

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

FÁBIO HENRIQUE SIMÕES

**ANÁLISE DE DADOS DE VIDA APLICADA EM MOTORES DE
TRAÇÃO FERROVIÁRIOS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2019

FÁBIO HENRIQUE SIMÕES

**ANÁLISE DE DADOS DE VIDA APLICADA EM MOTORES DE
TRAÇÃO FERROVIÁRIOS**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues.

CURITIBA

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Especialização em Engenharia da Confiabilidade



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE DADOS DE VIDA APLICADA EM MOTORES DE TRAÇÃO FERROVIÁRIOS

por

FÁBIO HENRIQUE SOMÕES

Esta monografia foi apresentada em 04 de outubro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Fábio Henrique Simões foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Wanderson Stael Paris, MSc
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Membro Titular da Banca - UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho à minha esposa e filha, Lilian e Cecília, pelo apoio e compreensão durante o desenvolvimento da pós-graduação.

Aos meus pais, Henrique e Lourdes, pela educação que me foi passada.

Às minhas irmãs, Roberta e Bethânia, por suprir a minha ausência junto aos meus pais nesta situação atual da minha vida.

AGRADECIMENTOS

O trabalho faz parte de uma realização pessoal, sempre trabalhei no ramo ferroviário e trazer uma metodologia aplica à minha área é sempre gratificante.

O primeiro agradecimento vai a Deus, por me proporcionar conhecimento durante a minha vida e me dar condição de chegar até este ponto.

À minha família, Lilian e Cecília, pela compreensão de todos os dias durante a minha dedicação ao curso e ao trabalho, enquanto tive que me ausentar de alguns momentos do cotidiano. O apoio sempre foi dado pois visualizamos um futuro melhor após a conclusão do curso.

Aos meus pais, que mesmo com a distância geográfica, sempre estiveram próximos e me dando o apoio necessário para que eu pudesse chegar aos meus objetivos de vida.

As minhas irmãs, agradeço por suprir a minha falta perante os meus pais, pois devido a circunstância da vida profissional, tive a necessidade de me afastar geograficamente.

Aos meus gestores do trabalho que sempre auxiliaram na solução do problema proposto neste trabalho e sempre trouxeram informações complementares para enriquecer ainda mais o tema abordado nesta monografia.

Por fim, gostaria de agradecer à empresa que trabalho por disponibilizar informações que deram base para chegar as conclusões devidas no tema abordada

RESUMO

SIMÕES, Fábio Henrique. **Análise de dados de vida aplicada em motores de tração ferroviários**. 2019. 118p. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O Motor de Tração (MT) é o componente responsável pela tração de uma locomotiva Diesel / Elétrica. O ambiente de trabalho em que ela opera é muito agressivo e de realidades distintas, devido a locomotiva trafegar em vários ambientes diferentes de temperatura, umidade e condições da via (trilho por onde a locomotiva trafega). O MT é o terceiro componente de maior custo na manutenção da locomotiva, isso é uma das premissas para dedicação do estudo de confiabilidade desse componente. O estudo foi realizado por meio da metodologia LDA (Análise Dados de Vida). Essa metodologia utiliza base de dados com os seus TTF (tempo até falha) definindo as curvas de confiabilidade. O MT foi dividido em subcomponentes que tiveram registro de falha e foi levantada a curva de confiabilidade para cada um deles. Após o levantamento das curvas de confiabilidade, os subcomponentes foram associados em série no diagrama de blocos, e com o auxílio do *software* BlockSim da Compass foi verificado qual é o subcomponente mais crítico para implementar ações, e aumentar a projeção de confiabilidade do MT. O estudo foi baseado em dados levantados entre janeiro 2017 e julho 2019. Foram verificadas as falhas ocorridas nos MT sujeitas a reparos neste período e seus respectivos modos de falha. Após a verificação dos dados, foi possível visualizar o melhor subcomponente para investir tempo e dinheiro na manutenção do MT de forma a aumentar a confiabilidade.

Palavras-chave: Locomotiva. Motor de Tração. Confiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade.

ABSTRACT

SIMÕES, Fábio Henrique. **Análise de dados de vida aplicada em motores de tração ferroviários**. 2019. 118p. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

The Traction Motor (TM) is a component in charge for the traction of a Diesel Electric Locomotives. The work environment in which it operates is very aggressive and has different realities as the temperature and moisture variation and the conditions of the tracks due to the locomotive's displacement. The traction motor has the third higher costs in the locomotive's maintenance and this is a premise to the reliability study of this component. The study was based on the LDA Methodology. This methodology uses a database with its TTF (time to failure) defining the reliability curves. The traction motor was divided into subcomponents that had a failure record and the Reliability Curve was drawn for each one. After this step, the subcomponents were serially associated in the block diagram and using the BlockSim software it was verified which is the most critical subcomponent to implement actions and increases the Traction Motor Reliability projection. The study was based on data collected in the period between January 2017 and July 2019. In this period of time, the failures of Traction Motors repaired and its Failures Modes were verified. After the data verification, it was possible to settle the most important subcomponent to invest effort, time and money in Traction Motor's Maintenance in order to increase the Reliability.

Palavras-chave: Locomotive. Traction Motor. Reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama de funcionamento de uma locomotiva	36
Figura 1.2 – Imagem do MT CC	38
Figura 1.3 – Fluxograma de desenvolvimento	43
Figura 2.1 – Parte de um motor de corrente contínua	50
Figura 2.2 – Funcionamento magnético de um motor elétrico	51
Figura 2.3 – Funcionamento de uma locomotiva.....	52
Figura 2.4 – Representação em corte de um motor de tração CC	53
Figura 4.1 – Árvore de eventos do subcomponente.....	83
Figura 4.2 – Árvore de eventos do subcomponente com as definições de 6M, modo de falha e causa raiz	84
Figura 4.3 – Lançamento de dados do subcomponente cabo de ligação no <i>software</i> da Copass	89
Figura 4.4 – Diagrama de blocos dos subcomponentes do MT	97
Figura 4.5 – Calculadora do <i>software</i> BlockSim com a confiabilidade do MT em 1095 dias.....	98
Figura 4.6 – Árvore de eventos Bobina de Campo.....	100
Figura 4.7 – Calculadora do <i>software</i> BlockSim com a confiabilidade do MT em 1095 dias após melhorias implementadas	106

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 – Distribuição de modais no Brasil em 2016	35
Gráfico 2.1 – Acumulado de produção e recebimento de avariados	54
Gráfico 2.2 – Quantidade de avarias por subcomponente	55
Gráfico 2.3 – Custo individual aproximado de componente classe A da locomotiva	56
Gráfico 2.4 – Custo acumulado com a quantidade produzida entre janeiro e setembro de 2019	56
Gráfico 3.1 – Função Densidade de Probabilidade (PDF)	63
Gráfico 3.2 – Probabilidade de falha $F(t)$	63
Gráfico 3.3 – Confiabilidade $R(t)$	64
Gráfico 3.4 – Representação da taxa de falhas de uma distribuição exponencial	66
Gráfico 3.5 – Distribuição PDF Weibull com β variado.....	68
Gráfico 3.6 – Distribuição PDF lognormal	70
Gráfico 3.7 – PDF da Gama G com variação de λ	71
Gráfico 3.8 – PDF com variação de δ	73
Gráfico 4.1 – Curva de confiabilidade para cabo de interligação	90
Gráfico 4.2 – Curva de confiabilidade Bobina de Campo	91
Gráfico 4.3 – Curva de confiabilidade Armadura.....	91
Gráfico 4.4 – Curva de confiabilidade Bobina de Interpolo	92
Gráfico 4.5 – Curva de confiabilidade Rolamento LC.....	92
Gráfico 4.6 – Curva e confiabilidade Alojamento LP	93
Gráfico 4.7 – Curva de confiabilidade Mancal LP.....	93
Gráfico 4.8 – Curva de confiabilidade Estator	94
Gráfico 4.9 – Curva de confiabilidade Porta-escovas.....	94
Gráfico 4.10 – Curva de confiabilidade Duto de ar.....	95
Gráfico 4.11 – Curva de confiabilidade Rosca da Capa.....	95
Gráfico 4.12 – Curva de confiabilidade Pinhão	96
Gráfico 4.13 – Curva de confiabilidade do MT obtida pelo diagrama de blocos.....	98
Gráfico 4.14 – Importância da confiabilidade do MT	99
Gráfico 4.15 – Curva de confiabilidade bobina de campo após implementação de melhoria no processo	105
Gráfico 4.16 – Curva de confiabilidade do MT obtida pelo diagrama de blocos após implantação das melhorias.....	107

Gráfico 4.17 – Novo Pareto de Importância da confiabilidade após implementação das ações.....	108
Gráfico 4.18 – Pareto de Importância da confiabilidade após implementação das ações com a nova classificação da bobina de campo	109

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 – Taxa de falha.....	62
Equação 3.2 – Densidade de Probabilidade	65
Equação 3.3 – Função de confiabilidade	65
Equação 3.4 – Taxa de falha.....	65
Equação 3.5 – Tempo Médio até a Falha (MTTF).....	66
Equação 3.6 – Densidade de Probabilidade Distribuição de Weibull	67
Equação 3.7 – Confiabilidade Distribuição Weibull	67
Equação 3.8 – Taxa de falhas Distribuição Weibull	68
Equação 3.9 – Distribuição PDF lognormal.....	69
Equação 3.10 – PDF Gama G.....	71
Equação 3.11 – Equação de Γ em função de x	71
Equação 3.12 – PDF Loglogística	72
Equação 3.13 – Complemento pdf da loglogística	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Falhas em MTs entre janeiro e dezembro de 2017	37
Tabela 1.2 – Falhas em MTs entre janeiro e dezembro de 2018	37
Tabela 1.3 – Falhas em MTs entre janeiro e junho de 2019	38
Tabela 4.1 – Exemplo de dados em suspensão.....	85
Tabela 4.2 – Dados para LDA do subcomponente Porta-escovas.....	86
Tabela 4.3 – Subcomponentes afetados	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Evolução da técnica de FMEA.....	60
Quadro 4.1 – Informações da metodologia FMEA	77
Quadro 4.2 – Exemplo da metodologia 5 Porque.....	79
Quadro 4.3 – Plano de ação para mitigar a causa raiz “Falha durante a substituição da Bobina de campo N° 4”	103
Quadro 4.4 – Plano de ação para mitigar a causa raiz “Bobina de campo solta com relação ao núcleo” e “Falta de torque na bobina de campo N°1”	104

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 4.1 – Rompimento do cabo de interligação I	80
Fotografia 4.2 – Rompimento do cabo de interligação II	80
Fotografia 4.3 – MT contaminado com óleo proveniente do MD I	81
Fotografia 4.4 – MT contaminado com óleo proveniente do MD II	82
Fotografia 4.5 – Área de assentamento do parafuso danificada	101
Fotografia 4.6 – Deslocamento do parafuso devido ao torque incorreto I	102
Fotografia 4.7 – Deslocamento do parafuso devido ao torque incorreto II	102
Fotografia 4.8 – Rompimento da interligação de bobina de campo devido a causa raiz “Bobina de campo solta com relação ao núcleo”	104

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS

Dr.	Doutor
Eng.	Engenheiro
MSc	Mestre
Nº	Número
Prof.	Professor

LISTA DE SIGLAS

2P	Dois Parâmetros
6M	Mão de obra, Medida, Máquina, Materiais, Meio ambiente e Método
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
FMEA	Análise de modo e efeito de falha (<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>)
G	Gama generalizada
LC	Lado comutador
LDA	Análise de dados de vida
LP	Lado pinhão
MD	Motor diesel
MT	Motor tração
MTTF	Média de tempo até falha (<i>Mean Time To Failure</i>)
NACO	Nada constatado
NCY	Sigla de oficina da empresa Rumo Logística
RP	Reparação básica
RT	Reparação total
T	Período
TKU	Transporte por quilometro útil
TTF	Tempo até falha (<i>Time To Failure</i>)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

- B Parâmetro de forma
- μ Média
- η Parâmetro de escala
- Y Parâmetro de Posição
- λ Parâmetro de Distribuição ou taxa de falha
- t Variável Aleatória
- N_i Número de falhas
- T Período de tempo
- σ' Desvio Padrão
- Γ Função Gama em x
- δ Parâmetro de forma na distribuição Loglogística
- μ Parâmetro de escala na distribuição Loglogística

SUMÁRIO

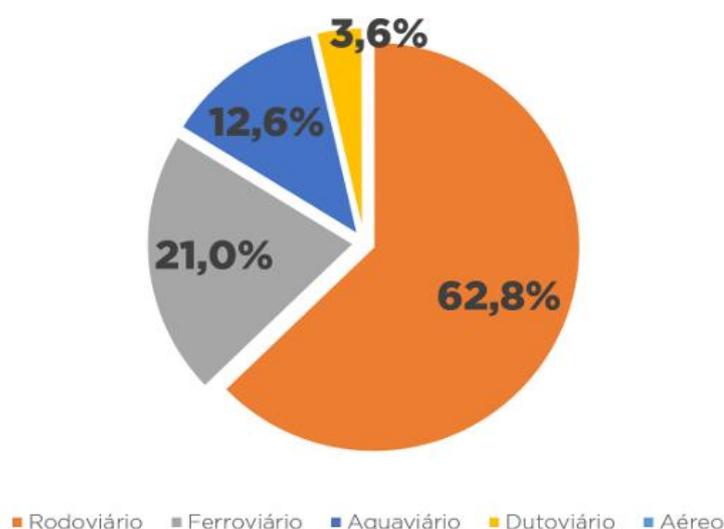
1	INTRODUÇÃO	35
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	37
1.2	OBJETIVOS	39
1.2.1	Objetivo Geral.....	40
1.2.2	Objetivos específicos.....	40
1.3	JUSTIFICATIVA.....	40
1.4	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	41
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	46
2	MOTOR DE TRACÇÃO	49
3	REFERENCIAL TEÓRICO	59
3.1	ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA - FMEA.....	59
3.2	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)	61
3.2.1	Distribuição exponencial.....	64
3.2.2	Distribuição Weibull	66
3.2.3	Distribuição Lognormal	69
3.2.4	Distribuição Gama Generalizada (G).....	70
3.2.5	Distribuição Loglogística	72
4	DESENVOLVIMENTO	75
4.1	ACOMPANHAMENTO DAS FALHAS (FMEA) E CRITÉRIOS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS	75
4.2	ANÁLISE DAS FALHAS	78
4.3	PADRONIZAÇÃO DOS MODOS DE FALHA E CAUSA RAIZ	82
4.4	DEFINIÇÃO DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICAS	84
4.5	LDA DOS SUBCOMPONENTES.....	87
4.5.1	Distribuição para subcomponentes do MT	88
4.6	DIAGRAMA DE BLOCOS NO MT	96
4.7	DEFINIÇÕES DE AÇÕES PARA AUMENTO DE CONFIABILIDADE	99
4.7.1	Ações para causa raiz “Falha durante a substituição da bobina N°4”	101
4.7.2	Ações para causa raiz “Bobina solta com relação ao núcleo” e “Falta de torque na bobina de campo N°1”	103
5	CONCLUSÃO	111
5.1	DIFICULDADES DURANTE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	113

5.2	COMPROVAÇÃO DE SUCESSO DO ESTUDO	114
5.3	BENEFÍCIOS DO ESTUDO.....	114
5.4	TRABALHOS FUTUROS.....	115
	REFERÊNCIAS.....	117

1 INTRODUÇÃO

A matriz de transporte traz a ferrovia como o segundo modal responsável pelo transporte de carga no Brasil, sendo responsável por aproximadamente 20% do transporte de cargas no Brasil, conforme é possível verificar no Gráfico 1.1 (ALVARENGA, 2019).

Gráfico 1.1 – Distribuição de modais no Brasil em 2016



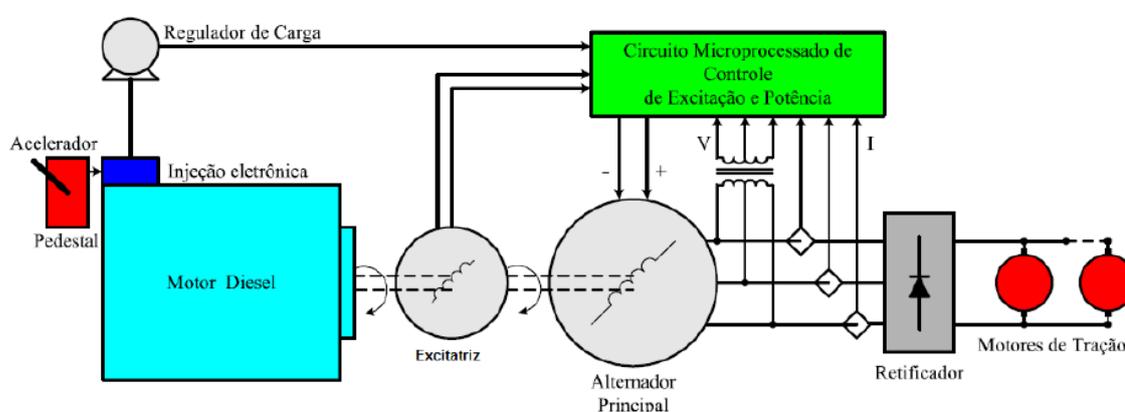
Fonte: Alvarenga (2019).

A importância e o crescimento da ferrovia no Brasil dependem de investimentos governamentais e também do aumento no transporte por essa via por parte das empresas existentes. O investimento governamental fica a cargo dos governantes visualizarem o potencial deste modal e iniciarem o planejamento de investimento. Por outro lado, o aumento do transporte pelas empresas depende de uma melhor confiabilidade das próprias administradoras em seus ativos, de modo a melhorar cada vez mais as suas previsões e seus índices de transporte.

A disponibilidade dos ativos ferroviários é a base pilar para que as empresas consigam melhorar os seus transportes e suas taxas de transporte por quilômetro útil (TKU). Não haverá mudanças significativas se houver um aumento na disponibilidade, mas a confiabilidade dos ativos ser baixa, não estando dentro do esperado pelo sistema do transporte. Confiabilidade em ferrovia ainda não é muito usada no Brasil e, com isso, é possível ter previsão de quebra ou aumento da disponibilidade dos ativos.

No modal ferroviário o principal ativo para o transporte é a locomotiva, nela que se concentra toda a potência que será utilizada para mover um trem. O modelo mais utilizado é o modelo diesel – elétrica, composta por um motor diesel e gerador / motores elétricos, responsáveis por toda a tração. A locomotiva diesel – elétrica pode ser separada em sistemas responsáveis pela transformação da energia durante o funcionamento. A Figura 1.1 ilustra os sistemas em que ocorrem as transformações de energias mecânica – elétrica – mecânica.

