica, com o objetivo de obter *insights* que permitam aprimorar o projeto dos produtos (Souza, 1999).

Segundo Santos (2008b), a demanda por métodos estatísticos para analisar dados de garantia surgiu com a crescente capacidade de armazenamento de dados a baixo custo, sendo inicialmente identificada pelos pesquisadores Hahn e Meeker (1982) e Lawless (1982). Isto é, o desenvolvimento do método de modelagem da confiabilidade utilizando dados de

acionamento de garantia já existentes na empresa/indústria/fabricante, se deu com o objetivo de reduzir o custo do processo de coleta de dados de campo (Dillenburg, 2005) auxiliando no entendimento do contexto de confiabilidade do produto e permitindo ações de melhoria contínua, de modo a tornar um produto mais confiável, reduzindo reparos e custos, possibilitando a redução de preço e mantendo uma boa imagem da empresa perante o mercado (Pasetto, 2002).

2.2.2.7.1. *Autores brasileiros que realizaram a avaliação da confiabilidade com dados de acionamento de garantia com dados de falha em campo*

Trabalhos brasileiros encontrados durante a execução desta pesquisa foram avaliados quanto à abordagem que seguiram para modelar a confiabilidade de produtos utilizando os dados provenientes do acionamento de garantia destes.

Falcetta (2000) realizou um trabalho sobre a análise da confiabilidade de produtos, cujo principal objetivo foi definir uma metodologia aplicável à modelagem e análise da confiabilidade de produtos manufaturados existentes no mercado, utilizando dados de Tempos Até Falha provenientes da utilização de sua garantia. Inicialmente, ele executou a modelagem matemática da confiabilidade dos vários subsistemas (componentes) que compõem o produto; em seguida, estimou a confiabilidade do produto como um todo e, por fim, apresentou conclusões e sugestões para novos estudos a serem desenvolvidos, tais como: (a) aperfeiçoamento da heurística para definir o modelo de distribuição seguido pela função confiabilidade; (b) desenvolvimento de métodos alternativos para análise de confiabilidade de produtos manufaturados que não sejam afetados por distorções devido à alta quantidade de dados censurados ou à presença da fase de mortalidade infantil na função de risco do produto e (c) incorporação de métodos de estimação de parâmetros de distribuições desconhecidas baseados em simulação na metodologia proposta, como o método de Kaplan-Meier (1958).

O pesquisador destaca que a baixa complexidade da metodologia permite sua utilização por profissionais com pequeno treinamento em técnicas de modelagem de confiabilidade e que a maioria dos cálculos pode ser realizado com o auxílio de planilhas eletrônicas, como as da Microsoft Excel®.

O elevado nível de censura nos dados coletados no trabalho de Falcetta (2000) superestimou a confiabilidade total do produto e acabou distorcendo a informação relativa ao MTTF; consequência essa da formulação matemática teórica tendo em vista a

natureza censurada dos dados, fazendo com que os resultados obtidos demonstrassem uma situação não-real de funcionamento do equipamento estudado.

Por último, Falcetta (2000) destaca, quanto ao ajuste dos dados de acionamento de garantia, que ainda que os modelos de distribuições estatísticas não se adaptem tão bem aos conjuntos de dados de falha real, alguns modelos são mais úteis que outros e podem ser utilizados para fins de análises e discussões.

Guimarães (2002) realizou uma modelagem para análise da confiabilidade de produtos em garantia, com o objetivo de identificar a distribuição das falhas e estimar a confiabilidade do produto ao longo de um período de dois anos de uso. Esse estudo possibilitou à empresa estabelecer os custos adicionais associados à extensão da garantia do produto, que atualmente era de um ano. O estudo foi delineado em duas alternativas de modelagem: a primeira através da adequação, estimação e simulação do modelo de distribuição de falhas; e a segunda por meio da análise bayesiana de confiabilidade, envolvendo o uso de distribuições a priori e a posteriori.

O autor destaca que os resultados observados mostram que, apesar das técnicas serem distintas, as modelagens convergiram para estimativas similares e qualitativamente coerentes com os pressupostos estabelecidos pela empresa pesquisada. Ele sugere o desenvolvimento de modelagens para análise da confiabilidade, utilizando a estimação bayesiana especialmente em situações onde os parâmetros de forma e escala são variáveis aleatórias. Recomenda-se que as estimações para obtenção da distribuição a posteriori sejam simuladas com diferentes valores para a distribuição a priori.

Pasetto (2002) conduziu um estudo de caso com a Dell Computadores sobre a previsão de falhas durante o período de garantia com base na percepção do cliente. A autora destaca que, ao projetar as falhas para o produto em estudo, também foi possível analisar os custos associados ao atendimento à garantia, resultando em recomendações para sua redução.

Ela enfatiza o uso da voz do cliente, representada pelos dados de acionamento de garantia, como uma característica crucial da análise realizada. Isso é viável apenas em empresas/indústrias/fabricantes que mantenham um relacionamento direto com seus clientes e tenham registros organizados das reclamações de garantia.

Para Pasetto (2002), estimar a confiabilidade de um produto é de grande importância para a organização, especialmente nas áreas de custeio: permitindo uma alocação mais eficiente de recursos para atender às demandas de garantia e prever os custos envolvidos.

Santos (2008a) propôs um modelo de confiabilidade que utiliza dados de garantia e pós-garantia para analisar três diferentes modos de falha. Ele argumenta que esses dados podem conter registros de falhas causadas por diversos mecanismos, resultando em Tempos Até Falha que não seguem uma única distribuição de probabilidade, mas sim uma combinação delas. Por isso, segundo ele, modelar os modos de falha individualmente assegura uma melhor compreensão da confiabilidade do sistema como um todo.

Por outro lado, o pesquisador destaca os desafios teóricos enfrentados na análise de confiabilidade estatística, especialmente devido ao alto nível de censura nos dados de garantia. Ele então, com o intuito de minimizar a censura, propõe o uso de dados complementares, como a opinião de especialistas para reduzir essa censura, melhorando a precisão dos modelos e ajustando-os à realidade operacional dos produtos; ajudando a mitigar distorções nos resultados causadas pelo elevado nível de censura, garantindo estimativas mais próximas da realidade.

Santos (2008b), no mesmo ano, expande o estudo anterior ao aplicar um modelo de riscos concorrentes aos dados de garantia, utilizando as distribuições Exponencial e Weibull. Ele destaca mais uma vez a natureza altamente censurada dos dados de garantia, caracterizando a censura como poucas unidades que falham durante o período coberto pela garantia; o que, segundo ele, sugere a utilização de dados de falha da fase de envelhecimento do produto (fase de desgaste) e não só da fase de início de ciclo de vida, devido a necessidade de métodos robustos para modelar a confiabilidade e ajustar dados censurados, especialmente quando diferentes mecanismos de falha estão envolvidos. Sendo assim, dados de acionamento de garantia onde a mesma não foi concedida (por não estar dentro do período pré-determinado consensualmente para reparação gratuita do produto) também devem ser levados em consideração.

Bonetti (2009) concentrou-se na estimação da confiabilidade dos componentes de máquinas agrícolas como primeiro passo para analisar a confiabilidade do sistema como um todo. Assim como Santos (2008a), ele utilizou dados de garantia e a análise qualitativa de especialistas como base para seu estudo; optando por recursos de baixo custo em comparação aos métodos clássicos que dependem de dados de bancada de testes, Bonetti explorou a multiplicação de duas funções Weibull para consolidar seus resultados.

Segundo ele, o método proposto destacou-se pela utilização de dados simples e de fácil obtenção, além do aproveitamento do conhecimento dos especialistas dentro da empresa. Bonetti ressaltou a importância de definir de maneira clara e precisa o conceito de falha para

cada produto. Enquanto algumas falhas são evidentes, como quando o equipamento deixa de funcionar abruptamente, outras ocorrem de forma gradual ao longo do tempo, sendo mais subjetivas. Nessas situações, ele sugeriu que a definição de falha deve considerar a percepção do consumidor, refletindo a ideia de que um produto falha quando o cliente percebe que ele não está mais cumprindo sua função, conforme discutido por Freitas e Colosimo (1997).

Oliveira e Turrioni (2016) conduziram um estudo de modelagem de confiabilidade utilizando dados de acionamento de garantia, visando superar as limitações comuns ao lidar com dados de campo, como alta censura, dificuldade no ajuste de distribuições paramétricas e presença de múltiplos modos de falha. Eles categorizaram a censura dos dados de garantia como decorrente do término do período de garantia sem ocorrência de falhas, o que resulta em dados censurados à direita (censura do tipo II, quando se determina um período de tempo de experimento).

Observaram que muitos estudos assumem erroneamente a existência de apenas um modo de falha ou distribuições idênticas para todos os modos de falha, o que não reflete a realidade. Em vez disso, cada modo de falha segue uma distribuição de probabilidade distinta, complicando a modelagem quando múltiplos modos de falha atuam simultaneamente. Para lidar com essa complexidade, consideraram o uso de estimadores não-paramétricos como uma alternativa viável.

Além disso, destacaram a proposta de (Santos 2008a) de modelar separadamente cada modo de falha e utilizar o modelo de riscos concorrentes para obter a confiabilidade global do produto. Enfrentaram desafios com a organização dos dados fornecidos pela empresa estudada, ressaltando a necessidade de um banco de dados estruturado especificamente para confiabilidade, capaz de fornecer dados precisos mesmo após o término da garantia, eliminando a subjetividade associada ao uso da opinião de especialistas.

Identificaram problemas na classificação dos modos de falha devido à falta de preparo da equipe técnica e treinamento inadequado em confiabilidade, o que comprometeu a modelagem individual dos modos de falha com distribuições paramétricas conhecidas. Tendo em vista isso, eles relatam que, nesses casos, onde há classificação errada ou sem propriedade dos modos de falha, não há outra alternativa a não ser trabalhar com o produto como sofrendo o efeito de apenas um modo de falha, o que torna mais difícil a modelagem; a identificação correta do componente onde ocorreu e o modo de falha é interessante em uma base de dados para estudo de confiabilidade.

Concluíram que, em muitos casos, estimadores não-paramétricos são mais apropriados quando a modelagem paramétrica não é viável devido à complexidade ou à contaminação dos dados.

A pesquisa conduzida por Schneider (2001), por sua vez, focou na aplicação de uma metodologia para retroalimentação do projeto do produto, utilizando dados de campo obtidos através do SAC da empresa estudada.

O estudo começou com a coleta detalhada de dados de reclamações, que incluíam informações sobre cada falha do produto, data de venda e data de ocorrência da falha. Em seguida, os dados foram estratificados e analisados para identificar padrões e tendências nas reclamações relacionadas às falhas dos produtos. A partir dessas análises, Schneider estimou a função de confiabilidade do produto. Além da modelagem estocástica de confiabilidade, o estudo aplicou variações da FMEA, tanto no nível de projeto quanto no nível de processo.

Para determinar a distribuição que melhor representasse o MTTF, Schneider utilizou uma abordagem visual comparativa, buscando semelhança entre os dados observados e as curvas teóricas das distribuições. Ele também testou a adequação das distribuições por meio de testes de aderência Qui-quadrado, comparando as frequências observadas com as esperadas pelos modelos de distribuição. Por fim, calculou a confiabilidade do produto com base nos dados analisados, fornecendo uma avaliação detalhada do desempenho do produto no campo e recomendando ajustes no projeto para melhorar a confiabilidade e reduzir o número de falhas.

Por último, a pesquisa de Dillenburg (2005) contribuiu significativamente para a análise de confiabilidade de produtos ao desenvolver duas metodologias baseadas em dados de falha em campo obtidas através do acionamento de garantia. Em contraste com outras abordagens existentes, Dillenburg concentrou-se na implementação prática dessas metodologias por meio de planilhas eletrônicas.

A primeira metodologia, denominada pelo autor de “análise de dados completos”, é aplicada quando é possível determinar tanto o mês da venda quanto o mês da falha de cada produto. Isso requer um sistema robusto de rastreabilidade e monitoramento individual de cada unidade. A segunda metodologia, denominada como “análise de dados incompletos”, é utilizada quando as únicas informações disponíveis são o número total de unidades vendidas e o número de falhas observadas em cada mês. Dessa forma, a escolha entre as metodologias propostas pelo autor depende da capacidade organizacional dos dados, de modo a permitir a determinação precisa da data de venda de cada produto que falha.

A perspectiva voltada para a organização dos dados de acionamento de garantia ganha força com o destaque do autor, de que apenas quando o número de ocorrências de cada modo de falha detectado no produto é devidamente registrado, torna-se possível aplicar as estimativas de confiabilidade de forma independente para cada componente.

Dillenburg também destaca a importância da análise não-paramétrica, especialmente na análise de dados incompletos, visando obter estimativas robustas sem assumir uma distribuição específica dos dados de Tempo Até Falha.

Finalizando as observações de Dillenburg (2005), quanto ao conceito de MTTF (geralmente associado a sistemas não reparáveis) o autor observa que, mesmo em sistemas reparáveis, a utilização deste índice em vez do MTBF é relevante. Isso porque, segundo ele, utilizando o MTTF ao considerar a estimativa em uma população de risco, não é necessário considerar a possibilidade de ocorrência de novas falhas no mesmo produto após uma reparação. Esta abordagem facilita a estimativa em situações onde há pouca ou nenhuma rastreabilidade do produto em análise.

2.2.2.7.1.1. Discussões sobre a aplicação da avaliação da confiabilidade com dados de acionamento de garantia como dados de falha em campo

Todos os autores mencionados apontam vantagens e problemas ao se trabalhar com dados de garantia. Apesar dos benefícios destacados, como baixo custo e representação da utilização real do sistema em campo, sendo indicado como importante complemento em um programa de melhoria da confiabilidade (Dillenburg, 2005), os dados obtidos da utilização real do produto através do acionamento de garantia também possuem desvantagens e, com base no exposto, essas desvantagens são destacadas.

O primeiro destaque é relacionado à natureza desse tipo de dado (Falcetta, 2000; Santos, 2008b). Esses dados são tipicamente imprecisos em diversos aspectos, principalmente por estarem sob interferência de diversas variáveis aleatórias, conforme já mencionado, tendo em vista que são não obtidos em testes experimentais controlados, mas sim por meio da utilização em campo, sugerindo a natureza característica imprecisa (Oliveira e Turrioni, 2016; Oh e Bai, 2001; Karim e Suzuki, 2007 apud Limon e Yadav, 2017). Entre esses aspectos, destacam-se:

- a) Imprecisão nas informações referentes ao período de disponibilidade e indisponibilidade do produto: O período entre o tempo de final de fabricação [tempo de prateleira]¹⁰ e o início do uso do produto, bem como o período entre a falha do produto e o envio para reparo pode ser de difícil mensuração e precisão (Fogliatto e Falcetta, 2001 apud Guimarães, 2002);
- b) Dificuldades de ajuste dos dados a uma distribuição estatística: A incapacidade de determinar uma distribuição estatística que modele os Tempos Até a Falha encontrados pode ser atribuída à atuação de diferentes modos de falha, que provavelmente seguem distribuições distintas, impedindo um ajuste perfeito (Falcetta, 2000; Dillenburg, 2005). Oliveira e Turrioni (2016) atribuem essa dificuldade ao que eles chamam de “alta censura”.
- c) Suposição de que a grande maioria dos clientes acionam a garantia o produto apresenta uma falha: esse comportamento é mais provável durante o período de garantia (Oliveira e Turrioni, 2016).

O segundo destaque é quanto à organização dos dados, sendo crucial para uma estimativa próxima da realidade; no entanto muitas vezes a falta de organização dos dados torna-se um impeditivo para a aplicação do método (Falcetta, 2000; Oliveira e Turrioni, 2016; Dillenburg, 2005; Pasetto, 2002)

O terceiro destaque é tido como desvantagem: os dados de falha em campo obtidos por meio do acionamento de garantia são reativos. Isso porque só se tornam disponíveis após o lançamento do produto no mercado, quando a correção de problemas de confiabilidade é mais complicada e onerosa (Dillenburg, 2005).

O quarto e último destaque é quanto ao entendimento e quantificação da censura nos dados de acionamento de garantia. Como visto, Santos (2008b) caracteriza a censura como poucas unidades que falham durante o período coberto pela garantia; o que, segundo ele, sugere a utilização de dados de falha da fase de envelhecimento do produto (fase de desgaste) e não só da fase de início de ciclo de vida. Do mesmo modo, Oh e Bai (2001), considerando que muitos dos modos de falha dependentes do tempo de uso são pouco prováveis de ocorrer dentro do período de garantia, recomenda que mesmo dados incompletos de falhas fora deste período sejam incorporados ao estudo para evitar estimativas excessivamente otimistas da confiabilidade em longo prazo. Bonetti (2009) ainda complementa o argumento, citando os

¹⁰ O termo será explicado posteriormente, no tópico 2.2.2.7.2 desta fundamentação.

autores Freitas e Colosimo, (1997) que defendem que os dados censurados devem ser utilizados porque a omissão das censuras afeta as estimativas de confiabilidade.

Já Oliveira e Turrioni (2016), embora categorizam a censura dos dados de garantia de forma parecida, como decorrente do término do período de garantia sem ocorrência de falhas, defendem que sejam utilizados apenas dados de falhas limitados ao período de garantia do produto, argumentando que a utilização de dados incompletos de falhas provenientes de produtos fora da garantia pode levar a conclusões erradas sobre a real confiabilidade do produto analisado, principalmente porque a grande maioria aciona a garantia somente dentro do período de garantia. Para eles, os dados de produtos que não falham dentro do período de garantia analisado são considerados dados censurados.

Comparando ao argumento de Santos (2008b), uma limitação do estudo ao utilizar apenas dados de acionamento de garantia e concessão da garantia (sem considerar falhas do pós-garantia) seria a falta de representação de outras partes da vida útil do produto além da fase de mortalidade infantil, causando distorções das estimativas de confiabilidade, segundo Falcetta (2000).

2.2.2.7.2. *Caracterização da censura em dados de garantia como falha em campo*

Diante dos diversos entendimentos do que seria a censura de dados nos dados de falha oriundos do acionamento de garantia, sabe-se que de alguma forma eles são caracterizados em torno da incerteza e imprecisão e podem vir acompanhados de algum tipo ou várias espécies de censura. É necessário então esclarecer o que caracteriza a natureza incerta e a censura desse tipo de dados de falha em campo:

- a) A origem dos relatórios de assistência técnica dos produtos em garantia depende muito da suposição de que a grande maioria dos clientes lesados por uma falha do produto aciona o setor de assistência técnica (Oliveira e Turrioni, 2016), o que pode não ser uma verdade; ou seja, produtos que apresentaram falhas podem não ter sua garantia acionada. Neste caso, a caracterização de censura de dados à esquerda pode ser a mais considerada, devido ao fato de não existirem informações sobre a ocorrência de eventos antes de um certo ponto no tempo ou quando a ocorrência de eventos é subestimada. A falta de acionamento da assistência técnica por parte dos clientes com produtos
-

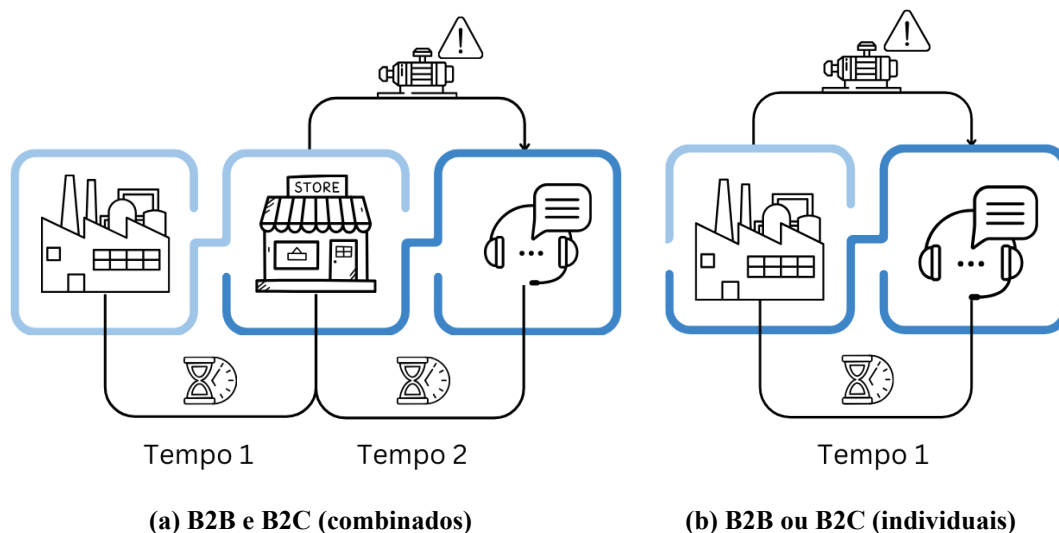
defeituosos representa a ausência de dados sobre as falhas que ocorrem antes do acionamento de garantia. Ao mesmo tempo, a suposição de que a grande maioria dos clientes só aciona a garantia no período de garantia pode sugerir incerteza característica do tipo de dado.

- b) O período de garantia habitualmente não capta a ocorrência de todos os modos de falhas, especialmente aqueles vinculados à fase de desgaste, que ocorrem majoritariamente após a garantia (Santos, 2008a,b). Isso pode caracterizar uma censura à direita (tipo I), visto que os dados de falha são limitados ao tempo pré-definido de garantia.
 - c) Imprecisões nos registros de garantia podem fazer com que as estimativas de confiabilidade se tornem não-realistas. Partir da suposição de que os dados estão organizados e precisos pode caracterizar incerteza quanto à natureza dos dados (Dillenburg, 2005; Oliveira e Turrioni, 2016). Estruturar o banco de dados para uma coleta com objetivos bem definidos pode evitar erros que comprometam os dados de falha, principalmente em análises por modos de falha individuais.
 - d) O tempo entre a falha do produto e o envio para reparo também pode não ser fidedigno devido ao retardamento do acionamento de garantia por parte do cliente, o que pode caracterizar o período em que o produto fica inutilizável até que o cliente decida realizar o reparo (Souza, 1999). Essa situação envolve aspectos tanto de censura quanto de incerteza. A censura ocorre quando se tem informações parciais sobre o tempo de falha dos produtos, como neste caso, quando produtos retornam pela garantia após falharem, mas você não conhece exatamente o tempo de falha devido à demora no acionamento de garantia. A incerteza também está presente porque o atraso no acionamento de garantia pode variar entre clientes e não segue um padrão previsível. Isso adiciona uma camada de variabilidade e incerteza nos dados de falha, tornando a análise mais complexa.
 - e) Casos em que não se consegue conhecer exatamente o tempo de uso do produto devido ao período em que o mesmo permanece em estoque na empresa ou nas lojas que o comercializam podem caracterizar incerteza quanto à natureza dos dados (imprecisão entre o tempo de final de fabricação e o início do uso do produto); este período, entre a data de fabricação e o início de
-

operação, é chamado de tempo de prateleira (Fogliatto e Falcetta, 2001 apud Guimarães, 2002). Conforme Fogliatto e Falcetta (2001, apud Guimarães, 2002), o tempo de prateleira não parece ser tão relevante em produtos de alto valor agregado. No entanto, o tempo de prateleira pode ser considerado como uma incerteza natural dos dados atrelada ao tempo; a incerteza nos dados refere-se à imprecisão ou erro na “medição” dos tempos de falha. Neste caso, a incerteza é introduzida pelo tempo de prateleira, que dificulta saber exatamente quando o produto começou a ser usado, e quando o produto falhou exatamente pela demora no acionamento de garantia.

A Figura 14 exemplifica o que seria a incerteza relacionada ao tempo de prateleira. O diagrama representa o processo cronológico desde a fabricação do produto até o acionamento de garantia, considerando os casos de comercialização B2B (*Business to Business*) e B2C (*Business to Consumer*). No exemplo (a), há a combinação dos dois tipos de comercialização; a informação de Tempo 2 é tida como a informação de operação do produto, podendo ser mais facilmente obtida por meio de notas fiscais do revendedor, entregues ao cliente e usadas no registro de acionamento de garantia. No entanto, o Tempo 1 pode não ser conhecido se o tempo entre fabricação e venda à empresa revendedora não for contabilizado e se a rastreabilidade do produto não se estender ao estoque da empresa revendedora ou não for registrada. O Tempo 1, em que o produto não está sendo utilizado é chamado de tempo de prateleira. No Exemplo (b), o tempo de prateleira limita-se ao tempo em que o produto fica no estoque do fabricante ou empresa.

Figura 14 - Ilustração do processo cronológico entre a fabricação do produto e o acionamento de garantia



Pressupondo essa natureza incerta e censurada, os dados de falha provenientes do acionamento de garantia estão, de certa forma, sempre incompletos. Com base nas perspectivas mencionadas pelos pesquisadores que trabalharam com dados de acionamento de garantia como dados de falha em campo, temos que de fato os dados possuem características incertas, esparsas, incompletas ou pouco claras, o que caracteriza esses dados como censurados (Rai e Singh, 2003) e com variadas definições de censura atuantes.

Fogliatto e Ribeiro (2011) resumem a possibilidade da atuação de mais de um tipo de censura em um conjunto de dados como sendo a multicensura. Com isso, a definição de dados multicensurados pode encaixar-se melhor na caracterização do tipo de censura presente nos dados de acionamento de garantia.

A censura pode influenciar a análise de confiabilidade (Schneider, 2001; Escobar e Meeker, 1998), podendo levar a inferências enviesadas (Limon et al., 2016; Limon e Yadav, 2017; Santos, 2008a). Portanto, ao trabalhar com dados de garantia, é importante buscar a aplicação de métodos que superem a imprecisão gerada pela natureza incerta e censurada desses dados.

Ainda assim, a avaliação da confiabilidade por meio dos dados de acionamento de garantia como dados de falha em campo pode ser muito relevante, e suas vantagens merecem realce sobre as desvantagens.

2.3. PROPOSTA DE PESQUISA BASEADA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com base nas informações obtidas na Revisão Sistemática da Literatura e na compreensão dos conceitos básicos abordados, a proposta de pesquisa pode ser fundamentada. Considerando toda a discussão e os benefícios de impacto social apresentados nesta fundamentação, a pesquisa conduzirá uma avaliação da confiabilidade utilizando dados de acionamento de garantia como dados de falha em campo. Esta avaliação será realizada nas dependências de um fabricante do ramo de equipamentos de lazer aquático, que atua no mercado há mais de 50 anos e nunca realizou uma avaliação da confiabilidade de seus produtos. O objetivo é exemplificar esta aplicação de modo a permitir sua replicação.

A avaliação priorizará o produto bombas centrífugas hidráulicas, chamadas pelo fabricante de “Motobombas Com Pré-filtro”. Uma discussão sobre a escolha do produto objeto de estudo será conduzida no Capítulo 3.

2.3.1. Breve fundamentação teórica sobre as características, funcionamento e modo de falha das bombas centrífugas objeto de estudo

As bombas centrífugas hidráulicas são turbomáquinas que deslocam fluidos líquidos, como a água, por meio da aplicação e transformação de energia mecânica fornecida por uma fonte externa de energia – no caso do produto objeto de estudo, um motor elétrico (Pimenta, 1978 apud Moretti, 1993; Santos, 2011; Castellanos, 2019; Santos et al., 2023). A denominação "bomba centrífuga" deve-se à força centrífuga, que é a principal responsável pela maior parte da energia transferida ao fluido ao atravessar a bomba (Reis, 2023).

A denominação "Motobomba com Pré-filtro" (conforme o fabricante objeto de estudo) é derivada da união das palavras "Motor" e "Bomba", fazendo referência ao tipo de fonte externa de energia mecânica, que neste caso é um motor elétrico.

Uma Motobomba com Pré-filtro é considerada um sistema em série, onde a falha de um componente afeta negativamente o desempenho e a confiabilidade de todo o sistema da bomba; ou seja, o sucesso da função do sistema da bomba está diretamente condicionado à operação normal dos componentes (Dhillon, 2006 apud Cavalcante, 2015; Elsayed, 2021; Fogliatto e Ribeiro, 2011).

É composta principalmente por motor elétrico, rotor (ou impelidor), câmara e carcaça (voluta ou corpo) (Castellanos, 2019; Santos, 2011), e possui características como eixo horizontal, estágio simples (um rotor fechado), não submersível e de sentido radial (Santos et al., 2023; Santos, 2011; Moretti, 1993). As bombas objeto de estudo têm diversas aplicações, sendo especialmente utilizadas para o bombeamento de água em atividades de lazer.

As bombas em estudo são consideradas reparáveis, principalmente pela disponibilidade de peças de reposição que compõem o produto, que também são manufaturadas pelo fabricante, e pela disposição de garantia. A devolução de uma bomba em garantia sugere que ela é passível de reparo ou substituição.

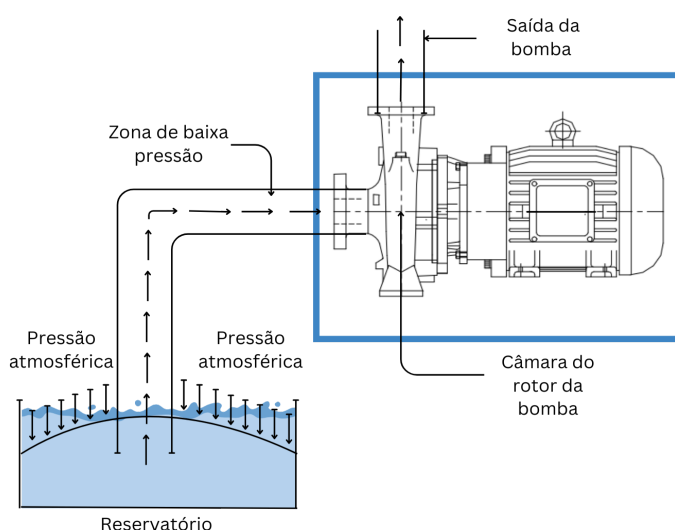
2.3.1.1. Caracterização de uma falha em uma bomba centrífuga

Tendo em vista que é crucial compreender e definir de maneira clara a função do produto durante a análise de confiabilidade (Santos, 2011), a função principal da bomba centrífuga, objeto deste estudo, é fornecer energia a um fluido para transferi-lo ou elevá-lo, convertendo a energia mecânica fornecida pelo motor em energia cinética por meio do rotor

(Santos et al., 2023). O não cumprimento dessa função caracteriza um modo de falha principal.

A bomba centrífuga hidráulica funciona com base na diferença de pressão entre a entrada e a saída da máquina (Reis, 2023). O fluido entra paralelamente ao eixo no rotor, cuja rotação é proporcionada pelo motor elétrico através do eixo. Essa rotação provoca o deslocamento do fluido, que é succionado do centro do rotor para a periferia através da força centrífuga. O fluido impulsionado atinge alta velocidade ao sair da carcaça em torno do rotor e, durante sua trajetória pela carcaça, a energia cinética é convertida em energia potencial de pressão (Castellanos, 2019; Moretti, 1993; Santos, 2011). A Figura 15 apresenta um esquema ilustrativo do funcionamento do sistema de bombeamento utilizando uma bomba centrífuga.

Figura 15 - Funcionamento de um sistema de bombeamento com bomba centrífuga



O principal modo de falha ocorre quando a bomba não desempenha adequadamente essa função. No entanto, como se trata de um sistema em série, outros componentes da bomba podem apresentar modos de falha individuais que contribuem para o modo de falha principal.

Diversos fatores, como temperatura, vibração, ruídos e vazamentos, podem estar associados a falhas mecânicas ou elétricas, falhas na montagem (operacional) ou na fabricação, e exposição a condições operacionais inadequadas. Esses fatores podem influenciar negativamente o desempenho do produto, exigindo soluções específicas para cada tipo de problema.

Exemplos de fontes comuns de vibração excessiva em bombas centrífugas incluem desbalanceamento do rotor, desalinhamentos angular ou paralelo dos eixos da bomba e do

motor devido à instalação inadequada, e ressonância. A ressonância ocorre quando as frequências naturais dos componentes da bomba são excitadas pela velocidade de rotação, podendo resultar em trincas, empenamentos ou desalinhamentos (Serra, 1995).

Folgas mecânicas causadas por bases trincadas, parafusos soltos ou problemas similares também produzem espectros de frequência com muitos picos, espaçados de forma irregular e com ruído de fundo elevado devido aos impactos dos componentes (Berry, 1990 apud Serra, 1995; Reis, 2023).

Problemas relacionados à temperatura, vibração e ruídos podem surgir quando a bomba opera fora do Ponto de Melhor Eficiência (BEP - do inglês *Best Efficiency Point*) (Santos, 2011). Isso resulta em perda de eficiência devido a condições operacionais inadequadas, como cavitação ou elevação de temperatura devido à vazão insuficiente para remover o calor gerado internamente, causando atritos internos em partes metálicas e consequente alta vibração (Serra, 1995).

2.3.2. Resumo das características da proposta em prol das características dos dados do fabricante objeto de estudo

O método de avaliação da confiabilidade utilizado na pesquisa será desenvolvido com base nos dados fornecidos pelo fabricante. A condução do estudo envolverá a coleta dos dados de Tempo Até Falha (TTF), que serão ajustados a uma distribuição estatística, seguida pelo cálculo dos indicadores de confiabilidade.

A fundamentação teórica da pesquisa indica que dados de garantia são frequentemente multicensurados e incertos. Assim, serão adotados procedimentos estatísticos para lidar com essas características. A abordagem incluirá a comparação entre os índices de confiabilidade estimados por modelos paramétricos e não-paramétricos, conforme sugerido por Falcetta (2000). Oliveira e Turrioni (2016) também propõem que o uso de estimadores não-paramétricos quando a modelagem paramétrica não é adequada.

Métodos como a combinação de distribuições e inclusão de opiniões de especialistas sugeridos por Santos (2008), a estimação bayesiana proposta por Guimarães (2002) ou o uso da Lógica *Fuzzy*, não serão explorados.

A avaliação será conduzida com dados de acionamento e consentimento de garantia (falhas que o fabricante entende como sendo verídicas), excluindo registros de acionamento onde não houve concessão garantia, cortesias e devoluções. Embora a maioria dos autores

mencionados na fundamentação defendem o uso de dados do pós-garantia, esses dados também não serão utilizados, partindo do argumento de que dados fora do período de garantia, incompletos ou com informações distorcidas (como o caso dos dados fornecidos para a pesquisa), podem levar a conclusões equivocadas sobre a confiabilidade do produto, além disso, quando a falha ocorre fora do período de garantia, a maioria das pessoas não acionam a garantia, conforme discutido por Oliveira e Turrioni (2016).

A pesquisa utilizará o índice de confiabilidade MTTF para a avaliação. Esse índice é particularmente útil para entender o tempo médio que um produto pode operar antes de falhar, focando na vida útil até a primeira falha e oferecendo uma visão direta com menor necessidade de rastreabilidade rigorosa. Em contraste, o MTBF, embora mais adequado para sistemas reparáveis (classificação do produto em estudo), se concentra no tempo médio entre falhas sucessivas e requer alta rastreabilidade e acompanhamento individual de cada unidade que falhe.

Dada a baixa rastreabilidade nos dados de falha da fabricante em estudo, a pesquisa utilizará o MTTF em vez do MTBF, que requer alta rastreabilidade para medir o tempo médio entre falhas sucessivas. Essa decisão é respaldada pelo argumento de Dillenburg (2005), que enfatiza a relevância do MTTF para a análise de falhas em produtos reparáveis com base em dados de acionamento de garantia, simplificando a aplicação de técnicas usadas para produtos não reparáveis ao desconsiderar a possibilidade de novas falhas no mesmo produto.

Visto que Friederich e Lazarova-Molnar (2024) destacam a automatização do processo de avaliação da confiabilidade como essencial e a utilização de recursos computacionais para implementar cálculos complexos, a pesquisa utilizará o *software* MINITAB®, sugerido por Montgomery e Runger (2012) como intuitivo para o usuário, para a condução dos cálculos estatísticos, assim como feito por Dias et al. (2020). Além disso, a pesquisa incluirá o uso do *software* gratuito RStudio (Kronthaler e Zöllner, 2021) para realizar as mesmas análises, oferecendo uma alternativa acessível. O desenvolvimento da mesma análise utilizando ambos os *softwares* serão detalhados para facilitar a aplicação, especialmente para usuários com experiência limitada.

A pesquisa considerará apenas um único modo de falha devido à indisponibilidade de dados claros sobre falhas individuais dos componentes. Reconhece-se que, em condições reais de uso, o produto pode estar sujeito a vários modos de falha atuando conjuntamente e de forma aleatória, e que há uma relação de dependência entre o desempenho do equipamento e a confiabilidade de cada componente (denominada "lei da probabilidade") (Fogliatto e Ribeiro,

2011). No entanto, assim como a maioria das empresas, o fabricante em estudo não possui essas informações de forma clara e consistente (Falcetta, 2000), o que dificulta a avaliação da confiabilidade por modo de falha e a subsequente medição da confiabilidade do sistema como um todo, levando a resultados menos realistas (Fogliatto e Ribeiro, 2011; Elsayed, 2021).

A avaliação da confiabilidade de um sistema pode ser feita de duas formas distintas: de maneira genérica, utilizando dados de falha do sistema como um todo, ou de maneira específica, considerando dados de falha dos componentes individuais (Schneider, 2001). Portanto, a pesquisa adota a abordagem de um único modo de falha, conforme especificado por Hoyland e Rausand (1994, apud Falcetta, 2000), não considerando os modos de falha dos subsistemas na análise do sistema principal. Esta limitação, imposta pelos dados disponíveis, torna essa a única abordagem viável para a realização da pesquisa, conforme também adotado por Oliveira e Turrioni (2016).

A revisão sistemática de literatura destacou a constante utilização dos métodos FMEA e FTA na análise de confiabilidade. Para complementar a análise quantitativa determinística ou estocástica usual, conforme destacado por Breznická et al. (2023) na revisão sistemática de literatura, foram considerados outros métodos qualitativos, indutivos e dedutivos. A utilização conjunta dos métodos FMEA (indutivo) e FTA (dedutivo) permitirá uma visão abrangente que pode auxiliar o fabricante na organização dos dados por modo de falhas, possibilitando que, futuramente, o método de avaliação da confiabilidade proposto neste trabalho possa ser aprimorado.

A FMEA será conduzida por meio de uma planilha eletrônica, utilizando o software Microsoft Excel®, enquanto a FTA contará com o suporte da ferramenta *online e gratuita* MIRO. A pesquisa não se concentra em explicações teóricas científicas aprofundadas sobre a ocorrência de falhas nas bombas, abordando o assunto de modo superficial, básico e generalizado, e utilizando o conhecimento do fabricante a respeito das falhas para o desenvolvimento das aplicações.

Por fim, destaca-se que a metodologia desta pesquisa tem como objetivo fornecer um exemplo inicial e de baixo custo para a avaliação da confiabilidade de produtos no mercado. Recomenda-se que, após essas avaliações iniciais, seja adotada uma metodologia de gestão de confiabilidade, aprimorando o uso deste método, minimizando censuras e realizando reavaliações periódicas.

CAPÍTULO 3

Explicação metodológica da pesquisa

3. METODOLOGIA

3.1. MÉTODO DE PESQUISA

Com base na classificação metodológica de Yin (2016) e Turrioni e Mello (2012), esta pesquisa adota uma abordagem combinada (quantitativa e qualitativa), de natureza aplicada, com objetivos exploratórios, através do método Modelagem e Simulação. Este método é empregado quando se deseja experimentar, através de um modelo, um sistema real, determinando-se como este sistema responderá a modificações que lhe são propostas (Turrioni e Mello, 2012).

No método de pesquisa adotado, há vantagens significativas, como o uso de simulação por meio de recursos computacionais, e a experimentação pode ocorrer em um curto período de tempo, beneficiando-se do suporte computacional (Chuang, 2004). Isso é particularmente valioso para esta pesquisa, realizada em um ambiente empresarial, onde o tempo disponível para a coleta de dados e análises pode ser limitado.

A Tabela 12 ilustra os tipos de classificação de pesquisa científica, sendo destacados os parâmetros que se adequam a esta.

Tabela 12 - Classificação desta pesquisa científica

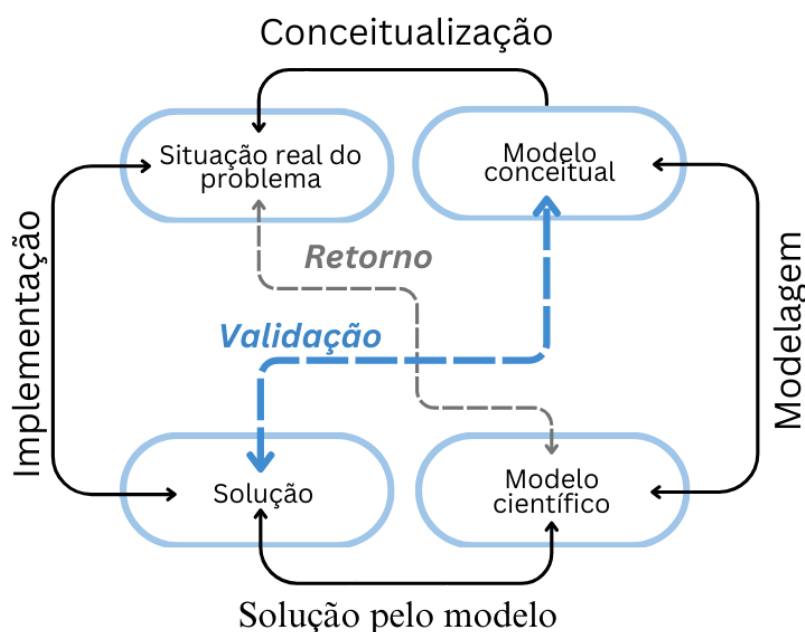
CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA CIENTÍFICA	
NATUREZA: ☐ Básica ☒ Aplicada	MÉTODOS
OBJETIVOS: ☐ Exploratória ☐ Descritiva ☒ Explicativa ☐ Normativa	☐ Experimento ☒ Modelagem e simulação ☐ Survey
ABORDAGEM: ☐ Quantitativa ☐ Qualitativa ☒ Combinada	☐ Estudo de caso ☐ Pesquisa-ação ☐ <i>Soft System Methodology</i>

Fonte: Adaptado de Turrioni e Mello (2012), pág.80.

3.1.1. Etapas do método de pesquisa

A Figura 16 expõe as etapas do método Modelagem e Simulação segundo Mitroff et al. (1974).

Figura 16 - Etapas do método Modelagem e Simulação



Fonte: Adaptado de Mitroff et al., (1974)

Neste modelo, a abordagem operacional da pesquisa é dividida em quatro fases principais: Conceitualização, Modelagem, Solução pelo Modelo e Implementação (Mitroff et al., 1974). A fase de Implementação depende do tempo disponível para a corroboração da pesquisa. No entanto, recomenda-se a execução do ciclo completo das quatro fases, incluindo também as fases complementares de validação (para assegurar que o modelo desenvolvido represente com precisão e confiabilidade o sistema real ou o fenômeno estudado) e retorno (para integrar os resultados e descobertas obtidas a partir do modelo ao processo de decisão e planejamento, e utilizar esses *insights* para aprimorar o modelo e o sistema em estudo), com o objetivo de promover a melhoria contínua.

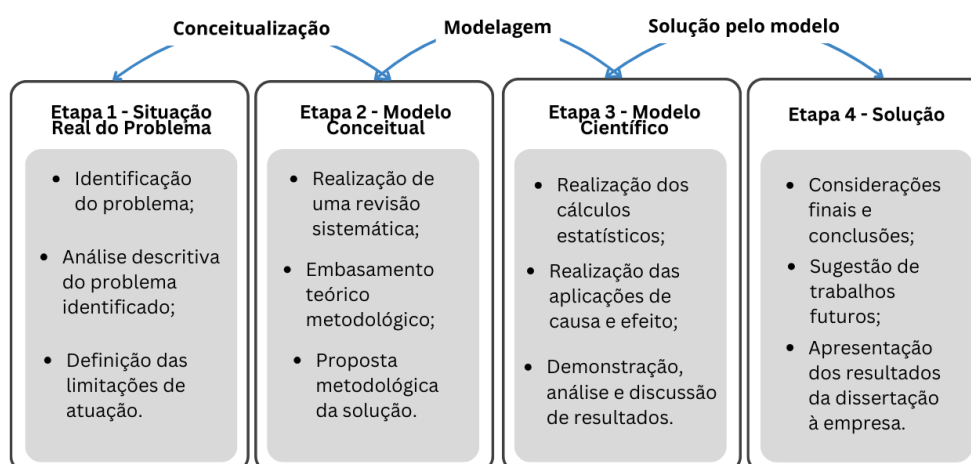
Bertrand e Fransoo (2002) afirmam que o modelo de Mitroff et al. (1974) é muito útil para identificar um caminho metodológico específico que uma pesquisa em particular está seguindo, relacionando-o com a validade das afirmações feitas na própria pesquisa. Além disso, eles explicam essas fases da seguinte forma:

Na fase de Conceitualização, o pesquisador cria o modelo conceitual do problema e do sistema em estudo, toma decisões sobre as variáveis a serem incluídas no modelo e estabelece o escopo do problema e do modelo a serem estudados. Na fase subsequente, o pesquisador constrói efetivamente o modelo quantitativo, definindo as relações causais entre as variáveis; esta fase é central, onde o pesquisador toma como base um Modelo Conceitual – obtido na literatura – e o transforma em um modelo científico (aplicável) - aqui resultados podem ser discutidos. Na fase de Solução pelo modelo, geralmente, a matemática desempenha um papel determinante e os resultados são consolidados. Finalmente, na fase de Implementação, os resultados do modelo são colocados em prática, e um novo ciclo pode começar.

Com base no modelo de passo a passo para a realização de uma metodologia baseada em Modelagem e Simulação proposta por Mitroff et al, (1974) e discutido por Bertrand e Fransoo (2002), as etapas desta pesquisa foram elaboradas.

Devido ao tempo destinado à execução da pesquisa, a fase de Implementação e as fases complementares de validação e retorno não puderam ser desenvolvidas. Desta forma, a Figura 17 demonstra as ações realizadas em cada etapa que foi desenvolvida, seguida de uma breve explicação:

Figura 17 - Etapas do método de pesquisa



- **Etapa 1 (Situação Real do Problema)** - Fase inicial da pesquisa, caracterizada pelo surgimento do projeto. Após a identificação da problemática, deve ser realizada uma contextualização e definição de possíveis soluções. Neste estágio, são delineados os objetivos primários com potencial para fornecer soluções eficazes.

- **Etapa 2 (Modelo Conceitual)** - Nesta fase, deve-se haver a incorporação de um embasamento científico robusto relacionado à evolução científica na aplicação de métodos capazes de solucionar a Situação Real do Problema e contextualizar a pesquisa.
- **Etapa 3 (Modelo Científico)** - Através do Modelo Conceitual pode ser definido o Modelo Científico. Nesta etapa, deve-se coletar os dados de acionamento de garantia de um período determinado e conduzir os cálculos estatísticos previamente definidos. Após isso, a condução das análises FMEA e FTA devem ser realizadas com a colaboração dos responsáveis da fabricante objeto de estudo. Os resultados são apresentados e discutidos.
- **Etapa 4 (Solução)** – Finalmente, as considerações finais baseadas na discussão dos resultados são apresentadas, avaliando o alcance dos objetivos estabelecidos pela pesquisa e discutindo desafios enfrentados durante o processo. As conclusões devem incluir os resultados obtidos na análise de confiabilidade, seguidos por sugestões para trabalhos futuros. Após essa etapa, os resultados de confiabilidade poderão ser comunicados à fabricante em estudo, proporcionando oportunidades para a busca contínua de aprimoramentos com base nos resultados obtidos.

3.2. APLICAÇÃO DAS ETAPAS 1, 2 E 3 DA PESQUISA BASEADA NO MÉTODO

Este tópico descreve as primeiras etapas de condução da pesquisa, apresentando a etapa de identificação da Situação Real do Problema (Etapa 1) e a condução do Modelo Conceitual (Etapa 2).

3.2.1. Situação Real do Problema

A pesquisa surgiu da identificação dos desafios enfrentados por empresas/indústrias/fabricantes para avaliar a confiabilidade de seus produtos, fazendo com que, muitas vezes, essa análise nunca seja realizada. Os desafios variam desde a escassez de recursos intelectuais até a falta de recursos financeiros.

Observou-se que essas, via de regra, possuem dados de falhas procedentes da utilização do produto em campo provenientes do acionamento de garantia, os quais podem ser utilizados como ponto de partida nas análises de confiabilidade, sem necessidade de investimento financeiro adicional, presumindo que já estejam disponíveis.

Uma fabricante específica foi selecionada como objeto de estudo para a investigação científica experimental. A escolha foi feita porque, apesar do longo período de atuação dessa fabricante no mercado, a oportunidade de realizar a avaliação de confiabilidade de seus produtos ainda não havia surgido, devido a diversas limitações, principalmente a falta de pessoal especializado.

Os objetivos foram delineados como sendo avaliar a confiabilidade de um produto manufaturado por essa fabricante, utilizando dados de falhas provenientes do acionamento de garantia e da coleta dessas informações, realizada pelo Serviço de Atendimento ao Consumidor/Cliente (SAC) através da assistência técnica. Embora a fabricante não possua dados específicos sobre a confiabilidade dos produtos, ela mantém um banco de dados em seu sistema de Planejamento de Recursos Empresariais (ERP - do inglês *Enterprise Resource Planning*), onde são registradas as falhas em campo dos produtos.

A fabricante em questão atua no ramo de equipamentos de lazer no estado do Rio de Janeiro, Brasil, com mais de 50 anos de experiência no mercado, operando no sistema de comercialização B2B e B2C combinados, onde um lojista compra seu produto manufaturado e o revende ao consumidor final.

Com a investigação científica, além de auxiliar a fabricante a iniciar a avaliação de confiabilidade de seus produtos, será possível fornecer um passo a passo e um panorama geral da realização desse tipo de avaliação a partir de dados de falha em campo já coletados. Isso beneficiará tanto a fabricante em questão quanto quaisquer outras empresas que tenham acesso a esta pesquisa. Destacam-se, nesse aspecto, os inúmeros benefícios de se realizar e aprimorar essa avaliação.

A contribuição também permeia a possibilidade de o método atuar como auxiliar na implementação de um futuro programa de confiabilidade e na adoção da Mentalidade de Risco recomendada pela norma brasileira ABNT NBR ISO 9001:2015 (Sistemas de Gestão da Qualidade - SGQ).

3.2.1.1. Caracterização e delimitação do produto objeto de estudo

A pesquisa concentra-se no produto bomba centrífuga hidráulica, denominado pela fabricante como “Motobomba com Pré-filtro”; um produto consolidado no mercado.

O motor acoplado à bomba centrífuga é fornecido por outro fabricante, de modo que apenas as bombas são produzidas internamente. No entanto, os motores fornecidos por

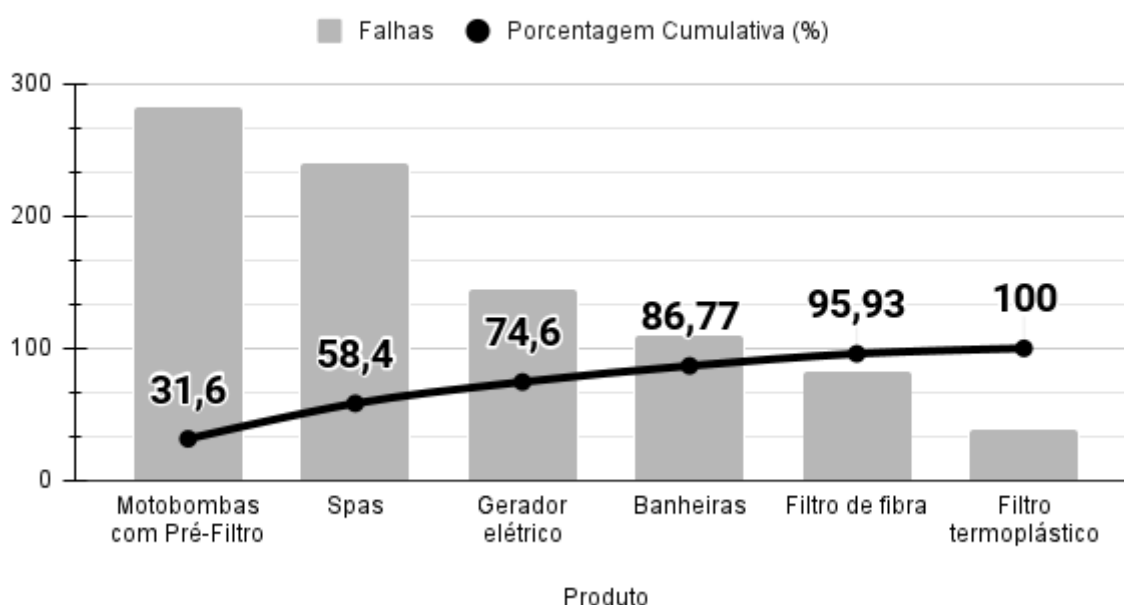
parceiros externos, quando acoplados à bomba, formam um único produto final comercializado pelo fabricante objeto de estudo. Conforme explicado pelos responsáveis, as "Motobombas com Pré-filtro" possuem variações que diferem entre si em relação à potência em cavalo-vapor; nesta pesquisa todas as variações serão consideradas como um único produto.

As Motobombas com Pré-filtro manufaturadas são utilizadas em sistemas de bombeamento de água consumida em lazer, constituindo um dos principais produtos do fabricante. Além de ser considerado um dos principais produtos manufaturados pelo fabricante, as Motobombas com Pré-filtro foram escolhidas devido ao seu volume histórico de falhas, resultando em um número significativo de acionamentos de garantia, conforme relatos da diretoria e das gerências dos setores de Qualidade, SAC e Montagem de Motobombas, da fabricante objeto de estudo.

A Figura 18 ilustra uma amostra das ocorrências de falhas das Motobombas com Pré-filtro quando comparadas a outros produtos manufaturados pela mesma fabricante, por meio de um gráfico de Pareto. Este gráfico demonstra que, ao focar nas falhas das Motobombas, podemos abordar a maior parte dos problemas relacionados aos acionamentos de garantia com um esforço relativamente menor.

Figura 18 - Falhas por produto manufaturado (Gráfico de Pareto)

Gráfico de Pareto (Falhas por produto manufaturado)



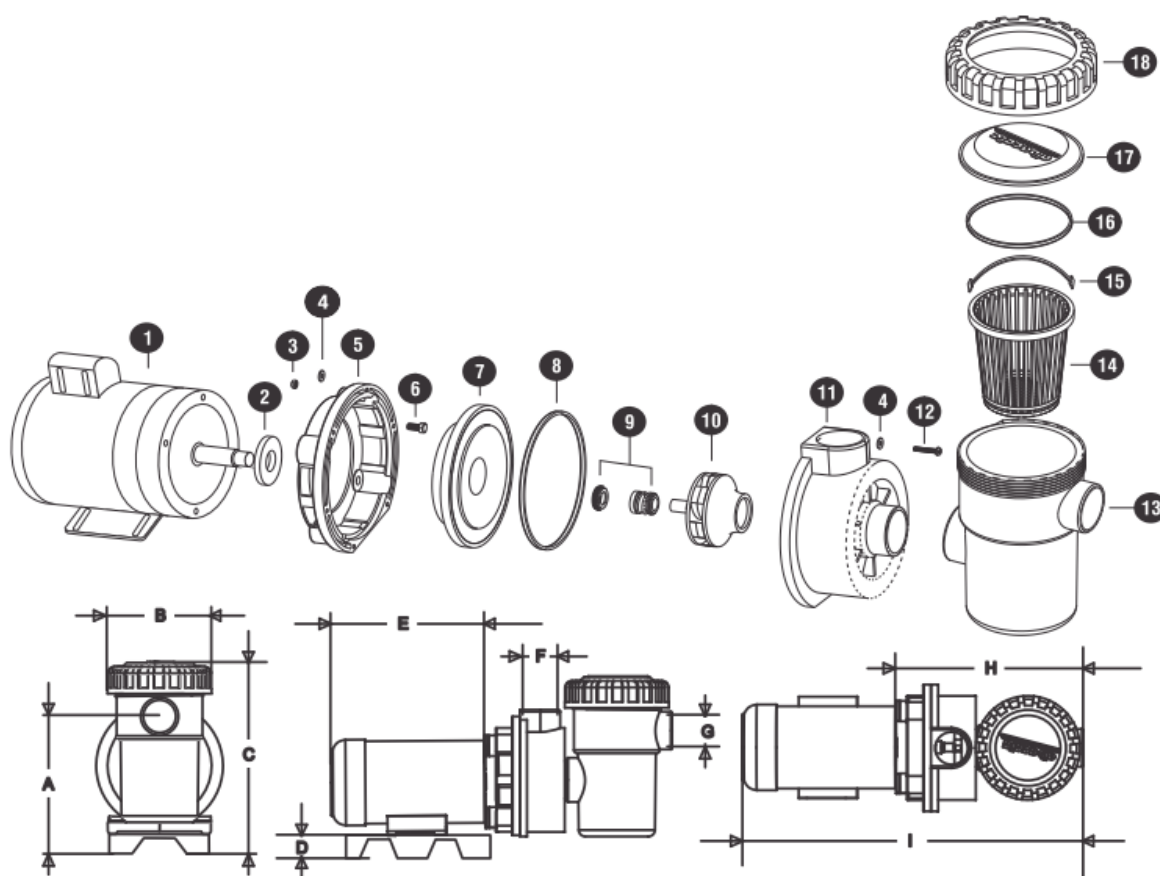
3.2.1.2. Componentes do produto objeto de estudo da pesquisa

As informações detalhadas sobre os componentes do produto foram extraídas do manual do fabricante, e estão visualmente representadas na Figura 19. Esses detalhes serão essenciais para conduzir principalmente o FMEA e a FTA nesta pesquisa.

Figura 19 - Detalhamento dos componentes Motobomba com Pré-filtro

Legenda da figura

1. Motor	7. Câmara da Bomba	13. Pré-filtro termoplástico
2. Borracha para proteção do Motor	8. Borracha para Bomba	14. Cesta para Bomba
3. Porca Aço Inox	9. Selo Mecânico	15. Alça para Cesta Pré-filtro
4. Arruela Aço Inox	10. Rotor para a Bomba	16. Borracha para Tampa da Bomba
5. Acoplamento para Bomba	11. Corpo para a Bomba	17. Tampa para Pré-filtro
6. Parafuso Aço Inox	12. Parafuso Aço Inox	18. Porca para Pré-filtro



Fonte: Adaptado do manual do fabricante objeto de estudo

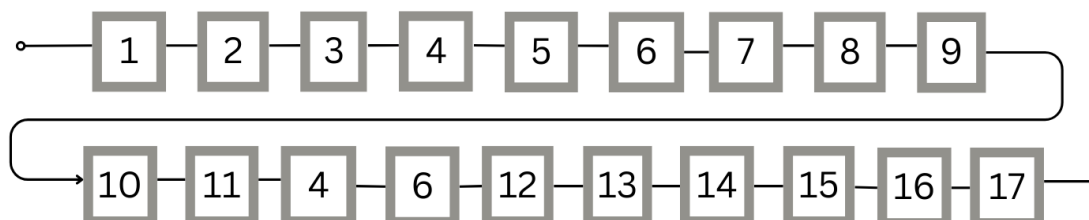
A Motobomba com Pré-filtro é constituída de 18 componentes, cada um com descrições e funções específicas no sistema global. Alguns dos componentes, enumerados, podem ser visualizados individualmente na composição da Figura 20.

Figura 20 - Composição de componentes do produto objeto de estudo



Considerando a numeração de legenda da Figura 19, o diagrama em blocos da Figura 21 exemplifica o arranjo de componentes do sistema em série Motobomba com Pré-filtro.

Figura 21 - Composição de componentes do produto objeto de estudo



3.2.1.3. Período de garantia do produto objeto de estudo

A garantia dada para a cobertura de possíveis falhas no produto objeto de estudo foi estabelecida com base na lei brasileira, a saber o Código de Defesa do Consumidor (CDC) (Lei nº 8.078/1990), que regula as relações de consumo no Brasil, e na vasta experiência do fabricante adquirida pelo longo tempo de atuação no mercado para equiparação ou triunfo sobre a concorrência.

De acordo com o manual do fabricante, no termo de garantia “As Motobombas [...] são garantidas, contra defeitos de fabricação, pelo prazo de 01(um) ano contado a partir da

data de emissão da Nota Fiscal ao consumidor.” e destaca-se que “Selo Mecânico, Borrachas [...] tem garantia de 90 (noventa) dias”; “Rotor e Corpo da bomba” tem garantia de 1 (um) ano.”.

Ainda segundo o manual do fabricante, a garantia fica totalmente invalidada se:

- a. “Não tiverem sido seguidas, na instalação e na operação do produto, as recomendações que constam do Manual de Instruções que acompanha o produto.”
- b. “As redes elétrica e hidráulica não ‘forem’ compatíveis com as indicadas no Manual de Instruções.”
- c. “ ‘Houver’ sinais de violação do produto.”
- d. “O produto ‘tiver’ sofrido modificações, danos ou ‘tenha sido’ utilizada de forma não compatível com o fim a que se destina.”
- e. “Se for verificado umidade no local de instalação.”

E não cobre danos:

- f. “Sofridos pelo produto durante seu transporte ou seu manuseio inadequado;”
- g. “Decorrentes da remoção do produto;”
- h. “Causados por uso de produtos de limpeza, óleos ou produtos químicos impróprios (abrasivos, solventes, corrosivos, etc.);”
- i. “Decorrentes da operação sem a mínima quantidade de água recomendada, trabalhar totalmente sem água ou com água em temperatura inadequada.”
- j. “Falta de manutenção do equipamento”.
- k. “Erro de instalação, seja por revenda ou técnicos terceirizados.”

Logo, entende-se que a invalidação da garantia é caracterizada como exposição a condições operacionais não recomendadas.

O fabricante ainda destaca que “utiliza em seu equipamento motor de outro fabricante, e portanto não se responsabiliza pelo motor, e caso ocorra algum defeito é de inteira responsabilidade do consumidor a locação até a assistência técnica credenciada da mesma, no prazo de 1(um) ano a contar da data emitida na respectiva nota fiscal.”; no entanto, segundo responsáveis, há diversas situações em que o fabricante objeto de estudo concede garantia e auxílio na reparação de falhas ocasionadas em decorrência do motor, entendendo que, por ser comercializado como um só produto, auxiliar na correção dessas auxilia na manutenção da credibilidade vinculada à marca.

Desta forma, para fins de avaliação, os dados de acionamento de garantia que serão utilizados levarão em consideração a concessão da garantia ao consumidor, assumindo que foram observadas as condições de invalidação descritas no manual.

3.2.2. Modelo conceitual - planejamento da avaliação

Com base na Etapa 1, a Etapa 2 pôde ser iniciada. Foi realizada uma busca de fundamentos teóricos básicos e uma contextualização sobre aplicações científicas voltadas à resolução da problemática. O resultado do desenvolvimento da Etapa 2 foi apresentado no Capítulo 2 desta dissertação. A proposta de solução metodológica da pesquisa foi delineada conceitualmente, sendo o tópico 2.3 do capítulo mencionado e seus subtópicos, um detalhamento da proposta.

3.2.3. Modelo científico - execução da avaliação

Com o Modelo Conceitual devidamente estabelecido, a transição da Conceitualização (Etapa 2) para a Implementação do Modelo Científico (Etapa 3) pôde ter início. Neste momento, prosseguiu-se para a coleta de dados de falha de modo a executar a sequência lógica elaborada e demonstrada na Figura 22.

Figura 22 - Sequência lógica para continuidade da aplicação do modelo científico



3.2.3.1. Coleta e organização da amostra

A coleta de dados ocorreu no setor de Serviço de Atendimento ao Cliente (SAC) do fabricante objeto de estudo, com o auxílio do setor de Qualidade. A população consistiu nos registros de acionamento de garantia (denominados pelo fabricante como "Ordens de Serviço - OS"). A amostra foi definida como sendo os registros relacionados ao produto "Motobombas com Pré-filtro", independentemente dos modelos (diferenciação em cavalo-vapor).

3.2.3.1.1. Discussões sobre a coleta da amostra

Uma primeira amostra foi coletada considerando os últimos cinco anos (2019 a 2024); no entanto, foram identificadas complicações nas informações coletadas. Essas questões poderiam comprometer a execução da estimativa. A principal complicação estava relacionada à forma como os dados eram registrados, sugerindo a necessidade de aprimoramento nesse processo. Além disso, a data de início de operação das bombas precisava ser identificada em cada Ordem de Serviço (OS). Com isso, tornou-se necessária a realização de uma segunda coleta de dados, desta vez com refinamentos.

Na segunda abordagem amostral de coleta de dados, tentou-se classificar as falhas por grupo de modo de falha, com o objetivo de contabilizar apenas as falhas relacionadas a defeitos de fabricação, agrupadas e denominadas pelo fabricante como "falhas de fabricação". Considerando ainda o mesmo período de tempo anterior, a amostra inicial de 106 registros foi reduzida para 87 após a remoção de 15 registros em que a garantia não foi concedida e 4 registros onde o acionamento foi dado como cortesia. Dois registros, nos quais a data de venda (contida na Nota Fiscal Eletrônica - NFe) e a data de acionamento de garantia eram iguais (ou seja, TTF = 0), foram considerados *outliers* e, portanto, removidos. Assim, a amostra final ficou com 85 registros de falha considerados como sendo de fabricação.

No entanto, essa abordagem foi frustrada ao tentar retratar as falhas de fabricação por componente, devido ao preenchimento de informações inconsistentes sobre o que era considerado uma falha de fabricação. Para preservar a confidencialidade do fabricante, essas inconsistências não serão detalhadas. Além disso, a abordagem poderia causar confusão ao fabricante, levando-o a considerar os resultados de confiabilidade para o produto como um todo, em vez de se limitar às falhas de fabricação específicas.

A terceira coleta de dados, então, seguiu uma abordagem geral, ficando definido que seriam considerados quaisquer dados de falha (sem classificação por grupo de modo de falha). Entretanto, o período de coleta foi limitado aos últimos dois anos (2022 a 2024) porque não se sabe ao certo o impacto da pandemia do vírus COVID-19 nos registros de falhas ocorridos neste ano e em anos posteriores; isso contabiliza mais incertezas aos resultados.

3.2.3.1.2. Amostra principal e suas características limitantes

Considerando apenas acionamentos ocorridos no período de garantia, foram coletados um total de 538 casos de falhas em unidades de bomba centrífuga com concessão de garantia registrados entre janeiro de 2022 e fevereiro de 2024 (já removendo dados referentes à devolução de produto, cortesias e não concessão da garantia, e inconsistências consideradas como *outliers* e, portanto, removidos).

Observou-se que o fabricante dispunha facilmente da data de acionamento de garantia (ou suposta data de falha) e da data de início de operação da bomba (data da venda do produto pelo revendedor, conforme a Nota Fiscal Eletrônica - NFe). Essas datas caracterizam o início da operação do produto, conforme descrito no manual do próprio fabricante. No entanto, o fabricante não dispunha de informações sobre o tempo de prateleira entre o fim da fabricação do produto e a venda ao revendedor, nem sobre o tempo de estoque no revendedor até a venda ao consumidor final. A disponibilidade desses dados requer melhorias no quesito rastreabilidade.

Com isso, estabeleceu-se que o cálculo de Tempo Até Falha (TTF) seria realizado considerando o suposto tempo de operação do produto, definido como a diferença em dias entre a data de emissão da Nota Fiscal Eletrônica (NFe) e a data de acionamento de garantia, desconsiderando efetivamente o tempo de prateleira.

Com o cálculo do Tempo Até Falha (TTF) considerando apenas o período “Tempo 2” de comercialização B2C, conforme o exemplo apresentado no Capítulo 2 (tempo entre a venda do revendedor ao cliente final), a censura à direita torna-se mais evidente e a censura à esquerda menos evidenciada, mesmo sendo conhecido que os dados de acionamento de garantia são multicensurados. Todavia, a incerteza natural dos dados não é anulada, assim como a censura e a incerteza relacionadas ao tempo de prateleira entre o fim da fabricação do produto, a venda ao revendedor e a venda ao consumidor final. Isso torna ainda mais relevante

a comparação dos resultados obtidos através da análise utilizando modelos paramétricos e não-paramétricos.

Devido à grande quantidade de informações, a Tabela 13 representa apenas uma fração exemplar da disposição (organização) de informações de TTF coletadas.

Tabela 13 - Exemplo da organização de informações

Nº OS	DATA DE NFe	DATA DO AC. DA GARANTIA	TTF (EM DIAS)	CÓDIGO DO PRODUTO
30113	09/07/2021	04/01/2022	179	7890037033996
30116	18/03/2021	04/01/2022	292	7890037037345
30119	29/09/2021	04/01/2022	97	7890037034009
30121	30/01/2021	05/01/2022	340	7890037033972
30123	19/12/2020	05/01/2022	382	7890037033972
30125	07/01/2021	05/01/2022	363	7890037033972

Com os dados organizados pôde-se ter início a execução das análises estatísticas utilizando o auxílio de *softwares*, conforme planejado.

CAPÍTULO 4

Desenvolvimento principal do método

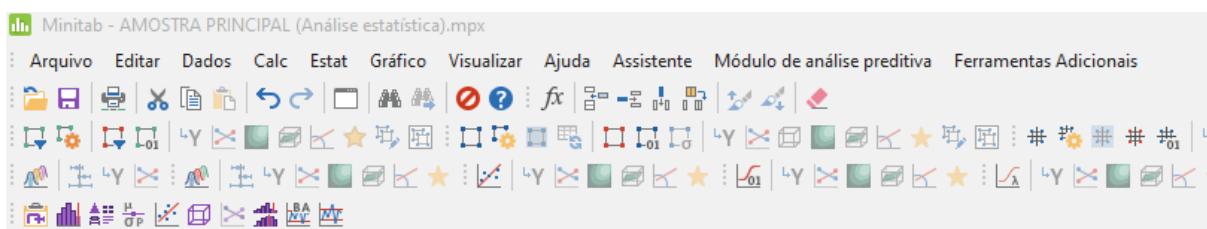
4. DESENVOLVIMENTO PRINCIPAL DO MÉTODO

Este tópico descreve a principal etapa do método de pesquisa: a condução do Modelo Científico (Etapa 3), sendo uma continuação da execução do método iniciada no capítulo anterior. A apresentação dos resultados, discussões e considerações finais também são apresentadas neste tópico e capítulo (Etapa 4 - Solução), sendo abordada nas considerações finais baseadas na discussão dos resultados aqui apresentados.