Figura 1.1 – Diagrama de funcionamento de uma locomotiva



Fonte: SENAI (2018).

O funcionamento da locomotiva em caráter de transformação de energia ocorre da seguinte maneira: a energia mecânica do motor diesel (MD) passa para o alternador e é transformada em energia elétrica. A energia elétrica se mantém passando pelo retificador e pelos motores de tração (MTs), que a transforma em energia mecânica novamente através das engrenagens MT e do eixo do rodeiro.

O estudo foi realizado na confiabilidade dos MTs. A escolha foi feita devido ao fato de o MT ser o item de maior custo na manutenção de uma locomotiva. Além do custo individual ser elevado – aproximadamente R\$30.000,00 – são usados de 4 a 8 MTs em cada locomotiva, a depender de sua potência (RUMO LOGÍSTICA, 2019). O alto custo deste componente está relacionado à maneira como o componente é utilizado na locomotiva que, na maioria dos casos, ocorre até a falha com nível de desgaste acelerado de seus subcomponentes. A principal mudança que deve ser realizada é a remoção preventiva. Atualmente, não existe um prazo exato que deverá ser realizada a remoção de modo a diminuir os custos de manutenção nos MTs.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

A metodologia RAM requer variadas informações que nem sempre estão prontas a serem consideradas. Na grande maioria, as bases se encontram com informações desordenadas e inconsistentes. Qualquer tipo de base deverá ser levado em consideração, pois qualquer informação é importante para gerar as informações na metodologia RAM.

A curva de confiabilidade de cada subcomponente foi construída com base nas informações e frequência de falha. Essas curvas foram construídas com o auxílio de outra metodologia, a *Life Data Analysis* (LDA). Com essa metodologia foi possível construir modelos que irão traçar a curva de confiabilidade do sistema (MT completo) e seus subcomponentes. A base que existe atualmente foi ser tratada de maneira a conhecer os modos de falhas envolvidos e traçar projeções de falha conforme os modelos definidos. As Tabelas 1.1, 1.2 e 1.3 mostram como estão disponibilizadas as informações em uma base atual, que foi tratada de modo a modelar o MT e seus principais subcomponentes – estator e armadura.

Tabela 1.1 – Falhas em MTs entre janeiro e dezembro de 2017

Mês/Ano	JAN/2017	FEV/2017	MAR/2017	ABR/2017	MAI/2017	JUN/2017	JUL/2017	AGO/2017	SET/2017	OUT/2017	DEZ/2017	Dez/2017
MTs produzidos	32	29	33	30	31	48	51	53	42	28	12	49
Nº de falhas	12	18	20	12	21	17	12	18	8	7	3	6

Fonte: Rumo Logística (2019).

Tabela 1.2 – Falhas em MTs entre janeiro e dezembro de 2018

Mês / Ano	JAN/2018	FEV/2018	MAR/2018	ABR/2018	MAI/2018	JUN/2018	JUL/2018	AGO/2018	SET/2018	OUT/2018	DEZ/2018	Dez/2018
MTs produzidos	44	37	57	56	49	54	61	60	53	66	63	34
Nº de falhas	7	11	12	12	14	4	5	0	6	6	3	1

Fonte: Rumo Logística (2019).

Tabela 1.3 – Falhas em MTs entre janeiro e junho de 2019

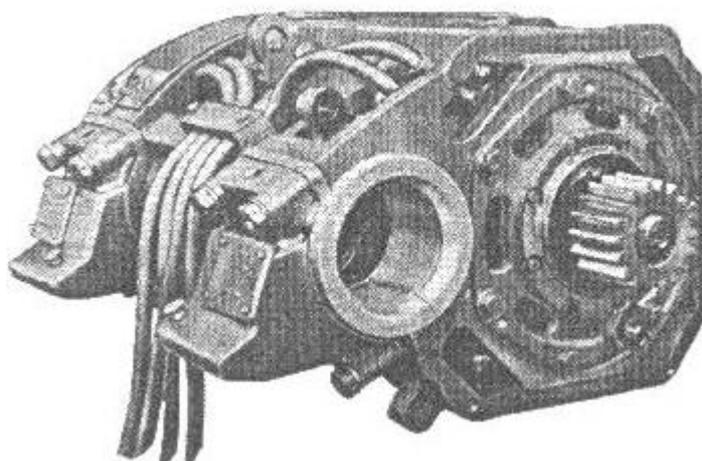
Mês / Ano	JAN/2019	FEV/2019	MAR/2019	ABR/2019	MAI/2019	JUN/2019
MTs produzidos	68	53	49	50	52	46
Nº de falhas	5	3	3	0	1	0

Fonte: Rumo Logística (2019).

As informações trazidas nas Tabelas 1.1, 1.2 e 1.3 nos informam o patamar de falhas nos motores produzidos no processo atual. Subtraindo a quantidade de MTs produzidos pelo número de falhas temos o número de motores que ainda não falharam e estão em funcionamento em alguma locomotiva.

No modelo atual de manutenção dos MTs, existe variados tipos de escopo que influenciam no custo do reparo do item. A Figura 1.2 mostra as partes do MT que foram explicadas posteriormente e os escopos de manutenção de cada uma delas.

Figura 1.2 – Imagem do MT CC



Fonte: SENAI (2018).

Na sequência foi realizado uma explicação dos modelos de manutenção nos subcomponentes de maior representação financeira do MT:

a) Estator:

- Reparação Básica (RP), é realizada qualificações mecânicas (dimensional e inspeção visual), qualificações elétricas (testes de isolamento, verificação de curto em bobinas e verificação de mau contato

com auxílio de termografia) e reparações em pontos apontados nas fases de qualificação;

- Reparação Total (RT), é realizada uma reparação voltando a parte mecânica para os dimensionais *standards* (conforme manuais de fabricante) e a parte elétrica substituindo todo o isolamento (entre espiras e para massa) conforme especificação do fabricante;

b) Armadura:

- Reparação básica com troca de bandagem, é realizada a substituição de bandagem de fixação das bobinas da armadura, qualificações mecânicas (dimensional de eixo e inspeção visual) e elétricas (teste de isolamento e curto entre espiras);

- Substituição de eixo, é realizado a troca do eixo, inspeção das bandagens e qualificações elétricas (teste de isolamento e curto entre espiras);

- Reparação elétrica, é realizada a substituição de todo o isolamento elétrico (entre espiras e massa) conforme especificação do fabricante e qualificações mecânicas (dimensional de eixo e inspeção visual);

- O balanceamento é utilizado em qualquer escopo realizado, conforme parâmetros de fabricante.

Não existe atualmente uma regra que padroniza a montagem dos MTs, ou seja, existem motores montados com variadas combinações de escopo. Por exemplo, pode haver um motor de tração com estator RT e armadura de reparação básica com troca de bandagem. Nessa situação faz-se necessário modelar a confiabilidade de cada escopo dos subcomponentes e certificar o reflexo de cada um no sistema MT.

1.2 OBJETIVOS

Este subtópico apresenta os objetivos dessa pesquisa, divididos entre o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

Aplicar metodologias da Engenharia de Confiabilidade para aumento da confiabilidade do Motor de tração utilizado nas locomotivas. Implementar as ações evidenciadas pelas ferramentas e verificar a projeção / evidencia do aumento da confiabilidade.

1.2.2 Objetivos específicos

O objetivo geral dessa pesquisa demanda diversos objetivos específicos necessários para a realização da análise. São eles:

- a) Realizar levantamento de dados sobre as falhas ocorridas nos períodos de tempo de utilização do MT;
- b) Modelar as curvas de confiabilidade e suas principais métricas para os subcomponentes que tiverem registro de falha no período de acompanhamento;
- c) Utilizar o *software* da Compass para definição da LDA e inserir as distribuições definidas de cada subcomponente no BlockSim para definir o mais crítico e implementar ações para aumento da confiabilidade nos MT.

1.3 JUSTIFICATIVA

A motivação principal para o desenvolvimento do trabalho é trazer para o modal ferroviário a utilização de ferramenta de confiabilidade e procurar ser mais assertivos em seus planejamentos das manutenções. Nos processos atuais é levado em consideração somente o histórico, e não uma visão estratégica de tendência de falhas ou os momentos adequados para realização de determinados escopos de manutenção. A princípio a aplicação de ferramenta de confiabilidade foi realizada no componente MT que é parte significativa do orçamento da manutenção e do retorno, com as estratégias oriundas das metodologias de confiabilidade, e de maior proporcionalidade. Realizando a estruturação da metodologia LDA e Diagrama de Blocos para o processo de MT, existe a expectativa de aumento de confiabilidade desse componente.

A implantação da metodologia proporciona ganhos e contribuição nos seguintes aspectos:

- a) A visualização da curva de confiabilidade do MT e seus principais subcomponentes: com a definição da confiabilidade de cada subcomponente é possível verificar o melhor local para concentrar esforços e aumento da confiabilidade do motor de tração;
- b) Identificar os modos de falhas mais frequentes nos MT e verificar o quanto a confiabilidade é afetada na presença de cada modo de falha, se baseando na metodologia LDA e seus tempos até falhas (TTF).
- c) Melhorar a assertividade das ações que são implementadas para aumento de confiabilidade do MT.

1.4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Segundo Strauss e Corbin (1998), o método de pesquisa é um conjunto de procedimentos e técnicas utilizados para se coletar e analisar os dados. O método fornece os meios para se alcançar o objetivo proposto, ou seja, são as “ferramentas” das quais fazemos uso na pesquisa, a fim de responder nossa questão.

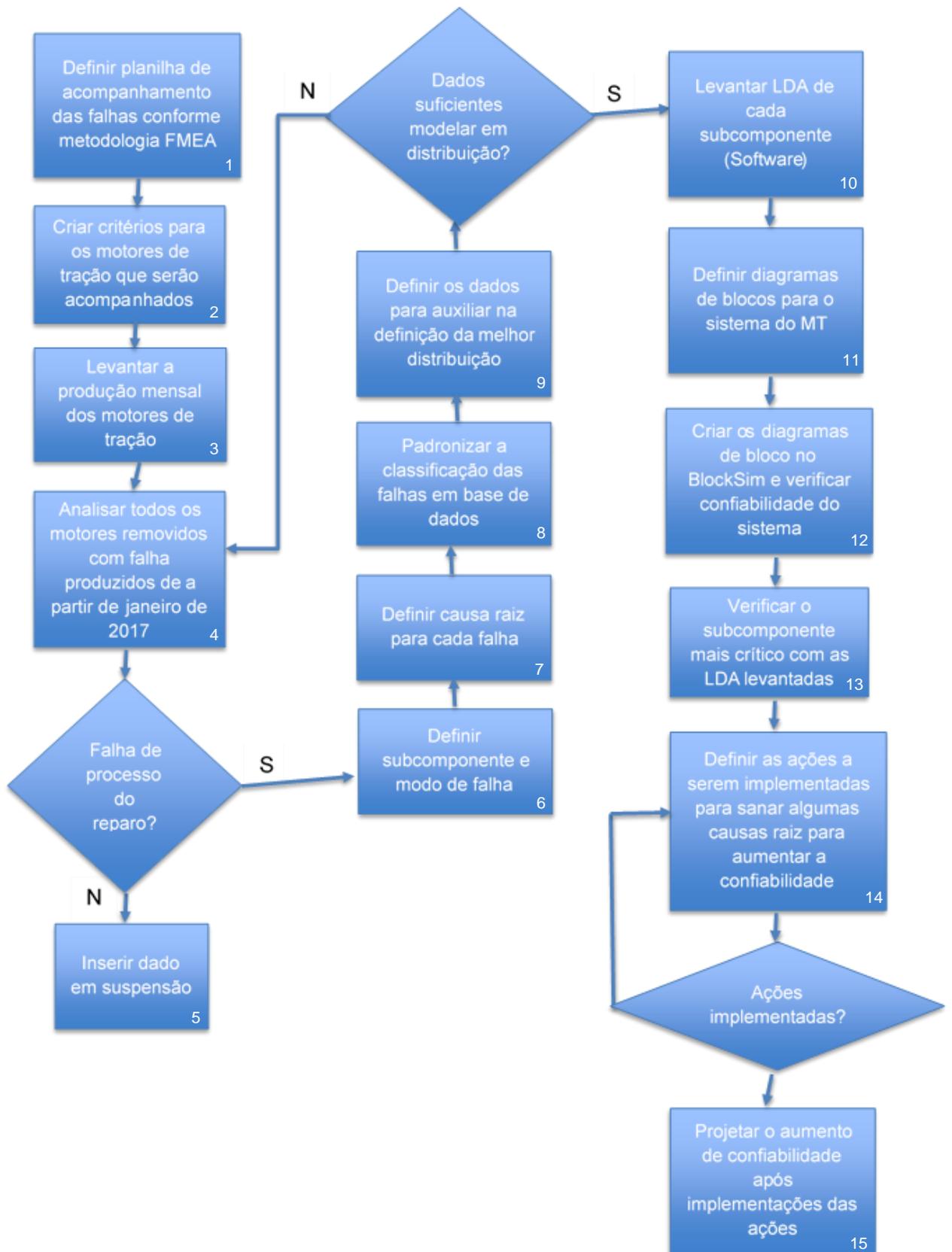
A partir desta definição foram desenvolvidos os seguintes processos para a realização da pesquisa:

- a) Levantar os modos de falhas e suas causas raízes em MT com produção entre janeiro 2017 e junho de 2019. Este levantamento foi realizado através de análises de cada MT que foi recebido com falha. Foram verificados além dos itens citados anteriormente, os TTFs de cada falha e os subcomponentes afetados;
- b) A partir desses dados foram levantados os dados de vida de variadas realizadas para verificar como se comportam de forma estatística as falhas dos MT e verificar a curva de confiabilidade do sistema. Uma das situações que foi verificada é a modelagem de cada subcomponente afetado, para compor posteriormente o agrupamento das modelagens de todos esses subcomponentes e, por fim, a verificação da representatividade da falha de cada subcomponente para a confiabilidade do MT.

- c) Realizar a interligação do sistema (série ou paralelo) através da representação de cada subcomponente para o funcionamento do sistema. Através dessa interligação no BlockSim do *software* da Compass – empresa especializada em *software* de confiabilidade – foi possível visualizar a confiabilidade do sistema. A interligação de confiabilidade e a curva de confiabilidade de cada subcomponente, adquiridas no item anterior, dará uma orientação mais precisa para qual causa raiz sanar, com o intuito de maior confiabilidade. Ou então, avaliar qual o custo benefício dos investimentos no processo do MT que é possível obter maior ganho de confiabilidade e custo.

O fluxograma representado na Figura 1.3 traz as informações macro para entendimento da evolução das etapas e as interações de algumas metodologias da engenharia de confiabilidade. Na sequência cada etapa foi explicada brevemente e no capítulo 4 todas elas foram desenvolvidas com mais profundidade.

Figura 1.3 – Fluxograma de desenvolvimento



Fonte: Autoria própria (2019).

O fluxograma apresenta as etapas para o desenvolvimento do trabalho que foi desenvolvido da seguinte forma:

1. **Definir planilha de acompanhamento das falhas conforme metodologia do FMEA:** nesta etapa foram reunidos profissionais especialistas em MT e exposta a metodologia FMEA. Padronizaram uma planilha com as informações necessárias para chegar a causa raiz das falhas e definiram que os efeitos, subcomponentes, modo de falhas e causa raiz seriam padronizados à medida que as análises fossem desenvolvidas.

2. **Criar critérios para os MT que serão acompanhados:** nesta etapa foram definidos quais lotes de MT seriam acompanhados. O processo teve alteração considerável em janeiro de 2017 e para ter maior números de dados foi colocado o limite até junho 2019.

3. **Levantar a produção mensal dos MT:** nesta etapa foram verificados a produção dos motores no período de acompanhamento das amostras, distinguindo entre aqueles que falharam e não falharam em cada mês. Essa informação foi de suma importância para definir os dados colocados em suspensão e em falhas.

4. **Analisar todos os MT removidos com falha produzidos a partir de janeiro de 2017:** com os critérios de análise definidos na etapa deste fluxo, todos os MT removidos com falha foram analisados com auxílio das metodologias apresentadas no capítulo 3 deste trabalho.

Após esta etapa, o fluxo possui uma tomada de decisão em que a conclusão da análise define se a causa raiz da falha é um erro de processo, considerado como falha para LDA, ou um erro de variável externa ao processo do MT, considerado como suspensão para LDA. Assim, caso a falha fosse causada por um erro externo, segue para a etapa 5, e caso fosse causada pelo processo, segue para a etapa 6.

5. **Inserir dado em suspensão:** as falhas que não são consideradas com erro do processo são definidas como suspensão para a LDA do MT.

6. **Definir subcomponente e modo de falha:** nesta etapa as falhas por processo que foram analisadas passa por uma classificação definindo em qual subcomponente do MT ela foi diagnosticada e tem seu modo de falha definido pelo desdobramento da análise. A padronização destas informações é de suma importância para o desenvolvimento das etapas futuras do estudo.

7. **Definir causa raiz para cada falha:** nesta etapa é definida a causa raiz para a falha. Para chegar a essa definição foi utilizada a metodologia dos 5 Porquês. A dificuldade para chegar nas definições é a falta de informação sobre a falha, mas essa metodologia facilita a busca das informações necessárias para definição da causa raiz correta.

8. **Padronizar a classificar as falhas em base de dados:** nesta etapa foram analisados todos os dados com o objetivo de realizar sua padronização final. Por mais que algumas análises anteriores busque a padronização, sempre é deixado alguma informação de mesmo contexto com descrição diferente. Assim, essa etapa busca acabar com esses erros e retratar da melhor maneira a realidade das falhas do MT.

9. **Definir os dados para auxiliar a definição da melhor distribuição:** nesta etapa foi definida como seriam realizadas as divisões dos dados para aplicação das LDAs individuais no sistema MT. Foi decidido por utilizar uma divisão por subcomponentes. Após a divisão, os dados foram lançados no software Weibull ++ da Compass e também foi utilizado o assistente para definir a melhor distribuição para cada conjunto de dados.

Após esta etapa o fluxo possui outra tomada de decisão, em que se verifica como deve-se realizar a LDA do subcomponente em questão. Caso não seja possível realizar a LDA, retornar a etapa 4 para buscar mais dados até ser possível defini-la. Caso seja possível realiza-la, segue para a etapa 10.

10. **Levantar LDA de cada subcomponente (Software):** nesta etapa é realizada o levantamento da LDA de cada subcomponente. Com a LDA definida, é possível verificar a confiabilidade e os parâmetros de distribuição de cada subcomponente analisado.