4.1.CONDUÇÃO DA MODELAGEM NO SOFTWARE MINITAB®

Os registros foram inseridos no MINITAB® para a realização das análises, que serão demonstradas passo a passo. A Figura 23 ilustra como os dados são dispostos no *software*.

Figura 23 - Ilustração da disposição dos dados

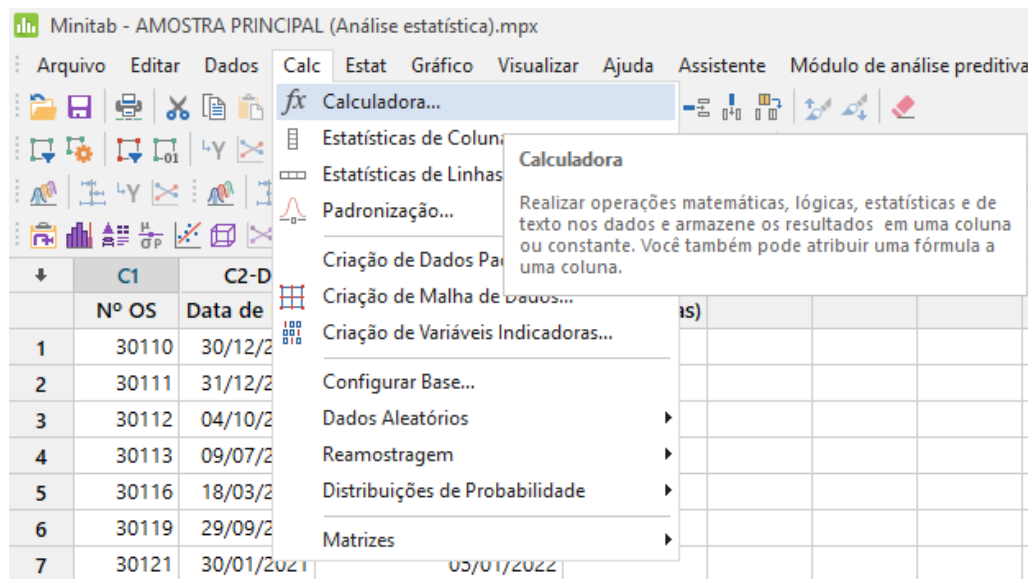


	C1	C2-D	C3-D	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	Nº OS	Data de NFe	Data de Ac. da Garantia	TTF (em dias)						
1	30110	30/12/2021	03/01/2022							
2	30111	31/12/2021	03/01/2022							
3	30112	04/10/2021	04/01/2022							
4	30113	09/07/2021	04/01/2022							
5	30116	18/03/2021	04/01/2022							
6	30119	29/09/2021	04/01/2022							
7	30121	30/01/2021	05/01/2022							
8	30123	19/12/2020	05/01/2022							
9	30125	07/01/2021	05/01/2022							
10	30129	15/06/2021	07/01/2022							
11	30144	25/01/2021	11/01/2022							
12	30152	26/04/2021	12/01/2022							

O cálculo do TTF foi realizado no próprio *software* através do seguinte passo a passo: “**Calc > Calculadora**”. Sendo este cálculo a diferença em dias entre a suposta data de início

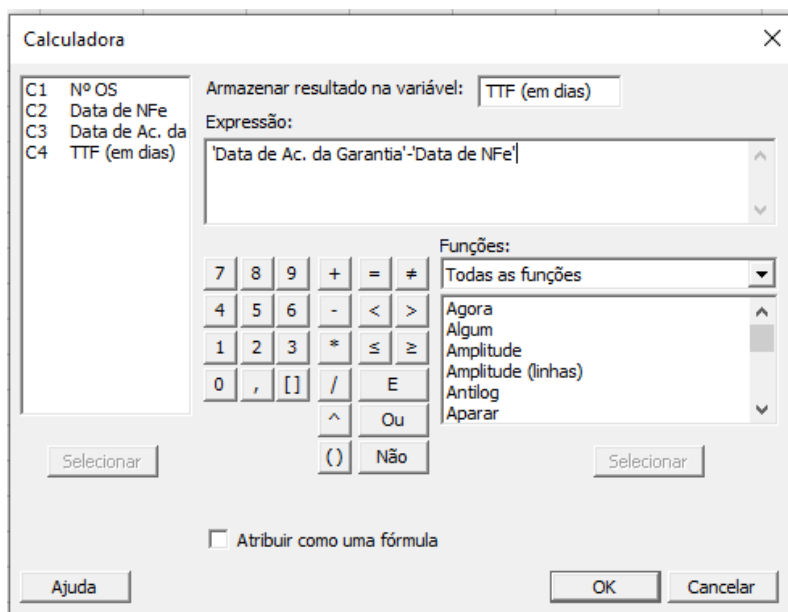
de operação do produto, adotada como a data da NFe, e a suposta data da falha do produto, adotada como a data de acionamento da garantia. A Figura 24 ilustra o passo a passo para o cálculo do TTF no *software*.

Figura 24 - Passo a passo para cálculo do TTF no MINITAB®



Na caixa de diálogo, o preenchimento foi realizado conforme a Figura 25, sendo o cálculo mencionado: “a diferença em dias entre a suposta data de início de operação do produto, adotada como a data da NFe, e a suposta data da falha do produto, adotada como a data de acionamento da garantia.”.

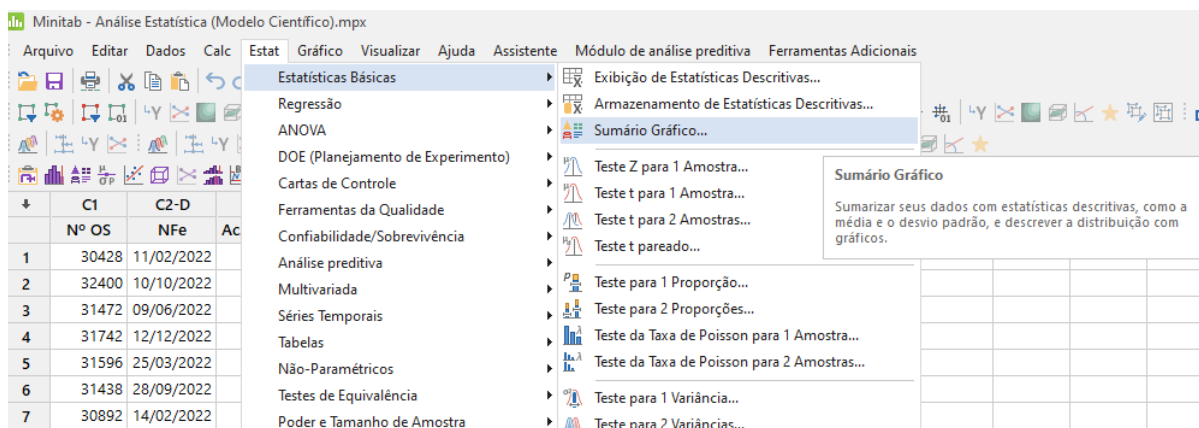
Figura 25 - Preenchimento da caixa de diálogo “Calculadora” no MINITAB®



4.1.1. Estatísticas descritivas

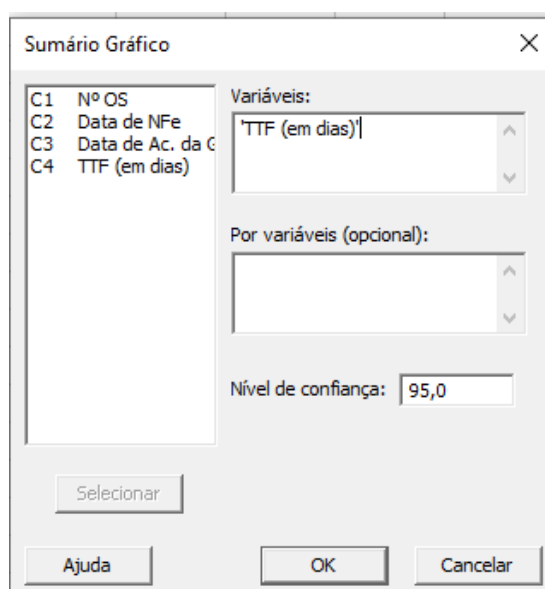
Com o TTF calculado, análises descritivas da amostra foram realizadas por meio do seguinte passo a passo: “Estat > Estatísticas Básicas > Sumário Gráfico”. A Figura 26 demonstra o passo a passo.

Figura 26 - Passo a passo para geração de Estatísticas Descritivas no MINITAB®



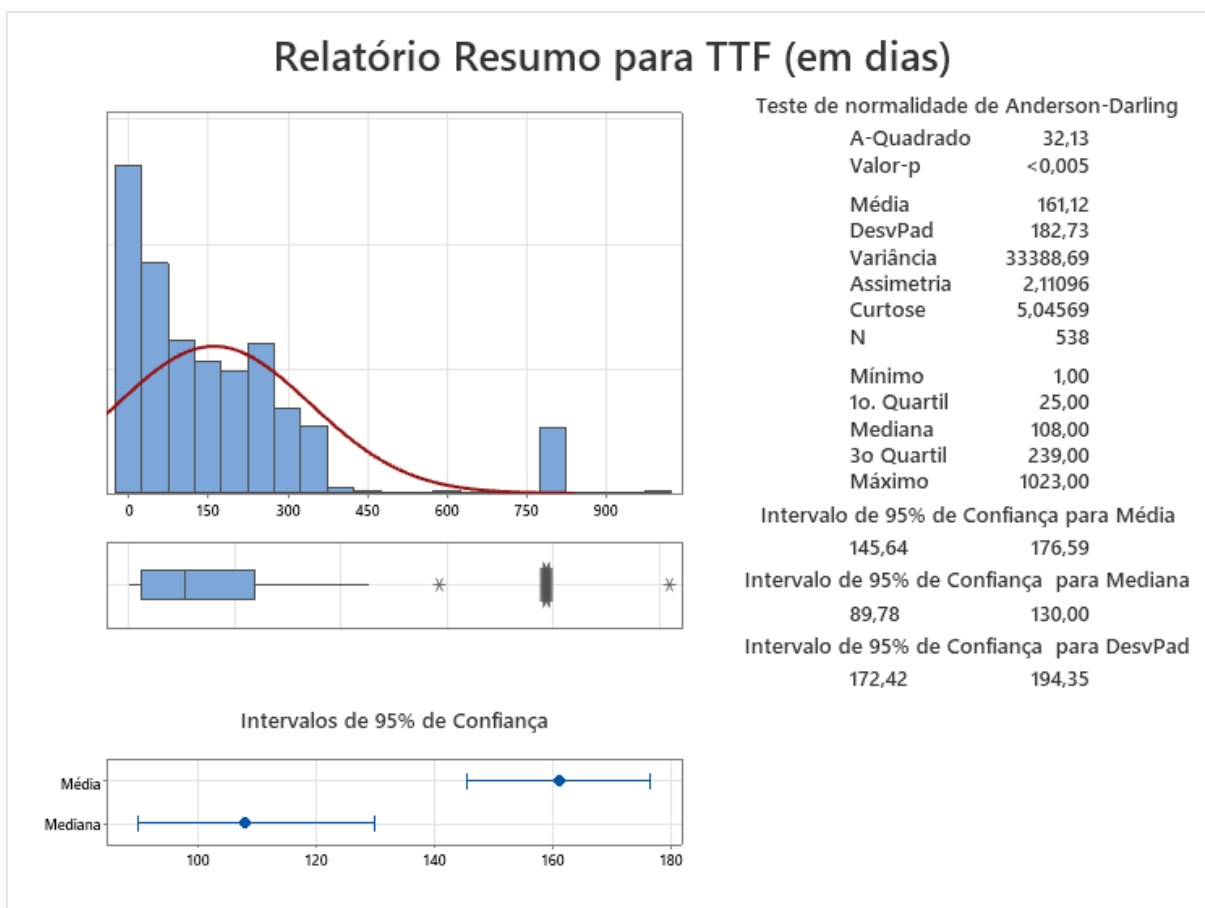
Na caixa de diálogo, a variável TTF (em dias) é selecionada no campo “Variáveis”. O preenchimento foi realizado conforme ilustrado na Figura 27, assumindo o nível de confiança em 95%; para este caso, o valor de rejeição da hipótese de que os dados seguem uma distribuição normal deve ser maior que 5%

Figura 27 - Preenchimento da caixa de diálogo “Calculadora” no MINITAB®



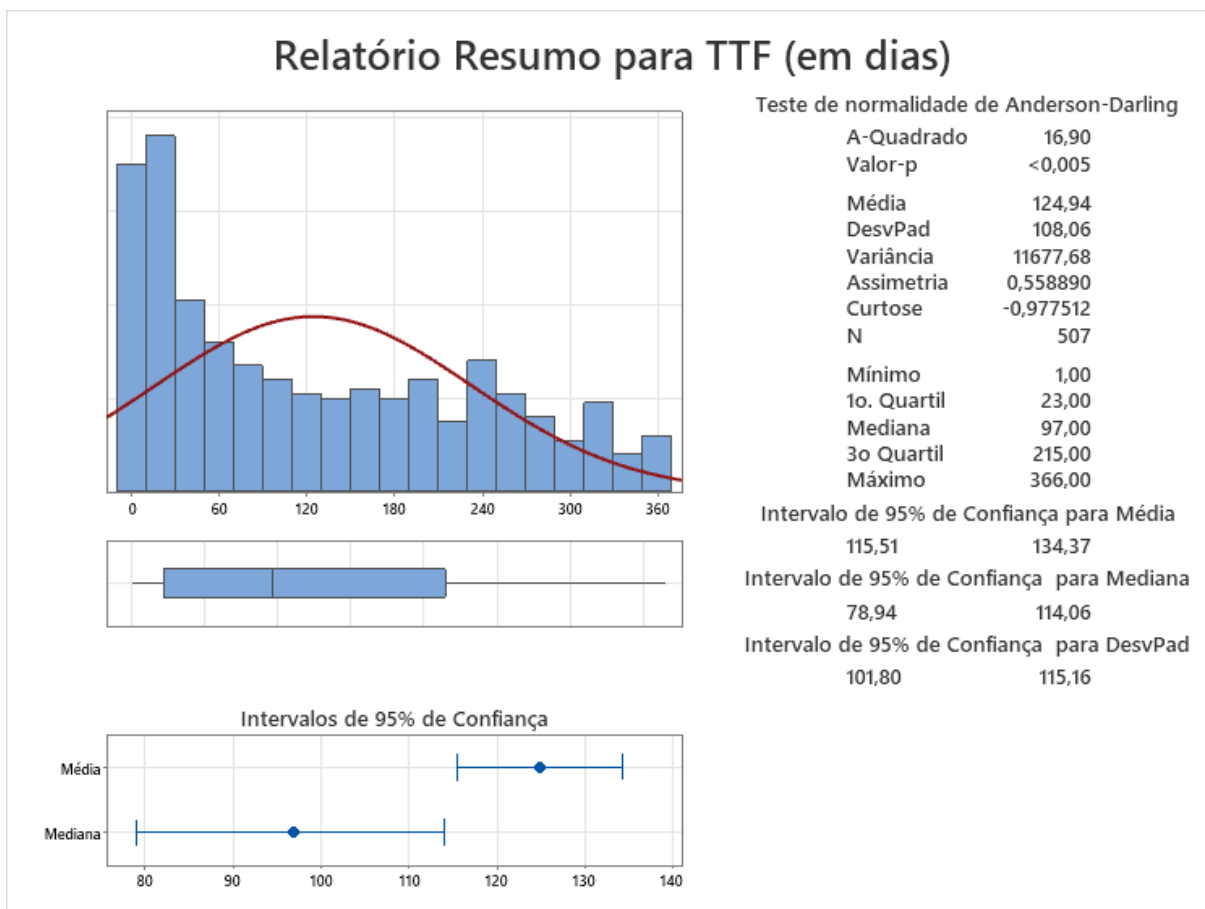
Como resultado, o *software* retorna uma espécie de relatório com o histograma dos dados de Tempo Até Falha, analisando principalmente a normalidade dos dados. Esses resultados podem ser visualizados na Figura 28.

Figura 28 - Relatório de Estatísticas Descritivas



Através do gráfico, pôde-se observar que houveram concessões de garantia com Tempo Até Falha maior que 365 dias; neste caso, a garantia entra como cortesia e nesta pesquisa é considerado como *outlier*. Dos 538 dados, foram removidos mais 31 *outliers*, e executada uma nova análise com os 507 dados a serem considerados (Figura 29).

Figura 29 - Novo relatório de Estatísticas Descritivas



Com um $P\text{-value}$ de 0,005, que é menor que 0,05 (5%), rejeita-se a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição Normal. A diferença substancial entre a média e a mediana indica assimetria na distribuição dos dados, e o grande desvio padrão em relação à média sugere que há uma variabilidade significativa nos dados, o que pode ser devido à aleatoriedade característica dos dados de falha utilizados.

4.1.2. Escolha da distribuição estatística

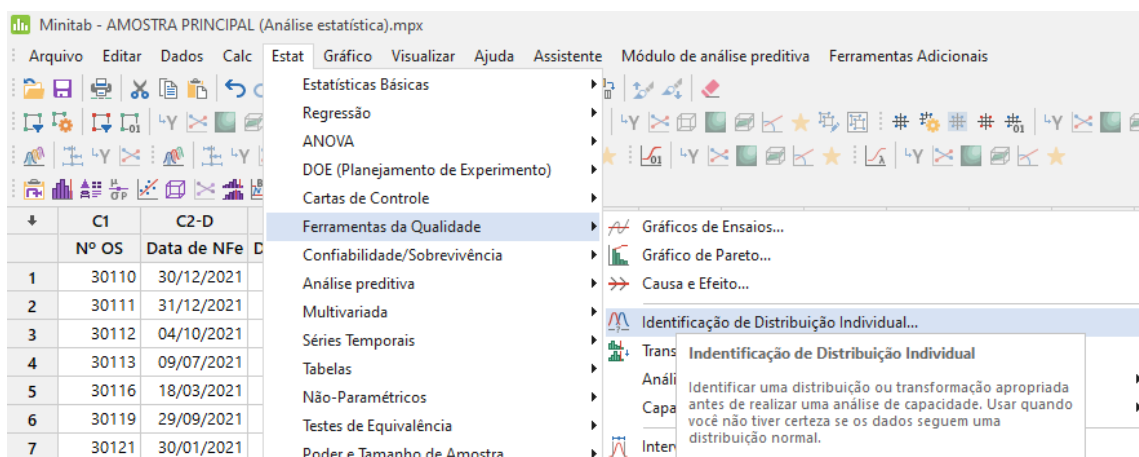
Após tornar-se evidente que os dados de falha não seguiam uma distribuição normal, a verificação de aderência a outros modelos de distribuição estatística é iniciada. A análise se iniciou com a modelagem paramétrica. Para este momento, o *software* leva em consideração os cálculos de MLE e Anderson-Darling.

Há alguns caminhos para se realizar a avaliação da qualidade de ajuste dos dados de falha a uma distribuição paramétrica. Esses caminhos foram utilizados na análise desta pesquisa, sendo eles descritos como:

a) **“Estat > Ferramentas da Qualidade > Identificação de Distribuição Individual”:**

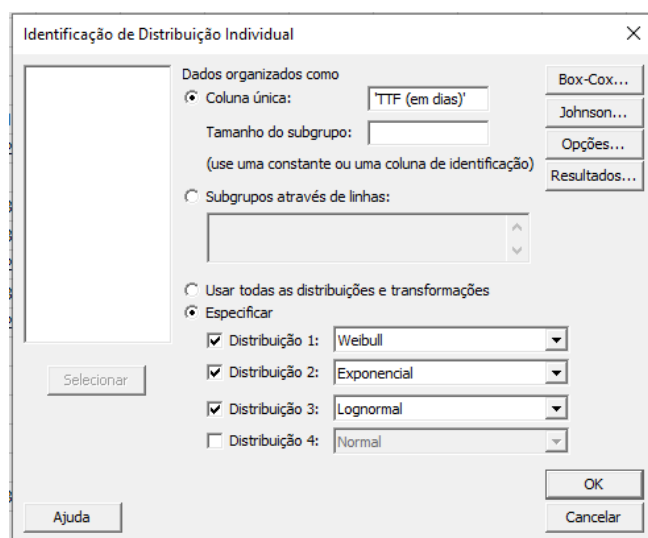
A Figura 30 ilustra esse caminho no *software*.

Figura 30 - Passo a passo ‘a’ para a verificação de aderência a distribuições estatísticas no MINITAB®



Neste caminho é possível analisar variadas distribuições. A caixa de diálogo é preenchida conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para verificação de aderência a distribuições estatísticas no MINITAB® através do caminho ‘a’



Os gráficos gerados em Papel de Probabilidade podem ser visualizados no Apêndice 6 e os resultados desse caminho podem ser visualizados na Tabela 14, sendo eles os parâmetros das distribuições estimados por MLE e os valores de Anderson-Darling.

Tabela 14 - Resultados gerados pelo passo a passo ‘a’ para a verificação de aderência à distribuição

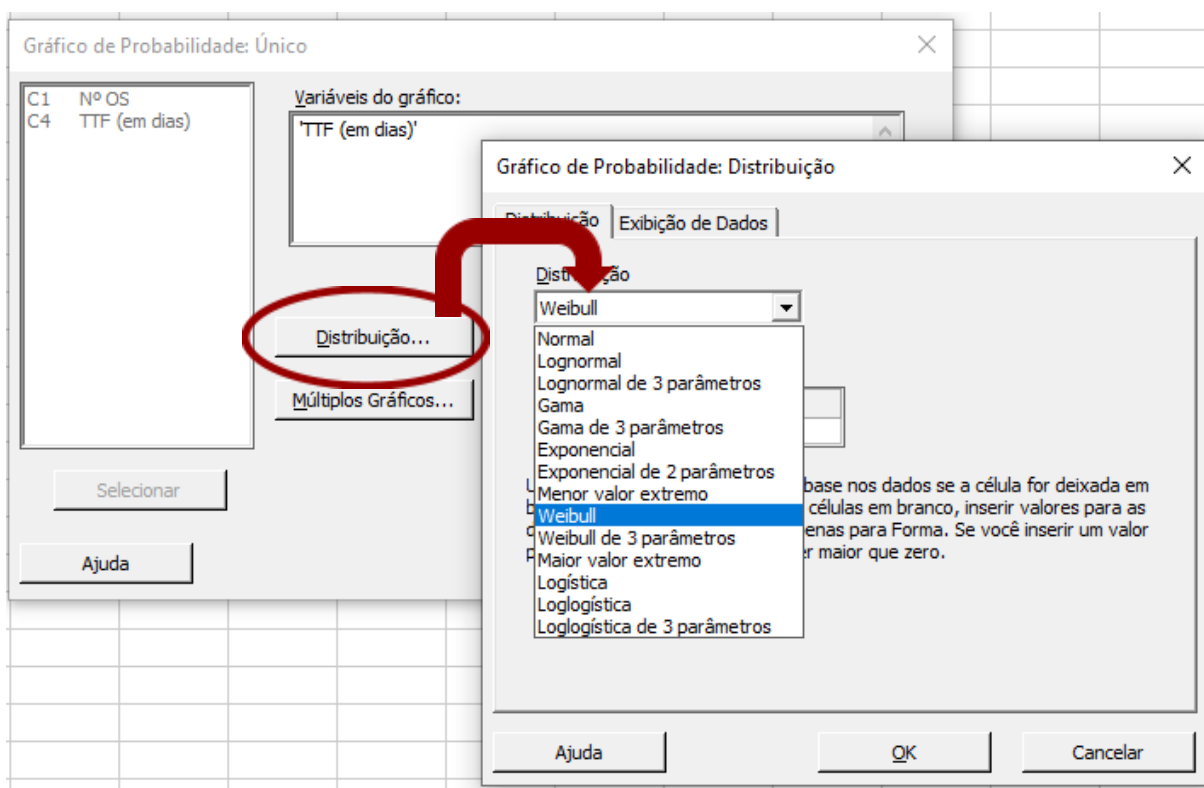
Média = 124,937 Desvio Padrão = 108,063 Mediana = 97			
Estimativas de Máxima Verossimilhança dos Parâmetros da Distribuição			
Distribuição	Localização	Forma	Escala
Weibull	-	0,93793	121,75095
Exponencial	-	-	124,93688
Lognormal*	4,13721	-	1,48584
*Escala: Estimativa de Máxima Verossimilhança ajustada.			
Teste de Qualidade de Ajuste (Anderson-Darling -AD)			
Distribuição	Valor AD		Valor-p
Weibull	8,737		<0,010
Exponencial	10,866		<0,003
Lognormal	15,340		<0,005

Observando os valores de AD gerados por esse caminho, pode-se perceber que, entre as distribuições analisadas, a distribuição de Weibull apresenta menor valor de AD, o que sugere que este modelo representa melhor a distribuição de dados de falha analisados quando comparado à representação das outras distribuições incluídas na análise.

Os resultados de *P-value*, no entanto, demonstram que, a hipótese H_0 de que os dados seguem as distribuições avaliadas, pode ser rejeitada, uma vez que para todas as distribuições paramétricas o resultado esteve abaixo de 0,05. Segundo Falcetta (2000), quando o ajuste dos dados de acionamento de garantia não se adapta bem aos modelos de distribuições estatísticas, pode-se utilizar o modelo que seja mais útil para fins de análises e discussões. Dentre as distribuições paramétricas analisadas, a distribuição Weibull, por apresentar um *P-value* mais próximo de 0,05, representaria melhor os dados de falha da amostra em uma análise paramétrica.

- b) “Gráfico > Gráfico de probabilidade > [caixa de diálogo: único]”: Neste caminho, a análise é realizada individualmente em cada distribuição, devendo ser selecionada na caixa de diálogo da Figura 32, no botão “Distribuição”. Neste caminho, os resultados são os mesmos apresentados pelo caminho ‘a’.

Figura 32 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para verificação de aderência à distribuições estatísticas no MINITAB® através do caminho ‘b’



- c) E, por último, o caminho “**Estat > Confiabilidade/Sobrevivência > Análise de distribuição (Censura à direita) > Gráfico de Identificação de Distribuição**”: A Figura 33 demonstra esse passo a passo e a Figura 34 o preenchimento da posterior caixa de diálogo.

Figura 33 - Passo a passo ‘c’ para a verificação de aderência a distribuições estatísticas no MINITAB®

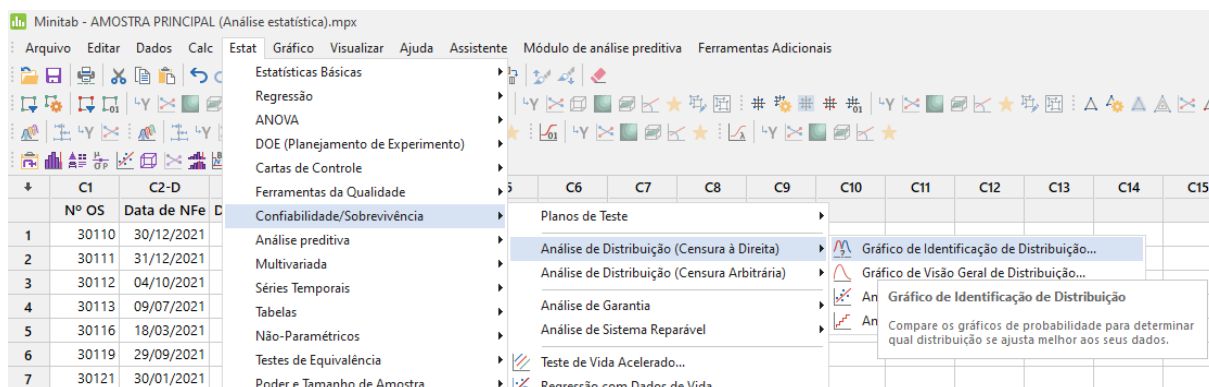
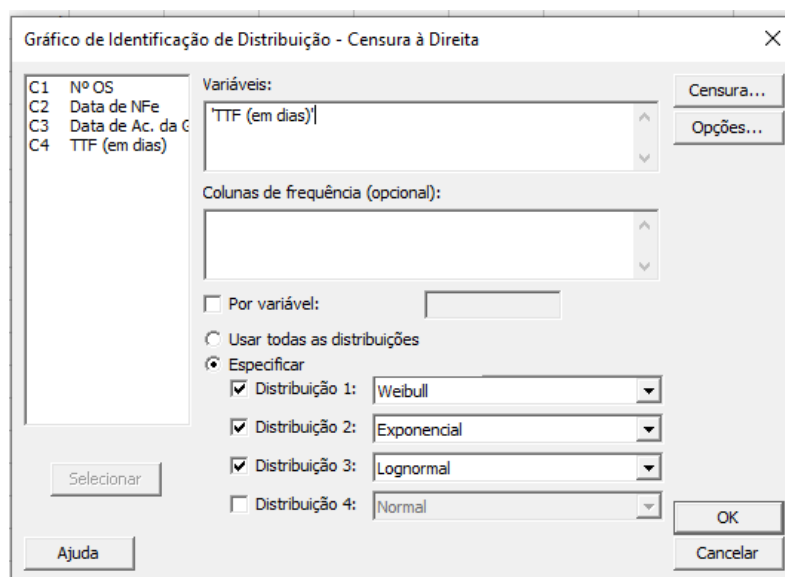
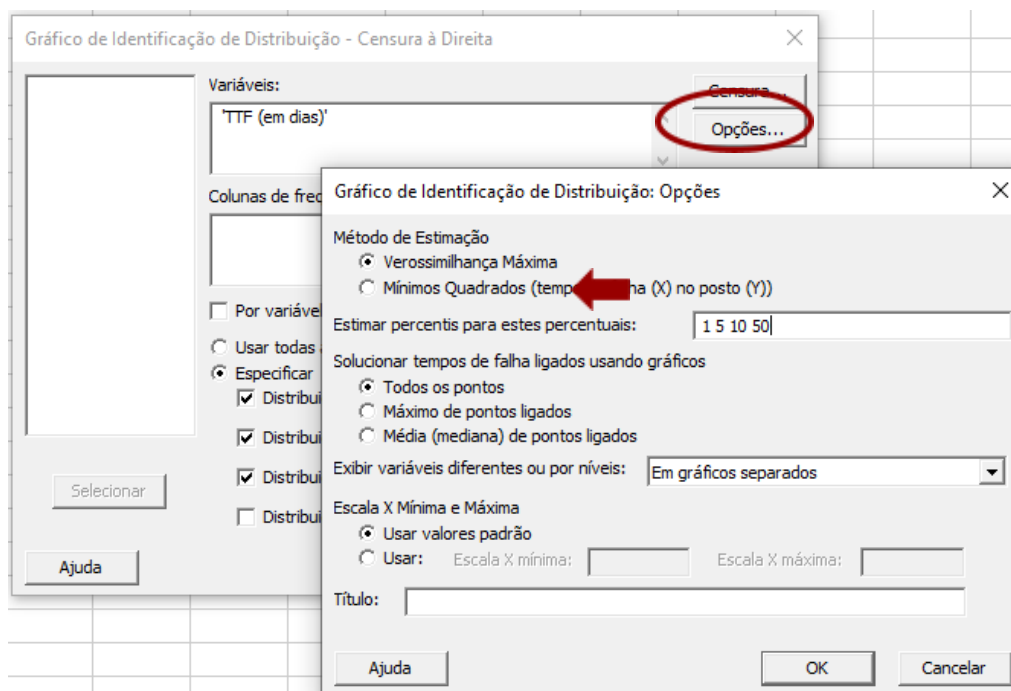


Figura 34 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para verificação de aderência a distribuições estatísticas no MINITAB® através do caminho ‘c’



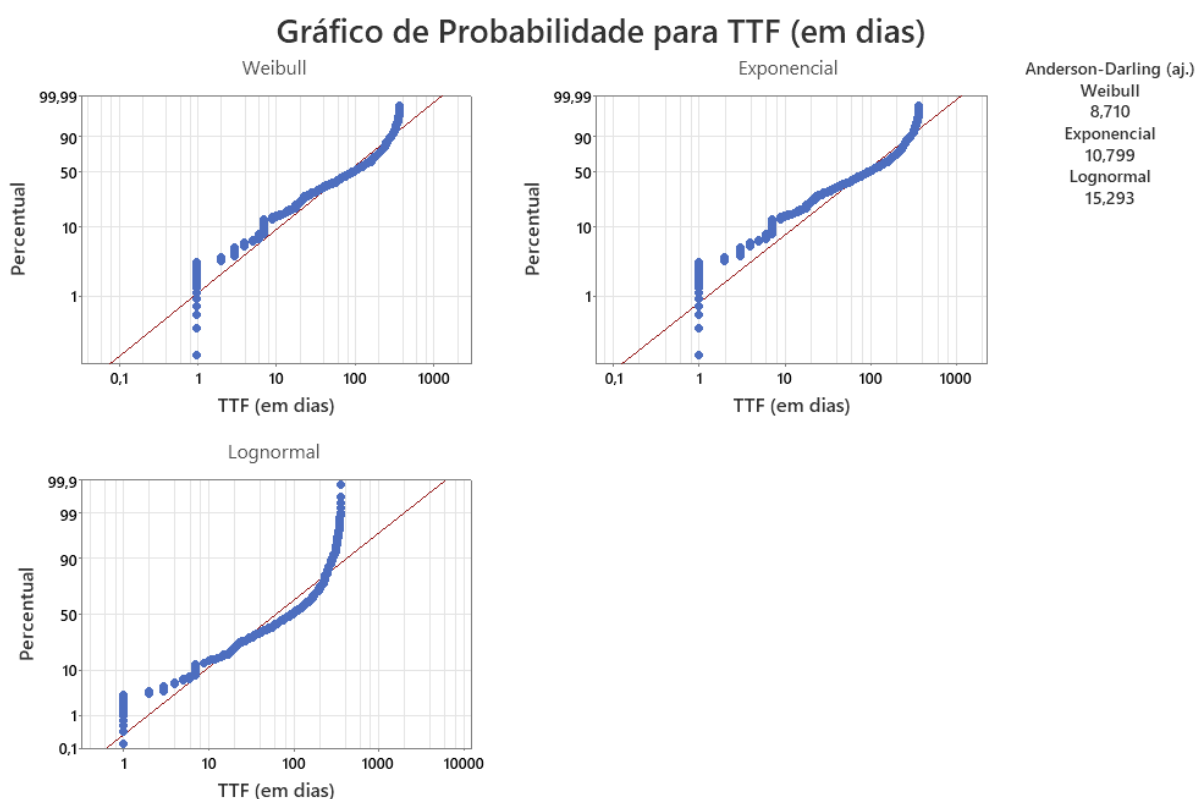
No botão “opções”, para esta pesquisa, o método de estimação escolhido foi a MLE. O preenchimento dessa caixa de diálogo pode ser visualizado na Figura 35.