11. **Definir diagramas de blocos para o sistema do MT:** nesta etapa foi verificada qual a melhor configuração de interligação dos subcomponentes para o correto funcionamento do MT. Os subcomponentes têm a mesma importância para o funcionamento do MT, caso algum falhe, todo o sistema passa a não operar. Dessa forma, o sistema foi definido como sendo em série.

12. **Criar os diagramas de bloco no BlockSim e verificar confiabilidade do sistema:** nesta etapa é criado o diagrama de blocos no *software* BlockSim da Compass. Cada bloco possui as informações do subcomponente (dados do modelo de distribuição) e são interligados conforme a configuração definida anteriormente.

Com os blocos configurados e interligados é possível definir a curva de confiabilidade do sistema MT. A partir da curva é possível definir estatisticamente a confiabilidade do subcomponente em um determinado período de tempo.

13. **Verificar o subcomponente mais crítico com as LDAs levantadas:** O *software* BlockSim possui um gráfico que define o subcomponente mais crítico levando em consideração a distribuição de cada bloco. Esta definição auxilia na decisão sobre onde as ações devem ser implementadas para ter maior ganho de confiabilidade.

14. **Definir as ações a serem implementadas para sanar algumas causas raiz e aumentar a confiabilidade:** nesta etapa são definidas ações que suportam a melhoria da confiabilidade. Sua representação é definida pela criticidade do subcomponente apontada na etapa 13 do fluxo.

Após esta etapa é inserida outra decisão ao fluxo em que se verifica se as ações definidas para melhoria do processo foram implementadas. Caso não foram retorna a etapa anterior, e caso tenha sido implementada, passa para a etapa 15.

15. **Projetar o aumento de confiabilidade após implementar as ações:** nesta etapa é definida a confiabilidade do sistema após a implementação das ações. Como no acompanhamento é possível definir a quantidade de falhas por subcomponente e, com isso, sua representação para a LDA, a projeção da confiabilidade leva em consideração a nova LDA do subcomponente após a implantação das ações e redução.

O desenvolvimento desde fluxograma define todo o processo do trabalho, informando os pontos pertinentes e quais metodologias da Engenharia de Confiabilidade foram implementada.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos:

- a) Capítulo 1: apresenta as informações introdutórias ao trabalho, com uma breve contextualização do tema abordado, a justificativa do estudo, seus objetivos e os procedimentos metodológicos;
- b) Capítulo 2: apresenta o detalhamento do processo de manutenção em MT, de modo a delinear os pontos de oportunidades e os componentes

que contribuem para as falhas. Algumas exposições (gráficos e indicadores) foram feitas durante o acompanhamento dos processos.

- c) Capítulo 3: apresenta toda a parte teórica das metodologias de confiabilidade que foram utilizadas durante o trabalho. As principais metodologias que foram utilizadas são a LDA e os diagramas de blocos com o modelo de confiabilidade de sistema, série e paralelo;
- d) Capítulo 4: apresenta a aplicação de toda a teoria exposta no capítulo anterior. Para tanto, foi realizada a modelagem de todo o sistema e seus pontos conforme for evoluindo o levantamento realizado; a definição do modelo de confiabilidade que exemplifica todo o processo de funcionamento MT, com base nas falhas ocorridas no período citado no item 1.4 deste trabalho; os pontos foram inseridos no software BlockSim da empresa Compass para, assim, verificar as oportunidades e as opções para implantação de melhoria no componente MT;
- e) Capítulo 5: apresenta as conclusões do trabalho, expondo quais são os pontos positivos e negativos verificados durante a evolução desta análise. As dificuldades encontradas durante o trabalho e quais as saídas a serem realizadas para superá-las. As conclusões verificadas com a aplicação da metodologia de LDA e diagrama de blocos do componente MT e os benefícios que irão ficar para empresas que trabalham com o componente utilizando metodologias de confiabilidade

2 MOTOR DE TRAÇÃO

Este capítulo aborda o funcionamento de um motor elétrico de corrente contínua, para entender o funcionamento do MT, descreve a performance de uma locomotiva, dos subcomponentes do MT e ainda apresenta alguns detalhes sobre a função do MT no processo de manutenção de uma locomotiva. Estas abordagens são necessárias para compreender o porquê utilizar o MT na metodologia e para o aumento da confiabilidade.

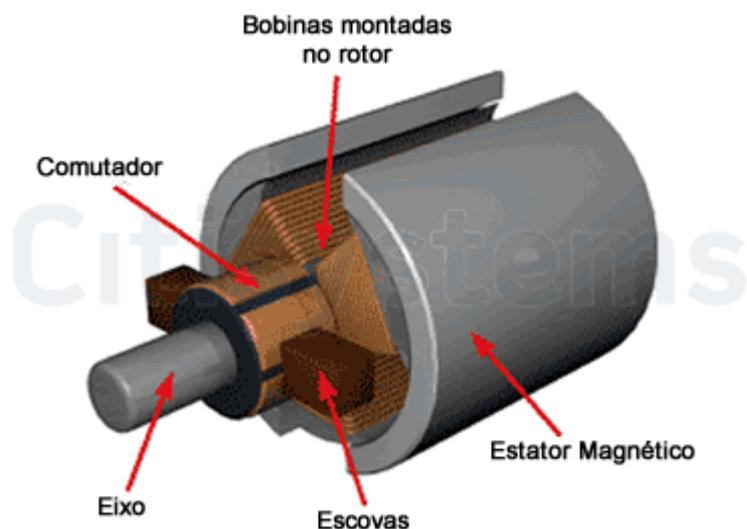
As locomotivas existentes no mercado nacional são, em sua maioria, Diesel Elétrica e o seu funcionamento foi descrito de forma breve na introdução deste trabalho. As locomotivas existentes no Brasil, e que foram produzidas até o ano de 2008, têm em seu circuito de tração motores de corrente contínua (CC) e de 2008 até os dias atuais são de corrente alternada (CA). Como a grande maioria da frota nacional tem sua fabricação anterior a 2008, ou seja, são motor CC, e, conseqüentemente, a maioria das manutenções realizadas também são nestes modelos, estes são os MTs expostos no presente trabalho. (MRS..., 2008).

No andamento deste capítulo todos os conceitos básicos de um motor CC foram expostos, de modo a melhorar o entendimento do item e de suas partes. A definição mais básica sobre o motor CC, e que deve ser de conhecimento de todos os leitores, é a definição de motor elétrico. O motor elétrico é uma máquina que permite a conversão de potência elétrica em potência mecânica com pequenas perdas, ou seja, ao introduzir uma corrente elétrica em motor, sairá energia mecânica através da rotação do eixo. (SENAI, 2018).

O motor CC, segundo Silveira (2019a), nada mais é do que um motor alimentado por corrente contínua, sendo esta alimentação proveniente de uma bateria ou qualquer outra de alimentação CC. A sua comutação – troca de energia entre rotor e estator – pode ocorrer através de escovas ou sem escovas. Em relação a velocidade, o motor CC pode ser controlado apenas variando a sua tensão, diferentemente de um motor elétrico CA, cuja a velocidade é variada pela frequência.

Um motor CC é composto por um eixo acoplado ao rotor que é a parte girante do motor. O estator é composto por um ímã e o comutador tem a função de transferir a energia da fonte de alimentação ao rotor (SILVEIRA, 2019a). A Figura 2.1 ilustra as partes que compõem um motor CC.

Figura 2.1 – Parte de um motor de corrente contínua



Fonte: Silveira (2019a).

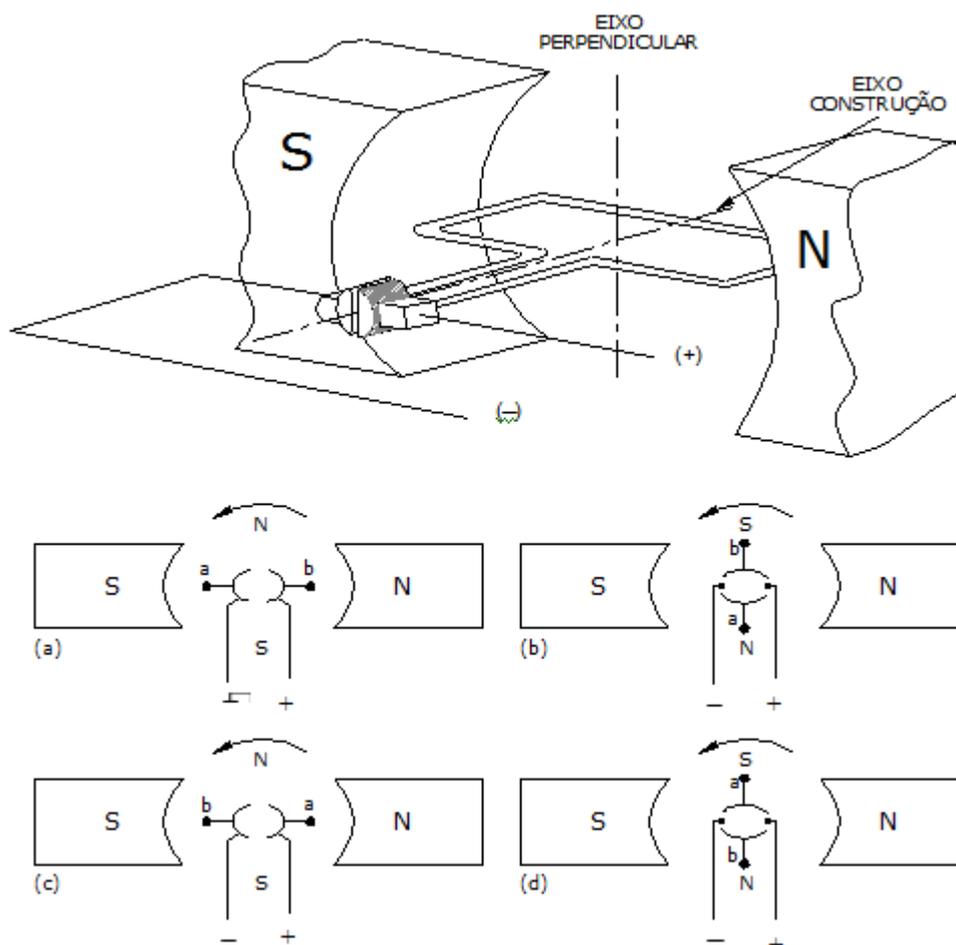
As figuras e as explicações servirão para dar suporte no processo de compreensão do funcionamento de motor no conceito magnético do funcionamento.

O motor CC, segundo a definição do SENAI

é um motor com os campos polo norte e polo sul de um ímã permanente. Existe uma espira de forma retangular e nos seus extremos estão ligados dois semi-anéis que recebem tensão pelas escovas (+ e -). Quando em uma bobina, no caso a espira, se aplica uma tensão, formará no sentido perpendicular ao eixo construtivo, 2 polos magnéticos sendo que os mesmos são opostos um ao outro. (SENAI, 2018, p. 22).

Conforme a Figura 2.2 ilustra, quando o motor se encontra na posição “a”, formará na parte superior um polo norte e na parte inferior, um polo sul. Estes polos serão atraídos pelos seus opostos do ímã permanente e a atração fará a espira mudar de acordo com a posição “b”. Se o giro fosse muito lento, a espira pararia na posição “b”. Mas, como existe uma inércia para esta parada, na realidade, a espira irá girar até encontrar a posição “c”. Neste ponto, volta a repelir novamente repetindo o que houve na posição “a” e assim sucessivamente, até quando for interrompida a alimentação da espira. Nas posições “b” e “d” não há alimentação na espira, estes pontos são chamados de ponto neutro (SENAI, 2018).

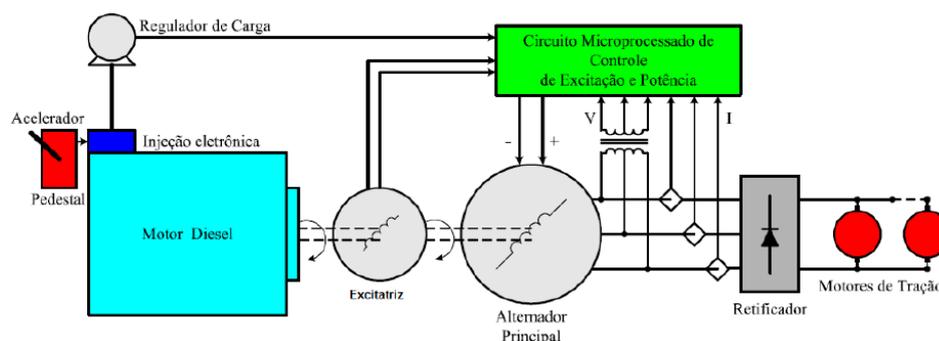
Figura 2.2 – Funcionamento magnético de um motor elétrico



Fonte: SENAI (2018).

Até o presente momento foi abordado os conceitos que ajudam a compreender o funcionamento de um motor de CC. Estes conceitos teóricos são de suma importância para entender de forma detalhada todo o funcionamento de uma locomotiva. A Figura 2.3 ilustra todo o funcionamento de uma locomotiva.

Figura 2.3 – Funcionamento de uma locomotiva



Fonte: SENAI (2018).

O funcionamento de uma locomotiva se inicia através de um banco de baterias que alimentam motores de arranque, realizando a conversão de energia elétrica em energia mecânica de giro, presente no eixo do motor de arranque. O giro será transferido ao MD, que através do seu circuito de injeção eletrônica (existem em alguns casos a injeção mecânica), entrará em combustão mantendo o giro do mesmo. Desse modo, ele gera uma energia mecânica com todo o potencial que será consumido durante o funcionamento da locomotiva. O giro do MD será transferido para a excitatriz e alternador principal através de um conjunto de engrenamento.

A excitatriz, é um modelo de gerador de corrente contínua, que tem como princípio de funcionamento a geração de energia através da alimentação de suas bobinas de campo com corrente oriunda da bateria. A produção de energia elétrica da excitatriz irá alimentar o campo do alternador principal, que também por princípio, gera uma tensão alternada de 3 fases. Estas serão retificadas (corrente contínua) através do retificador. Todo o controle de potência que a locomotiva necessita é realizado através do Circuito Microprocessado de Controle de excitação e potência, que monitora a tensão e corrente produzida pelo Alternador Principal e controlando a rotação do MD e a excitação produzida pela excitatriz. O MT entrará em funcionamento com a energia elétrica vinda do retificador e entregando energia mecânica. Através do engrenamento inicia-se o giro da roda movimentando a locomotiva.

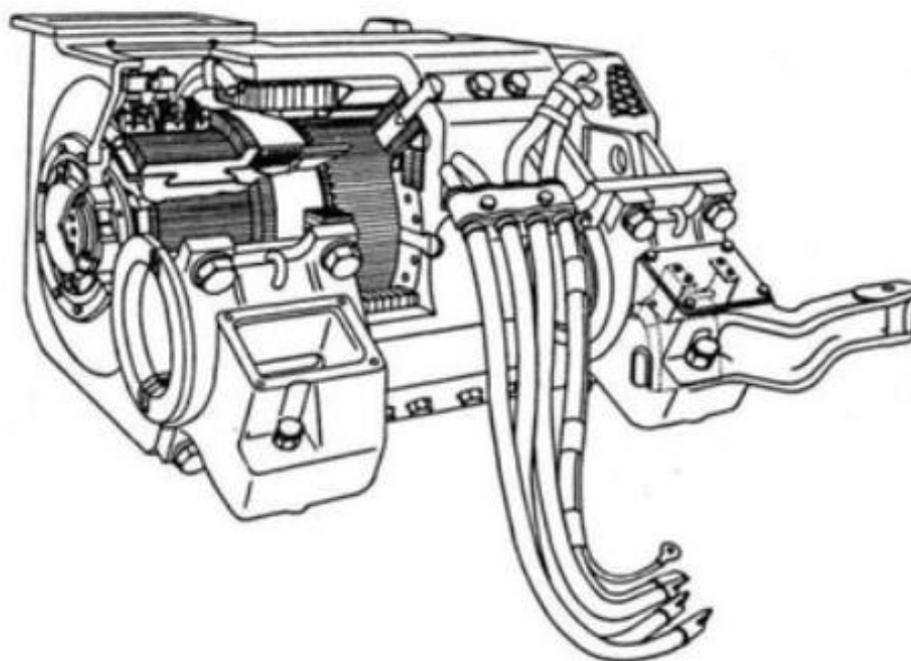
O MT é um componente que possui o mesmo princípio de um motor elétrico CC, conforme citado anteriormente. O conhecimento de seus subcomponentes é necessário para o entendimento do estudo de confiabilidade, que é o objetivo deste trabalho. Os seus subcomponentes são:

- a) Estator;

- b) Bobina Campo;
- c) Bobina interpolo;
- d) Cabo de saída;
- e) Cabo de interligação;
- f) Capa do mancal lado pinhão (LP) e lado comutador (LC);
- g) Armadura;
- h) Comutador;
- i) Porta-escovas;
- j) Rolamento LP e LC;
- k) Pinhão;
- l) Alojamentos LP e LC;
- m) Duto de ar.

Por fim, é possível ver na Figura 2.4 um exemplo de um motor de tração CC.

Figura 2.4 – Representação em corte de um motor de tração CC



Fonte: Bentes (2019).

O MT foi monitorado durante o período de janeiro de 2017 a junho de 2019 em uma frota de locomotivas de uma ferrovia brasileira. Essa ferrovia possui uma população de aproximadamente 2300 MT, que são utilizados nas locomotivas que percorrem toda a região Sul do Brasil. As remoções dos motores das locomotivas são praticadas em dois escopos principais: a parte da manutenção corretiva e a

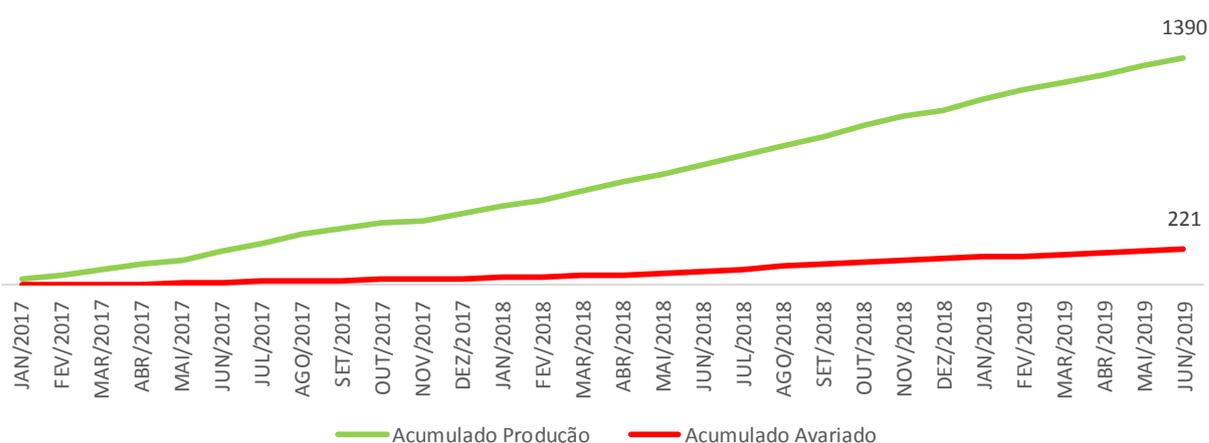
manutenção preventiva. Na sequência foi definido o conceito de cada modelo de manutenção.

Segundo Freitas (2016), a manutenção corretiva é a forma mais primitiva de manutenção, como foi mostrado anteriormente na Evolução da Manutenção. Ela se baseia simplesmente na correção de uma falha ou do desempenho menor que o esperado, ou seja, é uma manutenção de emergência.

Já a manutenção preventiva é a manutenção voltada para evitar a ocorrência de falhas ou quedas de desempenho, através de manutenções em intervalos de tempo pré-definidos, obedecendo um plano previamente elaborado. Diferentemente da manutenção corretiva, a preventiva, como o próprio nome sugere, procura prevenir, evitar a ocorrência de falhas. É imprescindível quando o fator segurança se sobrepõe aos demais (FREITAS, 2016).

Os MT produzidos no período delimitado pelo estudo, foram removidos para manutenção corretiva quando as manutenções e análises buscavam as causas de um problema existente, ou foram removidos para manutenção preventiva, quando o objetivo era monitorar o MT. Este acompanhamento tornou possível realizar várias análises para auxiliar no estudo de confiabilidade deste componente. O Gráfico 2.1 apresenta a quantidade acumulada de MT produzidos e recebidos com avaria durante o período de acompanhamento.

Gráfico 2.1 – Acumulado de produção e recebimento de avariados

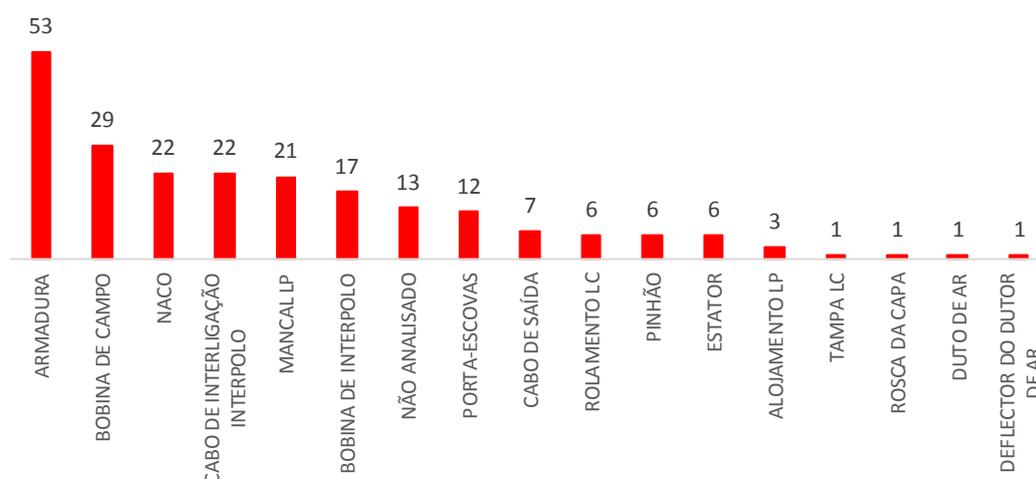


Fonte: Rumo Logística (2019).

Foram analisados 221 MTs, e com essa análise foi possível levantar todos os subcomponentes afetados e suas causas raízes para cada modo de falha encontrado. Os subcomponentes que tiveram registro de qualquer tipo de modo de falha foram

mapeados e colocado em gráfico de Pareto para ter visibilidade de qual subcomponente teve mais registro de falha. O componente de maior registro de falha pode não ser o componente de menor confiabilidade, pois além da quantidade de falhas, a confiabilidade também depende quanto tempo demorou para que as falhas de cada subcomponente ocorressem. O Gráfico 2.2 apresenta a quantidade avarias registradas em cada subcomponente no período analisado.

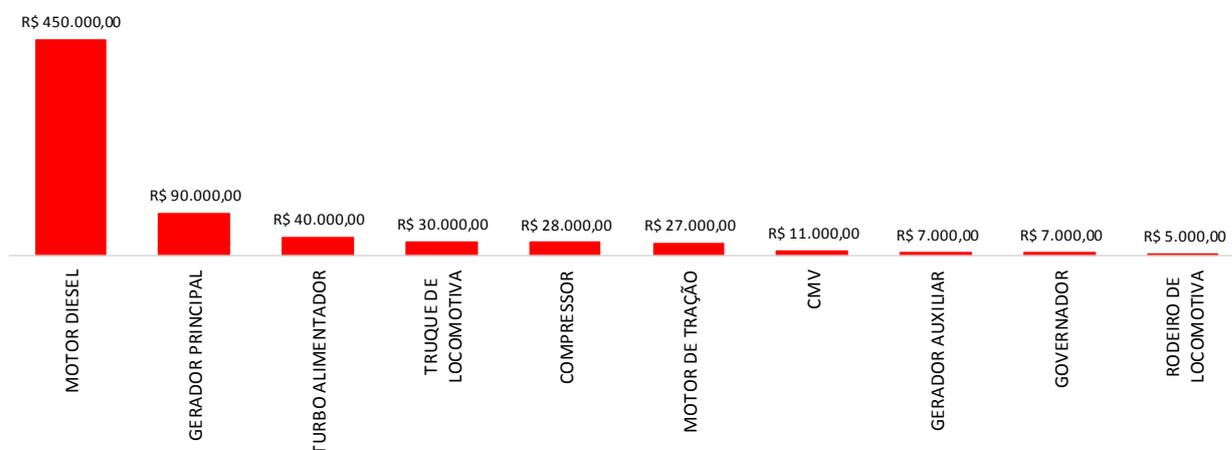
Gráfico 2.2 – Quantidade de avarias por subcomponente



Fonte: Rumo Logística (2019).

Além do mapeamento do alto número de falhas, também foram analisados os custos de manutenção do MT. Apesar de não ser o item de maior custo individual, quando os orçamentos são analisados, ele se torna o componente de maior custo da locomotiva devido ao alto volume produzido. Os Gráficos 4 e 5 apresentam dados sobre o custo aproximado do componente individual, e o custo individual mais a produção do componente, respectivamente.

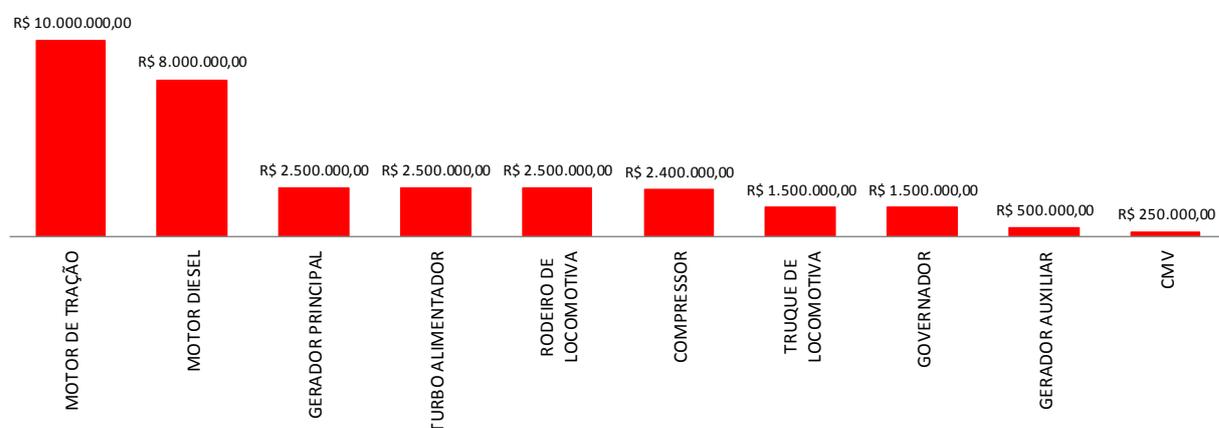
Gráfico 2.3 – Custo individual aproximado de componente classe A da locomotiva



Fonte: Rumo Logística (2019).

O Gráfico 2.4 apresenta o custo acumulado do MT (com representação de quantidade consumida) em comparação com os principais subcomponentes da locomotiva.

Gráfico 2.4 – Custo acumulado com a quantidade produzida entre janeiro e setembro de 2019



Fonte: Rumo Logística (2019).

Neste capítulo foi apresentado um breve resumo do funcionamento de um motor de corrente contínua, com seu comportamento magnético e princípio de giro, juntamente com as funções de algumas partes do motor de corrente contínua. Trazendo a utilização do motor CC que impulsiona a locomotiva para andar, foi mencionado o funcionamento de uma locomotiva com os seus principais componentes. A explicação foi bem resumida levando em consideração todo o tipo de controle existente dentro das locomotivas. Após o entendimento do funcionamento o

MT, foram detalhados os subcomponentes existentes, de modo a familiarizar o leitor com os conceitos, para quando for introduzido o estudo de confiabilidade. O levantamento que será considerado para objeto de estudo também foi explicitado neste capítulo. Assim, já é possível ter uma percepção sobre os subcomponentes que tiveram registro de falha e os custos envolvidos na manutenção do MT.

Tudo o que foi mencionado neste capítulo é base para o entendimento de todo o estudo apresentado. O funcionamento de um motor CC informa sobre os fenômenos eletromagnéticos que envolvem o objeto de estudo. O funcionamento da locomotiva informa sobre onde está inserido o componente, sua função e os escopos de manutenções praticados atualmente nas ferrovias brasileiras. A abertura dos subcomponentes é importante para traçar as curvas de confiabilidade de todo o sistema e também a confiabilidade de cada subcomponente, de modo a esclarecer o local de menor confiabilidade do sistema que necessita ser depositado o esforço da manutenção.

A base de dados utilizada para um estudo de confiabilidade é o item mais importante de todo o estudo, sem ela não é possível traçar as curvas de confiabilidade e caso ela não retrate o cenário mais próximo da realidade, pode direcionar de forma errada a solução para o problema. Este capítulo apresentou a forma como foi realizada a coleta de dados, os períodos considerados e algumas classificações importantes para o desenvolvimento do trabalho. Em qualquer empresa, independente do ramo que está inserida, a questão financeira tem um peso considerável na tomada de decisão. Sendo assim, foi evidenciado que o MT tem o maior custo anual dos componentes de locomotivas. Devido ao alto custo e uma base de dados com detalhes suficientes para realização de um estudo de confiabilidade, o MT se tornou elegível para realização de um estudo de confiabilidade aprofundado.

O capítulo 2 aborda as metodologias e ferramentas da área de confiabilidade utilizadas para tratar a base de dados obtida. Assim, é possível realizar a projeção de vida do MT, devido ao conhecimento dos TTFs e a utilização de distribuições de modelos estatísticos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os referenciais teóricos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. As metodologias que serão apresentadas é a análise de modo e efeito de falha (FMEA), análise de dados de vida (LDA) e distribuições estatística para análise dos dados. As metodologias é base para o estudo e quantifica a confiabilidade atual e projeção do MT.

O desenvolvimento da pesquisa teve como base várias metodologias da engenharia de confiabilidade. Todas elas contribuíram para definir a base de dados a ser verificada e analisadas para definição da melhor distribuição a ser implementada para cada subcomponente e para o MT como um sistema completo. Na sequência é apresentado o referencial teórico que embasa este trabalho.

3.1 ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA - FMEA

A metodologia de Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA) é uma das metodologias utilizadas neste trabalho para auxiliar na classificação das falhas encontradas no MT e organizar todas as informações. O FMEA é uma técnica que define, identifica e elimina falhas conhecidas ou potenciais, de sistemas, projetos, processos, máquinas e/ou serviços, antes que atinjam o cliente (STAMATIS, 2003). O FMEA é uma técnica que evoluiu ao longo do tempo, e isso se deve ao fato dela ser uma das ferramentas mais utilizadas no setor de confiabilidade. O Quadro 3.1 apresenta algumas evoluções da técnica FMEA.

Quadro 3.1 – Evolução da técnica de FMEA

A EVOLUÇÃO DA TÉCNICA FMEA	
FMEA tradicional	suplementos ao FMEA
FMEA tabular (1950)	Análise de Criticidade (1950)
Matriz FMEA (1977)	Análise de Riscos (1950)
Software FMEA (1979)	Método da combinação de falhas (1981)
FMEA aplicado a computadores (1982)	

Fonte: Dussault (1984).

Segundo Puente (*et al*, 2002), essa ferramenta se divide em dois estágios, sendo o primeiro a identificação de modos de falha de um produto em que seus efeitos prejudiciais são identificados. No segundo estágio os times de engenheiros ou profissionais experientes (conhecedores do produto) determinam o nível crítico destas falhas e as colocam em ordem. A falha mais crítica foi colocada como a primeira do ranking de falhas e como prioridade para ações mitigadoras.

Segundo Vollertt Junior (1996), quando uma falha dá origem a um problema no processo / projeto de um produto, e essa falha gera impactos aos consumidores desse produto, chamamos isso de efeitos. Os efeitos podem ser primários, quando estes afetam diretamente a confiabilidade do produto, ou secundários, quando trazem insatisfação somente ao usuário do produto.

O modo de falha pode ser definido como a maneira na qual o defeito se apresenta ou a maneira como o item falha ou deixa de apresentar o resultado esperado. Mas este conceito fica um tanto vago se não for especificado em que nível a falha se apresenta ou onde ela é descrita. Portanto, os modos de falha podem ser identificados em vários níveis e pontos de um sistema, desde os elementos de montagem de um componente até os modos de falhas de um subsistema (VINADÉ *et al*, 2001).

A ferramenta ainda verifica cada modo de falha através de índices, que avaliam quantitativamente a gravidade de cada um deles. Abaixo segue uma definição dos três índices utilizados pelo FMEA (RIGONI, 2019):

- a) Severidade: Impacto para ao sistema que o produto está inserido caso ocorra a falha. Pode ser considerado como impacto na confiabilidade,

segurança, custo, parada do sistema e outros fatores importantes do sistema (RIGONI, 2019);

- b) Ocorrência: probabilidade de ocorrência de um determinado tipo de falha (RIGONI, 2019);
- c) Detecção: Probabilidade de identificação da falha durante o processo de reparo / montagem de sistema (RIGONI, 2019).

3.2 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)

A análise de dados de vida (LDA) foi utilizada no desenvolvimento do trabalho para definir a confiabilidade de todo o sistema e de cada subcomponente que tenha sido registrada pelo menos uma falha durante o período de acompanhamento. O conceito de confiabilidade deve estar claro antes de elevar o conhecimento sobre LDA.

Segundo Blanchard e Fabrycky (1990), confiabilidade é uma característica inerente ao projeto e pode ser definida como a probabilidade na qual um sistema ou produto irá operar de modo satisfatório em um dado intervalo de tempo, quando utilizado restrito às condições de operação específicas.

A confiabilidade, apesar de ser uma metodologia matemática e estatística, sua aplicação em produtos e equipamentos tem impacto direto no desempenho financeiro das empresas. Os benefícios agregados quando se utiliza das metodologias de confiabilidade podem ser definidos a partir do aumento da produção de uma linha, redução de paradas não programadas, redução dos custos de manutenção auxiliando na execução na hora certa, redução dos custos e índices de acidentes (SILVEIRA, 2019b).

A LDA requer um banco de dados e estes são tratados com algum tipo de distribuição estatística. Essas distribuições foram formuladas por estatísticos, matemáticos e/ou engenheiros com o intuito de modelar matematicamente ou representar determinado comportamento. Existem variadas distribuições que são frequentemente utilizadas para definições que melhor se enquadram em suas especificações (RAMOS JUNIOR, 2019). Algumas definições de alguns modelos, segundo Ramos Junior (2019):

- a) Exponencial: Possui taxa de falhas constantes, parte de falha aleatória da curva da banheira (RAMOS JUNIOR, 2019);

- b) Exponencial 2P: Representa vida mínima (RAMOS JUNIOR, 2019);
- c) Normal, Logística, Gumbel: Representa bem dados com falha por desgaste (RAMOS JUNIOR, 2019);
- d) Lognormal: Além da representação por desgaste também tem um foco em falhas prematuras (RAMOS JUNIOR, 2019);
- e) Weibull 2P e 3P: Essa é a distribuição mais usada representa todos os tipos de falhas (Prematura, Aleatória e Desgaste) (RAMOS JUNIOR, 2019);
- f) Loglogística: Representa falhas com característica prematuras (RAMOS JUNIOR, 2019);
- g) Gama, Gama G: representa todas os tipos de falhas, mas geralmente utilizada para bases com número de dados acima de 150 (RAMOS JUNIOR, 2019).

Durante a definições de alguns modelos foi utilizado o termo taxa de falhas, que significa o número de falhas por unidade de tempo. A variável tempo pode ser qualquer medida quantificável, por exemplo dia, minutos, ciclos, entre outras medidas. A função taxa de falha matematicamente está exposta na Equação 3.1 (RIBEIRO, 2011).

Equação 3.1 – Taxa de falha

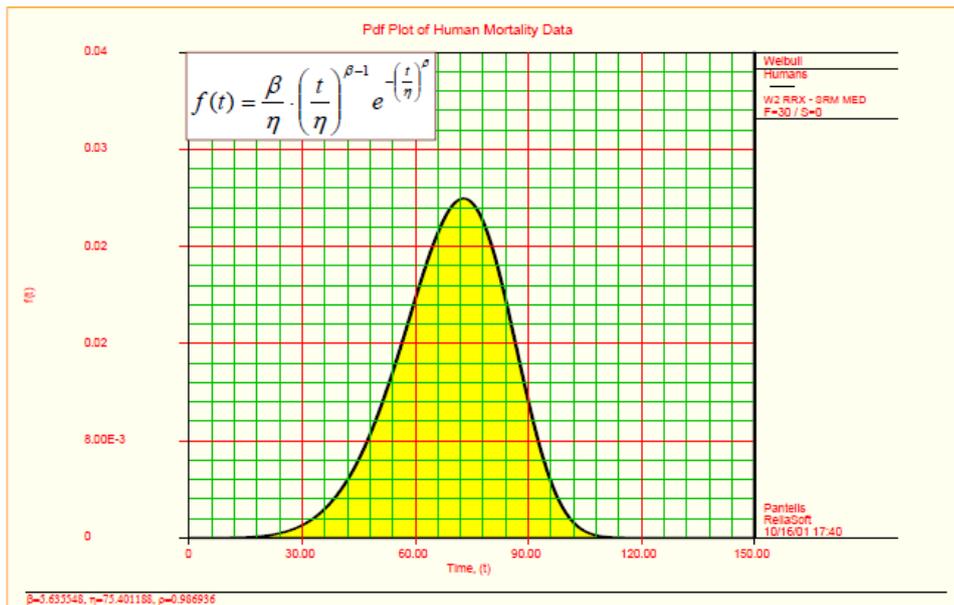
$$\lambda_i = \frac{N_i}{T}$$

Fonte: Ribeiro (2011).

onde λ_i taxa de falha, N_i número de falhas e T período de tempo.