Figura 35 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo no botão “Opções”



Os resultados de qualidade de ajuste gerados por esse caminho podem ser visualizados na Figura 36, juntamente com os gráficos (Papel de Probabilidade). O caminho ‘c’ não demonstra resultados de *P-value*.

Figura 36 - Resultados gráficos gerados pelo passo a passo ‘c’ para a verificação de aderência à distribuição



Nota-se por meio da avaliação visual do resultado gráfico “Papel da Probabilidade”, que o comportamento dos dados de falha se ajusta melhor ao modelo de distribuição Weibull.

Neste caminho, no entanto, nota-se uma variação do resultado do teste de Anderson-Darling (AD) apenas para a distribuição Weibull, sendo dessa vez de 8,710 em vez de 8,737 (resultado obtido nos caminhos anteriores). Essa diferença pode ser explicada pela consideração da censura neste caminho, o que pode alterar a equação de Máxima Verossimilhança e consequentemente os valores de Anderson-Darling (AD), que são dependentes dos valores estimados na MLE, conforme o Capítulo 2.

Quanto a alteração do valor apenas para a distribuição Weibull, pode ter ocorrido devido à sensibilidade e maior complexidade em termos de ajuste de parâmetros, especialmente quando comparada às distribuições Exponencial e Lognormal. Isso ocorre porque, diferente das outras duas distribuições, a Weibull considera como parâmetros

principais a forma e a escala da distribuição, e pequenos ajustes nesses parâmetros podem ter um impacto significativo na adequação da distribuição aos dados.

Como visto no Capítulo 2, a distribuição Exponencial é um caso especial da Weibull com o parâmetro de forma igual a 1, o que simplifica seu ajuste e torna menos provável que diferentes métodos resultam em variações significativas no valor de AD. A Lognormal também tem dois parâmetros, mas sua função de distribuição cumulativa e a transformação logarítmica dos dados podem resultar em menor sensibilidade a pequenos ajustes nos parâmetros comparado à Weibull.

Ainda assim, no que diz respeito à modelagem paramétrica dos dados de falha, as análises realizadas por meio do valor de AD e *P-value* (nos outros caminhos), sugerem a distribuição Weibull como sendo a que mais representa o comportamento desses dados. Sendo assim, na modelagem paramétrica, a distribuição Weibull foi adotada para modelar os dados e estimar assim os índices de confiabilidade.

4.1.3. Condução dos cálculos

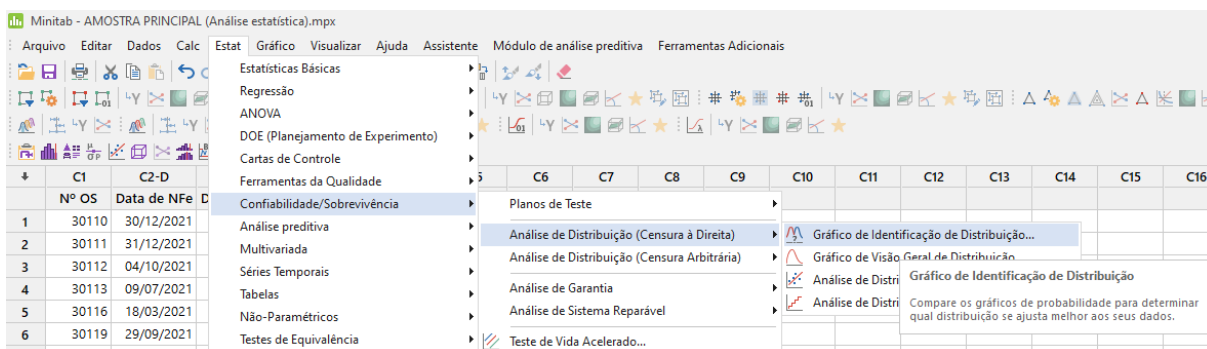
Com os resultados da análise anterior, pôde ser observada a dificuldade de ajuste dos dados de falha de falha em campo obtidos por meio dos dados de falha acionamento de garantia aos modelos paramétricos, o que vai de encontro com a teoria vista no Capítulo 2. Dessa forma, a condução dos cálculos será realizada também utilizando modelagem não-paramétrica, posterior à condução da modelagem paramétrica.

4.1.3.1. *Utilizando modelagem paramétrica*

Ainda no *software* MINITAB®, foram realizados os cálculos estatísticos. Após identificada a distribuição Weibull como a que melhor representa os dados, os resultados foram obtidos seguindo os seguintes passos: **“Estat > Confiabilidade/Sobrevivência > Análise de Distribuição (censura à direita) > Gráfico de Visão Geral de Distribuição”**.

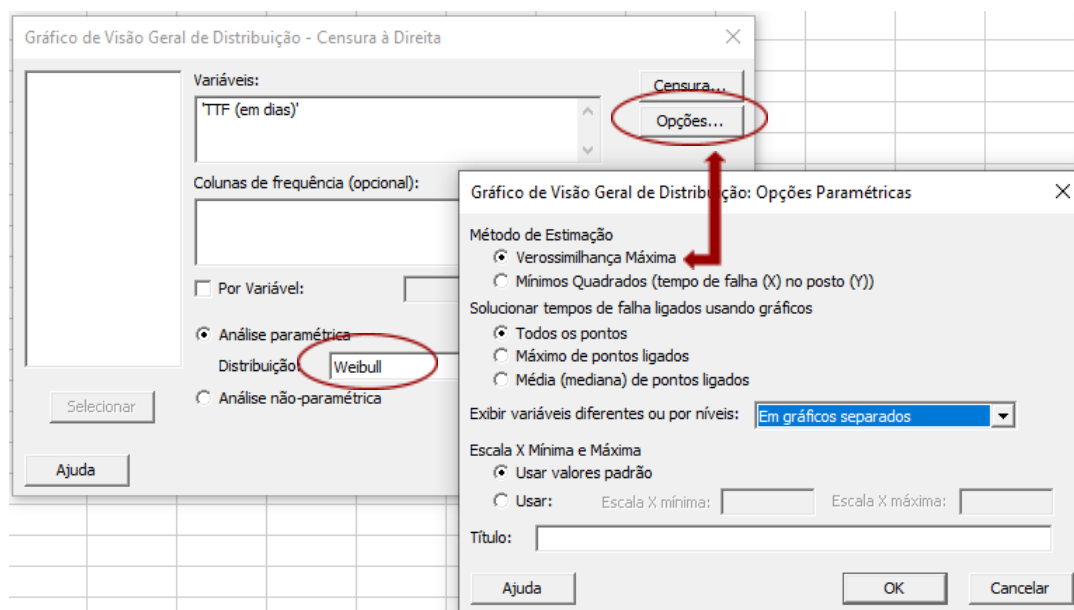
A Figura 37 demonstra esse caminho.

Figura 37 - Passo a passo para análise dos cálculos pela distribuição Weibull



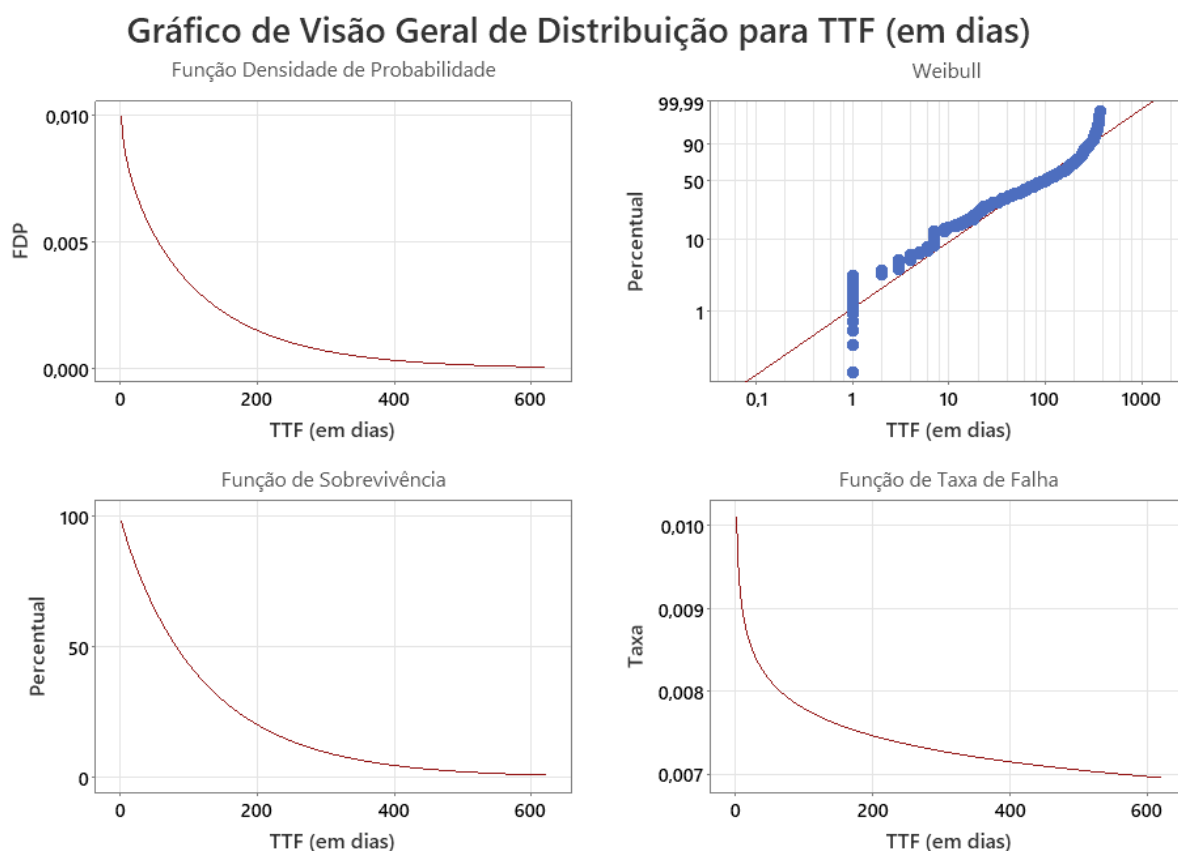
Na caixa de diálogo, no botão “opções”, o método de estimação foi escolhido como sendo MLE. A Figura 38 demonstra o preenchimento da caixa de diálogo.

Figura 38 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo análise dos cálculos pela distribuição Weibull



Feito isso, os resultados gráficos dos cálculos estatísticos foram gerados e podem ser visualizados na Figura 39.

Figura 39 - Resultados gráficos da estimação de índices de confiabilidade pelo modelo Weibull



No conjunto de gráficos da Figura 39 é possível observar os resultados da Função Densidade de Probabilidade (FDP ou $f(t)$), da Função de Confiabilidade ($R(t)$) (denominada na figura como Função de Sobrevivência) e da Taxa de Falha ($h(t)$), calculadas com base nos parâmetros dos dados de falha estimados pelo modelo Weibull. A Tabela 15 demonstra os valores gerados pelos cálculos. A discussão desses resultados será feita posteriormente, no tópico 4.4 deste capítulo.

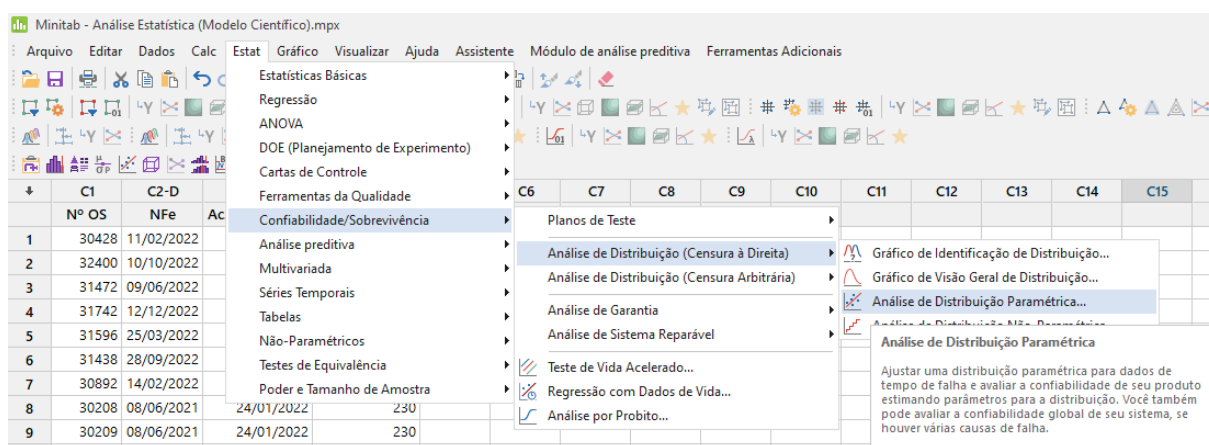
Tabela 15 - Resultados gerados pela estimação por Weibull

**MTTF = 125,38 dias Desvio Padrão = 133,761 Mediana = 82,3689						
TTF (em dias) aleatório do MINITAB ®	R(t)	R(t)(%)	Taxa de Falha	Taxa de Falha (%)	FDP	FDP (%)
1	74,2208	74,2%	0,0104452	1,04%	0,0099472	0,99%
34	56,8973	56,9%	0,0083461	0,83%	0,0061576	0,62%
66	43,9843	44,0%	0,0080013	0,80%	0,00453	0,45%
99	34,1834	34,2%	0,0078047	0,78%	0,0034178	0,34%
131	26,6702	26,7%	0,0076676	0,77%	0,0026106	0,26%
164	20,8723	20,9%	0,0075628	0,76%	0,0020097	0,20%

197	16,376	16,4%	0,0074781	0,75%	0,0015557	0,16%
229	12,8759	12,9%	0,0074072	0,74%	0,0012094	0,12%
262	10,1426	10,1%	0,0073463	0,73%	0,0009433	0,09%
294	8,00272	8,0%	0,0072929	0,73%	0,0007379	0,07%
327	6,32354	6,3%	0,0072455	0,72%	0,0005786	0,06%
360	5,00331	5,0%	0,0072029	0,72%	0,0004546	0,05%
392	3,9635	4,0%	0,0071642	0,72%	0,0003578	0,04%
425	3,14327	3,1%	0,0071288	0,71%	0,0002821	0,03%
457	2,49534	2,5%	0,0070961	0,71%	0,0002228	0,02%
490	1,98286	2,0%	0,0070658	0,71%	0,0001762	0,02%
523	1,57703	1,6%	0,0070376	0,70%	0,0001394	0,01%
555	1,25531	1,3%	0,0070113	0,70%	0,0001105	0,01%
588	74,2208	74,2%	0,0069865	0,70%	0,0000877	0,01%
620	56,8973	56,9%	0,0069631	0,70%	0,0000696	0,01%

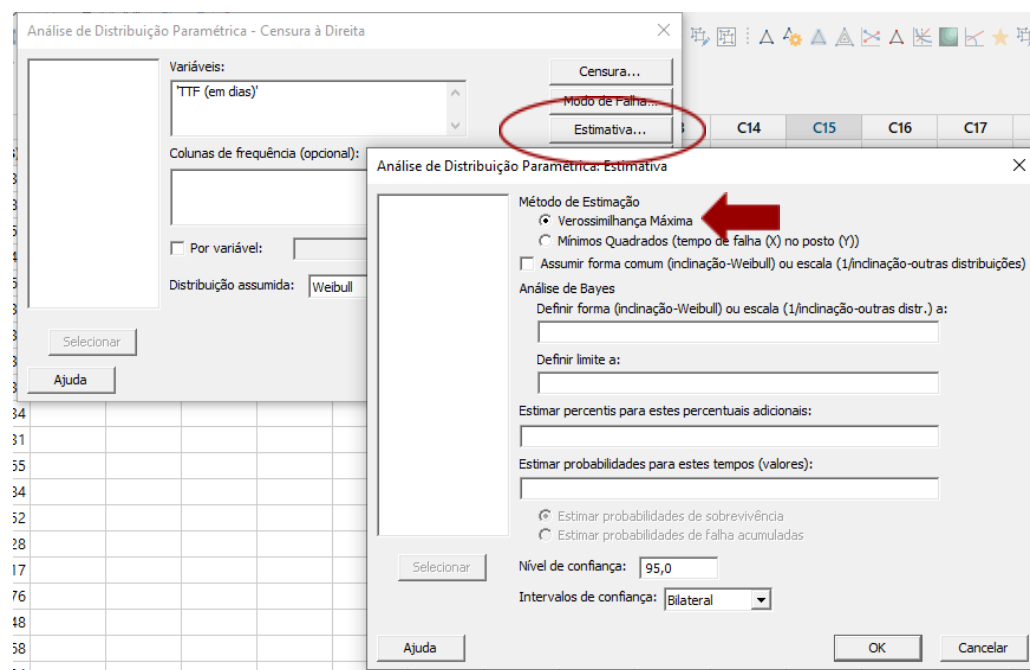
Outro caminho para obtenção dos mesmos resultados pode ser feito no seguinte caminho: **“Estat > Confiabilidade/Sobrevivência > Análise de Distribuição Paramétrica (Censura à Direita) > Análise de Distribuição Paramétrica”**. Para esta pesquisa, a única diferença nesse caminho está na possibilidade de obtenção do Gráfico de Falhas Acumuladas (F(t)). A Figura 40 demonstra esse caminho.

Figura 40 - Outro passo a passo para análise dos cálculos pela distribuição Weibull



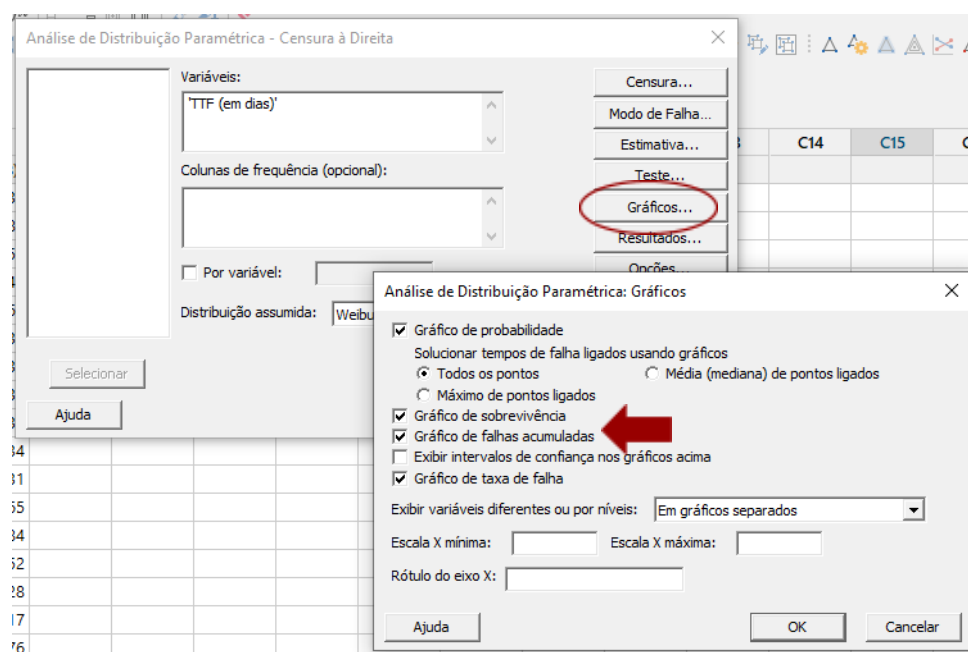
Na caixa de diálogo, no botão “estimativa” é selecionada a opção MLE. A Figura 41 demonstra o preenchimento da caixa de diálogo.

Figura 41 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo análise dos cálculos pela distribuição Weibull



A opção de verificar o Gráfico de Falhas Acumuladas pode ser visualizada a seguir, na Figura 42.

Figura 42 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para cálculos de Falhas Acumuladas pela distribuição Weibull



As Figuras 45 e 46 apresentam o preenchimento realizado na caixa de diálogo, onde foram selecionados o tipo de estimativa e a apresentação de resultados gráficos.

Figura 45 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para cálculos pelo método Kaplan-Meier

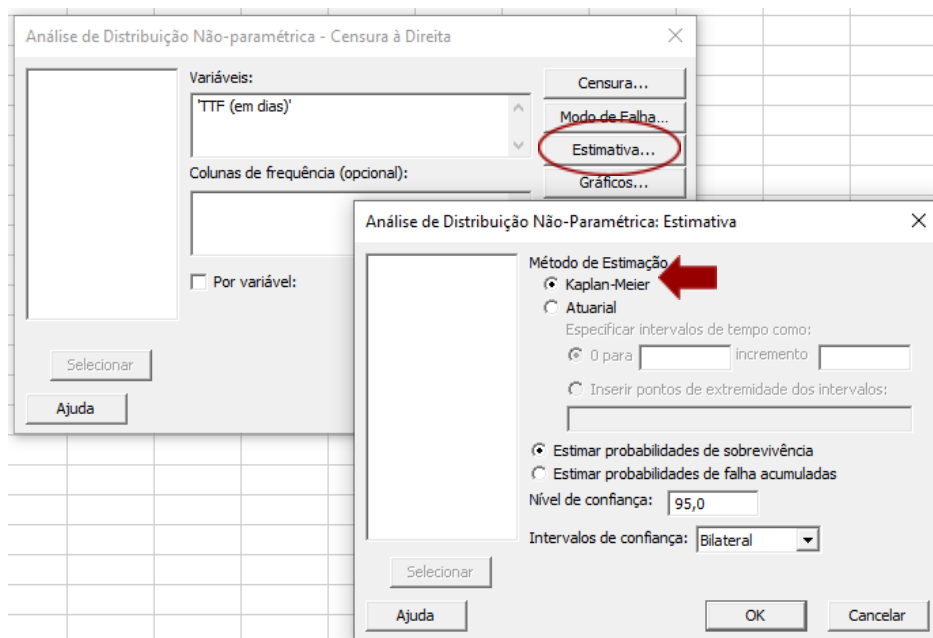
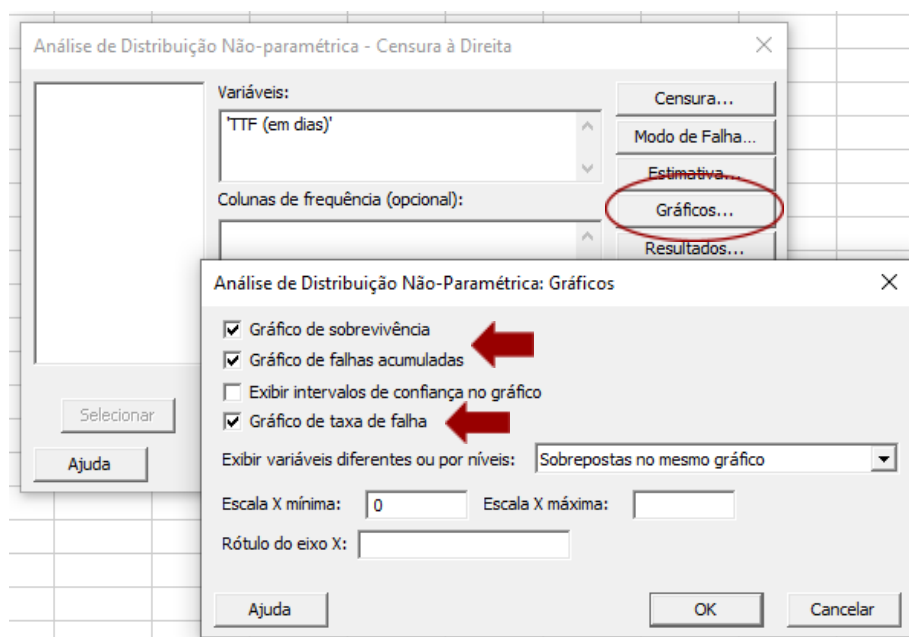


Figura 46 - Passo a passo para preenchimento da caixa de diálogo para cálculos pelo método Kaplan-Meier



Os resultados gerados podem ser visualizados na Tabela 16, posteriormente os resultados gráficos podem ser visualizados nas Figuras 47, 48 e 49. A discussão dos resultados será conduzida posteriormente, no tópico 4.4 deste capítulo.

Tabela 16 - Resultados de confiabilidade gerados pelo método Kaplan-Meier

**MTTF = 124,937 dias				
Tempo (em dias) Aleatório do MINITAB®	Nº Sob Risco	Prob. de Sobrevivência	Sobrevivência em %	Erro Padrão
1	507	0,968442	96,84%	0,0077641
12	432	0,848126	84,81%	0,0159392
30	361	0,708087	70,81%	0,0201914
60	304	0,593688	59,37%	0,0218125
90	261	0,512821	51,28%	0,0221985
179	163	0,315582	31,56%	0,0206401
181	160	0,313609	31,36%	0,0206052
271	66	0,128205	12,82%	0,0148476
324	28	0,053254	5,33%	0,0099722
340	16	0,027613	2,76%	0,0072774
365	2	0,001972	0,20%	0,0019704
366	1	0	0,00%	0,0000000

Figura 47 - Resultado gráfico de confiabilidade gerados pelo método Kaplan-Meier

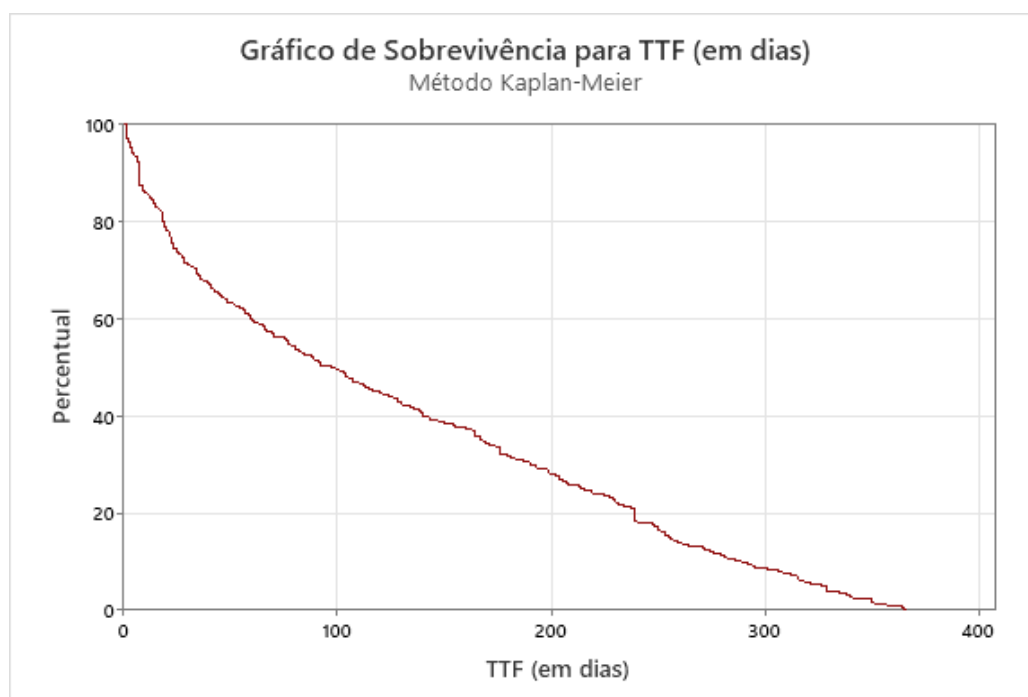
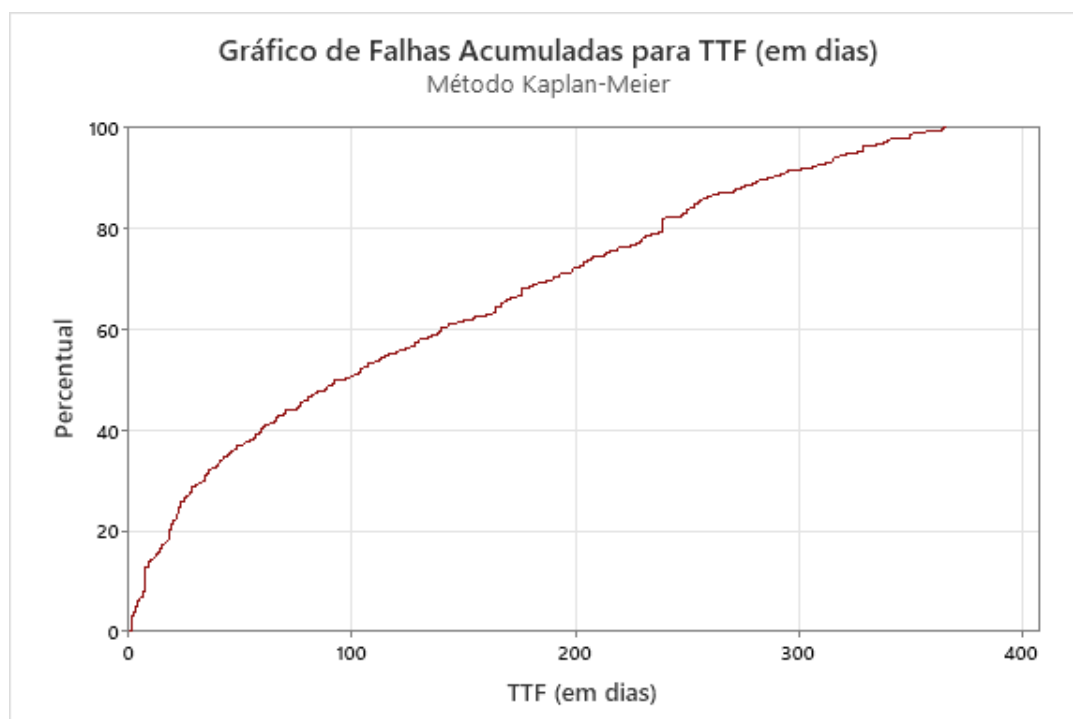


Figura 48 - Resultado gráfico de Taxa de Falha gerados pelo método Kaplan-Meier



Figura 49 - Resultado gráfico de Falhas Acumuladas gerados pelo método Kaplan-Meier



4.2. CONDUÇÃO DA MODELAGEM NO SOFTWARE RSTUDIO

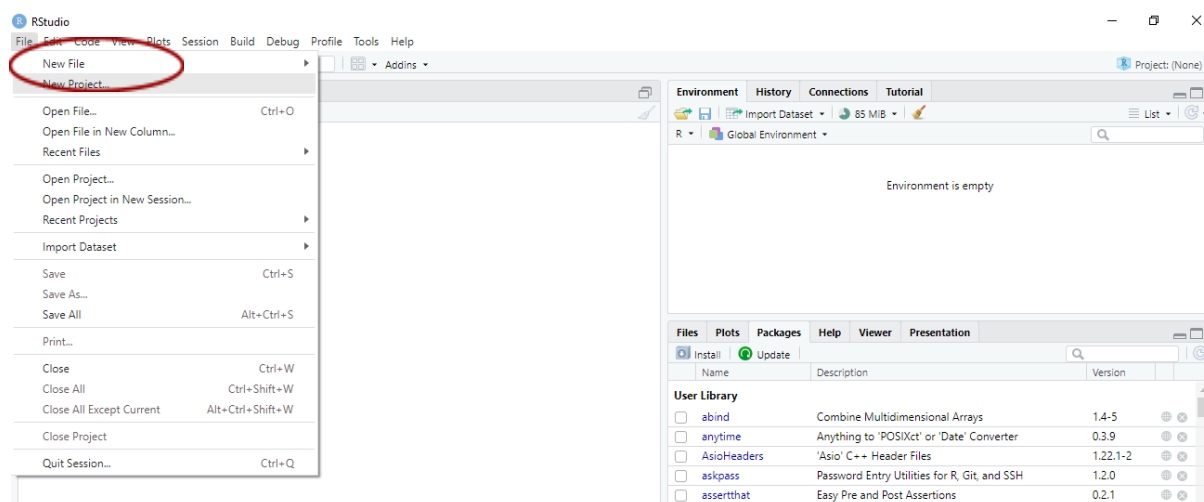
Considerando que o *software* MINITAB® não é gratuito e que um dos principais motivos para a proposta de realizar a avaliação de confiabilidade com dados de acionamento de garantia é o custo acessível, demonstra-se uma forma gratuita de realizar as mesmas análises estatísticas utilizando o *software* gratuito RStudio. O *Script* completo utilizado nesta análise pode ser visualizado no Anexo 1.

Com base nas instruções obtidas principalmente pelo material didático disponibilizado *online* pelo departamento de estatística da UFMG, mencionado no Capítulo 2, e nas referências acadêmicas citadas sobre a linguagem R, a condução da análise foi realizada seguindo o mesmo passo a passo da análise anterior. Isso inclui a verificação das estatísticas descritivas do conjunto de dados, a realização do teste de ajuste às distribuições estatísticas paramétricas para escolher a que melhor representa o conjunto de dados, o cálculo dos índices de confiabilidade com o modelo paramétrico, e o cálculo dos índices de confiabilidade com o modelo não-paramétrico Kaplan-Meier.

Após a instalação do R e o RStudio no computador (instruções no Capítulo 2), foram organizados os dados de falha em uma planilha. A planilha foi salva em formato de arquivo ‘.csv’ em uma pasta no disco local do computador onde o RStudio foi instalado.

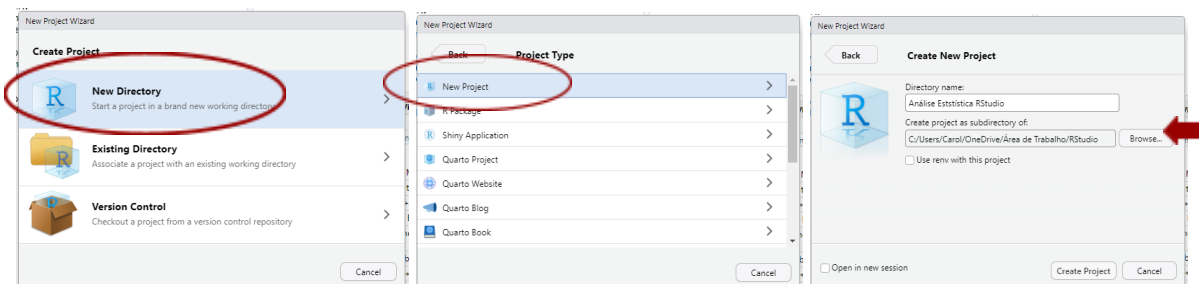
Em seguida, abrindo o RStudio, foi criado um novo projeto através da aba ‘Files’, como demonstra a Figura 50.

Figura 50 - Passo a passo para criar um novo projeto no RStudio



Na caixa de diálogo aberta após a ação anterior, criou-se um novo diretório (Figura 51 [a]) e um novo projeto (Figura 51 [b]). Nesta hora, foi necessário nomear o projeto e escolher o local onde os resultados da análise estatística serão salvos (Figura 51 [c]).

Figura 51 - Passo a passo para preenchimento das caixas de diálogo para criar novo projeto no RStudio

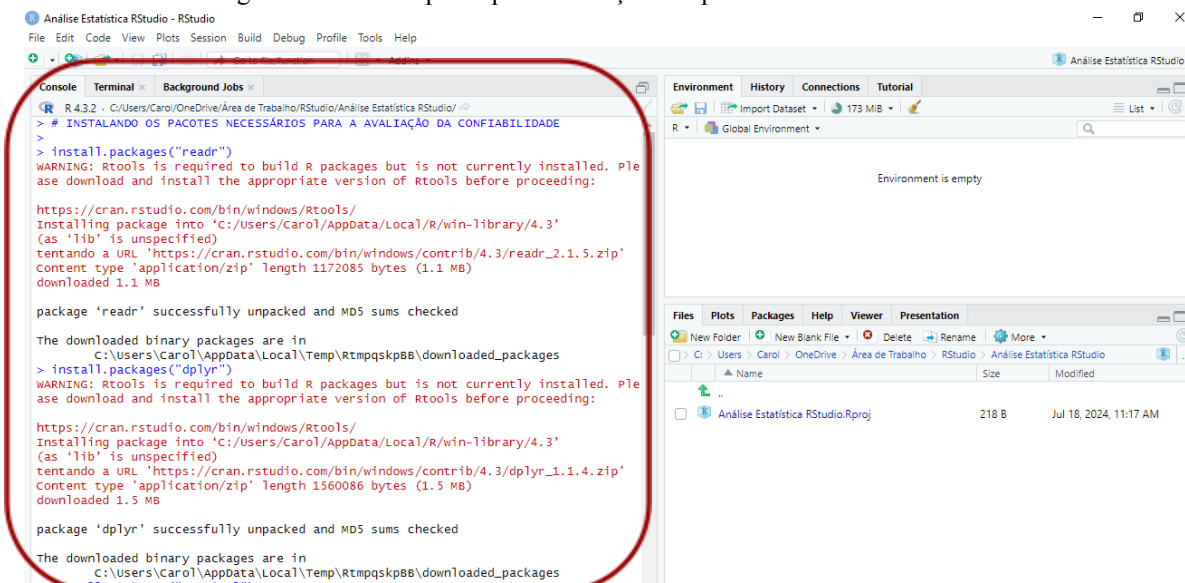


Feito isso, iniciou-se então as ações, instalando os pacotes necessários para a condução dos passos de avaliação da confiabilidade. São eles:

- **readr**: necessário para a leitura dos dados;
- **dplyr**: necessário para manipulação da base de dados;
- **survival**: necessário para elaboração de curvas de sobrevivência, até mesmo pelo modelo não-paramétrico Kaplan-Meier;
- **flexsurv**: necessário para a realização de ajuste de modelos paramétricos flexíveis aos dados de tempo;
- **ggplot2**: realiza a construção de gráficos;
- **psych**: realiza a demonstração das estatísticas descritivas dos dados;
- **fitdistrplus**: necessário para ajuste de distribuição para dados censurados ou não censurados.

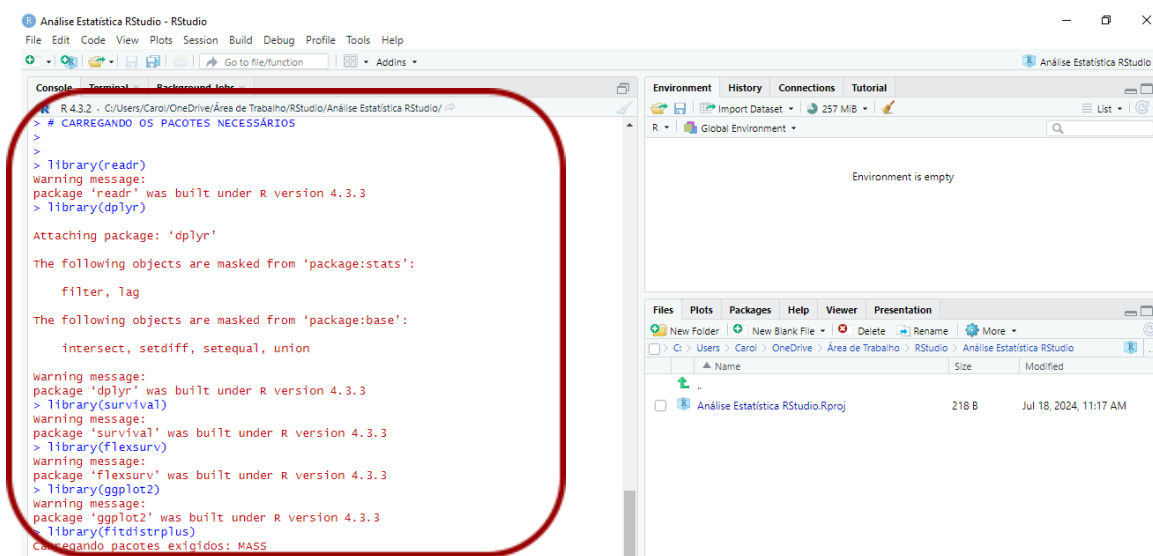
A instalação foi realizada escrevendo e executando o comando `'install.packages()'` do R, para cada pacote. A Figura 52 demonstra um exemplo desta etapa.

Figura 52 - Passo a passo para instalação dos pacotes necessários no RStudio



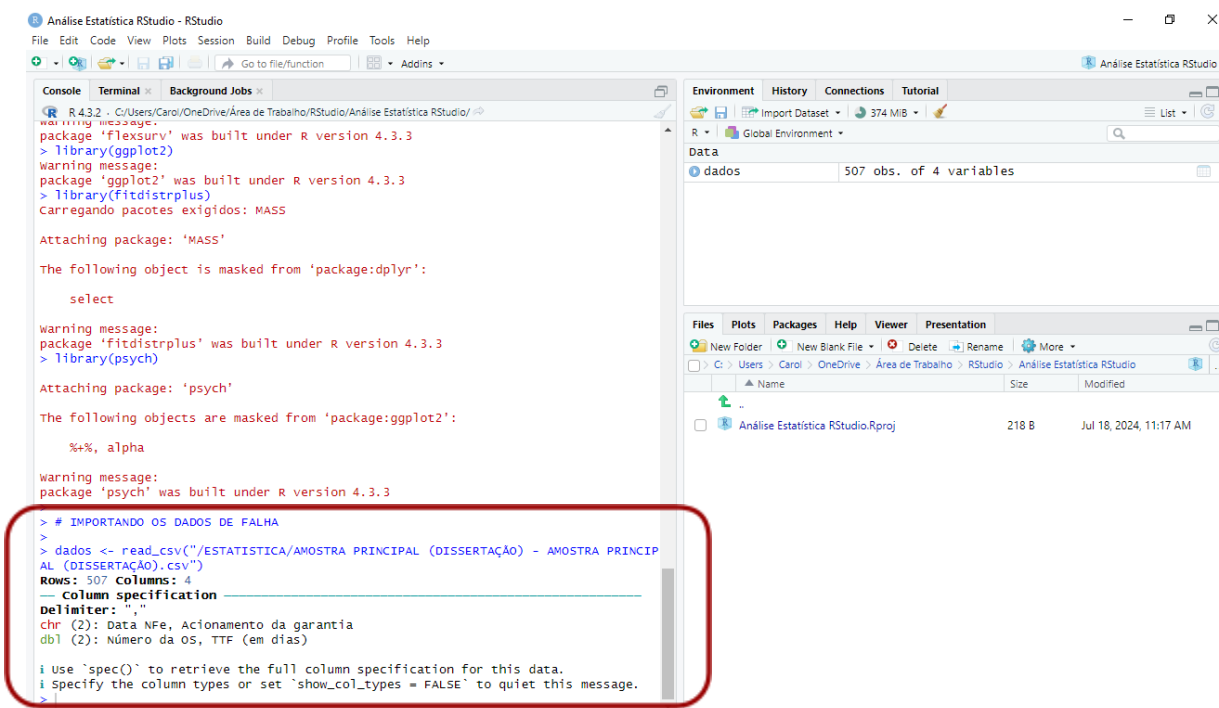
Em seguida, os pacotes instalados foram carregados através da execução do comando ‘library()’ do R, para todos os pacotes, conforme a Figura 53 ilustra.

Figura 53 - Passo a passo para carregar os pacotes necessários no RStudio



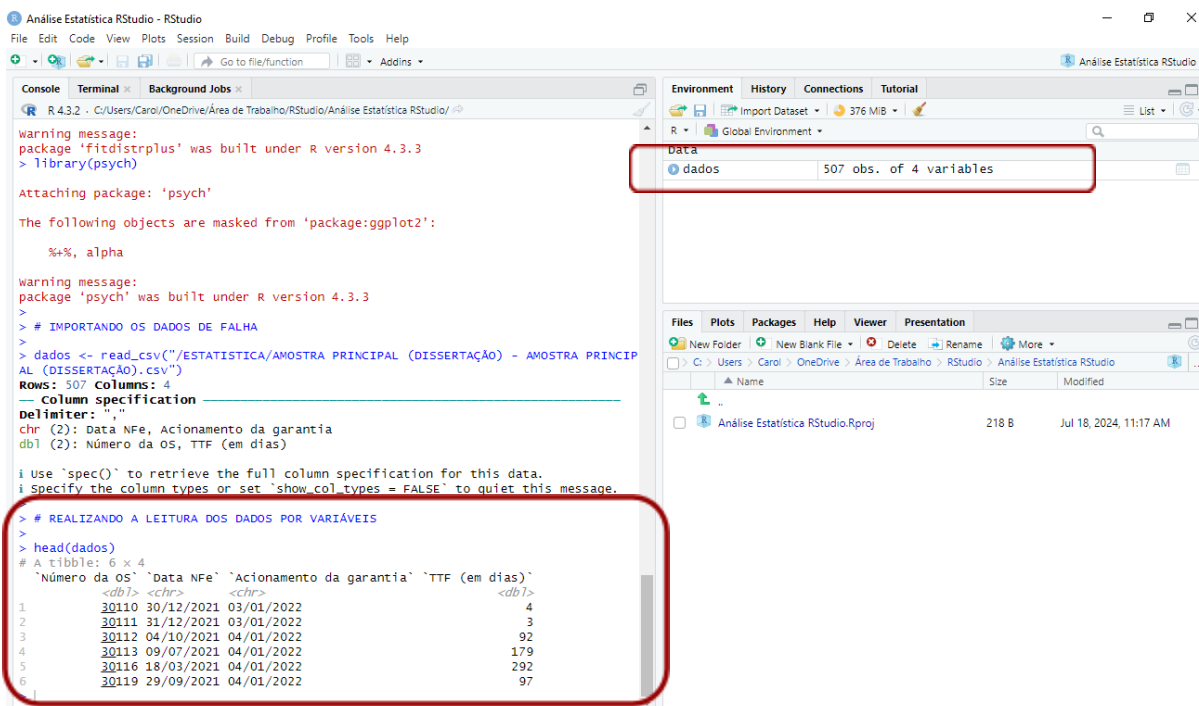
Com os pacotes instalados e carregados o comando ‘read_csv()’, do pacote ‘readr’ foi executado da seguinte forma: ‘dados <- read_csv("caminho/para/o/arquivo/dados.csv")’. Este comando irá importar os dados de falha que serão analisados em uma pasta chamada ‘dados’ no RStudio . A Figura 54 demonstra a execução do comando.

Figura 54 - Execução do comando 'read_csv' no RStudio



Em seguida, o comando 'head()', do R, foi executado da seguinte forma: 'head(dados)'. Este comando realiza a leitura das variáveis do arquivo .csv salvo na pasta 'dados' criada no RStudio anteriormente, por variáveis (Figura 55). Pode-se perceber na Figura 54 e 55, que os 507 dados de falha desta pesquisa foram distribuídos em 4 variáveis (Nº de OS; Data NFe; Acionamento de garantia e TTF (em dias)), conforme nomeado no arquivo .csv. Esta mesma figura também demonstra a execução desse passo a passo.

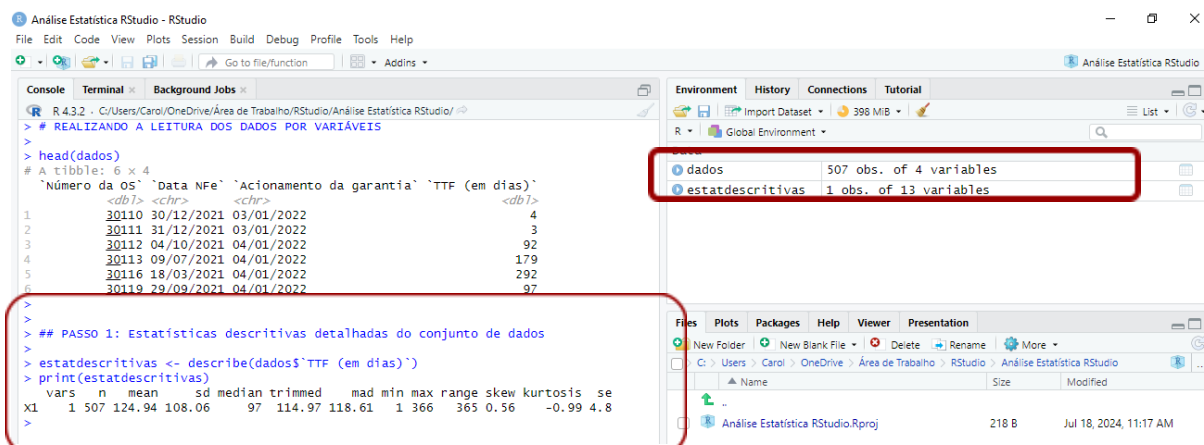
Figura 55 - Passo a passo para armazenamento dos dados no RStudio



4.2.1. Estatísticas descritivas

A obtenção das estatísticas descritivas foi conduzida escrevendo e executando o comando 'describe()', do pacote 'psych'. O comando foi executado da seguinte forma: **estatdescritivas <- describe(dados\$`TTF (em dias)`)**. Para visualizar os resultados gerados, o comando print() foi executado. A Figura 56 demonstra a etapa.

Figura 56 - Passo a passo para condução no RStudio



4.2.2. Utilizando modelagem paramétrica

4.2.2.1. Escolha da distribuição estatística

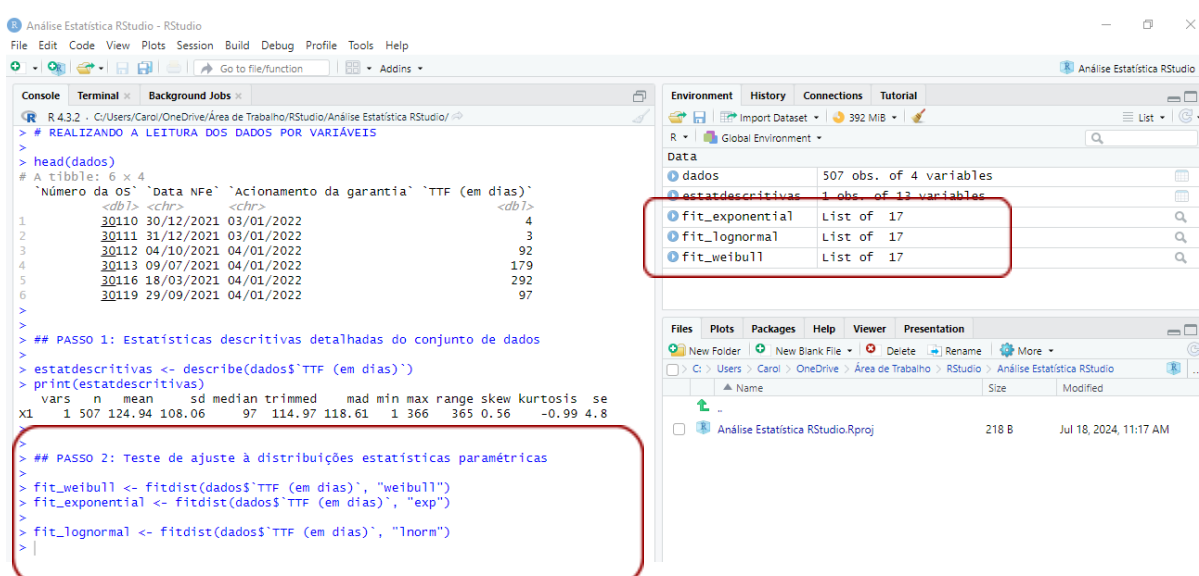
Prosseguiu-se, então, para a condução do teste de ajuste às distribuições paramétricas. O teste de ajuste foi conduzido usando o pacote ‘fitdistrplus’.

Escrevendo e executando os comandos a seguir, o RStudio realizar essa verificação para as distribuições Weibull, Exponencial e Lognormal, respectivamente, e assim foi feito:

- i. `fit_weibull <- fitdist(dados$`TTF (em dias)`,"weibull")`
- ii. `fit_exponential <- fitdist(dados$`TTF (em dias)`,"exp")`
- iii. `fit_lognormal <- fitdist(dados$`TTF (em dias)`,"lnorm")`

A Figura 57 demonstra a execução dos comandos.

Figura 57 - Resultado do comando ‘fitdist()’ do pacote ‘fitdistrplus’ na condução no RStudio



Pôde-se, então, comparar os ajustes realizados, escrevendo e executando o comando ‘gofstat()’ do mesmo pacote, da seguinte forma: ‘`gofstat(list(fit_weibull, fit_exponential, fit_lognormal))`’. O resultado pelo pacote é dado para testes de ajustes distintos pelo estimador MLE, incluindo o teste de Anderson-Darling (AD). Foi possível verificar que, assim como nas análises anteriores, o valor de AD é menor para a distribuição de Weibull, indicando que esta possui melhor ajuste aos dados do que as demais. Nesta pesquisa não serão discutidas diferenças entre os valores de AD da análise com MINITAB e da análise com RStudio. A Figura 58 demonstra a saída do comando.

Figura 58 - Resultado do comando 'gofstat()' do pacote 'fitdistrplus' na condução no RStudio

```
> # COMPARANDO OS AJUSTES
>
> gofstat(list(fit_weibull, fit_exponential, fit_lognormal))
Goodness-of-fit statistics
```

	1-mle-weibull	2-mle-exp	3-mle-lnorm
Kolmogorov-Smirnov statistic	0.1023536	0.09973376	0.1208846
Cramer-von Mises statistic	1.3421802	1.55482204	2.4645746
Anderson-Darling statistic	8.7415813	10.86584140	15.3584144

```
Goodness-of-fit criteria
```

	1-mle-weibull	2-mle-exp	3-mle-lnorm
Akaike's Information Criterion	5910.344	5911.398	6038.455
Bayesian Information Criterion	5918.801	5915.627	6046.912

```
> |
```

4.2.2.2. Condução dos cálculos

Partiu-se para a execução do Passo 3, cálculo dos índices de confiabilidade com o modelo paramétrico, adotando a distribuição Weibull na análise para continuar a exemplificação.

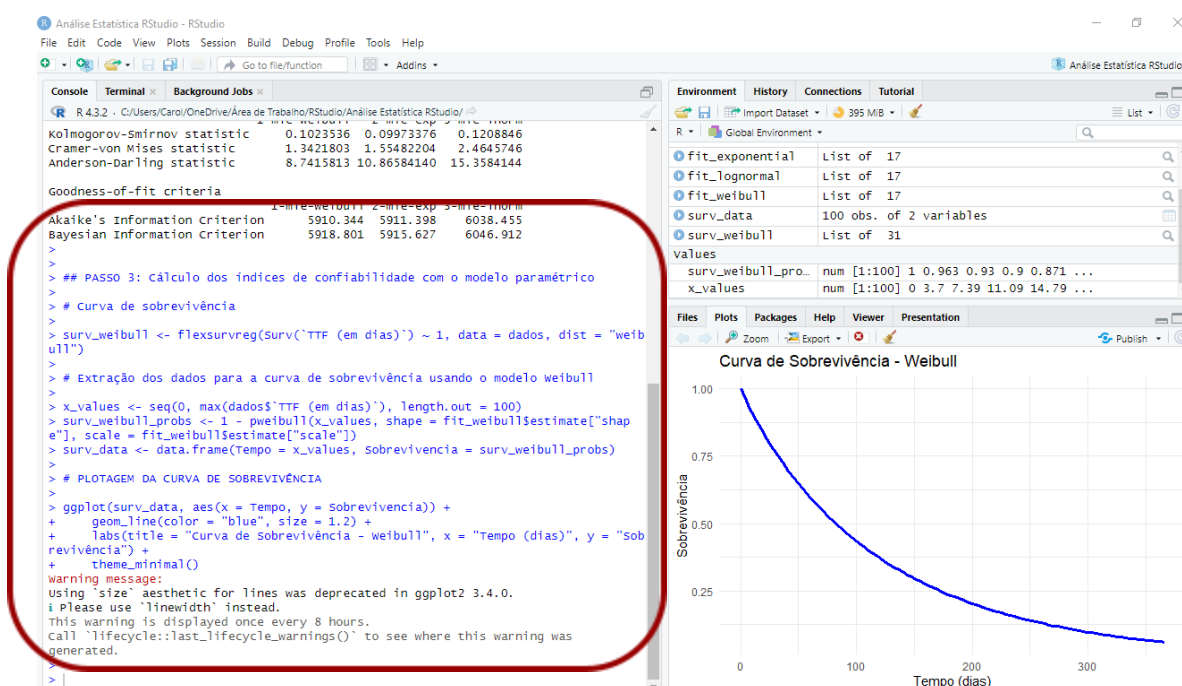
A Curva de Sobrevivência ($R(t)$) foi obtida com o pacote *flexsurv*, escrevendo e executando o comando `flexsurvreg()`, da seguinte forma: **'`surv_weibull <- flexsurvreg(Surv('TTF (em dias)') ~ 1, data = dados, dist = "weibull")`'**. O RStudio irá realizar a análise e armazenar os resultados na pasta '`surv_weibull`'.

Em seguida foi necessário extrair os resultados do comando anterior para a elaboração da Curva de Sobrevivência. Isso foi possível escrevendo e executando o comando: **'`x_values <- seq(0, max(dados$`TTF (em dias)`), length.out = 100) surv_weibull_probs <- 1 - pweibull(x_values, shape = fit_weibull$estimate["shape"], scale = fit_weibull$estimate["scale"]) surv_data <- data.frame(Tempo = x_values, Sobrevivencia = surv_weibull_probs)`'**.

Após isso, através de comandos do pacote *ggplot2*, é possível elaborar a Curva de Sobrevivência por meio da distribuição Weibull. O comando foi executado da seguinte forma: **'`ggplot(surv_data, aes(x = Tempo, y = Sobrevivencia)) + geom_line(color = "blue", size = 1.2) + labs(title = "Curva de Sobrevivência - Weibull", x = "Tempo (dias)", y = "Sobrevivência") + theme_minimal()`'**.

A Figura 59 demonstra a execução dos comandos no RStudio e a Curva de Sobrevivência.

Figura 59 - Execução dos comandos para elaboração da Curva de Sobrevivência ($R(t)$) pela distribuição Weibull no RStudio

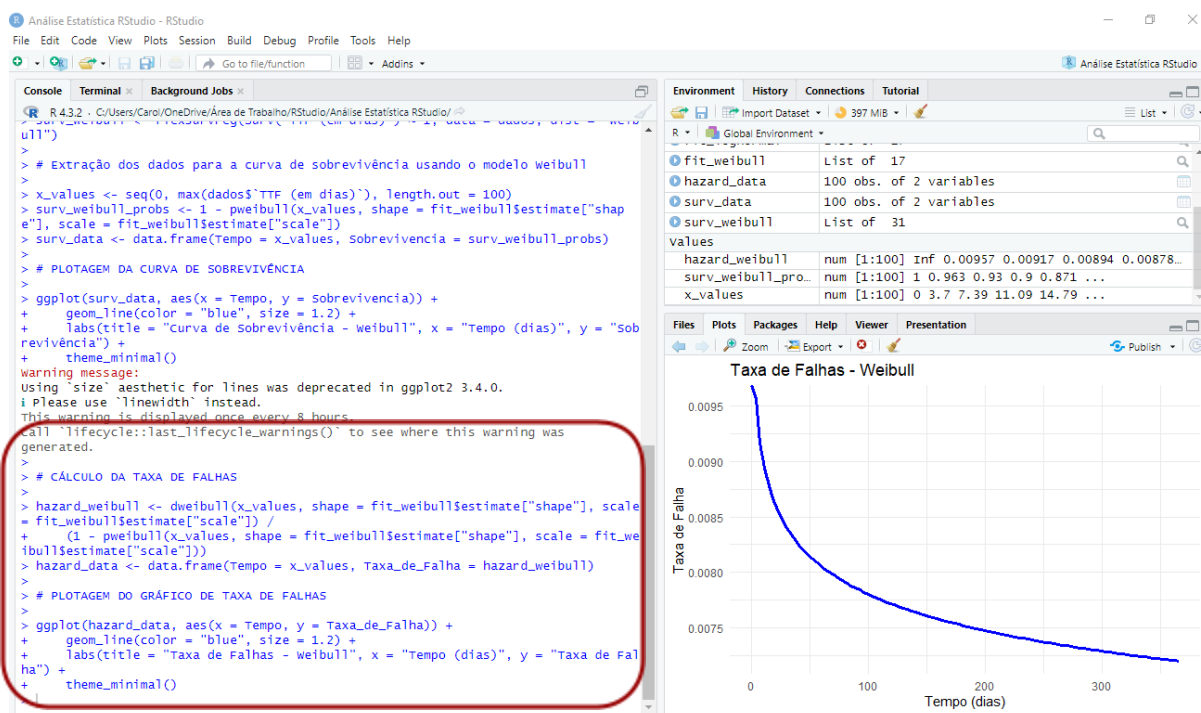


Da mesma forma, os gráficos de Taxa de Falha ($h(t)$) puderam ser obtidos escrevendo e executando os comandos a seguir:

- Cálculo da Taxa de Falha ($h(t)$):** `hazard_weibull <- dweibull(x_values, shape = fit_weibull$estimate["shape"], scale = fit_weibull$estimate["scale"]) / (1 - pweibull(x_values, shape = fit_weibull$estimate["shape"], scale = fit_weibull$estimate["scale"]))`
`hazard_data <- data.frame(Tempo = x_values, Taxa_de_Falha = hazard_weibull)`
- Plotagem do gráfico de Taxa de Falha:** `ggplot(hazard_data, aes(x = Tempo, y = Taxa_de_Falha)) + geom_line(color = "blue", size = 1.2) + labs(title = "Taxa de Falha - Weibull", x = "Tempo (dias)", y = "Taxa de Falha") + theme_minimal()`

A Figura 60 demonstra a execução dos comandos e o gráfico de Taxa de Falha obtido.

Figura 60 - Execução dos comandos para elaboração da Taxa de Falha ($h(t)$) pela distribuição Weibull no RStudio

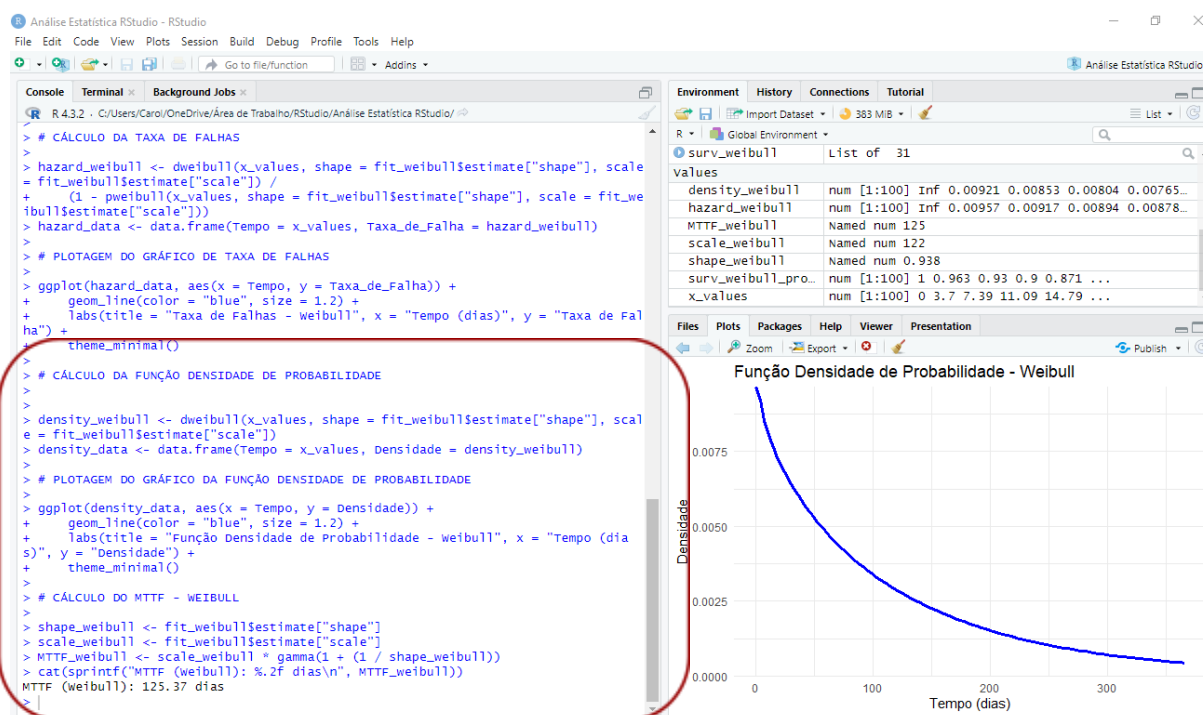


A Função Densidade de Probabilidade ($f(t)$) e o MTTF foram obtidos com os seguintes comandos:

- Cálculo da Função Densidade de Probabilidade (FDP) ($f(t)$):** 'density_weibull <- dweibull(x_values, shape = fit_weibull\$estimate["shape"], scale = fit_weibull\$estimate["scale"]) density_data <- data.frame(Tempo = x_values, Densidade = density_weibull)'.
- Plotagem do gráfico de Função Densidade de Probabilidade:** 'ggplot(density_data, aes(x = Tempo, y = Densidade)) + geom_line(color = "blue", size = 1.2) + labs(title = "Função Densidade de Probabilidade - Weibull", x = "Tempo (dias)", y = "Densidade") + theme_minimal()'.
- Cálculo do MTTF:** 'shape_weibull <- fit_weibull\$estimate["shape"]' e 'scale_weibull <- fit_weibull\$estimate["scale"]' e 'MTTF_weibull <- scale_weibull * gamma(1 + (1 / shape_weibull))' e 'cat(sprintf("MTTF (Weibull): %.2f dias\n", MTTF_weibull))'.

A Figura 61 demonstra a execução dos comandos, juntamente com o resultado de MTTF (125,37 dias) e o gráfico de Função Densidade de Probabilidade obtido.

Figura 61 - Execução dos comandos para elaboração da Função Densidade de Probabilidade (f(t)) pela distribuição Weibull no RStudio e Resultado do MTTF

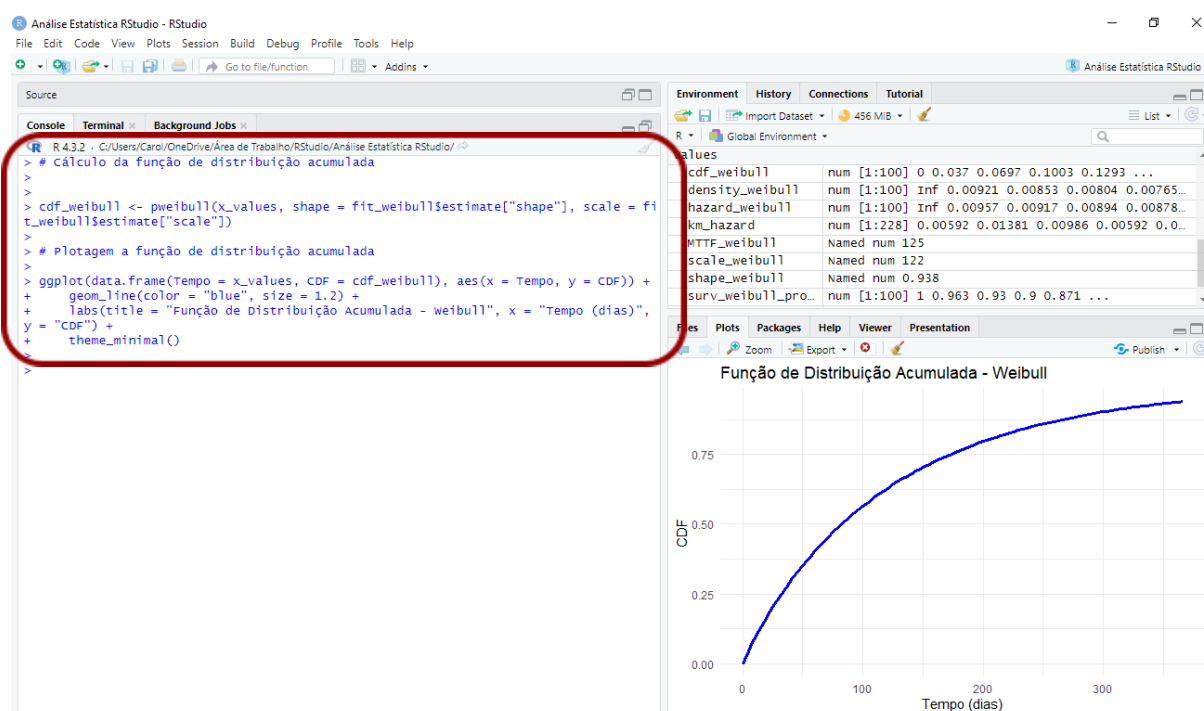


A Função de Distribuição Acumulada (FDA) também foi obtida. O comando executado para obtenção deste resultado foi:

- Cálculo da Função de Distribuição Acumulada (FDA):** `'cdf_weibull <- pweibull(x_values, shape = fit_weibull$estimate["shape"], scale = fit_weibull$estimate["scale"])'.`
- Plotagem da Função de Distribuição Acumulada (FDA):** `'ggplot(data.frame(Tempo = x_values, CDF = cdf_weibull), aes(x = Tempo, y = CDF)) + geom_line(color = "blue", size = 1.2) + labs(title = "Função de Distribuição Acumulada - Weibull", x = "Tempo (dias)", y = "CDF") + theme_minimal()'.`

A Figura 62 demonstra a execução dos comandos e o gráfico de Função Densidade de Probabilidade obtido.