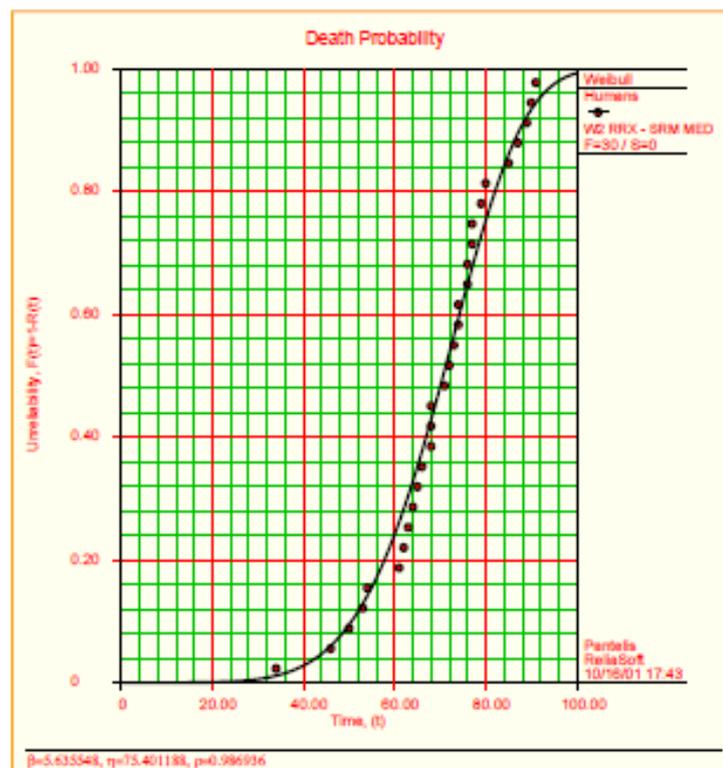
As distribuições também possuem a suas representações gráficas em que as principais são: Função Densidade de Probabilidade (PDF), Probabilidade de Falha $[F(t)]$ e Confiabilidade $[R(t)]$. Os Gráficos 3.1, 3.2, e 3.3 exemplificam cada uma dessas funções importantes para o entendimento do desenvolvimento do trabalho. Primeiramente, o Gráfico 3.1 exemplifica a função PDF (RAMOS JUNIOR, 2019).

Gráfico 3.1 – Função Densidade de Probabilidade (PDF)



Fonte: Spanó (2018).

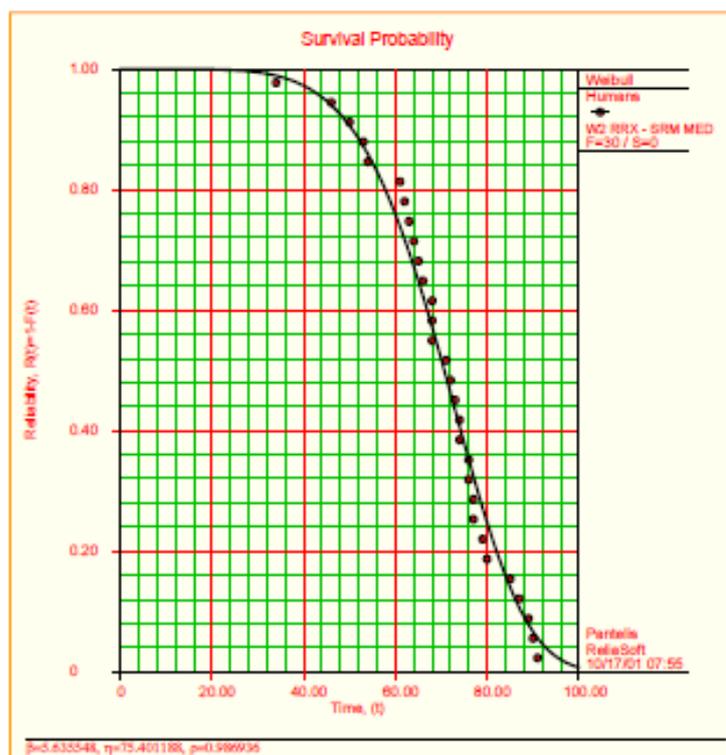
O Gráfico 3.2 exemplifica uma curva de probabilidade de falha $F(t)$.

Gráfico 3.2 – Probabilidade de falha $F(t)$ 

Fonte: Spanó (2018).

O Gráfico 3.3 exemplifica uma curva de confiabilidade $R(t)$, essa curva será importante para todo o desenvolvimento do trabalho.

Gráfico 3.3 – Confiabilidade R(t)



Fonte: Spanó (2018).

Em todas as distribuições existem algumas métricas que podem ser observadas (RAMOS JUNIOR, 2019):

- a) Confiabilidade, $R(t)$: Probabilidade de que a falha não ocorrerá no tempo (t) (RAMOS JUNIOR, 2019);
- b) Desconfiabilidade, $F(t)$: Probabilidade de que a falha será observada no tempo (t) (RAMOS JUNIOR, 2019);
- c) Vida B_x : Tempo em que a não confiabilidade é igual a $X\%$ (por exemplo, B_{20} é o tempo no qual 20% das falhas ocorrerão) (RAMOS JUNIOR, 2019);
- d) Vida Mediana: Tempo no qual 50% das falhas são esperadas (RAMOS JUNIOR, 2019)

3.2.1 Distribuição exponencial

A distribuição exponencial se caracteriza por ter uma taxa de falha (λ) constante, sendo a única de todas as distribuições com esta propriedade. A Equação

3.2 apresenta a fórmula matemática pela qual é possível verificar a PDF desta função (RAMOS JUNIOR, 2019).

Equação 3.2 – Densidade de Probabilidade

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

Fonte: Ramos Junior (2019).

Onde λ Parâmetro de Distribuição e t variável aleatória.

Como já apontado anteriormente, a função confiabilidade se desdobra matematicamente conforme a Equação 3.3.

Equação 3.3 – Função de confiabilidade

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda s} ds \\ &= 1 - [1 - e^{-\lambda t}] \\ &= e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

Fonte: Ramos Junior (2019).

Onde λ Parâmetro de Distribuição e t variável aleatória

A comprovação da taxa de falha constante é realizada através da definição matemática expressa na Equação 3.4 (RAMOS JUNIOR, 2019).

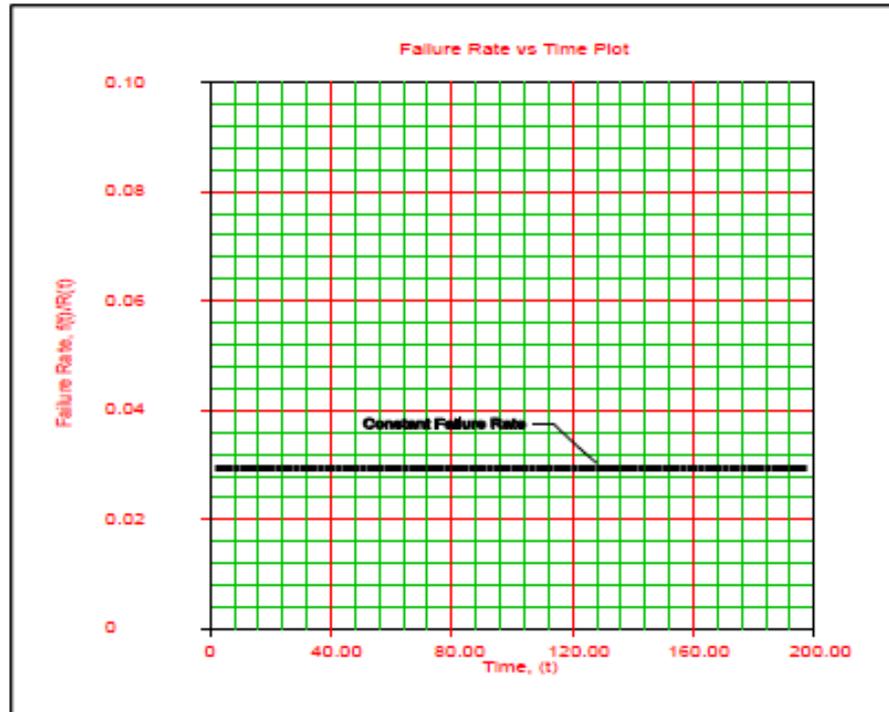
Equação 3.4 – Taxa de falha

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

Fonte: Ramos Junior (2019).

E, enfim, sua representação gráfica (Gráfico 3.4).

Gráfico 3.4 – Representação da taxa de falhas de uma distribuição exponencial



Fonte: Ramos Junior (2019).

O conceito de tempo médio até a falha (MTTF) é muito utilizado em confiabilidade para a distribuição exponencial, e é dado pela Equação 3.5 (RAMOS JUNIOR, 2019).

Equação 3.5 – Tempo Médio até a Falha (MTTF)

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$$

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

Fonte: Ramos Junior (2019).

3.2.2 Distribuição Weibull

A distribuição Weibull é a distribuição mais usada, pois é que a melhor se ajusta na maioria dos dados devido a sua flexibilidade. A PDF desta distribuição é dada pela Equação 3.6 (CARACTERÍSTICAS..., 2005).

Equação 3.6 – Densidade de Probabilidade Distribuição de Weibull

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

Onde:

$$f(T) \geq 0, T \geq 0 \text{ or } \gamma, \beta > 0, \eta > 0, -\infty < \gamma < \infty$$

e:

- β é o parâmetro de forma, conhecido também como inclinação da distribuição Weibull
- η é o parâmetro de escala
- γ é o parâmetro de posição

Fonte: CARACTERÍSTICAS... (2005).

As definições de confiabilidade e taxa de falha são obtidas através do desdobramento da mesma maneira que foi definida pela distribuição exponencial. (CARACTERÍSTICAS..., 2005). As Equações 3.7 e 3.8 apresentam as formulações matemáticas para obter os resultados:

Equação 3.7 – Confiabilidade Distribuição Weibull

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

e:

- β é o parâmetro de forma, conhecido também como inclinação da distribuição Weibull
- η é o parâmetro de escala
- γ é o parâmetro de posição

Fonte: CARACTERÍSTICAS... (2005).

Equação 3.8 – Taxa de falhas Distribuição Weibull

$$\lambda(T) = \frac{f(T)}{R(T)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

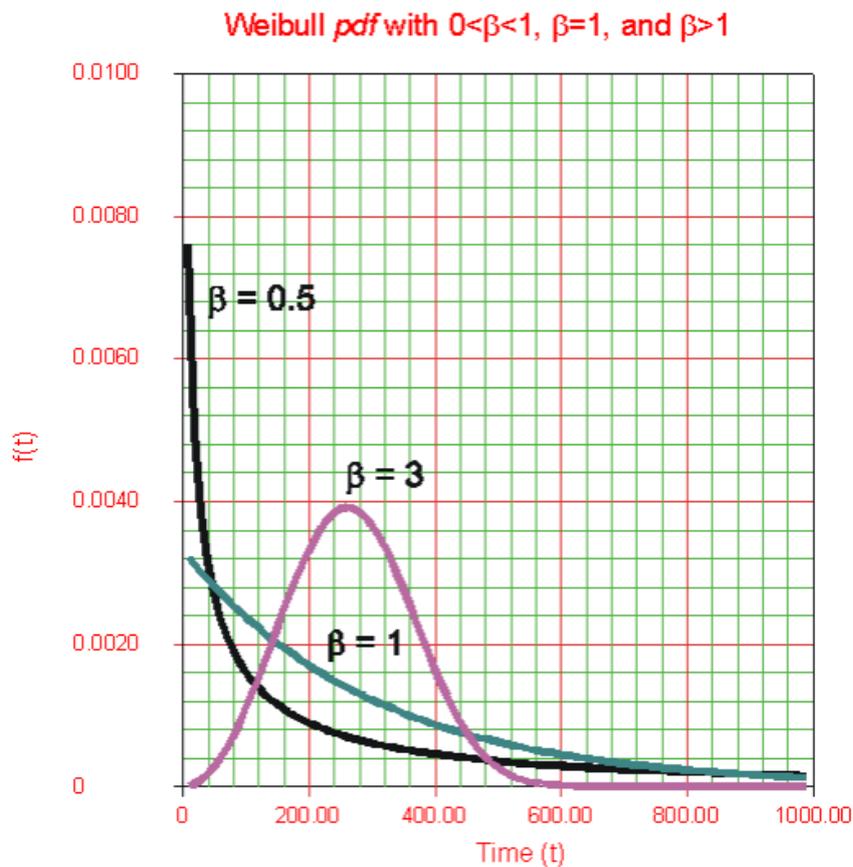
e:

- β é o parâmetro de forma, conhecido também como inclinação da distribuição Weibull
- η é o parâmetro de escala
- γ é o parâmetro de posição

Fonte: CARACTERÍSTICAS... (2005).

O valor de β na distribuição Weibull serve como definição de forma. Com a variação deste valor, a distribuição se assemelha com outros modelos. O Gráfico 3.5 representa de algumas PDF com variação de β , nele é possível identificar a semelhança com algumas distribuições. (CARACTERÍSTICAS..., 2005).

Gráfico 3.5 – Distribuição PDF Weibull com β variado



Fonte: CARACTERÍSTICAS... (2005).

É possível verificar, através deste gráfico, que a variação do β pode definir o modelo de curva e até buscar semelhança com PDF de outras distribuições. Essa

característica faz com que a distribuição Weibull seja a mais usada. (RAMOS JUNIOR, 2019).

3.2.3 Distribuição Lognormal

A distribuição Lognormal é utilizada para análise de confiabilidade, em que é preciso verificar ciclos até falha, fadiga, resistência de material e em projetos probabilísticos com cargas variáveis. Quando os logaritmos naturais dos tempos até a falha são normalmente distribuídos, é considerada uma distribuição normal. A PDF desta distribuição é dada pela Equação 3.9, e sua representação gráfica está disposta no Gráfico 3.6. (RAMOS JUNIOR, 2019).

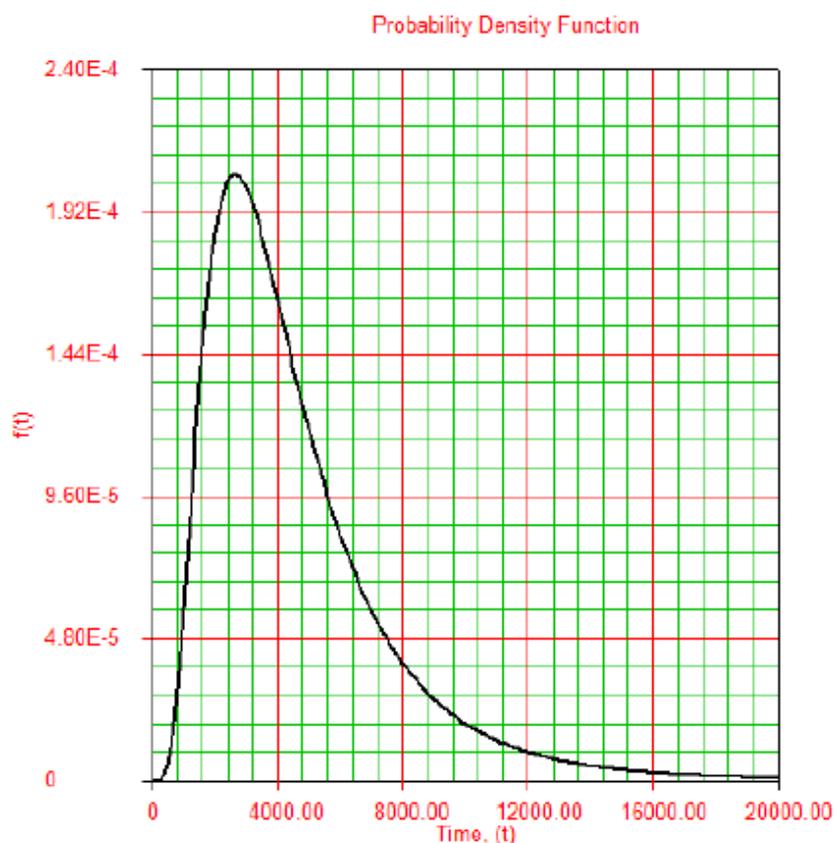
Equação 3.9 – Distribuição PDF lognormal

$$f(T) = \frac{1}{T\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T'-\mu'}{\sigma'}\right)^2}$$

Fonte: Ramos Junior (2019).

Onde T' tempos de falha, σ' desvio padrão e μ' média.

Gráfico 3.6 – Distribuição PDF lognormal



Fonte: Ramos Junior (2019).

Como pode ser verificado no Gráfico 3.6 a Lognormal representa melhor as falhas prematuras e desgastes. Neste caso, a probabilidade de falha cresce rapidamente no início de operação do sistema em questão. (RAMOS JUNIOR, 2009).

3.2.4 Distribuição Gama Generalizada (G)

A Gama G é uma distribuição pouco utilizada, pois seu modelo se ajusta mais adequadamente a banco de dados com mais de 150 informações. Porém, ela possui a capacidade de imitar outras distribuições, tais como a Weibull, a Exponencial ou a Lognormal, dependendo dos parâmetros de sua distribuição. (RAMOS JUNIOR, 2009).

Como se trata de imitações das distribuições citadas anteriormente, a PDF da Gama G é o retrato de uma delas, conforme é possível ver nas Equações 3.10 e 3.11. (LIFE...2015).

Equação 3.10 – PDF Gama G

$$f(t) = \frac{\beta}{\Gamma(k) \cdot \theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{k\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}$$

Fonte: Life... (2015).

Onde $\theta > 0$ é um parâmetro de escala, $\beta > 0$ e $k > 0$ são parâmetros de forma e $\Gamma(x)$ é a função gama de x , definida por:

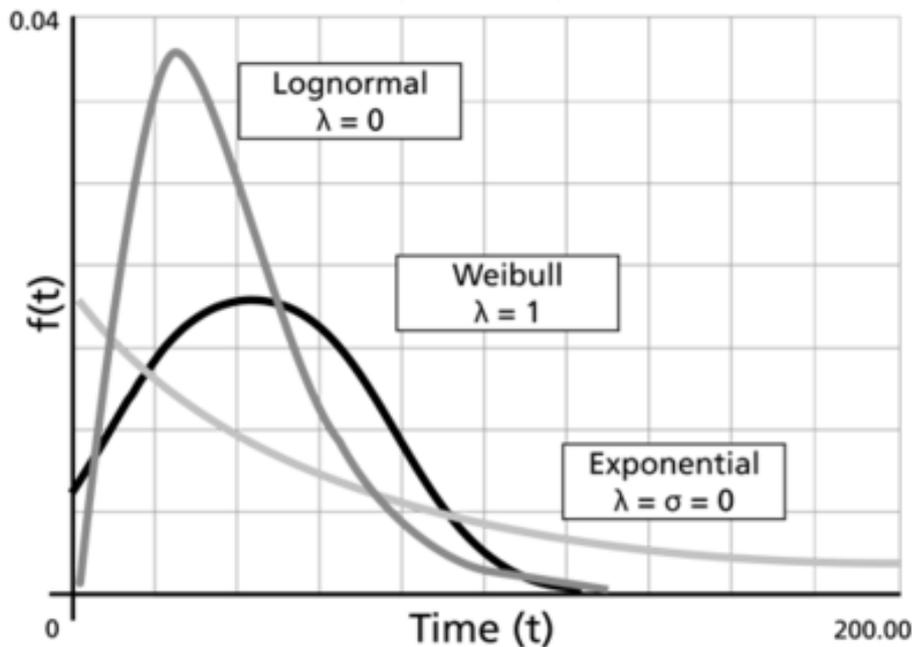
Equação 3.11 – Equação de Γ em função de x

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} s^{x-1} \cdot e^{-s} ds$$

Fonte: Life... (2015).

O Gráfico 3.7 retrata a representação gráfica da PDF da Gama G.

Gráfico 3.7 – PDF da Gama G com variação de λ



Fonte: Life... (2015).

A partir deste gráfico é possível analisar como essa alteração pode deixar a sua forma similar as outras distribuições. (LIFE... 2015).

3.2.5 Distribuição Loglogística

Como pode ser indicado pelo nome, a distribuição loglogística possui certas semelhanças com a distribuição logística. Por exemplo, o raciocínio matemático para a construção das escalas de plotagem de probabilidade é muito semelhante para essas duas distribuições. A distribuição loglogística possui 2 parâmetros δ e μ . A PDF dessa função é dada pelas Equações 3.12 e 3.13. (LIFE... 2015).

Equação 3.12 – PDF Loglogística

$$f(t) = \frac{e^z}{\sigma t(1 + e^z)^2}$$

Fonte: Life... (2015).

Equação 3.13 – Complemento pdf da loglogística

$$z = \frac{t' - \mu}{\sigma}$$

$$t' = \ln(t)$$

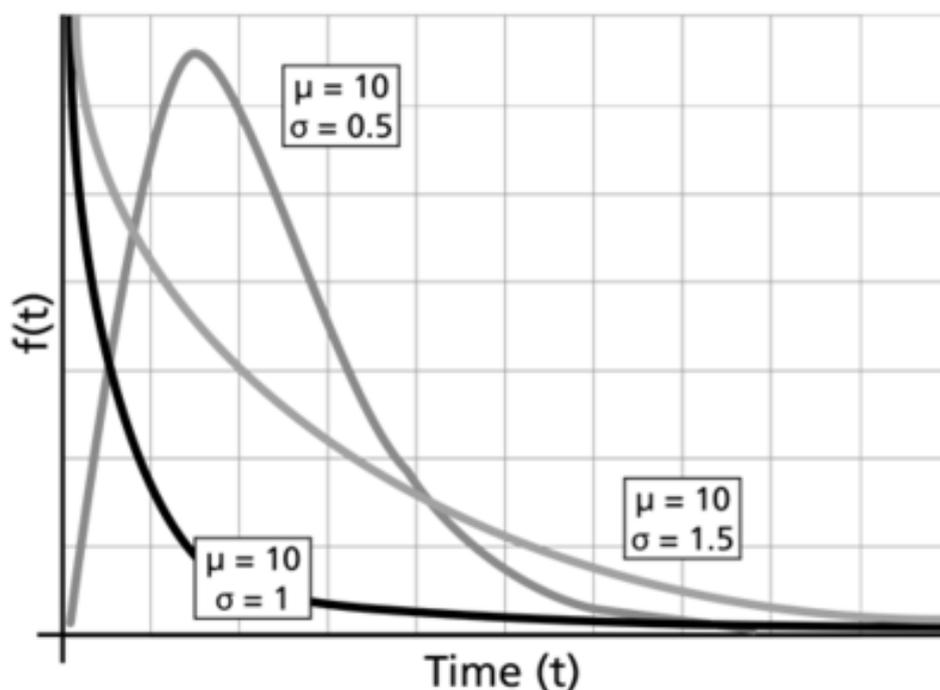
Fonte: Life... (2015).

Os parâmetros definem:

δ = parâmetro de forma

μ = parâmetro de escala

O Gráfico 3.8 apresenta a PDF com a variação do δ .

Gráfico 3.8 – PDF com variação de δ 

Fonte: Life... (2015).

As metodologias que utilizadas no desenvolvimento do trabalho foram apresentadas, com suas devidas referências. O FMEA é uma excelente ferramenta para auxiliar na classificação das falhas com suas causas raízes e tomada de decisão para solução dos problemas. As distribuições apresentadas são modelos estatísticos que auxiliam na projeção do comportamento de determinados bancos de dados ao longo do tempo. (RIGONI, 2019).

As teorias apresentadas são importantes para mostrar em que referência é baseada as práticas mostradas no desenvolvimento do trabalho. O FMEA foi utilizado como orientação das análises das falhas dos MTs, de forma a chegar na causa raiz de cada modo de falha. A metodologia orienta a classificar e agrupar os locais da falha para que seja possível destacar o subcomponente do MT que é responsável por mais falhas. (RIGONI, 2019).

As distribuições estatísticas modelam as falhas definidas pela metodologia do FMEA e projetam a falha de cada componente ao longo do tempo. De acordo com os dados de TTF, em que cada subcomponente é considerado como causa raiz, ajusta-se as distribuições (melhor ajuste conforme os dados). 9RAMOS JUNIOR, 2019).

Demonstrou-se como a ferramenta FMEA foi utilizada para os tipos de modo de falha apontados e subcomponentes afetados do MT. A causa raiz para cada falha

foi definida, de modo a realizar o levantamento de ações para mitigar essas falhas definidas por modos de falhas diagnosticados, encerrando o ciclo da ferramenta do FMEA. (RIGONI, 2019).

As falhas levantadas possuem os dados com os seus TTFs e os tempos dos MTs que ainda não falharam, considerados dados em suspensão. Com as informações dos tempos citados anteriormente foi possível definir a melhor distribuição que se enquadra nos tempos informados definindo a LDA de cada subcomponente com registro de falha. A definição da distribuição para cada subcomponente foi inserida a informação no modelo de análise BlockSim do software (Compass). Os blocos com a informação da LDA de cada subcomponente ligados em série destaca o subcomponente mais crítico. A definição de criticidade serve de embasamento para priorizar onde será investido o dinheiro e tempo disponível para melhorar a confiabilidade do MT (RAMOS JUNIOR, 2019).

4 DESENVOLVIMENTO

O MT é um item de importância relevante no processo de manutenção da locomotiva, tanto no véis financeiro quanto no funcionamento da locomotiva, tema explorado no capítulo 3 deste trabalho. O objetivo do trabalho é aumentar a confiabilidade do MT, e isso envolve inúmeras ferramentas e metodologias. Desse modo, foi desenvolvido um fluxograma, disponível na Figura 3 do capítulo 1, para esquematizar todo o processo desenvolvido durante este capítulo, e nos tópicos subsequentes são apresentadas e definidas cada uma dessas etapas.

4.1 ACOMPANHAMENTO DAS FALHAS (FMEA) E CRITÉRIOS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS

Nesta etapa são definidas as informações a serem levantadas em conta com base na metodologia FMEA para que seja possível chegar a causa raiz de cada falha que existir no MT que forem removidos com falha. A opção criada para o acompanhamento foi a definição de uma planilha padrão com todas as informações necessárias para desenvolvimento de parte da metodologia FMEA.

As informações verificadas na análise de cada MT removido com falha são as seguintes:

- a) Modelo do MT – como existem mais de um tipo de frotas de locomotivas, existem vários modelos de MTs;
- b) Número de série – controle de rastreabilidade do MT;
- c) Locomotiva que o MT estava aplicado;
- d) Local da retirada – auxilia na definição de região que o MT ficou em trabalho;
- e) Sintoma da falha – relata o motivo que o MT foi removido de uma locomotiva;
- f) Subcomponente afetado – importante na definição do local onde ocorre a falha;
- g) Modo de falha – relata sucintamente o que aconteceu no subcomponente que originou a falha;
- h) Causa raiz – informa qual a causa raiz que originou o sintoma para remoção do MT, neste item foi utilizada a metodologia do 5 Porquês;

- i) Definição da falha – responsável por informar se a falha verificada é oriunda do processo de reparo do MT ou de alguma variável externa, um problema no meio ambiente.

Os itens citados anteriormente devem ser informados para cada falha de MT analisada. O Quadro 4.1 exemplifica as informações solicitadas. Essas informações são importantes para definição da LDA agrupadas pelo subcomponente.

Quadro 4.1 – Informações da metodologia FMEA

Modelo	Nº de série Estator	Loco	Local de Retirada	Sintoma (análise eng.)	Subcomponente	Modo	Causa	Reconhecimento Processo
MT D31 – 14 dentes	81H11236	4467	NCY - PML Cacequi	Aterrado	NACO	NACO	NACO	Não
MT D31 – 14 dentes	CTJ050108M	4325	NCY - PML Cacequi	Interpolo aberto	Cabo de interligação interpolo	Rompido	Utilização do terminal fora da especificação	Sim
MT D31 – 14 dentes	74F11401	3682	LOI - PML Iguaçu	Armadura aberta	Cabo de interligação interpolo	Rompido	Utilização do terminal fora da especificação	Sim
MT D31 – 14 dentes	81F11259	8234	LOI - PML Iguaçu	Braço quebrado	Mancal LP	Quebrado	Caixa de graxa ou truque forçando o braço	Não
MT D31 – 14 dentes	64D7	4301	NSM - Santa Maria	Braço quebrado	Mancal LP	Quebrado	Caixa de graxa ou truque forçando o braço	Não
MT D31 – 14 dentes	81D11139	4471	LNC - SEDE CURITIBA	Baixo isolamento	Armadura	Impregnado	Vazamento de óleo na locomotiva	Não

Fonte: Rumo Logística (2019).

No ano de 2017 iniciou uma mudança no processo de reparo do MT, de modo que foram implantados vários testes de qualificação e implementadas ações de melhorias motivadas pelas análises do MT recebidos com falha. Essa mudança foi a responsável pela definição da amostra verificada para desenvolvimento deste trabalho. Em junho de 2019, foi a data limite para acompanhamento, fixar um período e levantar todas as informações do lote em questão. Neste período, o processo teve uma evolução considerável, pois as ações para mitigar as causas raízes identificadas foram sendo implementadas. Com isso houve uma melhora na confiabilidade.

As amostras em teste tiveram sua quantidade aumentada com o passar o tempo, isso se deve ao fato de que a produção de MTs reparados foi se somando a cada mês e, com isso, dando mais volume aos dados estudados. Os motores que foram produzidos em um determinado mês, mas ainda não retornaram com falhas, foram considerados dados em suspensão para a LDA, pois se o MT não retornou com alguma falha considera-se que o mesmo está em funcionamento na locomotiva. Um exemplo para esta consideração de dados suspensos é um motor produzido em janeiro de 2017 que até junho de 2019 não havia retornado com algum tipo de falha. A análise apontou como causa o processo de reparo do MT, este item segue na base com suspensão de 880 dias.

4.2 ANÁLISE DAS FALHAS

A análise foi realizada em todos os MT produzidos entre janeiro de 2017 e junho de 2019 que apresentaram falhas. As análises foram conduzidas com o auxílio da metodologia FMEA para definição dos subcomponentes afetados e modos de falhas. Já para chegar a causa raiz foi utilizada a metodologia dos 5 Porquês, em que se aponta a causa e em seguida se pergunta por que daquela causa aconteceu. Isso se repete até não ser mais possível responder à pergunta “Por que?”. O Quadro 4.2 apresenta o desenvolvimento dos 5 Porquês para uma determinada falha do MT.

Quadro 4.2 – Exemplo da metodologia 5 Porque

FALHA NA LOCOMOTIVA:	MOTOR DE TRACÇÃO SOLTANDO BANDAGEM
POR QUE?	ARMADURA SOLTANDO BANDAGEM
POR QUE?	RUPTURA DA BANDAGEM DO PACOTE LADO COMUTADOR
POR QUE?	CURTO ENTRE ESPIRAS DA ARMADURA
POR QUE?	FALHA NO ISOLAMENTO ENTRE ESPIRAS DA ARMADURA
POR QUE?	DETERIORAÇÃO DO MATERIAL ISOLANTE ENTRE ESPIRAS

Fonte: Rumo Logística (2019).

As análises foram conduzidas por especialistas e técnicos experientes em trabalhar com o componente. As causas raízes definidas podem ter sua origem tanto no processo de reparo de MT ou em alguma variável externa ao MT. Os casos em que a causa raiz do problema é considerada uma variável externa ao processo de reparo (não reconhecido) são levados para a base de dados como dados em suspensão, pois caso a intervenção externa não ocorresse, o MT estaria em funcionamento. Já os casos em que a causa raiz está ligada ao processo de reparo, terá o TTF relativo ao subcomponente que originou a falha contabilizado na base de dados. As Fotografias 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 exemplificam estes dois casos. As Fotografias 4.1 e 4.2 mostram um motor com falha no cabo de interligação, ou seja, uma falha no processo de reparo. Em contraposição, as Fotografias 4.3 e 4.4 mostram um MT contaminado com óleo, com origem no motor diesel da locomotiva, ou seja, uma falha devido a uma variável externa ao MT.

Fotografia 4.1 – Rompimento do cabo de interligação I



Fonte: Autoria própria (2019).

A Fotografia 4.2 mostra o ponto do rompimento de uma forma mais visível.

Fotografia 4.2 – Rompimento do cabo de interligação II



Fonte: Autoria própria (2019).

A Fotografia 4.3 detalha um MT que teve sua falha considerada como variável. Ela ilustra um MT que foi removido devido a uma impregnação por óleo lubrificante vindo do motor diesel da locomotiva.

Fotografia 4.3 – MT contaminado com óleo proveniente do MD I



Fonte: Aatoria própria (2019).

A Fotografia 4.4 evidencia a parte inferior do MT onde o óleo fica depositado.

Fotografia 4.4 – MT contaminado com óleo proveniente do MD II



Fonte: Autoria própria (2019).

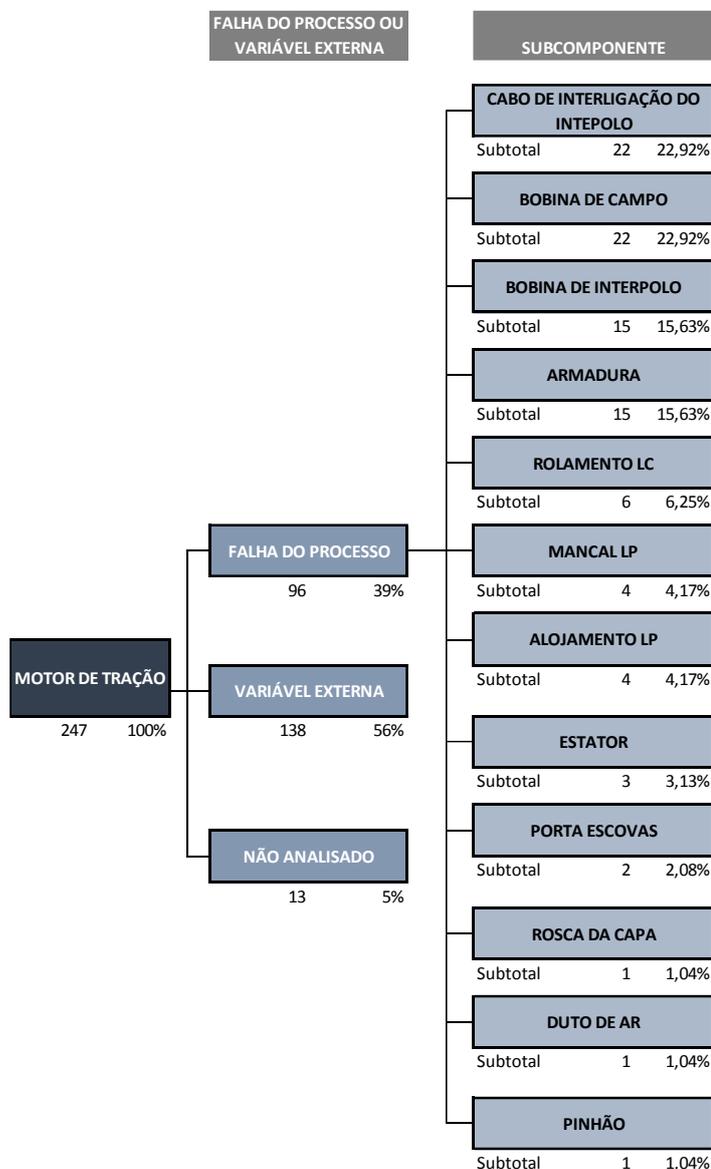
A análise de falha é responsável por definir a causa raiz da falha e com essas definições são mapeadas as ações para mitiga-las. A análise é a parte principal para obter sucesso neste trabalho, definindo corretamente as ações é possível realmente reduzir as falhas e melhorar a confiabilidade do MT.