Figura 62 - Execução dos comandos para elaboração da Função de Distribuição Acumulada pela distribuição Weibull no RStudio



4.2.3. Utilizando modelagem não-paramétrica

A condução da análise pelo modelo não-paramétrico Kaplan-Meier foi realizada com a execução dos seguintes comandos:

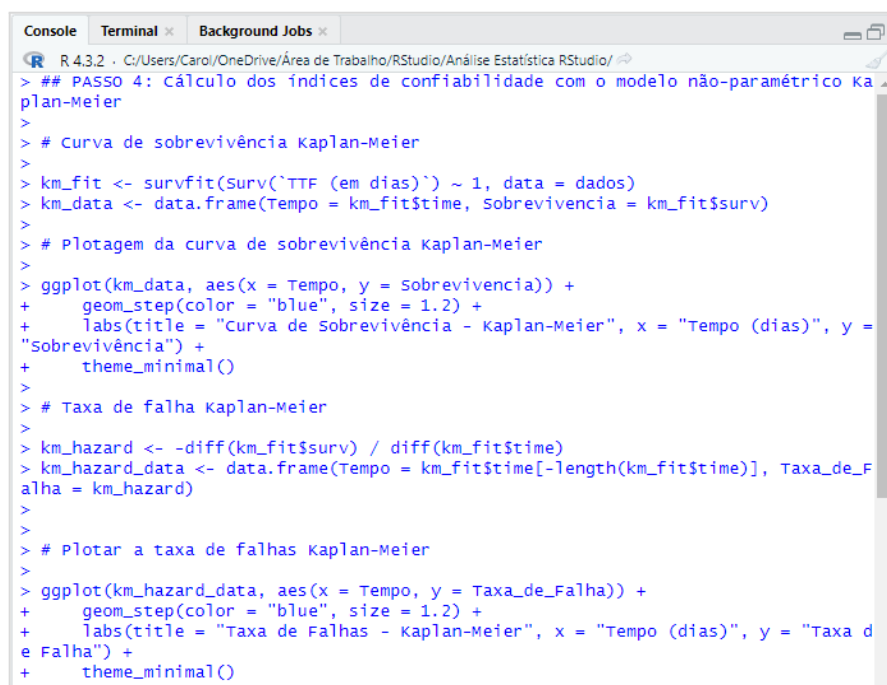
- **Cálculo da Curva de Sobrevivência (R(t)):** 'km_fit <- survfit(Surv('TTF (em dias)') ~ 1, data = dados)' e 'km_data <- data.frame(Tempo = km_fit\$time, Sobrevivencia = km_fit\$surv)'.
- **Plotagem da Curva de Sobrevivência:** 'ggplot(km_data, aes(x = Tempo, y = Sobrevivencia)) + geom_step(color = "blue", size = 1.2) + labs(title = "Curva de Sobrevivência - Kaplan-Meier", x = "Tempo (dias)", y = "Sobrevivência") + theme_minimal()'.
- **Cálculo da Taxa de Falha (h(t)):** 'km_hazard <- -diff(km_fit\$surv) / diff(km_fit\$time)' e 'km_hazard_data <- data.frame(Tempo = km_fit\$time[-length(km_fit\$time)], Taxa_de_Falha = km_hazard)'.
- **Plotagem da Taxa de Falha:** 'ggplot(km_hazard_data, aes(x = Tempo, y = Taxa_de_Falha)) + geom_step(color = "blue", size = 1.2) + labs(title = "Taxa de Falha - Kaplan-Meier", x = "Tempo (dias)", y = "Taxa de Falha") + theme_minimal()'.
- **Cálculo da Função Densidade de Probabilidade (f(t)):** 'pdf_km <- rep(NA, length(km_fit\$time))' e 'pdf_km[1] <- km_fit\$surv[1]' e 'for (i in

```
2:length(km_fit$time)){pdf_km[i] <- (km_fit$surv[i-1] - km_fit$surv[i]) /
(km_fit$time[i-1] - km_fit$time[i])}' e 'pdf_km_data <- data.frame(Tempo =
km_fit$time, PDF = pdf_km)'.
```

- **Plotagem da Função Densidade de Probabilidade:** 'ggplot(pdf_km_data, aes(x = Tempo, y = PDF)) + geom_step(color = "blue", size = 1.2) + labs(title = "Função Densidade de Probabilidade - Kaplan-Meier", x = "Tempo (dias)", y = "PDF") + theme_minimal()'
- **Cálculo da Função de Distribuição Acumulada (FDA):** 'cdf_km <- km_fit\$surv'.
- **Plotagem da Função de Distribuição Acumulada:** 'ggplot(data.frame(Tempo = km_fit\$time, CDF = cdf_km), aes(x = Tempo, y = CDF)) + geom_step(color = "blue", size = 1.2) + labs(title = "Função de Distribuição Acumulada - Kaplan-Meier", x = "Tempo (dias)", y = "CDF") + theme_minimal()'
- **Cálculo do MTTF:** 'MTTF_km <- sum(km_fit\$surv[-length(km_fit\$surv)] * diff(km_fit\$time))' e 'cat(sprintf("MTTF (Kaplan-Meier): %.2f dias\n", MTTF_km))'

A condução deste passo pode ser visualizada na Figura 63, e o Resultado do MTTF por Kaplan-Meier pode ser visualizado na Figura 64. Para não tornar a condução mais extensa, apenas o resultado gráfico da Curva de Sobrevivência, será demonstrado (Figura 65)

Figura 63 - Condução da análise pelo modelo não-paramétrico Kaplan-Meier



```
R 4.3.2 - C:/Users/Carol/OneDrive/Área de Trabalho/RStudio/Análise Estatística RStudio/
> ## PASSO 4: Cálculo dos índices de confiabilidade com o modelo não-paramétrico Ka
plan-Meier
>
> # Curva de sobrevivência Kaplan-Meier
>
> km_fit <- survfit(Surv('TTF (em dias)') ~ 1, data = dados)
> km_data <- data.frame(Tempo = km_fit$time, Sobrevivencia = km_fit$surv)
>
> # Plotagem da curva de sobrevivência Kaplan-Meier
>
> ggplot(km_data, aes(x = Tempo, y = Sobrevivencia)) +
+   geom_step(color = "blue", size = 1.2) +
+   labs(title = "Curva de Sobrevivência - Kaplan-Meier", x = "Tempo (dias)", y =
"sobrevivência") +
+   theme_minimal()
>
> # Taxa de falha Kaplan-Meier
>
> km_hazard <- -diff(km_fit$surv) / diff(km_fit$time)
> km_hazard_data <- data.frame(Tempo = km_fit$time[-length(km_fit$time)], Taxa_de_F
alha = km_hazard)
>
> # Plotar a taxa de falhas Kaplan-Meier
>
> ggplot(km_hazard_data, aes(x = Tempo, y = Taxa_de_Falha)) +
+   geom_step(color = "blue", size = 1.2) +
+   labs(title = "Taxa de Falhas - Kaplan-Meier", x = "Tempo (dias)", y = "Taxa d
e Falha") +
+   theme_minimal()
```

(Continua na próxima página)

(Continuação da Figura 63)

```

Console Terminal Background Jobs
R 4.3.2 - C:/Users/Carol/OneDrive/Área de Trabalho/RStudio/Análise Estatística RStudio/
> # cálculo da função densidade de probabilidade
>
> pdf_km <- rep(NA, length(km_fit$time))
> pdf_km[1] <- km_fit$surv[1]
> for (i in 2:length(km_fit$time)) {
+   pdf_km[i] <- (km_fit$surv[i-1] - km_fit$surv[i]) / (km_fit$time[i-1] - km_fit
+   $time[i])
+ }
> pdf_km_data <- data.frame(Tempo = km_fit$time, PDF = pdf_km)
>
> # Plotagem da função densidade de probabilidade
>
> ggplot(pdf_km_data, aes(x = Tempo, y = PDF)) +
+   geom_step(color = "blue", size = 1.2) +
+   labs(title = "Função Densidade de Probabilidade - Kaplan-Meier", x = "Tempo
+   (dias)", y = "PDF") +
+   theme_minimal()
>
> # Cálculo da função de distribuição acumulada
>
> cdf_km <- km_fit$surv
>
> # Plotagem da função de distribuição acumulada
>
> ggplot(data.frame(Tempo = km_fit$time, CDF = cdf_km), aes(x = Tempo, y = CDF)) +
+   geom_step(color = "blue", size = 1.2) +
+   labs(title = "Função de Distribuição Acumulada - Kaplan-Meier", x = "Tempo (d
+   ias)", y = "CDF") +
+   theme_minimal()
>

```

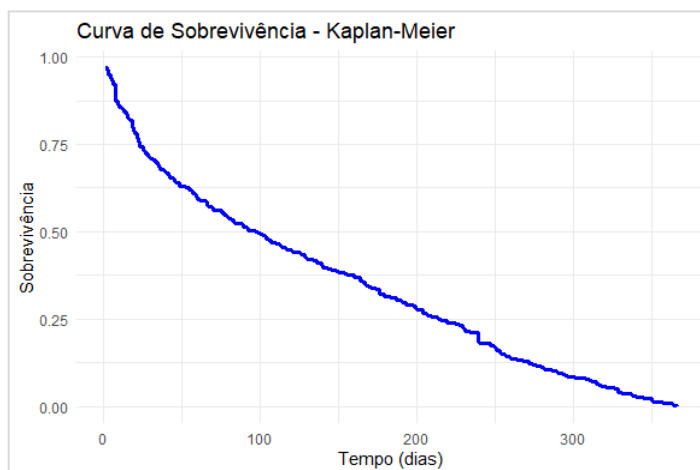
Figura 64 - Condução e resultado do MTTF pelo modelo não-paramétrico Kaplan-Meier

```

> # cálculo do MTTF - Kaplan-Meier
>
> MTTF_km <- sum(km_fit$surv[-length(km_fit$surv)] * diff(km_fit$time))
> cat(sprintf("MTTF (Kaplan-Meier): %.2f dias\n", MTTF_km))
MTTF (Kaplan-Meier): 123.94 dias

```

Figura 65 - Resultados gráficos do Passo 4 - Curva de Sobrevivência Kaplan-Meier



O *Script* completo utilizado nesta análise pode ser visualizado no Anexo 1.

4.3. CONDUÇÃO DAS ANÁLISES DE CAUSA E EFEITO DAS FALHAS

Considerando o conhecimento das causas das falhas e seu papel na melhoria da confiabilidade e mitigação dos efeitos percebidos que levam os clientes a acionar a garantia, conforme demonstrado no Capítulo 2 desta pesquisa, foram conduzidas análises básicas de causa e efeito para exemplificar a aplicação e a importância do método, conforme planejado na proposta. Uma equipe de trabalho foi estabelecida, conforme recomenda a literatura, sendo as gerências dos setores de Qualidade e Montagem de Motobombas da fabricante em estudo, além da própria autora da pesquisa.

4.3.1. Condução da Fault Tree Analysis (FTA)

A execução do método *Fault Tree Analysis* ocorreu após a conclusão das análises estatísticas. Com base nas etapas sequenciais demonstradas no Capítulo 2 desta pesquisa, a FTA foi conduzida. As ações realizadas nas etapas são explanadas a seguir.

4.3.1.1. Características da FTA elaborada

O objetivo da execução do método foi estabelecer a elaboração da FTA básica e generalizada do produto em estudo, a fim de exemplificar sua utilidade na identificação de modos de falha e causas dessas falhas a partir dos efeitos observados nas descrições de relato de falha realizados pelos clientes durante o registro de atendimento de garantia. Dessa forma, visa-se contribuir para a organização e identificação de falhas por modo de falha, bem como para o entendimento e atuação nas causas dessas falhas, possibilitando sua mitigação no processo de melhoria contínua.

4.3.1.2. Resolução, construção e resultados

A partir dos mesmos dados de falha obtidos nos registros de acionamento de garantia, puderam ser observados os relatos de falha dos clientes. Esses relatos são os sintomas da falha percebidos por estes; os efeitos da falha. Dentre os efeitos mais percebidos pelos clientes da fabricante objeto de estudo estão:

- a) “Vazamento”;
- b) “Vibração”, “ruído”, “barulho excessivo”;
- c) “Bomba não funciona”, “bomba não liga”, “Motor não parte”;

Inúmeros modos de falha podem estar relacionados a esses efeitos conforme mencionado no Capítulo 2 desta pesquisa, por meio de Dodson e Nolan (1997, apud Bonetti, 2009); além disso, é possível que mais de um componente seja responsável pelos efeitos, de modo que a análise pode ser extensa e com variadas conexões de causa e efeito. Devido às dificuldades na obtenção de informações claras sobre a ocorrência de falhas, a FTA foi limitada à análise dos efeitos mencionados (Eventos de Topo).

Como visto no Capítulo 2, esses efeitos são comuns. Conforme Serra (1995) causas comuns de vibração excessiva em bombas centrífugas incluem desbalanceamento do rotor, desalinhamentos angular ou paralelo dos eixos da bomba e do motor (por instalação inadequada), por exemplo. Folgas mecânicas causadas por bases trincadas, parafusos soltos, operação fora BEP e cavitação também podem produzir vibrações, ruídos em excesso, conforme Serra (1995) e Reis (2023). Outros problemas ainda podem ser causados por mau uso ou instalação inadequada.

Com base nessas informações e no conhecimento do fabricante, a FTA com uma resolução exemplar básica e generalizada foi elaborada e foi construída utilizando apenas o operador lógico “OU”. As Árvores de Falha elaboradas podem ser visualizadas nas Figuras 66, 67 e 68, sendo essas relacionadas aos efeitos “Bomba não funciona”; “Vibração” e “Vazamento”, respectivamente.

Figura 66 - FTA básica do efeito "Bomba não funciona"

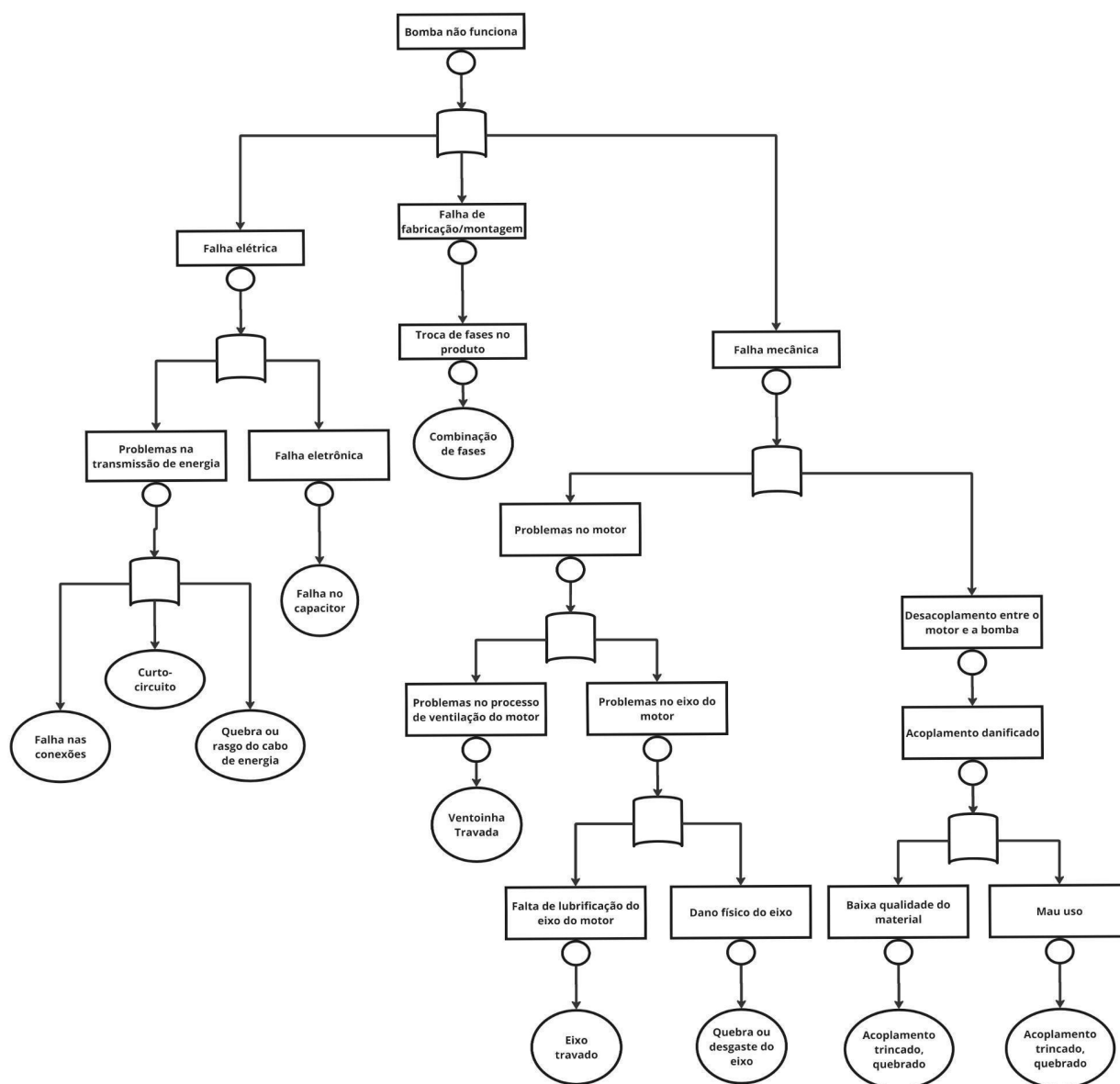


Figura 67 - FTA básica do efeito "Vibração"

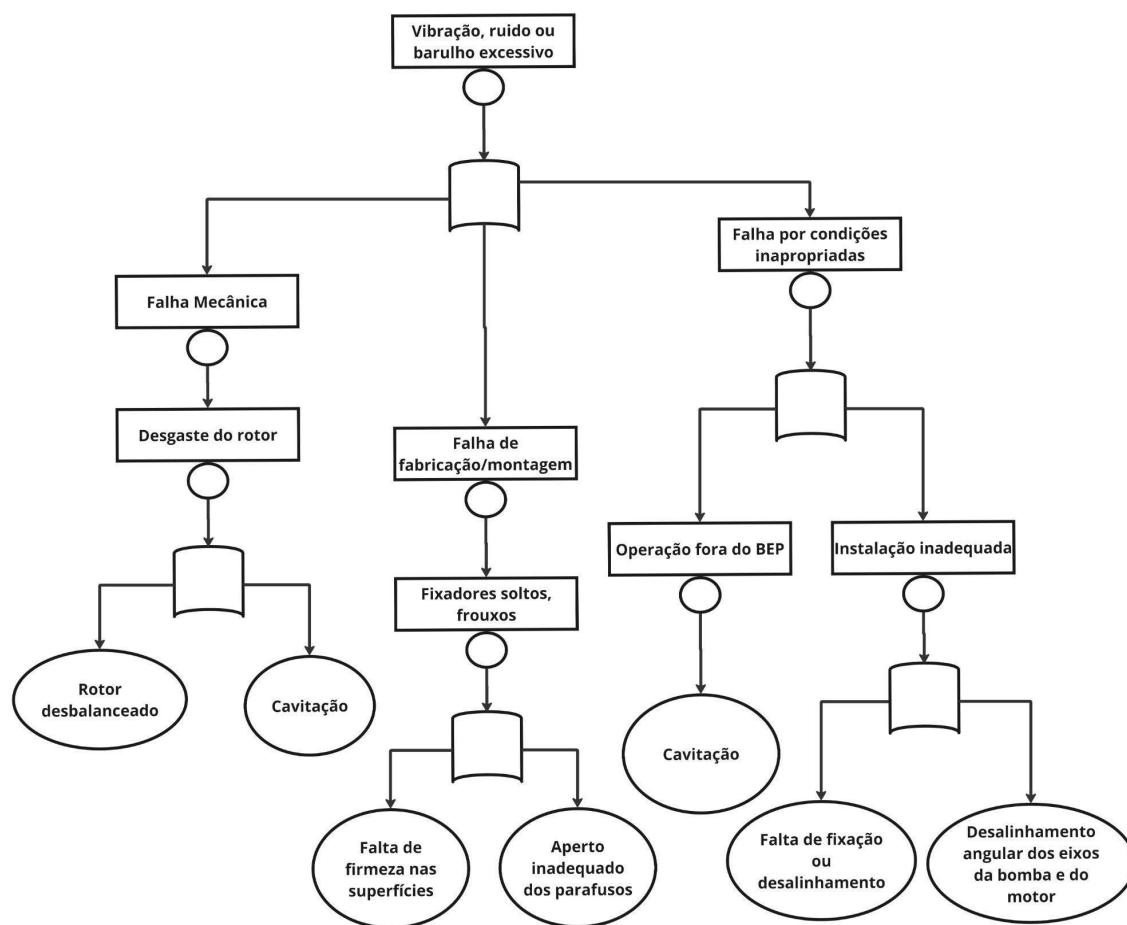
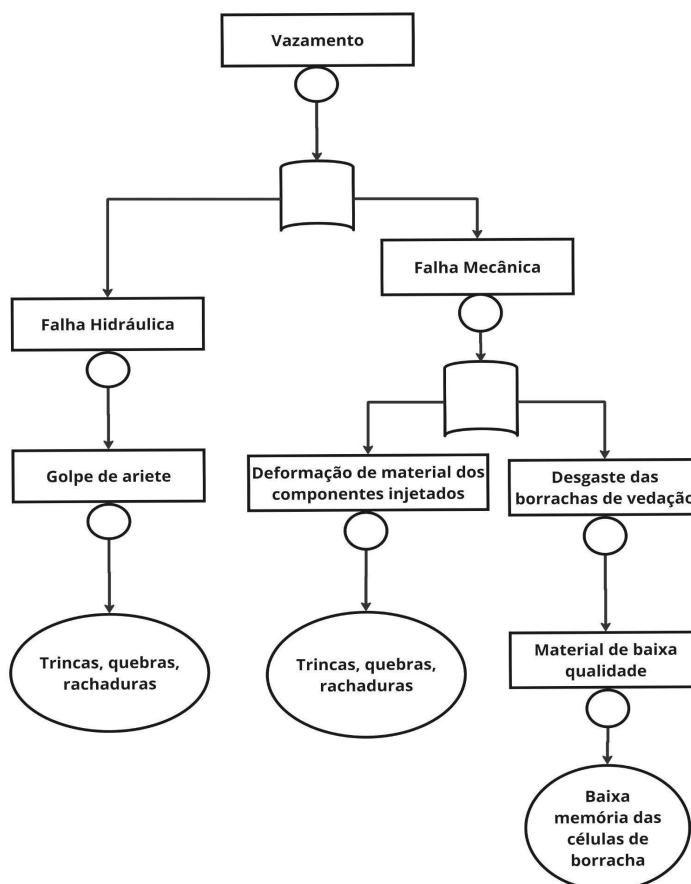


Figura 68 - FTA básica do efeito "Vazamento"



4.3.2. Condução da Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Após a FTA, um exemplo de condução do FMEA também foi realizado. A condução foi dividida em três etapas respectivamente: (1) Preparação, (2) Execução e (3) Conclusão, como recomenda Bertsche (2008).

Na preparação, foram identificados os componentes do sistema. A planilha em Microsoft Excel® foi elaborada e preenchida com o número e descrição do componente. A partir dos efeitos percebidos pelos clientes e do conhecimento técnico da equipe de trabalho, o FMEA foi executado, e pode ser visualizado no Apêndice 7.

Sendo classificados os índices de Severidade, Ocorrência e Detecção para cada modo de falha de componente que poderia gerar os efeitos percebidos e calculado o RPN.

Pode-se observar que muitos componentes apresentam mais de um modo de falha, como menciona Dodson e Nolan, (1997, apud Bonetti, 2009), como visto no Capítulo 2 desta pesquisa. Nem todos os modos de falha foram especificados nesta dissertação.

As medidas preventivas foram focadas nas causas da falha, isto é, na origem do problema que induziu ou causou a ocorrência de um determinado modo de falha.

Com o RPN calculado, foi possível classificar os componentes de maior impacto no sistema. Na Tabela 17 é possível visualizar os componentes de maior impacto e que merecem atenção no processo de melhoria da confiabilidade do produto Motobomba com Pré-Filtro.

Tabela 17 - Classificação dos componentes de maior impacto no sistema Motobomba com Pré-filtro

		Modo de falha	RPN	Classificação
1º	Componente 11	Trincas, rachaduras	196	B
2º	Componente 1	Quebra ou rasgo do cabo de energia	160	B
3º	Componente 10	Rotor desbalanceado	150	B
4º	Componente 7	Empenamento	128	B
5º	Componente 13	Trincas, rachaduras	120	B
6º	Componente 10	Danos estruturais	100	B
7º	Componente 5	Desacoplamento entre o motor e a bomba	96	C
8º	Componente 1	Curto-circuito	90	C
9º	Componente 18	Desgaste, quebras, trincas ou rachaduras	80	C
10º	Componente 6 e 12	Frouxidão ou ruptura dos parafusos	72	C

Com as análises de causa e efeito exemplificadas, pôde-se ter início a análise dos resultados obtidos e discussões com base nos resultados.

4.4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS DAS ETAPAS 1, 2 E 3

Neste tópico serão discutidos os principais resultados obtidos pelo passo a passo metodológico demonstrado para a avaliação da confiabilidade das bombas centrífugas manufaturadas pela fabricante objeto de estudo, por meio das estimativas estatísticas e condução complementar dos métodos de análise de falhas.

4.4.1. Resultados da condução da estimação pela modelagem paramétrica

Mesmo com intercorrências na coleta de dados, na terceira tentativa a amostra de estudo foi coletada, com 507 dados de falhas utilizáveis, oriundos dos registros de acionamento de garantia da bomba centrífuga objeto de estudo. Após a verificação de que os dados não seguiam a distribuição Normal, o teste de ajuste de bondade Anderson-Darling foi conduzido considerando as distribuições Weibull, Exponencial e Lognormal.

Durante a condução o ajuste às distribuições analisadas não foi perfeito, conforme já sinalizado na literatura; essa dificuldade de ajuste pode estar atrelada à atuação de variados modos de falha e natureza aleatória. Ainda assim, baseando-se na literatura demonstrada no Capítulo 2, a distribuição Weibull foi escolhida para continuação da execução da análise paramétrica, por apresentar menor valor AD, quando comparada às outras. Os índices de confiabilidade foram então estimados.

Para fins de análise e discussão, os resultados aproximados (devido a saída do *software*) para 90, 180 e 365 dias (tempo limite para concessão da garantia) foram destacados na Tabela 18, juntamente com o valor estimado de Tempo Médio Até Falha, sendo de 125 dias.

Tabela 18 - Resumo de resultados de estimação dos índices de confiabilidade utilizando a distribuição de Weibull

Tempo (em dias)	Função de confiabilidade (R(t))	Função densidade de probabilidade (f(t))	Taxa de Falha (h(t))	MTTF
90 dias	43,98~34,18%	0,34%	0,78%	~125 dias
180 dias	20,9%~16,4%	0,20%	0,76%	
365 dias	5%	0,05%	0,76%	

Fica evidente na Figura 66, que a confiabilidade diminui significativamente ao longo do tempo, o que é esperado, já que a probabilidade de falha aumenta com o uso prolongado do produto. No entanto, aos 180 dias (metade do tempo de garantia) o percentual estimado de produtos que sobrevivem é abaixo de 40%, o que caracteriza a confiabilidade do produto Motobomba com Pré-filtro como baixa, principalmente quando comparado ao período de garantia fornecido.

Figura 69 - Análise da Curva de Sobrevivência por Weibull



Os resultados da Taxa de Falha mostram uma leve diminuição ao longo do tempo, indicando que, apesar de ocorrerem falhas, a frequência dessas falhas não aumenta drasticamente. Isso é característico da área inicial de uma curva de banheira, onde há uma alta taxa de falhas no início (infância), seguida de uma taxa de falhas constante (vida útil); o que faz sentido, uma vez que estão sendo analisadas falhas no período de garantia.

O formato decrescente da Taxa de Falha observado na Figura 39 da aplicação do método é decorrente do comportamento assumido perante o valor do parâmetro de forma menor que 1 (0,97082) observado nos resultados da Tabela 14. Esse resultado indica uma taxa de falha decrescente ao longo do tempo, o que significa que os itens têm maior probabilidade de falhar no início de sua vida útil, e aqueles que sobrevivem tendem a durar mais. A Taxa de Falhas decrescente é consistente com a Função de Densidade de Probabilidade (FDP) crescente (Figura 39 da aplicação do método), indicando que a probabilidade de falha diminui com o tempo.

4.4.2. Resultados da condução da estimação pela modelagem não-paramétrica

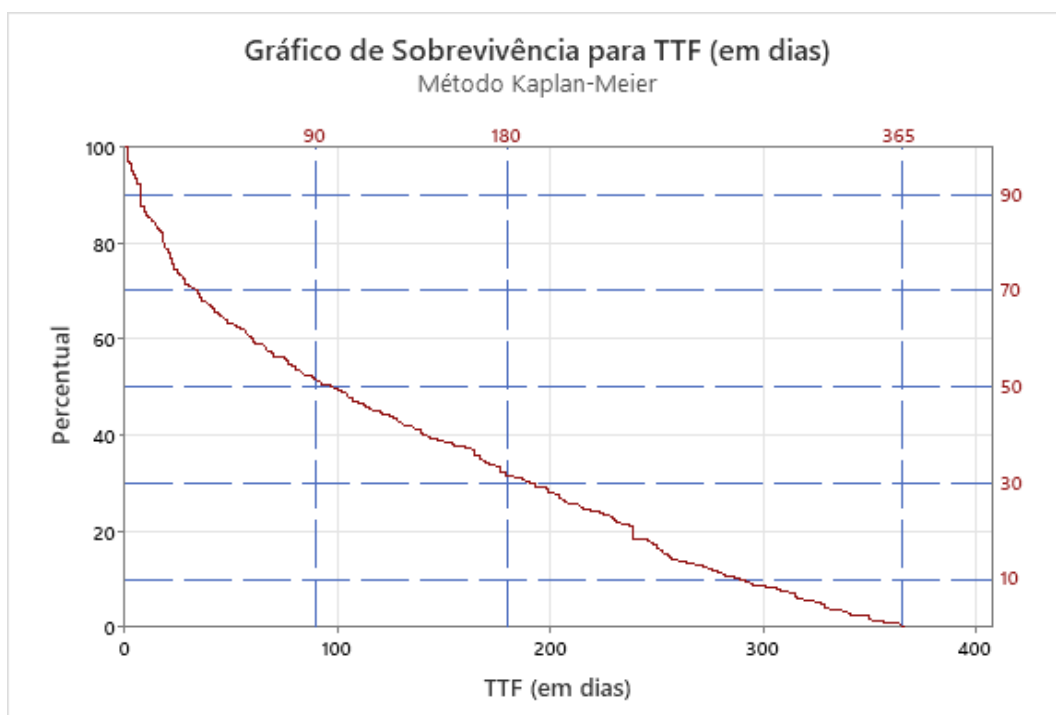
Utilizando a modelagem não-paramétrica com o método de Kaplan-Meier, a mesma amostra foi analisada. Pela modelagem não-paramétrica, o resultado referente à probabilidade de sobrevivência da Motobomba com Pré-filtro foi o seguinte (Tabela 18):

Tabela 19 - Resumo de resultados de estimação dos índices de confiabilidade utilizando o modelo Kaplan-Meier

Tempo (em dias)	Probabilidade de Sobrevivência (R(t))	MTTF
90 dias	51,28%	~124 dias
180 dias	31,36%	
365 dias	0,20%	

O MTTF estimado por Kaplan-Meier foi de 124 dias, diferenciando-se do modelo paramétrico por 1 dia. Similar ao modelo de Weibull, a Curva de Sobrevivência também apresenta comportamento decrescente ao longo do tempo, conforme esperado (Figura 67). Nota-se que, aos 180 dias, a probabilidade de sobrevivência estimada do produto Motobomba com Pré-filtro também fica abaixo de 40% e que aos 365 dias (1 ano, final do período de garantia) a probabilidade de sobrevivência do produto Motobomba com Pré-filtro cai para 0%.

Figura 70 - Análise da Curva de Sobrevivência por Kaplan-Meier



O comportamento crescente estimação da Taxa de falha, observado na Figura 48 da aplicação do método, sugere que, à medida que o tempo passa, os produtos têm uma probabilidade maior de falhar; o que se opõe totalmente ao estimado pelo modelo Weibull. Isso poderia indicar que os produtos estão entrando em uma fase de desgaste ou envelhecimento, onde as falhas se tornam mais frequentes. No entanto, esse tipo de comportamento não é esperado em produtos que estão em estágio inicial de operação. O que ocorre com a Taxa de Falha no modelo não-paramétrico Kaplan-Meier, é característico do método e foi mencionado por Dillenburg (2005) na fundamentação teórica desta pesquisa.

O modelo Weibull considera no cálculo da Taxa de Falha o parâmetro forma. Para $Y < 1$, $h(t)$ é decrescente, como já mencionado. Já o modelo não-paramétrico Kaplan-Meier é um modelo empírico e, logicamente, não estima parâmetros. Dillenburg (2005) cita essa particularidade no modelo Kaplan-Meier, onde a Taxa de Falhas é calculada baseada diretamente nos dados de TTF observados, por isso o comportamento dos gráficos e seus significados diferem, sendo essa diferença explicada pela estimação (características do próprio modelo).

4.4.3. Comparação de resultados entre as modelagens paramétricas e não-paramétrica

A dificuldade de ajuste da distribuição de dados de falha coletados aos modelos de distribuições conhecidos vai de encontro com os relatos sobre tal assunto na literatura. Dessa forma, o argumento de que o modelo não-paramétrico pode ser mais eficaz na avaliação se sustenta.

Os valores de confiabilidade diferem entre os dois modelos. Weibull tende a prever uma confiabilidade menor nos estágios iniciais (90 dias) em comparação com Kaplan-Meier. Aos 365 dias, ambos os modelos indicam uma baixa confiabilidade, mas Kaplan-Meier prevê uma confiabilidade quase nula. O Tempo Médio Até Falha (MTTF) estimado da motobomba com pré-filtro também varia, sendo de aproximadamente 124 dias pelo modelo Weibull e de aproximadamente 125 dias pelo método Kaplan-Meier.

A taxa de falhas no modelo Weibull é relativamente constante e ligeiramente decrescente, enquanto no método Kaplan-Meier, ela é crescente. Essa diferença é explicada pelas características de cada modelo, onde Weibull assume uma distribuição específica que pode suavizar a variação das taxas de falhas, enquanto Kaplan-Meier é uma estimativa não

paramétrica que pode capturar mais variabilidade nos dados, refletindo a aleatoriedade presente nos dados de TTF provenientes do acionamento de garantia.

Embora haja proximidade entre os resultados, a distinção entre os valores enfatiza ainda mais as características de incerteza relacionadas aos dados de falhas em campo oriundos dos registros de acionamento de garantia, corroborando com o que é observado na literatura e sugerindo a necessidade de aprimoramento do método.

Como discutido na literatura, nenhum modelo matemático é capaz de descrever precisamente o comportamento de fenômenos reais, especialmente com a influência de variáveis aleatórias, como ocorre com os dados de falhas em campo obtidos por meio do acionamento de garantia. No entanto, é importante realizar considerações a respeito do método utilizado.

4.4.4. Principais contribuições da FTA e do FMEA

Concluindo as discussões, a condução da FTA e da FMEA baseou-se principalmente no conhecimento da equipe multidisciplinar. A demonstração da aplicação pode ser útil para o fabricante, especialmente considerando o cenário de uma confiabilidade mais baixa no produto analisado.

Na aplicação, a FTA permitiu principalmente a compreensão dos efeitos observados pelos clientes e da relação destes com as principais causas (secundárias e primárias). Essa compreensão norteou a condução da FMEA.