4.3 PADRONIZAÇÃO DOS MODOS DE FALHA E CAUSA RAIZ

A padronização das falhas é importante para o processo, pois, assim, é possível verificar a frequência de repetição das falhas. A árvore de eventos existente no processo do MT não possui uma padronização para as causas raízes e, por isso, ocorrem falhas iguais, mas com definições diferentes. Após completar as informações do Quadro 4.1, apresentado no item 4.1 deste capítulo, foi necessário analisar a descrição das causas raízes e padronizar por grupos, de modo a possibilitar a identificação de repetições das falhas. As informações padronizadas tornam possível

a elaboração de uma árvore de eventos, que é representada a partir da quantidade de falhas em cada grupo (Figura 4.1).

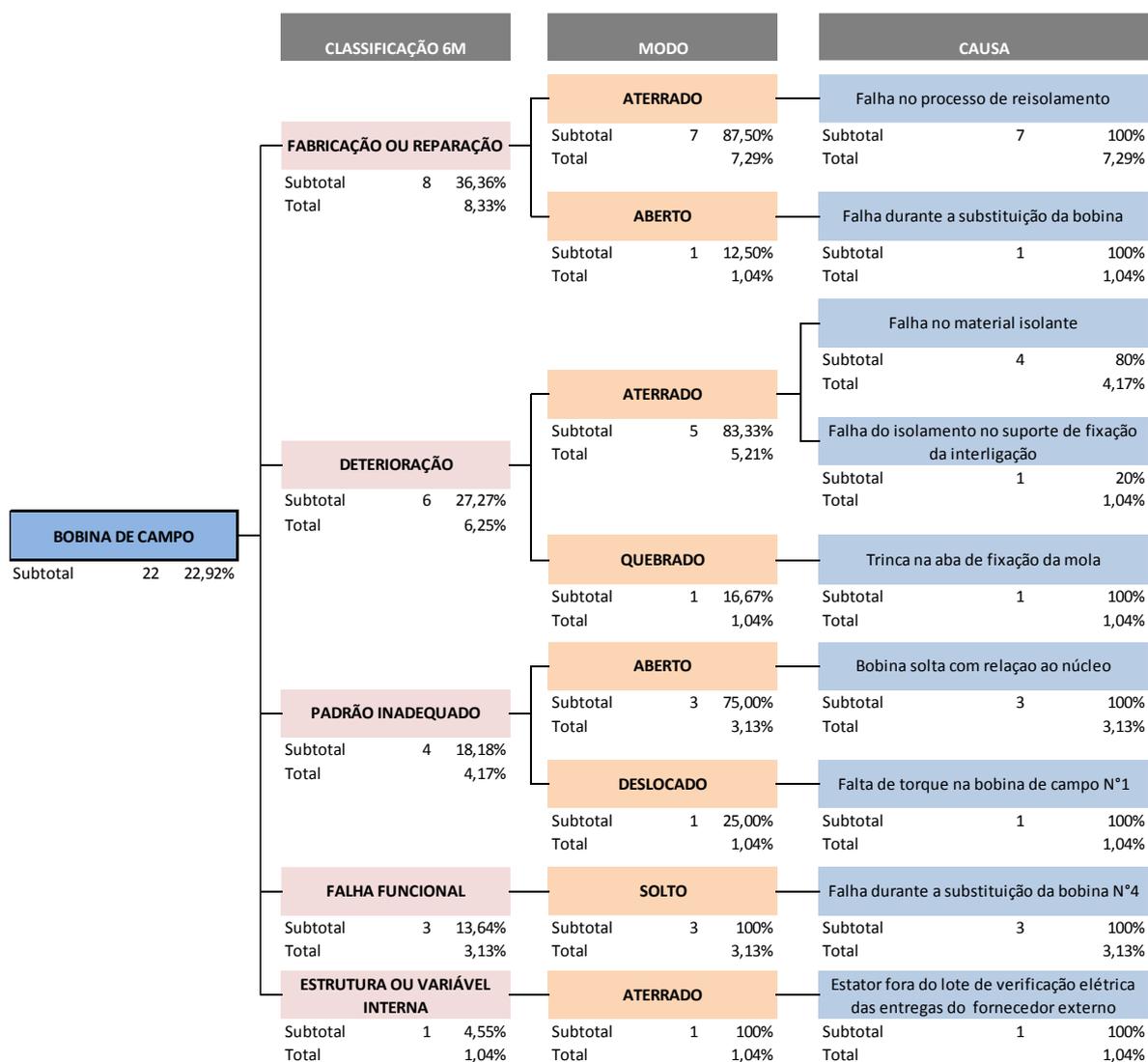
Figura 4.1 – Árvore de eventos do subcomponente



Fonte: Rumo Logística (2019).

O subcomponente pode possuir diversos modos de falha e causas raízes, e por isso é necessário um desdobramento melhor de cada subcomponente. Antes da definição do modo de falha e da causa raiz, é padrão definir as 6 principais causas de falhas, conhecidas como 6M (Diagrama de Ishikawa). O 6M são: mão de obra, medida, máquina, materiais, meio ambiente e método. A Figura 4.2 exemplifica essa classificação, evidenciando as falhas do subcomponente bobina de campo.

Figura 4.2 – Árvore de eventos do subcomponente com as definições de 6M, modo de falha e causa raiz



Fonte: Rumo Logística (2019).

Com a padronização dos modos de falhas é possível agrupar as falhas e montar as árvores de eventos conforme mostrado nas Figura 4.1 e 4.2. O agrupamento facilita a projeção da melhoria da confiabilidade, pois é possível quantificar para quantas causas as ações são efetivas.

4.4 DEFINIÇÃO DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICAS

Os dados confiáveis são os responsáveis pela assertividade em qualquer metodologia na Engenharia de Confiabilidade. A definição de LDA para qualquer sistema não é diferente, os dados certos são transformados em uma projeção de

confiabilidade e, quanto melhor os dados estiverem, mais correta será a curva de confiabilidade. Para dados imprecisos a distribuição fornece uma projeção de confiabilidade não realística, induzindo a tomada de decisões incorretas e trazendo prejuízos ao sistema.

Os dados levantados para este trabalho foram de MT, com o processo de reparo e operação da empresa Rumo Logística (empresa do modal ferroviário). As informações são específicas da empresa não podendo ser aplicada para outras ferrovias do mesmo ramo. Porém, a metodologia do estudo pode ser aplicada para outras ferrovias e até mesmo para outros componentes de locomotiva dentro da mesma empresa.

Mensalmente os MTs são produzidos conforme a demanda da empresa, a partir dessa produção que começa o acompanhamento para a base de dados. No ato do retorno após a falha cada MT é identificado com data de produção para deduzir da quantidade produzida e ter o número que de MTs ainda não falharam. Os MTs que ainda não falharam durante o período de acompanhamento (entre janeiro de 2017 e junho de 2019) ou que falharam devido a causas externas são considerados como dados em suspensão. As suspensões foram consideradas a partir do último dia de cada mês devido ao sistema da empresa não detalhar a rastreabilidade completa do todos os MT. A Tabela 4.1 exemplifica os dados obtidos sobre os MTs produzidos em janeiro de 2017, as avarias até junho de 2019 e a quantidade em suspensão.

Tabela 4.1 – Exemplo de dados em suspensão

Produção de Janeiro 2017	32 MT
Quantidade Avaria Jan/17 a Jun/19 (produzido em jan/17)	12 MT
Quantidade de Suspensão	20MT
Data Início para cálculo de suspensão	31/01/2017
Data Fim para cálculo de suspensão	30/06/2019
Tempo em dias (suspensão)	880 dias

Fonte: Autora própria (2019).

Os dados sobre os MT com falhas, cuja a causa raiz é do processo de reparo, foram adquiridos através das datas de aplicação e remoção da locomotiva. A diferença entre essas datas fornece o TTF de cada motor e torna possível criar a base de dados

para realizar a LDA de cada subcomponente. A Tabela 4.2 apresenta as falhas e suspensões levantada do subcomponente porta-escovas.

Tabela 4.2 – Dados para LDA do subcomponente Porta-escovas

Quantidade de itens registrados	TTF	Falha (F) ou Suspensão (S)
1	123	F
1	14	F
32	880	S
29	852	S
33	822	S
30	791	S
31	760	S
48	730	S
51	699	S
53	668	S
42	638	S
28	607	S
12	577	S
49	546	S
44	515	S
37	487	S
56	457	S
55	426	S
49	395	S
54	365	S
61	334	S
60	303	S
53	273	S
66	242	S
63	212	S
34	181	S
68	150	S
53	122	S
49	92	S
50	61	S
52	30	S
3	26	S
1	25	S
2	24	S
1	23	S
2	20	S
1	19	S
2	18	S

3	17	S
2	16	S
1	13	S
1	12	S
3	11	S
3	9	S
1	6	S
8	5	S
4	4	S
2	3	S
6	2	S

Fonte: Autoria própria (2019).

O exemplo da Tabela 4.2 foi aplicado em todos os subcomponentes que tiveram registro de falha da amostra que está sendo analisada. Os dados levantados com o método citado anteriormente tornam possível a definição da LDA e suas informações de todos os subcomponentes.

4.5 LDA DOS SUBCOMPONENTES.

Antes de definir a LDA de cada subcomponente, é necessário delimitar quais são itens que tiveram registro de pelo menos uma falha durante o período de análise. A Tabela 4.3 apresenta os subcomponentes que tiveram falha e a quantidade de falhas registradas e os dados em suspensão.

Tabela 4.3 – Subcomponentes afetados

Subcomponente afetado	Quantidade de MT em falhas (jan/17 a jun/19)	Quantidade de MT em suspensão (jan/17 a jun/19)
Cabo de interligação interpolo	22	1368
Bobina de campo	22	1368
Armadura	15	1375
Bobina de interpolo	15	1375
Rolamento LC	6	1384
Alojamento LP	4	1386
Mancal LP	4	1386
Estator	3	1387
Porta-escovas	2	1388
Duto de ar	1	1389
Rosca da capa	1	1389

Pinhão	1	1389
--------	---	------

Fonte: Autoria própria (2019).

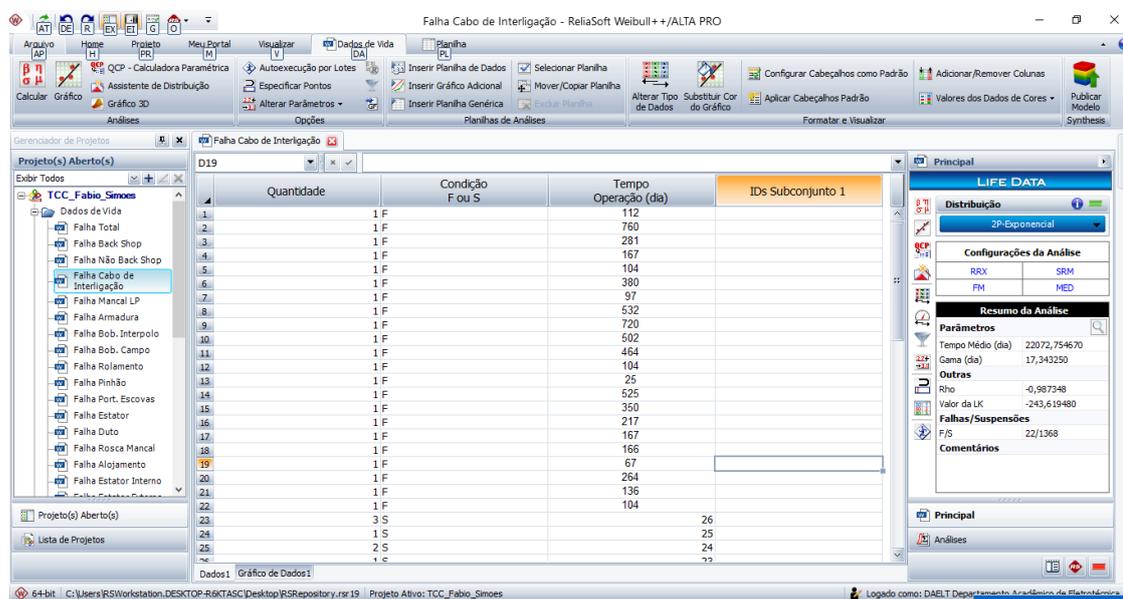
Cada subcomponente registrado anteriormente teve a LDA definida e, com isso, foi possível conhecer a confiabilidade que cada subcomponente traz individualmente para o sistema MT. Antes do registro vamos lembrar que LDA, ou Análise Dado de Vida, é uma metodologia que utiliza um banco de dados com registro do TTF de cada falha para realizar projeções através de distribuições matemáticas demonstrando o comportamento do sistema.

Cada distribuição tem uma característica individual, de modo que os bancos de dados existentes podem se adequar melhor a qualquer uma delas. Conforme demonstrado no capítulo 3 deste documento, as distribuições se adequam as características das falhas e, assim, podem ser identificadas como: prematura, desgaste ou constante. A distribuição que melhor representa os dados de cada subcomponente, de acordo com a análise do *software* de confiabilidade da Compass, será mostrada nos subtópicos a seguir. A confiabilidade levada em consideração para quantificar foi de 3 anos (1095 dias), pois este período é o ciclo de substituição preventiva do MT.

4.5.1 Distribuição para subcomponentes do MT

Os dados para os subcomponentes foram obtidos conforme já descrito neste documento, foram inseridos os TTFs e os tempos de suspensão no *software* da Compass. A verificação da melhor distribuição para os dados é realizada pelo próprio *software*, que sugere entre as várias distribuições contidas no seu processamento a que melhor se adequa aos dados lançados. A Figura 4.3 ilustra o lançamento dos dados no *software* que já adequada a melhor distribuição. Neste caso, foram lançados os dados sobre o subcomponente cabo de interligação, e a melhor distribuição foi a Exponencial 2P (parâmetro).

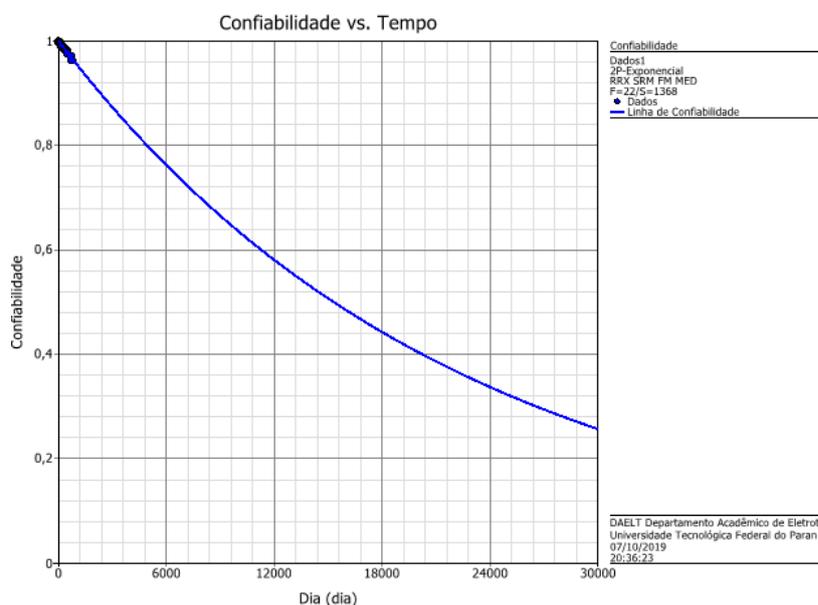
Figura 4.3 – Lançamento de dados do subcomponente cabo de ligação no software da Copass



Fonte: Autoria própria (2019).

Tendo os dados lançados e adequados na melhor distribuição, se torna possível verificar a confiabilidade ao longo do tempo, em dias. No caso do cabo de interligação, a confiabilidade em 1095 dias – período de troca preventiva – é de 95,23%. É possível verificar esse valor variando no tempo através da curva de confiabilidade adquirida. No Gráfico 4.1 é possível verificar a queda da confiabilidade ao longo do tempo. Este comportamento é sempre verificado na confiabilidade dos sistemas, pois sempre no início da vida possui 100% de confiabilidade, e ao longo do tempo este valor vai caindo gradualmente.

Gráfico 4.1 – Curva de confiabilidade para cabo de interligação



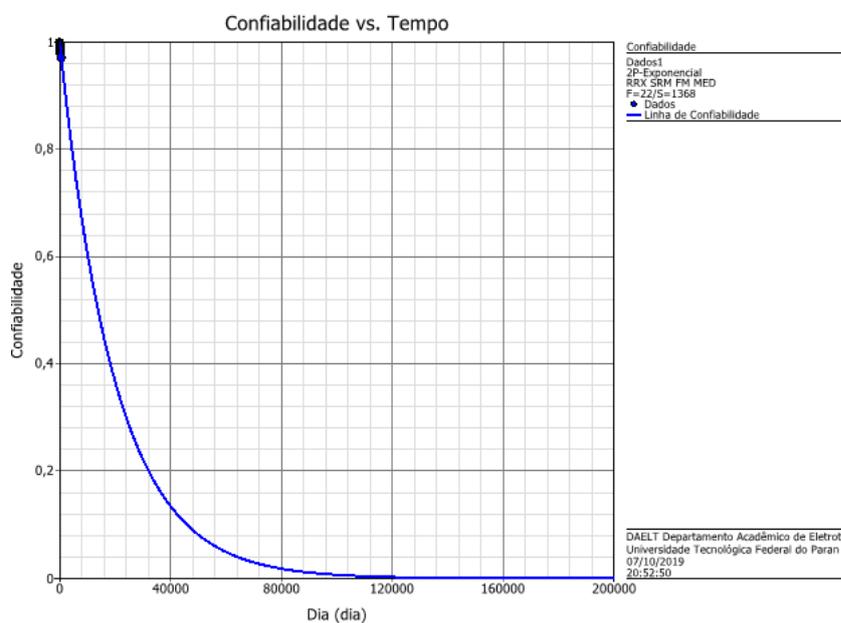
Fonte: Autoria própria (2019).

A melhor distribuição para os dados de cada subcomponente, a confiabilidade para os 1095 dias e a curva de confiabilidade estão representadas a seguir.

a) Bobina de campo (Gráfico 4.2):

- Melhor distribuição: Exponencial 2P;
- Confiabilidade: 94,89%.