Na FMEA, o cálculo do RPN, por meio das classificações de Severidade, Ocorrência e Detecção, permitiu identificar os componentes que merecem atenção na condução de ações de melhoria para aumentar a confiabilidade da motobomba. Os principais componentes classificados como de maior impacto foram, respectivamente: Corpo da Bomba, Motor, Rotor, Câmara e Pré-filtro; todos com classificação B. Nenhum componente obteve classificação A.

O aprimoramento da Árvore de Falhas pode ser um ótimo auxiliar na decomposição das causas de falhas e na definição de grupos de falhas por modos de falha mais robustos, facilitando a organização dos dados de falha no banco de dados de registro de acionamento da garantia. Em conjunto com o FMEA, essas análises fornecem uma visão abrangente das áreas críticas que necessitam de melhorias, permitindo a implementação de ações corretivas eficazes. A integração dessas metodologias pode não apenas aumentar a confiabilidade do

produto, mas também melhorar a satisfação do cliente e reduzir os custos associados a falhas e manutenções.

Além disso, a aplicação da sistemática nesta pesquisa pode servir como um modelo para futuras análises de confiabilidade e aprimoramento contínuo dos processos de fabricação das Motobombas.

Com as discussões sobre a aplicação do método realizadas, as considerações finais do método de pesquisa (ETAPA 4 - Solução pelo Modelo) são apresentadas, avaliando o alcance dos objetivos estabelecidos pela pesquisa, concluindo as discussões a respeito dos resultados e discutindo desafios enfrentados durante o processo.

4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS (ETAPA 4 - SOLUÇÃO PELO MODELO)

Neste tópico são abordadas considerações sobre os resultados discutidos, etapa do método de pesquisa denominado de Solução pelo Modelo (Etapa 4).

4.5.1. Adequação da sistemática proposta

Concluídas as análises e discussões tem-se que, apesar das dificuldades encontradas na condução do método, os objetivos gerais e específicos foram atingidos. Os índices de confiabilidade foram estimados e os métodos de causa e efeito foram exemplificados com auxiliares para nortear a implementação de melhorias e aumentar a confiabilidade do produto Motobomba com Pré-filtro.

4.5.2. Dificuldades encontradas na condução do método

As dificuldades encontradas na condução do método variaram desde limitações impostas pela inconsistência dos dados fornecidos pelo fabricante até desafios relacionados à característica censurada e incerta dos dados de falha em campo provenientes dos registros de acionamento de garantia.

Entretanto, essas dificuldades foram superadas, e através delas, sugestões relacionadas à pesquisa científica na área temática podem surgir.

4.5.3. Considerações a respeito resultados

Com tantas incertezas atribuídas aos dados, podem estar ocorrendo a subestimação ou a superestimação da confiabilidade. Índices como o MTTF podem estar sofrendo distorções em decorrência do mencionado e podem não estar demonstrando a situação real do objeto de estudo, assim como mencionou Falcetta (2000). Embora a subestimação seja provável, a superestimação não pode ser descartada.

A análise da confiabilidade dos produtos revelou que a probabilidade de sobrevivência em 180 dias (aproximadamente metade do tempo oferecido de garantia), inferior a 40%, o que indica que menos de 40% dos produtos permanecem operacionais após esse período. Entretanto, ao observar os resultados, estes não parecem não ser condizentes (ou representativos) à realidade, quando observada a longa atuação da fabricante, com mais de 50 anos de mercado.

O argumento se sustenta com a afirmação de Falcetta (2000), que relata que a solução de um modelo matemático pode estar correta e ainda assim não corresponder à realidade, simplesmente porque a suposição original do modelo matemático diverge das condições práticas do problema considerado.

Implicações relacionadas à condução metodológica em geral, como a não utilização de dados de pós-garantia na estimativa (distribuição temporal das falhas) - as falhas podem estar ocorrendo mais frequentemente após esse período e, por isso, podem não ser reportadas; ou seja, o produto dura mais -; inconsistências ligadas a dificuldades na modelagem ou à qualidade dos dados; imprecisões relacionadas à rastreabilidade do produto; modelagem adotando apenas um modo de falha; censuras características dos dados, como a subnotificação de falhas; e limitações derivadas da organização dos dados de falha da fabricante, podem ter impactado a precisão dos resultados.

Embora todas as ações metodológicas da pesquisa tenham sido tomadas com embasamento teórico, essas variáveis descritas podem ter acrescentado mais incerteza aos resultados. Os resultados podem ainda estar representando uma situação atual da empresa, não necessariamente indicando uma baixa confiabilidade do produto, mas sinalizando que melhorias precisam ser realizadas.

Neste caso, com todos os benefícios listados na utilização dos dados de acionamento da garantia como dados de falha em campo para estimação da confiabilidade, torna-se evidente que, caso haja interesse ou necessidade da utilização destes dados para avaliação da

confiabilidade, um rigoroso tratamento de dados e estudo estatístico para reduzir incertezas, imprecisões, censuras ou erros deve ser adotado.

As etapas de Implementação, Validação e Retorno, do método de pesquisa utilizado não foram realizadas. Entretanto sugere-se a comparação entre o estimado e a realidade.

4.5.3.1. *Sugestões ao fabricante objeto de estudo*

Frente a este cenário de uma estimativa fora da realidade ou baixa, algumas sugestões podem auxiliar em futuras aplicações do método. Entre as possíveis razões para a discrepância entre a estimativa e o que ocorre realmente está a inconsistência relacionada à organização dos dados no registro de acionamento de garantia.

Para uma execução mais precisa da metodologia, recomenda-se que os dados sejam organizados com o objetivo específico de avaliar a confiabilidade. Como visto no Capítulo 2 desta pesquisa, a adoção da cultura da confiabilidade na organização pode trazer resultados significativos. Recomenda-se a adoção de uma cultura voltada à confiabilidade, de modo a permitir que o período de garantia fornecido seja bem embasado (reduzindo custos) e o cumprimento da diretriz "mentalidade de risco" da ISO 9001 seja aplicado.

Organizar a coleta de dados de acionamento de garantia com o intuito de implementar avaliações de confiabilidade auxiliará no desempenho dessa cultura na organização. A precisão das informações, como modo de falha observado, data de operação (NFe), data da falha observada pelo cliente (se for possível) e a rastreabilidade dos produtos vendidos com a imediata coleta do código de rastreio no registro de acionamento da garantia, podem ser medidas que auxiliem na melhoria da precisão das estimativas de confiabilidade.

O aprimoramento da condução das análises FMEA e FTA pode auxiliar no aumento da complexidade da análise, possibilitando uma classificação robusta e consolidada dos modos de falha individuais. A FMEA e a FTA podem ajudar na organização, definição e entendimento dos modos de falha, de maneira que sejam coletados precisamente e entreguem melhores resultados.

Tendo em vista os benefícios da utilização de dados de acionamento de garantia como dados de falha em campo na avaliação da confiabilidade apresentados neste trabalho, recomenda-se que, caso haja interesse na utilização desses dados para estimar a confiabilidade de seus produtos, sejam adotados métodos de melhoria dos resultados, como os listados acima. A importância da organização do banco de dados de garantia, mencionada por autores

como Pasetto (2002), Falcetta (2000), Oliveira e Turrioni (2016) e Dillenburg (2005), é fundamental para garantir a precisão e a relevância das estimativas de confiabilidade.

4.5.3.2. *Sugestões de aprimoramento do método*

Para aprimoramento do método, de modo a mitigar os efeitos da censura e da incerteza sobre os resultados estimados quando utilizados dados de falha em campo derivados do acionamento de garantia, as seguintes sugestões de pesquisas futuras são dadas:

- a) Implementação da Lógica *Fuzzy* para avaliação do grau de incerteza dos resultados de estimação da confiabilidade e acompanhamento da evolução do trabalho com dados de acionamento de garantia, focando na redução de incertezas e censuras.
 - b) Estimação por modo de falha individual de cada componente para a confiabilidade global do sistema. As análises quantitativas dos métodos FMEA e FTA podem ser grandes aliadas neste quesito.
 - c) Condução de pesquisas utilizando outros métodos de minimização da censura observados na fundamentação teórica deste trabalho, tais como rastreabilidade do produto que se quer avaliar (permitindo a utilização do MTTF), organização adequada do banco de dados do SAC em prol da avaliação de confiabilidade (coletando informações de modos de falha classificados em grupos, datas de venda ao revendedor e de acionamento); inclusão da opinião de especialistas; inclusão de dados de acionamento de garantia pós-garantia e garantia não concedida.
 - d) Utilização da estimação bayesiana, conforme Guimarães (2002), que destaca a metodologia como sendo superior para análises de confiabilidade envolvendo variáveis aleatórias; a comparação com a modelagem de dados não-paramétrica, utilizando o modelo de Kaplan-Meier e outros poderia ser implementada neste caso.
 - e) Aperfeiçoamento da heurística para reduzir dificuldades em se definir qual seria o melhor método para estimar a confiabilidade de um produto utilizando dados de acionamento de garantia.
-

4.5.4. Considerações a respeito do uso de recurso computacional na condução das análises estatísticas

Por último, a modelagem estatística conduzida nesta pesquisa com o apoio de recursos computacionais tornou-se mais descomplicada e acessível, uma vez que atualmente há ferramentas intuitivas ao usuário (como o MINITAB®) e recursos de código aberto, como a linguagem R e sua interface gráfica RStudio, inteiramente disponíveis à sociedade. A utilização dessas ferramentas permite a realização de análises complexas de maneira mais eficiente e com maior precisão, facilitando a identificação de pontos críticos e a tomada de decisões informadas.

Além disso, a execução da metodologia de forma descritiva poderá auxiliar na implementação de análises de confiabilidade em qualquer empresa, fabricante ou indústria, democratizando o acesso a ferramentas e métodos de melhoria contínua. O acesso democratizado a essas tecnologias também incentiva a inovação e a competitividade, uma vez que empresas de diferentes portes podem aplicar as mesmas metodologias avançadas para melhorar seus processos e produtos.

CONCLUSÃO

Este trabalho realizou um estudo utilizando dados de falha em campo derivados dos registros de acionamento de garantia para estimar a confiabilidade de bombas centrífugas hidráulicas, que nunca antes foram avaliadas. A motivação e o incentivo para a condução deste tema de pesquisa surgiram de uma lacuna observada: empresas, fabricantes ou indústrias frequentemente enviam seus produtos ao mercado sem conhecer os parâmetros de confiabilidade deles, muitas vezes devido à limitação de recursos. Quando os produtos falham, essas informações sobre falhas são coletadas pelo setor de SAC durante o acionamento da garantia pelo cliente. Nesse contexto, surge uma valiosa oportunidade para iniciar a avaliação da confiabilidade dos produtos que anteriormente não foram avaliados.

Para compreender a temática do estudo e a contextualização da confiabilidade de produtos atualmente, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura. Na revisão, não foram encontrados estudos diretamente voltados à mesma temática. No entanto, informações sobre a utilização dos métodos FMEA e FTA em estudos de confiabilidade e aplicações com recursos computacionais enriqueceram a pesquisa. A escassez de estudos na área sugere a necessidade de aprimoramento das strings utilizadas na pesquisa ou a abertura de discussões sobre a falta de estudos relacionados à atualização e aprimoramento do método investigado.

A fundamentação teórica prosseguiu com a compreensão de conceitos teóricos já difundidos sobre a temática. Foram destacados os benefícios e desafios de trabalhar com dados de acionamento de garantia, como a obtenção da real condição de operação do produto em campo, a possibilidade de realizar análises de confiabilidade sem custos extras e as características de incerteza e censura dos dados, que os tornam difíceis de serem trabalhados.

Para demonstrar a aplicabilidade dos dados de acionamento de garantia como dados de falha em campo, a pesquisa avaliou um dos produtos carro-chefe de uma fabricante do estado do Rio de Janeiro, Brasil: as Motobombas com Pré-filtro. Apesar de atuar no mercado de lazer há 50 anos, a fabricante não teve oportunidade adequada para avaliar seus produtos.

A pesquisa foi conduzida utilizando o método de Modelagem e Simulação, onde, com base em um modelo teórico, foi elaborado e aplicado um modelo científico. A condução envolveu a combinação de análises qualitativas e quantitativas, abordagens indutivas e

dedutivas, além de elementos determinísticos e estocásticos, proporcionando uma avaliação completa do produto.

Os dados foram coletados e as análises estatísticas foram realizadas utilizando os softwares MINITAB® e RStudio. A estimativa dos parâmetros da distribuição dos Tempos Até Falha foi feita por Máxima Verossimilhança, utilizando a distribuição Weibull. O ajuste dos dados à distribuição Weibull não foi totalmente satisfatório, mas, segundo o teste de bondade de ajuste Anderson-Darling, a distribuição Weibull ainda era a mais promissora para a análise paramétrica. Considerando a incerteza e censura dos dados, foi aplicada a modelagem não-paramétrica Kaplan-Meier para comparação dos resultados.

As análises utilizando os métodos FMEA e FTA, conduzidas de forma básica, identificaram causas de falhas intrínsecas que podem influenciar a confiabilidade do produto e classificaram os componentes de maior impacto na confiabilidade do sistema, de acordo com o cálculo do Número de Prioridade de Risco, sendo eles respectivamente Corpo para a Bomba (Componente 11 do Diagrama de Blocos), Motor (Componente 1 do Diagrama de Blocos) e Rotor (Componente 10 do Diagrama de Blocos). A aplicação básica sugere espaço para o aprimoramento do método, permitindo uma lógica mais robusta e profunda que traga benefícios para a melhoria contínua.

Os recursos computacionais utilizados permitiram uma condução detalhada da avaliação da confiabilidade. A integração de recursos computacionais e metodologias estatísticas na análise de confiabilidade representa um avanço significativo para a indústria, permitindo um gerenciamento mais eficaz da qualidade e confiabilidade dos produtos, além de contribuir para a sustentabilidade e crescimento das empresas no mercado global.

Embora tenham surgido dificuldades devido a inconsistências nos dados de falha fornecidos, os objetivos da pesquisa foram atingidos. Os principais resultados, obtidos por modelos paramétricos e não-paramétricos, indicaram uma probabilidade de sobrevivência de aproximadamente 40% aos 180 dias de operação do produto (metade do período de garantia oferecido). Esses resultados parecem não representar a realidade de uma empresa ativa no mercado há mais de 50 anos, sugerindo que os dados de baixa confiabilidade podem ser causados pela natureza incerta e censurada dos dados de acionamento de garantia e pelas limitações na qualidade dos registros.

Recomenda-se à fabricante a implementação de melhorias como rastreabilidade dos produtos, organização adequada do banco de dados do SAC para auxiliar na avaliação da

confiabilidade, coleta de informações de modos de falha classificados e padronização das datas de venda e acionamento.

Diante da quantidade de incerteza e censura associada aos dados de acionamento de garantia, aprimoramentos são necessários. Em relação à censura dos dados, a aplicação da avaliação de incerteza pelo método Fuzzy pode ser eficaz e é uma sugestão para pesquisas futuras.

Sugere-se também a utilização de análises quantitativas dos métodos FMEA e FTA para calcular a confiabilidade global do sistema com base nos modos de falha individuais de cada componente; a utilização da estimação bayesiana conforme Guimarães (2002), comparada com a modelagem de dados não-paramétrica, como o modelo de Kaplan-Meier; e a condução de pesquisas utilizando a opinião de especialistas e dados de acionamento de garantia pós-garantia e não concedida. Além disso, outros métodos de aperfeiçoamento da heurística para reduzir dificuldades na definição do melhor método para estimar a confiabilidade de um produto usando dados de acionamento de garantia.

A falta de pesquisa na área pode sugerir que pesquisadores consideram esse método como não promissor, enquanto, na realidade, seus inúmeros benefícios indicam o contrário. Mesmo sem preocupação com recursos financeiros, a avaliação da confiabilidade utilizando dados de falha em campo, em vez de resultados controlados de laboratório, oferece a vantagem de compreender a operação real do produto. Um investimento maior na melhoria do método pode torná-lo mais eficaz, beneficiando a sociedade com uma solução de baixo custo para aprimorar serviços.

REFERÊNCIAS

ABADI, M.; HOSSEINI RAHDAR, M.; NASIRI, F.; HAGHIGHAT, F. Fault Identification and Fault Impact Analysis of The Vapor Compression Refrigeration Systems in Buildings: A System Reliability Approach. **Energies**, v. 15, n. 16, 2022. MDPI.

ALAM, M.; SUZUKI, K. Lifetime estimation using only failure information from warranty database. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 58, n. 4, p. 573–582, 2009.

ALSHAARI, A. H.; NOR, M. E. Reliability Analysis on Water Pumps in Water Supply System in Johor. Journal of Physics: Conference Series. **Anais.** . v. 1874, 2021. IOP Publishing Ltd.

ALTALEB, H.; ZOLTÁN, R. A brief overview of systems reliability. **ICCECIP conference**, 2020.

ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A Test of Goodness of Fit. **Journal of the American Statistical Association**, v. 49, n. 268, p. 765–769, 1954.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **NBR ISO 9001:2015: Sistemas de gestão da qualidade - requisitos**. Brasil, Rio de Janeiro, 2015.

ARSHAD, M.; M.T. RASOOL; M.I. AHMAD. Anderson Darling and Modified Anderson Darling Tests for Generalized Pareto Distribution. **Journal of Applied Sciences**, v. 3, n. 2, p. 85–88, 2003.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.

BERTSCHE, B. **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering**. Springer Berlin Heidelberg, 2008.

BONETTI, L. V. **Dados de garantia e análise qualitativa de especialistas como base para estudo de confiabilidade no setor de máquinas agrícolas**, 2009. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BHAT, M. A; AHMAD LONE, R.; AHMAD, R. Product Quality and Customer Loyalty: A Review of literature. **International Journal of Marketing and Technology**, v. 12, 2022.

BLOCKSIM. BlockSim: Reliability and Maintainability Analysis Software. 2024. Disponível em: <https://www.reliawiki.org/index.php/BlockSim>. Acesso em: 22 jul. 2024.

-
- BREZNICKÁ, A.; KOHUTJAR, M.; KRBAŤA, M.; ECKERT, M.; MIKUŠ, P. Reliability Analysis during the Life Cycle of a Technical System and the Monitoring of Reliability Properties. **Systems**, 1. dez. 2023. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- CASTELLANOS, M. B. **Monitoramento de falhas operacionais em bombas centrífugas multiestágios usando árvores de decisão**, 17. abr. 2019. Dissertação de mestrado, Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- CAVALCANTE, D. G. **Modelo para previsão de itens sobressalentes baseado em confiabilidade industrial: estudo desenvolvido em uma empresa do setor petrolífero**, 2015. Dissertação de mestrado, Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- CAWEMO**. Cawemo: Collaborative Process Modeling Tool. 2024. Disponível em: <https://cawemo.com/>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- CHUNG, C. A. **Simulation modeling handbook : a practical approach**. CRC Press, 2004.
- COOK, D. J.; MULROW, C. D.; HAYNES, R. B. **Systematic Reviews: Synthesis of Best Evidence for Clinical Decisions**. , 1997. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/14157764>>.
- DELIGNETTE-MULLER, Marie Laure; DUTANG, Christophe. **fitdistrplus: Help to Fit of a Parametric Distribution to Non-Censored or Censored Data**. Versão 1.2-1. 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=fitdistrplus>. Acesso em: 05 jul. 2024.
- DIAS, J.; NUNES, E.; SOUSA, S. Productivity improvement of transmission electron microscopes - A case study. *Procedia Manufacturing*. **Anais**. . v. 51, p.1559 -- 1566, 2020. Elsevier B.V.
- DILLENBURG, M. R. **Estimativas de confiabilidade de produto a partir das contagens mensais de vendas e falhas ao longo do período de garantia**. 2005. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DIPUTRA, A. W.; YASA, N. N. **The influence Of Product Quality, Brand Image, Brand Trust on Costumer Satisfaction and Loyalty**. 2021.
- DONG, Y.; HUANG, W.; BHARTI, V.; et al. **Reliability Assessment and Safety Arguments for Machine Learning Components in System Assurance**. , 2021. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2112.00646>>.
- ESCOBAR, L. A.; MEEKER, W. Q. **Statistical Methods for Reliability Data**. John Wiley & Sons, 2014.
- EHIAWINA, F. O.; OJIEMHENDE EHIAGWINA, F.; KEHINDE, O. O.; et al. **Fault Tree Analysis and its Modifications as Tools for Reliability and Risk Analysis of Engineering Systems-An Overview**. Federal Polytechnic Offa. 2022.
- ELSAIED, A. E. **RELIABILITY ENGINEERING**. Third edition ed. Piscataway, NJ, USA, 2021.
-

-
- FALCETTA, E. F. **Análise da Confiabilidade de Produtos baseada em Dados de Utilização da Garantia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. 2011.
- FOX, J.; ANDERSEN, R. **Using the R Statistical Computing Environment to Teach Social Statistics Courses**, 2005. Department of Sociology, McMaster University.
- FUENTES-HUERTA, M. A.; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, D. S.; CANTÚ-SIFUENTES, M.; PRAGA-ALEJO, R. J. Fuzzy reliability centered maintenance considering personnel experience and only censored data. **Computers and Industrial Engineering**, v. 158, 2021. Elsevier Ltd.
- FRIEDERICH, J.; LAZAROVA-MOLNAR, S. Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities. **Journal of Manufacturing Systems**, 1. fev. 2024. Elsevier B.V.
- GONG, Q.; CHEN, B.; LI, Y.; ZHI, P. Reliability Assessment Based on GO Method of Metro Traction System. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, 2020. Hindawi Limited.
- GU, C.; ZHAI, L.; GU, W.; et al. System analysis and reliability analysis for environmental test chambers. **International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing**, v. 14, p. 1115–1128, 2020. North Atlantic University Union NAUN.
- GUI, M.; SUI, Y.; DING, R.; et al. An Approach for the Dynamic Reliability Assessment of the Digital Power Control System for Nuclear Reactor. **Frontiers in Energy Research**, v. 10, 2022. Frontiers Media S.A.
- GUIMARÃES, U. V. **Modelagem para análise da confiabilidade de produtos em garantia**, 2002. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- HE, Y.; ZHANG, H.; WANG, P.; et al. Engineering application research on reliability prediction of the combined DC-DC power supply. **Microelectronics Reliability**, v. 118, 2021. Elsevier Ltd.
- HE, Y. H.; WANG, L. B.; HE, Z. Z.; XIE, M. A fuzzy TOPSIS and Rough Set based approach for mechanism analysis of product infant failure. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 47, p. 25–37, 2015. Elsevier Ltd.
- HEGDE, V. Improve warranty failures in original equipment manufacturing via design for reliability. Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium. **Anais...** . v. 2023-January, 2023. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- IBRAHIM, M. S.; FAN, J.; YUNG, W. K. C.; et al. System level reliability assessment for high power light-emitting diode lamp based on a Bayesian network method. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 176, 2021. Elsevier B.V.
-

-
- JACKSON, Christopher. **flexsurv: Flexible Parametric Survival Models**. Versão 2.3.0. 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/flexsurv/index.html>. Acesso em: 28 mai. 2024.
- JEON, H.; PARK, K.; KIM, J.-S. Comparison and Verification of Reliability Assessment Techniques for Fuel Cell-Based Hybrid Power System for Ships. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 2, p. 74–74, 2020. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- JONES, J. A.; HAYES, J. A. **Use Of a Field Failure Database for Improvement Of Product Reliability**. 1997.
- JUNIOR. JOÃO ROSALDO VOLLERTT. **Confiabilidade e falhas de campo: um estudo de caso para melhoria da confiabilidade de um produto e do reparo, através de um procedimento sistemático de coleta de dados**, 1996. Dissertação de mestrado, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- KITCHENHAM; CHARTERS. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering**. 2007.
- KUSHID, A. (2022). **Powering co-creation for a new era: This is the Miro Way**. Disponível em: <https://miro.com/blog/series-c-funding-announcement/>. Acesso em: 08 de jun. de 2024.
- KRONTHALER, F.; ZÖLLNER, S. **Data Analysis with RStudio: An Easygoing Introduction**. 2022.
- KWAK, Y. G.; HEO, D. H.; KANG, F. S. Reliability and characteristic analysis considering the circuit structure and operation risk of forward converters. **Electronics (Switzerland)**, v. 10, n. 23, 2021. MDPI.
- KWAK, Y. G.; HEO, D. H.; KIM, S. P.; et al. Reliability and economic efficiency analysis of 4-leg inverter compared with 3-leg inverters. **Electronics (Switzerland)**, v. 10, n. 1, p. 1–22, 2021. MDPI AG.
- LAZAROVA-MOLNAR, S.; NILOOFAR, P.; BARTA, G. K. Data-Driven Fault Tree Modeling for Reliability Assessment of Cyber-Physical Systems. Proceedings - Winter Simulation Conference. **Anais...** . v. 2020-December, p.2719–2730, 2020a. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- LIMON, S.; YADAV, O. P. Reliability estimation considering warranty data, usage rate profile, and qualitative information on design changes. **Mathematics Applied to Engineering**, p. 171–190, 2017. Elsevier.
- LIMON, S.; YADAV, O. P.; ZUO, M. J.; MUSCHA, J.; HONEYMAN, R. Reliability estimation considering usage rate profile and warranty claims. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability**, v. 230, n. 3, p. 297–308, 2016. SAGE Publications Ltd.
- LEE, J. H.; JUN, H. S.; PARK, H. M.; PARK, J. H.; LIM, S. K. Reliability Analysis of a Multilevel Inverter Applied to Stratospheric Drones Using Fault Tree Analysis. **Electronics (Switzerland)**, v. 12, n. 24, 2023. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
-

-
- LI, Y.; COOLEN, F. P. A.; ZHU, C.; TAN, J. **Reliability assessment of the hydraulic system of wind turbines based on load-sharing using survival signature**. 2020.
- LI, Y.; WANG, W.; ZHANG, L.; et al. Reliability analysis for vertical integration of protection, measurement, merge unit, and intelligent terminal device. **Global Energy Interconnection**, 2023.
- MATHWORKS. **MATLAB: The Language of Technical Computing**. 2024. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 22 fev. 2024.
- MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Excel**. Versão mais recente. 2024. Disponível em: <https://www.microsoft.com/excel>. Acesso em: 12 jun. 2024.
- MINITAB. Software de estatísticas para análise de dados. 2024. Disponível em: <https://www.minitab.com/>. Acesso em: 20 mai. 2024.
- MIRO. Plataforma colaborativa de quadros brancos online. 2024. Disponível em: <https://miro.com/>. Acesso em: 20 mai. 2024.
- MITROFF, I. I.; BETZ, F.; PONDY, L. R.; SAGASTI, F. On Managing Science in the Systems Age: Two Schemas for the Study of Science as a Whole Systems Phenomenon. **Interfaces**, v. 4, n. 3, p. 46–58, 1974. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS).
- MOHAMMADI, H.; FAZLI, Z.; KALEH, H.; et al. Risk Analysis and Reliability Assessment of Overhead Cranes Using Fault Tree Analysis Integrated with Markov Chain and Fuzzy Bayesian Networks. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2021, 2021. Hindawi Limited.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. Hoboken, Nj: Wiley, 2011.
- MORETTI, L. R. **Estimativa dos Parâmetros de Bombas Centrífugas**, mar. 1993. Dissertação de mestrado, Piracicaba: Universidade de São Paulo.
- MOSTAFA FADAEEFATH ABADI; MOHAMMAD HOSSEINI RAHDAR; NASIRI, F.; HAGHIGHAT, F. Fault Identification and Fault Impact Analysis of The Vapor Compression Refrigeration Systems in Buildings: A System Reliability Approach. **Energies**, v. 15, n. 16, p. 5774–5774, 2022. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- NOBAKHTI, A.; RAISSI, S.; DAMGHANI, K. K.; SOLTANI, R. Dynamic reliability assessment of a complex recovery system using fault tree, fuzzy inference and discrete event simulation. **Eksploracja i Niezawodnosc**, v. 23, n. 4, p. 593–604, 2021. Polish Academy of Sciences Branch Lublin.
- OLIVEIRA, G. S.; TURRIONI, J. B. Modelagem da confiabilidade utilizando dados de garantia: uma alternativa para resolver as limitações ao se trabalhar com dados de campo. **Produto & Produção**, v. 17, n. 2, 2016.
- OLIVEIRA, G. R. **Manutenção centrada em confiabilidade de bombas centrífugas baseado na metodologia de manutenção centrada em confiabilidade**. Trabalho de
-

Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2022.

OH, Y. S.; BAI, D. S. **Field data analyses with additional after-warranty failure data**. 2001.

PARSIF.AL. Plataforma de gestão de projetos e análise de dados. 2024. Disponível em: <https://parsif.al/>. Acesso em: 23 jan. 2024.

PASETTO, S. DE C. **Previsão de falhas no período de garantia a partir da percepção do cliente: um estudo de caso junto a uma empresa de alta tecnologia**, 2002. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 28 mai. 2024.

R CORE TEAM. **Contributors**. Disponível em: <https://www.r-project.org/contributors.html>. Acesso em: 28 mai. 2024.

REIS, W. D. DOS. **Análise de falha de eixo de bomba centrífuga**, 2023. Dissertação, Universidade Federal de Itajubá.

REVELLE, William. **psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research**. Versão 2.4.6.26. 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=psych>. Acesso em: 30 de jun. 2024.

ROWLEY, J.; SLACK, F. **Realização de uma revisão da literatura**. 2004.

RSTUDIO. Ambiente de desenvolvimento integrado para R. Disponível em: <https://rstudio.com/>. Acesso em: 20 mai. 2024.

SANTOS, G. T. DOS. **Modelo de confiabilidade associando dados de garantia e pós-garantia a três comportamentos de falhas**, ago. 2008. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SANTOS, G. T. DOS; FLAVIO SANSON FOGLIATTO; DUARTE, L.; RAUSAND, M. Aplicação de um modelo de riscos concorrentes na análise de confiabilidade de dados de garantia. **Produto & Produção**, v. 9, n. 3, 2008.

SANTOS, J. C. DOS. **Análise de confiabilidade de uma bomba centrífuga: aplicação na injeção de água para recuperação de petróleo**, 2011. Dissertação de mestrado, Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SANTOS, A. F. C. DOS; BOVÉRIO, M. A.; SILVA, D. P. DA. Análise técnica de intervenção corretiva em bomba centrífuga. **SITEFA**, v. VI, 2023.

SERRA, R. C. **Deteção de trincas em eixos de bombas centrífugas em operação através da técnica de análise de vibrações**, 1995. Dissertação, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Comissão Nacional de Energia Nuclear.

-
- SCHNEIDER, R. G. **Metodologia para retroalimentação do ciclo de desenvolvimento de produto com dados de confiabilidade oriundos da utilização do produto em campo**. Dissertação de mestrado, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- SHARMA, G.; RAI, R. N. Failure modes based censored data analysis for repairable systems and its industrial perspective. **Computers and Industrial Engineering**, v. 158, 2021. Elsevier Ltd.
- SHI, R.; ZHANG, L.; LIN, F.; et al. Annotated survey and perspectives on rail transport energy system RAMS evaluation technology. **Green Energy and Intelligent Transportation**, p. 100164, 2024. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2773153724000161>>.
- SOUZA, R. A. DE. **Confiabilidade e falhas de campo: uma metodologia para suporte ao projeto**. Dissertação de mestrado, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- SOUZA, V. F. E. **ECOS PL-Science: Uma Arquitetura para Ecossistemas de Software Científico Apoiada por uma Rede Ponto a Ponto**, 27. fev. 2015. Dissertação de mestrado, Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora.
- TIMPERLEY, L.; BERTHOUD, L. Reliability Analysis and Failure Mitigation Strategies for the PROVE Pathfinder CubeSat Payload. IEEE Aerospace Conference Proceedings. **Anais**. v. 2022-March, 2022. IEEE Computer Society.
- TURRIONI, J. B.; HENRIQUE PEREIRA MELLO, C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção**. 2012.
- THERNEAU, Terry M.. **survival: Survival Analysis**. Versão 3.7-0. 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/survival/index.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. **Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review***. 2003.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Departamento de Estatística. **Apostila “Utilizando o R”**. Disponível em: <https://www.est.ufmg.br/>. Acesso em: 30 mai. 2024.
- VESELY, W. E.; GOLDBERG, F. F.; ROBERTS, N. H.; HAASL, D. F. **Fault tree handbook**. Washington, D.C. U.S. Gov. Print. Off, 1981a.
- VESELY, W.; STAMATELATOS, M.; DUGAN, J.; FRAGOLA, J.; MINARICK, J. **Fault Tree Handbook with Aerospace Applications**. Washington, DC, USA, 2002.
- WANG, Y.; KANG, R.; CHEN, Y. Reliability assessment of engine electronic controllers based on Bayesian deep learning and cloud computing. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 34, n. 1, p. 252–265, 2021. Chinese Journal of Aeronautics.
- WICKHAM, Hadley. **ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics**. Versão 3.5.1. 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>. Acesso em: 28 mai. 2024.
-

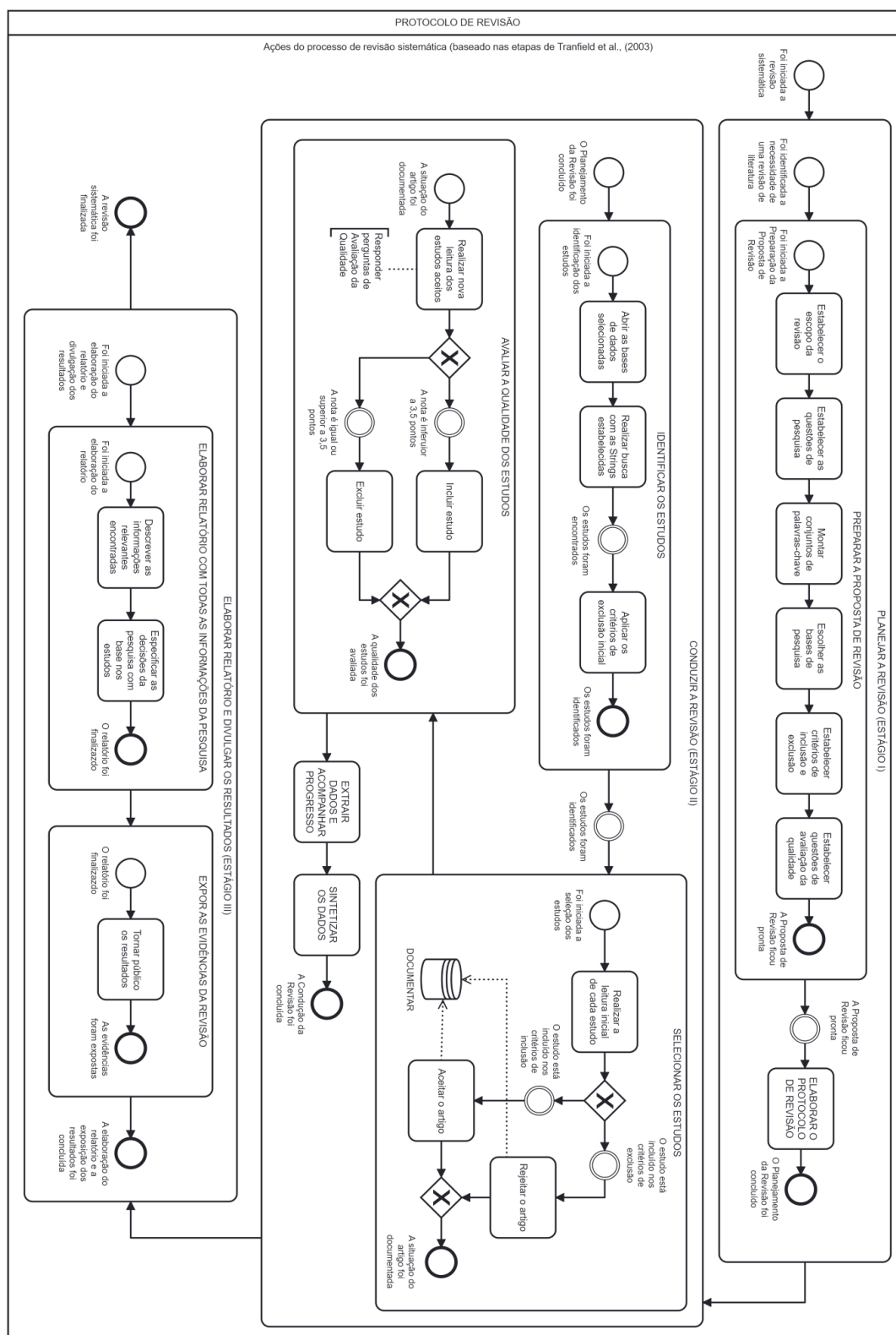
WICKHAM, Hadley; FRANÇOIS, Romain; HENRY, Lionel; MÜLLER, Kirill. **dplyr: A Grammar of Data Manipulation**. Versão 1.1.4. 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html>. Acesso em: 28 mai. 2024.

WICKHAM, Hadley; HESTER, Jim; BRYAN, Jennifer. **readr: Read Rectangular Text Data**. Versão 2.1.5. 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/readr/index.html>. Acesso em: 28 mai. 2024.

YIN, ROBERT. K. **Pesquisa Qualitativa do início ao fim - Traduzido por Daniel Bueno**. Porto Alegre: Penso, 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Ilustração do Protocolo de Revisão da RSL deste estudo e legenda



SÍMBOLO	NOME	DESCRIÇÃO / EXPLICAÇÃO
---------	------	------------------------

SÍMBOLOS PARA A REPRESENTAÇÃO DE EVENTOS

Descrição primária: Simbologia em formato circular. Representam acontecimentos ao longo do processo.

 	Evento de início	Evento responsável por dar início (borda única fina) ou fim (borda única grossa) ao processo. Para o acaso do modelo, o evento de início possui variações com representação de tempo (mas com borda única)*, e o de fim possui variações com representação de sinal** e erro***.
	Evento intermediário	Retrata a ocorrência de acontecimentos intermediários; possui borda dupla. No modelo, este evento possui variação de representação em tempo (mas com borda dupla)*, sinal** e link****.
	Evento de tempo*	Retrata um acontecimento que é demarcado pelo tempo.

SÍMBOLOS PARA A REPRESENTAÇÃO DE ATIVIDADES

Descrição primária: Simbologia em formato retangular. Representam ações e ou tarefas do processo.

	Atividade	Representam uma ação dentro de um processo.
	Subprocesso expandido (Caixa maior)	A atividade é desmembrada em outras atividades (tarefas), estas sendo classificadas então como subprocessos.

SÍMBOLOS PARA A REPRESENTAÇÃO DE TOMADA DE DECISÃO

Descrição primária: Simbologia em formato losangular. Representa decisões ou divisão e união de fluxos.

	Gateway	Representado por um losango, é utilizado para realizar divisões e junções de fluxos (caminhos) e para a tomada de decisões. Para o caso do modelo, ele é representado com um “X” no meio, cujo significado indica que apenas um dos caminhos do fluxo é seguido.
---	---------	--

SÍMBOLO PARA A REPRESENTAÇÃO DE DADOS

	Data Store	Representa um banco de dados. É um mecanismo para as atividades obtenham ou armazenem informações que persistirão além do escopo do processo.
---	------------	---

APÊNDICE 2 - Relação de estudos identificados

Nº	TÍTULO DO ARTIGO	AUTORES	ANO
1	A performance measurement system for integrated production and maintenance planning	Schreiber et al.,	2020
2	A practical reliability design method considering the compound weight and load-sharing	Li, et al.,	2020
3	An Approach for the Dynamic Reliability Assessment of the Digital PowerControl System for Nuclear Reactor	Gui et al.,	2022
4	An Industrial Maintenance Decision Support System based on fuzzy Inference to Optimize Scope Definition	Mitrofani et al.,	2020
5	Analyzing the impact of maintenance on profitability using dynamic bayesian networks	Schenkelberg et al.,	2020
6	Annotated survey and perspectives on rail transport energy system RAMS evaluation technology	Shi et al.,	2024
7	Application of machine learning algorithms in prognostics and health monitoring of electronic systems: A review	Bhat et al.,	2023
8	Assessment of the FIDES Guide 2022 electrical, electronic, and electromechanical reliability prediction methodology	Gaonkar et al.,	2023
9	Comparison and Verification of Reliability Assessment Techniques forFuel Cell-Based Hybrid Power System for Ships	Jeon et al.,	2020
10	Continuous improvement in maintenance: a case study in the automotive industry involving Lean tools	Pinto et al.,	2019
11	Data-driven fault tree modeling for reliability assessment of cyber-physical systems	Lazarova-Molnar et al.,	2020
12	Data-driven reliability analysis of Boeing 787 Dreamliner	Padian et al.,	2020
13	Demand forecasting of spare parts with regression and machine learning methods: Application in a bus fleet	İfraz et al.,	2023
14	Design for Reuse: residual value monitoring of power electronics' components	Rahmani et al.,	2022
15	Design, control, reliability, economic and energy management of microgrid: A review	Khare e Chaturvedi	2023
16	Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance	Daya et al.,	2023
17	Development of a digital model and metamodel to improve the performance of an automated manufacturing line	Ruane et al.,	2022
18	Development of Goal Model Mechanism for Self-reconfigurable Manufacturing Systems in the Mold Industry	Lee et al.,	2020
19	Dynamic reliability assessment of a complex recovery system using fault tree, fuzzy inference and discrete event simulation	Nobakhti et al.,	2021
20	Dynamic reliability assessment of flare systems by combining fault tree analysis and Bayesian networks	Kabir et al.,	2023
21	Effects of the meteorological data resolution and aggregation on the optimal design of photovoltaic power plants	Mayer et al.,	2021
22	Engineering application research on reliability prediction of the combined DC-DC power supply	He et al.,	2021
23	Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm	Mayer et al.,	2020
24	Exploring the Influence of the Parameters' Relationship between Reliability and Maintainability for Offshore Wind Farm Engineering	Chung	2022
25	Fault identification and fault impact analysis of the vapor compression refrigeration systems in buildings: A system reliability approach	Abadi et al.,	2022
26	Fuzzy multicriteria evaluation and trends of asset management performance: A case study of Spanish buildings	Carnero et al.,	2023
27	Human Reliability Assessment of Home-Based Rehabilitation	Wang et al.,	2021
28	Implementing TPM supported by 5S to improve the availability of an automotive production line	Ribeiro et al.,	2019
29	Improving CubeSat reliability: Subsystem redundancy or improved testing?	Bouwmeester et al.,	2022
30	Joint condition-based maintenance and condition-based production optimization	Michiel et al.,	2021

31	KPI development and obsolescence management in industrial maintenance Machine Failures' Consequences – A Classification Model Considering	Ferreira et al.,	2019
32	Ultra-Efficiency Criteria Mixed integer non-linear programming model for reliable and safer design at an	Sielaff et al.,	2023
33	early stage	Vázquez et al.,	2021
34	Nitrile cup seal robustness in the India Mark II/III hand pump system On the influence of infrastructure availability on companies decisions toward	Hans et al.,	2021
35	modal shift and relocation of facilities	Wehrle et al.,	2023
36	Ontology-based production planning under the consideration of system robustness	Denkena et al.,	2021
37	Productivity Improvement of Transmission Electron Microscopes - A Case Study	Dias et al.,	2020
38	Recent progress of machine learning in flow modeling and active flow control	Li et al.,	2022
39	Reducing production losses in additive manufacturing using overall equipment effectiveness	Basak et al.,	2022
40	Reliability Analysis and Failure Mitigation Strategies for the PROVE Pathfinder CubeSat Payload	Timperley et al.,	2022
41	Reliability analysis and redundancy optimization of k-out-of-n systems with random variable k using continuous time Markov chain and Monte Carlo simulation	Oszczypała et al.,	2024
42	Reliability Analysis during the Life Cycle of a Technical System and the Monitoring of Reliability Properties	Breznická et al.,	2023
43	Reliability analysis for vertical integration of protection, measurement, merge unit, and intelligent terminal device	Li et al.,	2023
44	Reliability Analysis of a Multilevel Inverter Applied to Stratospheric Drones Using Fault Tree Analysis	Lee et al.,	2023
45	Reliability analysis on domestic special CNC machine tools based on weibull distribution	Shi et al.,	2021
46	Reliability Analysis on Water Pumps in Water Supply System in Johor	Alshaari e Nor	2021
47	Reliability and characteristic analysis considering the circuit structure and operation risk of forward converters	Kwak et al.,	2021
48	Reliability and economic efficiency analysis of 4-leg inverter compared with 3-leg inverters	Kwak et al.,	2021
49	Reliability Assessment and Safety Arguments for Machine Learning Components in System Assurance	Dong et al.,	2023
50	Reliability Assessment Based on GO Method of Metro Traction System	Gong et al.,	2020
51	Reliability Assessment Model of IMA Partition Software Using Stochastic Petri Nets	Wu et al.,	2021
52	Reliability assessment of engine electronic controllers based on Bayesian deep learning and cloud computing	Wang et al.,	2021
53	Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities	Friederich e Lazarova-Molnar	2024
54	Reliability Assessment of Power System Considering the Impact of Renewable Energy Sources Integration Into Grid With Advanced Intelligent Strategies	Akhtar et al.,	2021
55	Reliability Assessment of the Configuration of Dynamic Uninterruptible Power Sources: A Case of Data Centers	Varnavskiy et al.,	2023
56	Reliability assessment of the hydraulic system of wind turbines based on load-sharing using survival signature	Li, et al,	2020
57	Reliability modeling and analysis of cycloid gear grinding machines based on the bootstrap-bayes method	Wang et al.,	2023
58	Research on Reliability Prediction method of Complex Mechanical Product Based on Meta-Action Unit	Zhang et al.,	2021
59	Resilience in supply systems – What the food industry can learn from energy sector	Ossevorth et al.,	2022
60	Risk Analysis and Reliability Assessment of Overhead Cranes Using Fault Tree Analysis Integrated with Markov Chain and Fuzzy Bayesian Networks	Mohammadi et al.,	2021
61	Security of railway control systems: A survey, research issues and challenges	Yu et al.,	2023
62	Selection of Production Reliability Indicators for Project Simulation Model	Pusztai et al.,	2022
63	Simulation model for the study of maintenance actions in a homogeneous multi-unit system of interchangeable components, with cannibalization	Diaz et al.,	2023

	Statistical reliability assessment for small sample of failure data of dumper diesel engines based on power law process and maximum likelihood estimation	Dinkar et al.,	2021
64	Study of the Reliability of Actuator Group System for FAST	Lei et al.,	2022
65	Study on key technologies of GNSS-based train state perception for train-centric railway signaling	Cai et al.,	2023
66	System analysis and reliability analysis for environmental test chambers	Gu et al.,	2020
67	System level reliability assessment for high power light-emitting diode lamp based on a Bayesian network method	Ibrahim et al.,	2021
68	The impact of unequal processing time variability on reliable and unreliable merging line performance	Romero-Silva et al.,	2021
69	The Use of a Fault Tree Analysis (FTA) in the Operator Reliability Assessment of the Critical Infrastructure on the Example of Water Supply System	Boryczko et al.,	2022
70	The VALU3S ECSEL project: Verification and validation of automated systems safety and security	Agirre et al.,	2021
71	TPM implementation and maintenance strategic plan – a case study	Pinto et al.,	2020
72	Two new multi-phase reliability growth models from the perspective of time between failures and their applications	Lin e Chen	2021
73			

APÊNDICE 3 - Motivos para aceitação e rejeição dos estudos

Nº	SITUAÇÃO	MOTIVO
1	Rejeitado	Estudos fora do escopo
2	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
3	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
4	Rejeitado	Estudos fora do escopo
5	Rejeitado	Estudos fora do escopo
6	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
7	Rejeitado	Estudos fora do escopo
8	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
9	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
10	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
11	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
12	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
13	Rejeitado	Estudos fora do escopo
14	Rejeitado	Estudos fora do escopo
15	Rejeitado	Estudos fora do escopo
16	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
17	Rejeitado	Estudos fora do escopo
18	Rejeitado	Estudos fora do escopo
19	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
20	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
21	Rejeitado	Estudos fora do escopo
22	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
23	Rejeitado	Estudos fora do escopo
24	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
25	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
26	Rejeitado	Estudos fora do escopo
27	Rejeitado	Estudos fora do escopo
28	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
29	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
30	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
31	Rejeitado	Estudos fora do escopo
32	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de bombas centrífugas
33	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
34	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
35	Rejeitado	Estudos fora do escopo
36	Rejeitado	Estudos fora do escopo
37	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
38	Rejeitado	Estudos fora do escopo
39	Rejeitado	Estudos fora do escopo
40	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
41	Rejeitado	Estudos fora do escopo
42	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
43	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
44	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
45	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
46	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
47	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
48	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
49	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
50	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
51	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
52	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
53	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas

54	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
55	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
56	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
57	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
58	Rejeitado	Estudos fora do escopo
59	Rejeitado	Estudos fora do escopo
60	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
61	Rejeitado	Estudos fora do escopo
62	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
63	Rejeitado	Estudos fora do escopo
64	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
65	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
66	Rejeitado	Estudos fora do escopo
67	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
68	Aceito	Estudos que utilizam a FMEA e/ou FTA na análise da confiabilidade
69	Rejeitado	Estudos fora do escopo
70	Rejeitado	Estudos fora do escopo
71	Rejeitado	Estudos fora do escopo
72	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas
73	Aceito	Estudos que avaliam a confiabilidade de um produto (ou sistema) ou bombas centrífugas

APÊNDICE 4 - Qualidade dos estudos

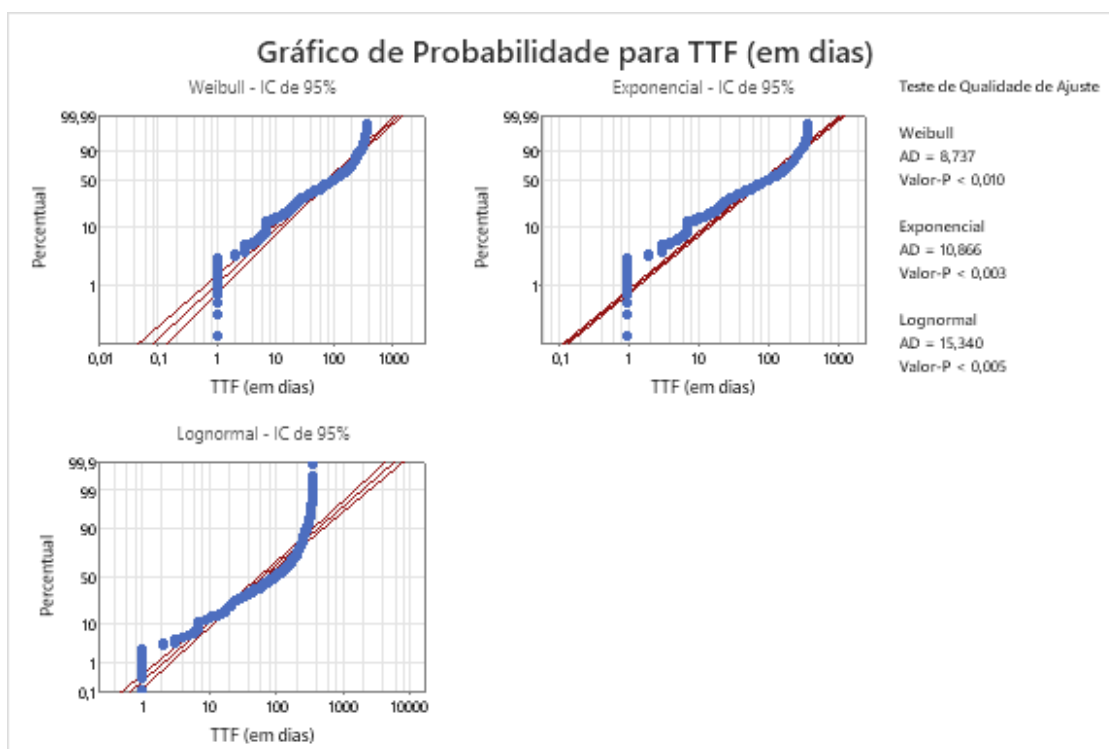
Nº	QUALIS	Nº DE CITAÇÕES	PONTUAÇÃO	SITUAÇÃO
2	A1	2	3,0	Rejeitado
3	A3	2	6,0	Aceito
6	Não identificado	0	4,0	Aceito
8	B2	0	0	Rejeitado
9	A1	9	6,5	Aceito
10	A1	27	3,0	Rejeitado
11	B2	12	3,5	Aceito
12	A1	21	3,0	Rejeitado
16	A3	2	3,0	Rejeitado
19	A1	4	4,5	Aceito
20	A2	23	5,0	Aceito
22	A4	7	4,0	Aceito
24	A1	5	3,0	Rejeitado
25	A2	0	6,0	Aceito
28	A1	40	3,0	Rejeitado
29	A2	11	3,0	Rejeitado
30	A1	39	2,0	Rejeitado
32	A4	0	1,0	Rejeitado
33	B1	4	1,5	Rejeitado
34	A3	5	2,5	Rejeitado
37	A2	5	6,5	Aceito
40	B1	0	6,0	Aceito
42	A4	0	6,0	Aceito
43	A2	0	4,5	Aceito
44	A3	0	5,0	Aceito
45	B4	1	3,0	Rejeitado
46	B4	0	4,5	Aceito
47	A3	2	5,0	Aceito
48	A3	10	6,0	Aceito
49	A3	0	3,5	Aceito
50	A3	2	4,0	Aceito
51	A2	3	3,0	Rejeitado
52	A3	7	4,0	Aceito
53	A1	0	6,0	Aceito
54	A1	48	3,0	Rejeitado
55	A2	2	2,5	Rejeitado
56	A1	18	4,5	Aceito
57	B1	0	3,0	Rejeitado
60	A2	4	4,5	Aceito
62	A2	4	2,5	Rejeitado
64	A2	7	3,0	Rejeitado
65	A4	2	3,0	Rejeitado
67	B4	2	3,5	Aceito
68	A1	11	4,5	Aceito
72	A1	16	2,0	Rejeitado
73	A4	4	3,0	Rejeitado

APÊNDICE 5 – Principais símbolos da FTA segundo Vesely et al., (2002)

SÍMBOLOS DE EVENTO PRIMÁRIO	
	EVENTO BÁSICO - Uma falha básica de início que não requer desenvolvimento adicional.
	EVENTO DE CONDICIONAMENTO - Condições ou restrições específicas que se aplicam a qualquer porta lógica (usado principalmente com portas DE PRIORIDADE E e portas DE INIBIÇÃO).
	EVENTO NÃO DESENVOLVIDO - Um evento que não é mais elaborado, seja por ser de pouca importância ou por falta de informações disponíveis.
	EVENTO ROTINEIRO - Um evento que normalmente é esperado ocorrer.
SÍMBOLOS DE PORTA	
	AND - A falha de saída ocorre se todas as falhas de entrada ocorrerem.
	OU - A falha de saída ocorre se pelo menos uma das falhas de entrada ocorrer.
	COMBINAÇÃO - A falha de saída ocorre se n das falhas de entrada ocorrerem.
	OU EXCLUSIVO - A falha de saída ocorre se exatamente uma das falhas de entrada ocorrer.
	PRIORIDADE E - A falha de saída ocorre se todas as falhas de entrada ocorrerem em uma sequência específica (a sequência é representada por um EVENTO DE CONDICIONAMENTO desenhado à direita da porta).
	INIBIR - A falha de saída ocorre se a falha (única) de entrada ocorrer na presença de uma condição de habilitação (a condição de habilitação é representada por um EVENTO DE CONDICIONAMENTO desenhado à direita da porta).
SÍMBOLOS DE TRANSFERÊNCIA	
	TRANSFERIR ENTRADA - Indica que a árvore é desenvolvida ainda mais na ocorrência da correspondente TRANSFERIR SAÍDA (por exemplo, em outra página).
	TRANSFERIR SAÍDA - Indica que esta parte da árvore deve ser anexada à correspondente TRANSFERIR ENTRADA.

Fonte: Adaptado de Vesely et al. (2002)

APÊNDICE 6 - Resultados gráficos gerados pelo caminho ‘a’ para Identificação de Aderência à Distribuições Estatísticas no *software* MINITAB®



Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas
Empenamento	Perda de eficiência, falha no direcionamento do fluido ou vazamento	8	Deformação do material	4	Inspeção visual	4	128	B	Reparo ou substituição	Verificação da injeção adequada do componente; verificação da matéria prima utilizada; observação de novas ocorrências e reporte ao fornecedor da matéria-prima ou uso de matéria-prima de melhor qualidade, caso necessário.
Componente 8: Borracha para bomba										
Função: Vedar superfícies contra agentes externos										
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas
Baixa memória	Vazamento	6	Desgaste ou material de baixa qualidade	4	Inspeção visual	1	24	D	Substituição da Borracha	Observação de novas ocorrências e reporte ao fornecedor da matéria-prima ou uso de matéria-prima de melhor qualidade
Rasgos		6		3		1	18	D		
Componente 11: Corpo para bomba										
Função: Proteger a Câmara da Bomba										
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas
Trincas, rachaduras	Vazamento	7	Baixa qualidade do material	7	Inspeção visual	4	196	B	Substituição do componente	Verificação da injeção adequada do componente; verificação da matéria prima utilizada; observação de novas ocorrências e reporte ao fornecedor da matéria-prima ou uso de matéria-prima de melhor qualidade, caso necessário.
		7	Falta de fixação da bomba causada por instalação inadequada	7	Inspeção visual	4	196	B		Orientações ao usuário quanto à instalação
Comp. 13: Pré-filtro termoplástico										
Função: Suporte/gaiola da cesta para bomba										
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas
Trincas, rachaduras	Vazamento	8	Vibrações causadas pela falta de fixação da bomba	5	Inspeção visual e local	3	120	B	Substituição do Pré-filtro	Orientações ao usuário quanto à instalação

		8	Baixa qualidade da matéria-prima	4	Inspeção visual	3	96	C		Observação de novas ocorrências e reporte ao fornecedor da matéria-prima ou uso de matéria-prima de melhor qualidade
		8	Golpe de aríete	4	Inspeção visual	3	96	C		Orientação ao usuário para instalação de dispositivos de proteção contra golpes de aríete
Comp. 14:Cesta para bomba										
Função:		Filtrar partículas sólidas do fluido bombeado								
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas
Trincas, rachaduras	Excesso de partículas sólidas no fluido	7	Uso inadequado	2	Inspeção visual e entrevista com o usuário	3	42	D	Substituição da Cesta	Orientações ao usuário quanto ao manuseio do componente
		7	Baixa qualidade do material	5	Inspeção visual	2	70	C		Observação de novas ocorrências e reporte ao fornecedor da matéria-prima ou uso de matéria-prima de melhor qualidade
Comp. 15:Alça para Cesta										
Função:		Auxiliar na instalação e remoção da cesta Pré-Filtro da Bomba								
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas
Quebra da alça	Dificuldade na instalação ou remoção do Pré-filtro	5	Uso inadequado	1	Inspeção visual e entrevista com o usuário	2	10	D	Substituição da Alça	Orientações ao usuário quanto ao manuseio do componente
		5	Matéria-prima de baixa qualidade	2	Inspeção visual	3	30	D		Observação de novas ocorrências e reporte ao fornecedor da matéria-prima ou uso de matéria-prima de melhor qualidade
Componente 17:Tampa para Pré-filtro										
Função:		Proteger o Pré-Filtro								
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas
Quebra da tampa, rachaduras ou trincas	Exposição do pré-filtro a agentes externos	7	Uso inadequado, vibrações ou material de baixa qualidade	1	Inspeção visual e entrevista com o usuário	1	7	D	Substituição da Tampa	Orientações ao usuário quanto ao manuseio do componente; observação de novas ocorrências e reporte ao fornecedor

	Vazamento	8		3		2	48	D		da matéria-prima ou uso de matéria-prima de melhor qualidade
Comp. 16: Borracha para a Tampa do Pré-Filtro										
Função: Vedar a bomba contra vazamentos										
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas
Baixa memória	Vazamento	6	Desgaste ou material de baixa qualidade	3	Inspeção visual	1	18	D	Substituição da borracha danificada	Reportar o ocorrido ao fornecedor do material ou uso de materiais de alta qualidade
Rasgos		6		3		1	18	D		
Comp. 18: Porca para Pré-filtro										
Função: Trazer firmeza ou realizar o fechamento do Pré-filtro										
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas
Desgaste, quebras, trincas ou rachaduras	Frouxidão do Pré-filtro	8	Matéria-prima de baixa qualidade	2	Inspeção visual local e inspeção de ruído	3	48	D	Substituição do componente	Orientações ao usuário quanto ao manuseio do componente
		8	Mau uso ou desgaste por vibração em decorrência da instalação inadequada	2		5	80	C	Substituição ou reinstalação	Observação de novas ocorrências e reporte ao fornecedor da matéria-prima ou uso de matéria-prima de melhor qualidade
Comp. 10: Rotor										
Função: Movimentar o fluido na bomba										
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas
Rotor desbalanceado	Vibração, perda de eficiência	10	Erro de montagem	5	Inspeção de ruído ou medição de eficiência	3	150	B	Balanceamento adequado	Treinamento de montagem
Danos estruturais		10	Desgaste por cavitação ou material de baixa qualidade	5	Inspeção visual ou medição de eficiência	2	100	B	Substituição do Rotor	Verificação da injeção adequada do componente; verificação da matéria prima utilizada; observação de novas ocorrências e reporte ao fornecedor da matéria-prima ou uso de matéria-prima de melhor qualidade, caso necessário.
Componente 9: Selo Mecânico										
Função: Vedar a junção entre partes rotativas e estacionárias da bomba										
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN		Ações corretivas	Ações preventivas

Desgaste	Vazamento	10	Baixa qualidade do componente	3	Inspeção visual	1	30	D	Substituição do Selo	Reporte do ocorrido ao fornecedor ou troca por Selos de melhor qualidade
Componente 1 (unido ao componente 1): Eixo do Motor										
Função:		Transmitir a rotação do motor para o rotor da bomba								
Modo de falha	Efeito de Falha	S	Causa	O	Meio de detecção	D	RPN	Ações corretivas		Ações preventivas
Travamento	Perda de transmissão de rotação	8	Falta de lubrificação	1	Inspeção visual	4	32	D	Substituição do eixo	Acompanhamento de novas ocorrências e reporte do ocorrido ao fornecedor
Desgaste ou quebra		8	Desgaste ou dano físico causado pelo rotor desbalanceado	2		3	48	D		



Documento de dissertação de mestrado acadêmico em Eng. de Produção - Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG) - Linha de pesquisa: Qualidade e Produto - Agosto de 2024

Avaliação da confiabilidade de bombas centrífugas utilizando dados de acionamento de garantia como falha em campo

*Script elaborado para condução da estimação da confiabilidade
Por Carolina Victória de Jesus Campos de Azevedo Julio*

ANEXO 1 - Script elaborado nesta pesquisa para a condução da estimação da confiabilidade através do *software* de código aberto RStudio

Carregar pacotes necessários

```
library(readr)
library(dplyr)
library(survival)
library(flexsurv)
library(ggplot2)
library(fitdistrplus)
library(psych)
```

Carregar dados

```
dados <- read_csv("caminho/para/seu/arquivo/dados.csv")
```

Exibir as primeiras linhas dos dados

```
head(dados)
```

PASSO 1: Estatísticas descritivas detalhadas do conjunto de dados

```
estatdescritivas <- describe(dados$`TTF (em dias)`)
print(estatdescritivas)
```

PASSO 2: Teste de ajuste à distribuições estatísticas paramétricas

```
fit_weibull <- fitdist(dados$`TTF (em dias)`, "weibull")
fit_exponential <- fitdist(dados$`TTF (em dias)`, "exp")
fit_lognormal <- fitdist(dados$`TTF (em dias)`, "lnorm")
```

Comparar os ajustes

```
gofstat(list(fit_weibull, fit_exponential, fit_lognormal))
```

PASSO 3: Cálculo dos índices de confiabilidade com o modelo paramétrico**# Curva de sobrevivência**

```
surv_weibull <- flexsurvreg(Surv(`TTF (em dias)`) ~ 1, data = dados, dist = "weibull")
```

Preparar dados para a curva de sobrevivência usando o modelo Weibull

```
x_values <- seq(0, max(dados$`TTF (em dias)`), length.out = 100)
surv_weibull_probs <- 1 - pweibull(x_values, shape = fit_weibull$estimate["shape"], scale =
fit_weibull$estimate["scale"])
surv_data <- data.frame(Tempo = x_values, Sobrevivencia = surv_weibull_probs)
```

Plotar a curva de sobrevivência usando o modelo Weibull

```
ggplot(surv_data, aes(x = Tempo, y = Sobrevivencia)) +
  geom_line(color = "blue", size = 1.2) +
  labs(title = "Curva de Sobrevivência - Weibull", x = "Tempo (dias)", y = "Sobrevivência") +
  theme_minimal()
```

Função de taxa de falha

```
hazard_weibull <- dweibull(x_values, shape = fit_weibull$estimate["shape"], scale =
fit_weibull$estimate["scale"]) /
  (1 - pweibull(x_values, shape = fit_weibull$estimate["shape"], scale =
fit_weibull$estimate["scale"]))
hazard_data <- data.frame(Tempo = x_values, Taxa_de_Falha = hazard_weibull)
```

Plotar a taxa de falhas

```
ggplot(hazard_data, aes(x = Tempo, y = Taxa_de_Falha)) +
  geom_line(color = "blue", size = 1.2) +
  labs(title = "Taxa de Falhas - Weibull", x = "Tempo (dias)", y = "Taxa de Falha") +
  theme_minimal()
```

Cálculo da função de distribuição acumulada - Weibull

```
cdf_weibull <- pweibull(x_values, shape = fit_weibull$estimate["shape"], scale =
fit_weibull$estimate["scale"])
```

Plotar a função de distribuição acumulada - Weibull

```
ggplot(data.frame(Tempo = x_values, CDF = cdf_weibull), aes(x = Tempo, y = CDF)) +
  geom_line(color = "blue", size = 1.2) +
  labs(title = "Função de Distribuição Acumulada - Weibull", x = "Tempo (dias)", y = "CDF")
+
```

```
theme_minimal()
```

Função de densidade de probabilidade

```
density_weibull <- dweibull(x_values, shape = fit_weibull$estimate["shape"], scale =  
fit_weibull$estimate["scale"])  
density_data <- data.frame(Tempo = x_values, Densidade = density_weibull)
```

Plotar a Função de densidade de probabilidade - Weibull

```
ggplot(density_data, aes(x = Tempo, y = Densidade)) +  
  geom_line(color = "blue", size = 1.2) +  
  labs(title = "Função Densidade de Probabilidade - Weibull", x = "Tempo (dias)", y =  
"Densidade") +  
  theme_minimal()
```

Cálculo do MTTF - Weibull

```
shape_weibull <- fit_weibull$estimate["shape"]  
scale_weibull <- fit_weibull$estimate["scale"]  
MTTF_weibull <- scale_weibull * gamma(1 + (1 / shape_weibull))  
cat(sprintf("MTTF (Weibull): %.2f dias\n", MTTF_weibull))
```

PASSO 4: Cálculo dos índices de confiabilidade com o modelo não-paramétrico Kaplan-Meier

Curva de sobrevivência Kaplan-Meier

```
km_fit <- survfit(Surv(`TTF (em dias)`) ~ 1, data = dados)  
km_data <- data.frame(Tempo = km_fit$time, Sobrevivencia = km_fit$surv)
```

Plotar a curva de sobrevivência Kaplan-Meier

```
ggplot(km_data, aes(x = Tempo, y = Sobrevivencia)) +  
  geom_step(color = "blue", size = 1.2) +  
  labs(title = "Curva de Sobrevivência - Kaplan-Meier", x = "Tempo (dias)", y =  
"Sobrevivência") +  
  theme_minimal()
```

Taxa de falha Kaplan-Meier

```
km_hazard <- -diff(km_fit$surv) / diff(km_fit$time)  
km_hazard_data <- data.frame(Tempo = km_fit$time[-length(km_fit$time)], Taxa_de_Falha  
= km_hazard)
```

Plotar a taxa de falhas Kaplan-Meier

```
ggplot(km_hazard_data, aes(x = Tempo, y = Taxa_de_Falha)) +
```

```
geom_step(color = "blue", size = 1.2) +  
labs(title = "Taxa de Falhas - Kaplan-Meier", x = "Tempo (dias)", y = "Taxa de Falha") +  
theme_minimal()
```

Calcular a função densidade de probabilidade (PDF) - Kaplan-Meier

```
pdf_km <- rep(NA, length(km_fit$time))  
pdf_km[1] <- km_fit$surv[1]  
for (i in 2:length(km_fit$time)) {  
  pdf_km[i] <- (km_fit$surv[i-1] - km_fit$surv[i]) / (km_fit$time[i-1] - km_fit$time[i])  
}  
pdf_km_data <- data.frame(Tempo = km_fit$time, PDF = pdf_km)
```

Plotar a função densidade de probabilidade - Kaplan-Meier

```
ggplot(pdf_km_data, aes(x = Tempo, y = PDF)) +  
  geom_step(color = "blue", size = 1.2) +  
  labs(title = "Função Densidade de Probabilidade - Kaplan-Meier", x = "Tempo (dias)", y =  
    "PDF") +  
  theme_minimal()
```

Calcular a função de distribuição acumulada - Kaplan-Meier

```
cdf_km <- km_fit$surv
```

Plotar a função de distribuição acumulada - Kaplan-Meier

```
ggplot(data.frame(Tempo = km_fit$time, CDF = cdf_km), aes(x = Tempo, y = CDF)) +  
  geom_step(color = "blue", size = 1.2) +  
  labs(title = "Função de Distribuição Acumulada - Kaplan-Meier", x = "Tempo (dias)", y =  
    "CDF") +  
  theme_minimal()
```

Cálculo do MTTF - Kaplan-Meier

```
MTTF_km <- sum(km_fit$surv[-length(km_fit$surv)] * diff(km_fit$time))  
cat(sprintf("MTTF (Kaplan-Meier): %.2f dias\n", MTTF_km))
```