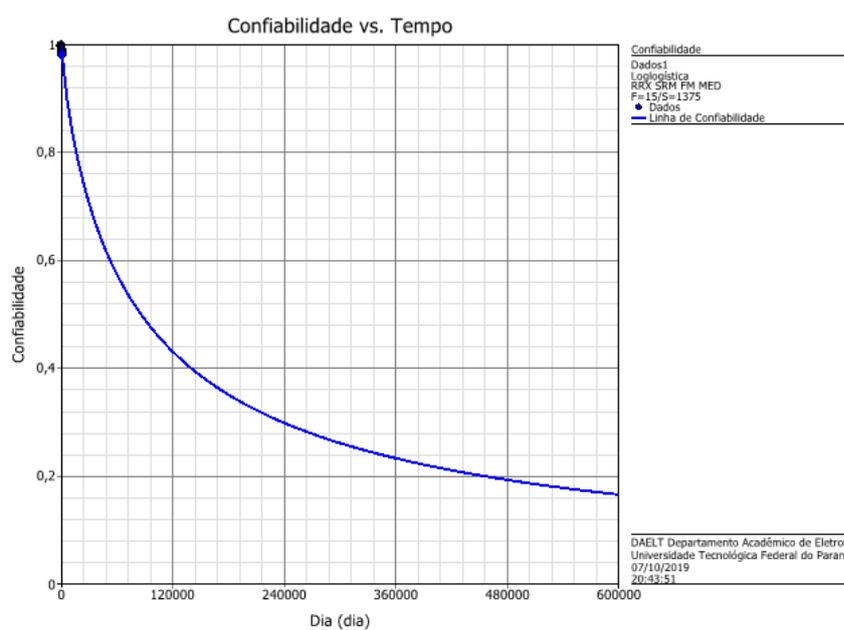
Gráfico 4.2 – Curva de confiabilidade Bobina de Campo



Fonte: Autoria própria (2019).

- b) Armadura (Gráfico 4.3):
- Melhor distribuição: Loglogística;
 - Confiabilidade: 97,39%.

Gráfico 4.3 – Curva de confiabilidade Armadura

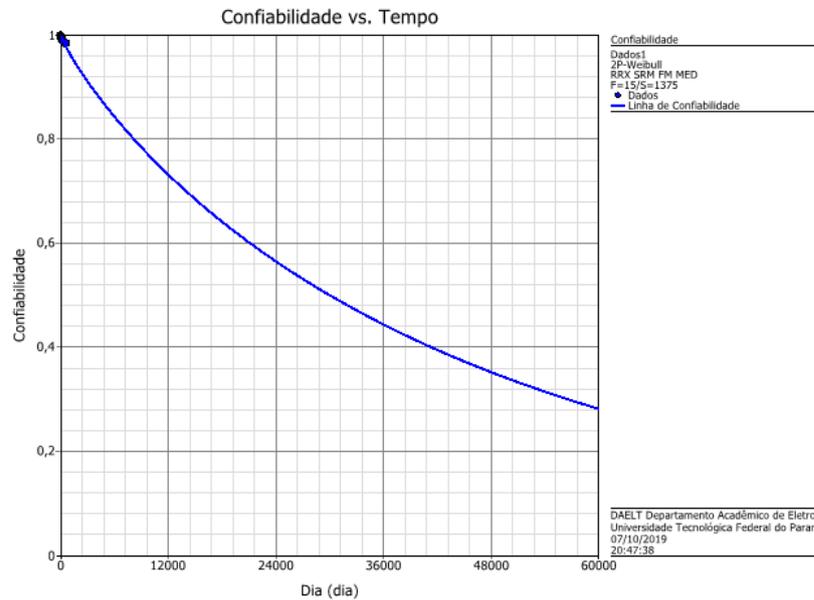


Fonte: Autoria própria (2019).

- c) Bobina de Interpolo (Gráfico 4.4):
- Melhor distribuição: Weibull 2P;

- Confiabilidade: 96,19%.

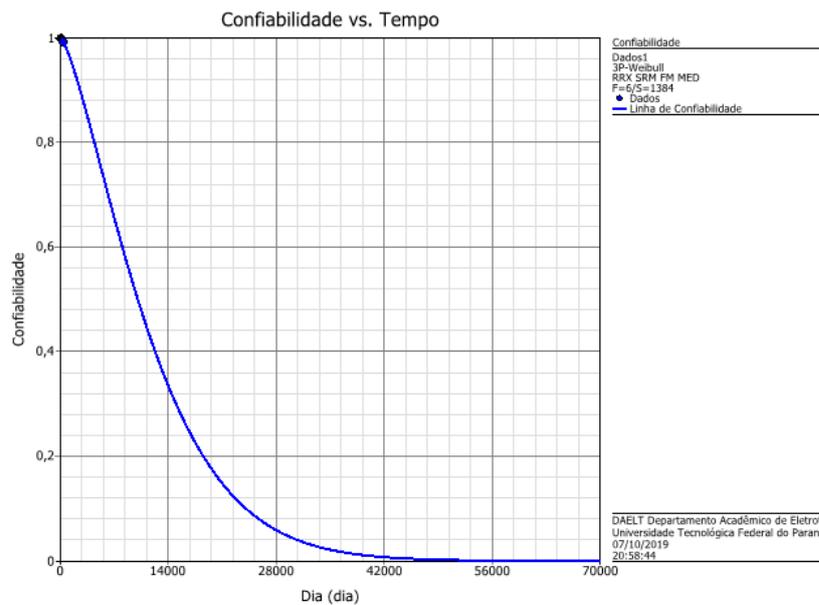
Gráfico 4.4 – Curva de confiabilidade Bobina de Interpolo



Fonte: Autoria própria (2019).

- d) Rolamento LC (Gráfico 4.5):
- Melhor distribuição: Weibull 3P;
 - Confiabilidade: 97,04%.

Gráfico 4.5 – Curva de confiabilidade Rolamento LC

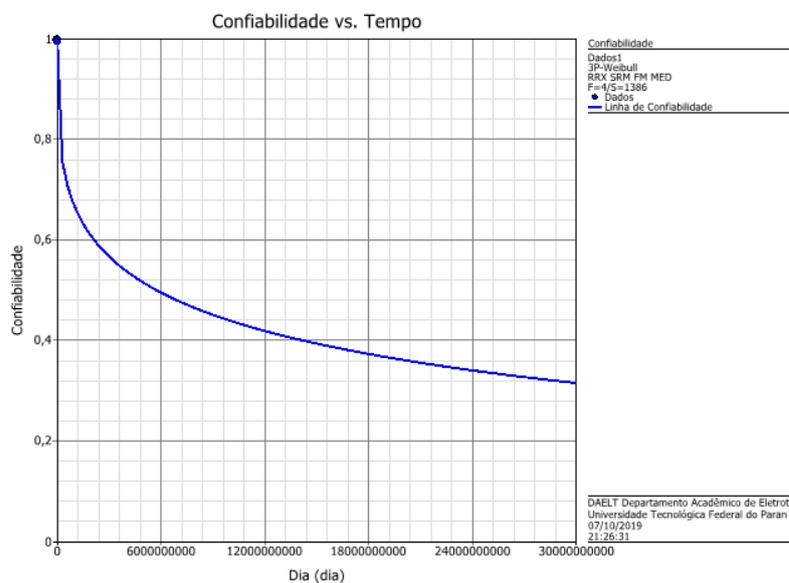


Fonte: Autoria própria (2019).

- e) Alojamento LP (Gráfico 4.6):
- Melhor distribuição: Weibull 3P;

- Confiabilidade: 99,43%.

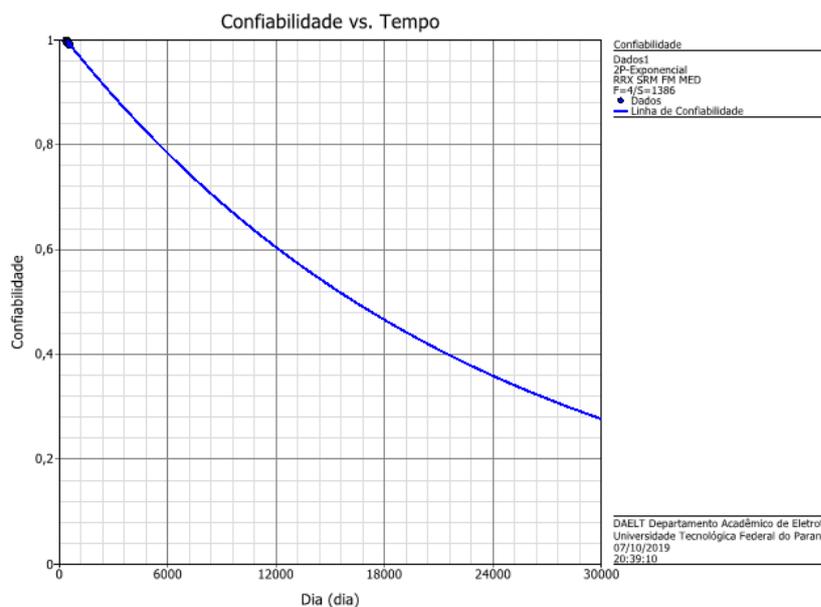
Gráfico 4.6 – Curva e confiabilidade Alojamento LP



Fonte: Autoria própria (2019).

- f) Mancal LP (Gráfico 4.7):
- Melhor distribuição: Exponencial 2P;
 - Confiabilidade: 97,02%.

Gráfico 4.7 – Curva de confiabilidade Mancal LP

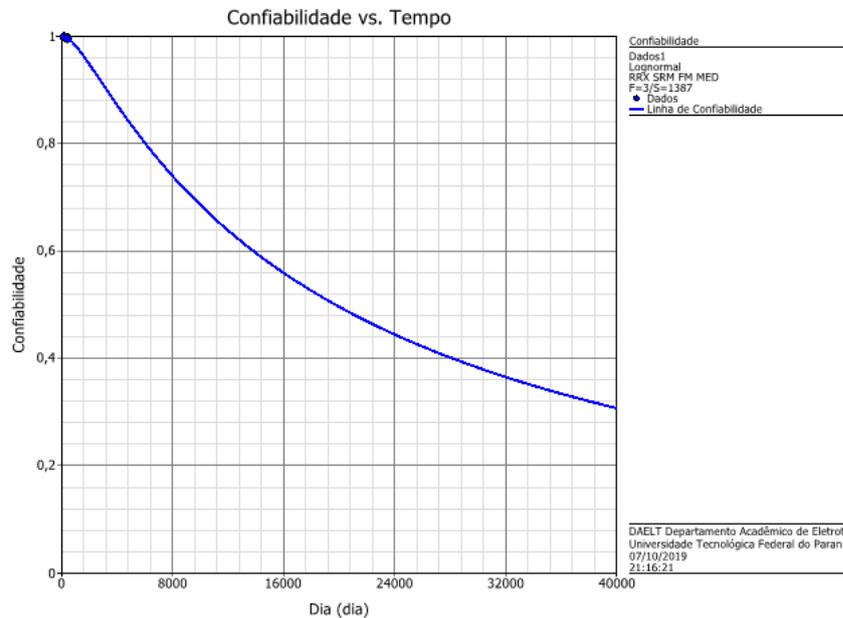


Fonte: Autoria própria (2019).

- g) Estator (Gráfico 4.8):
- Melhor distribuição: LogNormal;

- Confiabilidade: 98,03%.

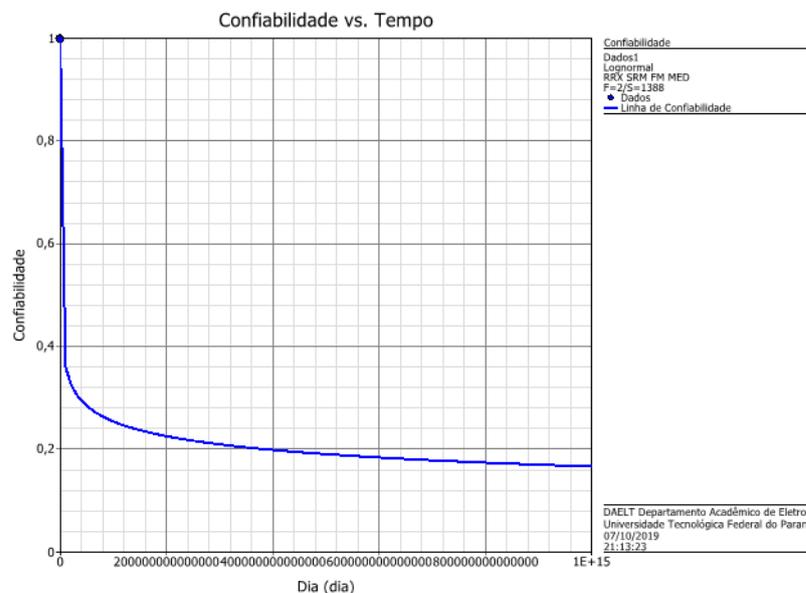
Gráfico 4.8 – Curva de confiabilidade Estator



Fonte: Autoria própria (2019).

- h) Porta-escovas (Gráfico 4.9):
- Melhor distribuição: LogNormal;
 - Confiabilidade: 99,65%.

Gráfico 4.9 – Curva de confiabilidade Porta-escovas

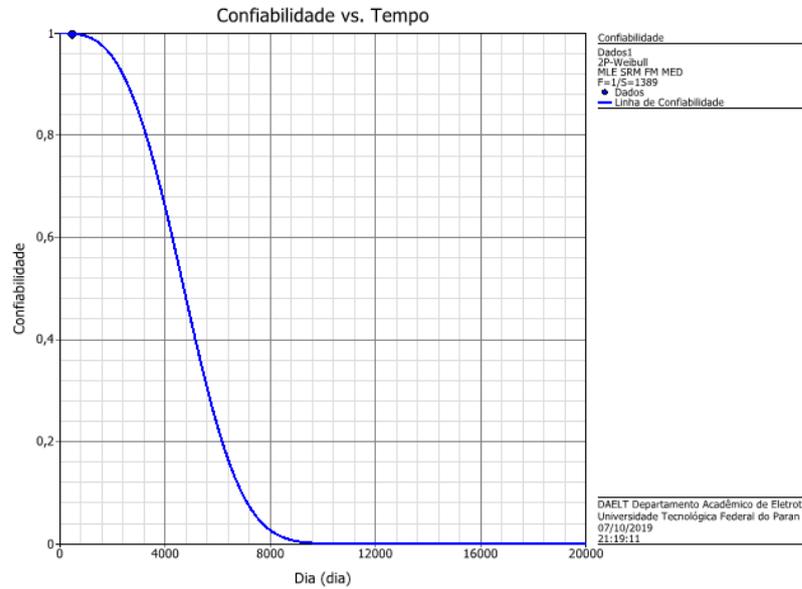


Fonte: Autoria própria (2019).

- i) Duto de ar (Gráfico 4.10):

- Melhor distribuição: Weibull 2P;
- Confiabilidade: 99,29%.

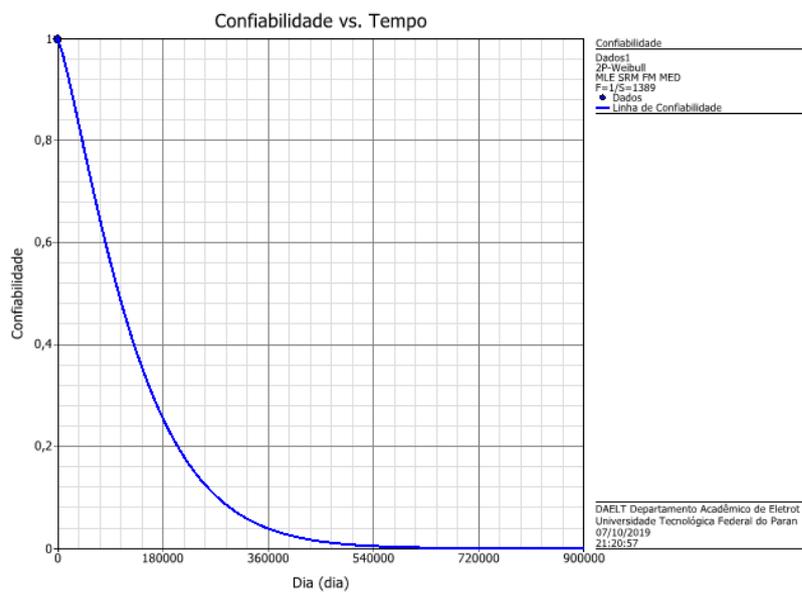
Gráfico 4.10 – Curva de confiabilidade Duto de ar



Fonte: Autoria própria (2019).

- j) Rosca da Capa (Gráfico 4.11):
- Melhor distribuição: Weibull 2P;
 - Confiabilidade: 99,76%.

Gráfico 4.11 – Curva de confiabilidade Rosca da Capa

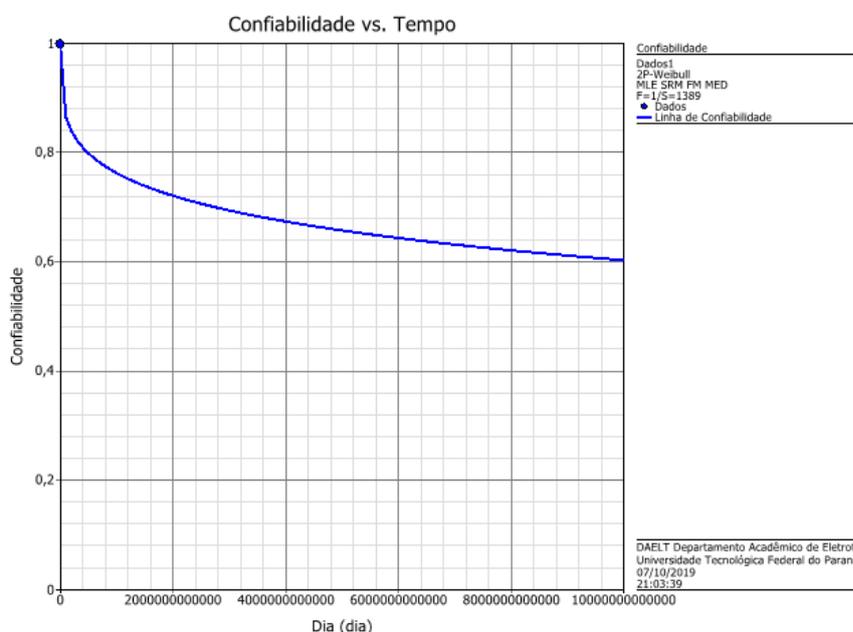


Fonte: Autoria própria (2019).

- k) Pinhão (Gráfico 4.12):

- Melhor distribuição: Weibull 2P;
- Confiabilidade: 99,89%.

Gráfico 4.12 – Curva de confiabilidade Pinhão



Fonte: Autoria própria (2019).

O próximo passo para verificar a confiabilidade do sistema é interligar as curvas de confiabilidade em uma determinada configuração na metodologia de diagrama de blocos. Nesta metodologia foi possível verificar a confiabilidade, qual subcomponente é mais crítico e o melhor local de atuação para aumento da confiabilidade.

4.6 DIAGRAMA DE BLOCOS NO MT

O diagrama de blocos é uma metodologia que interliga os subsistemas conforme o seu funcionamento. A interligação pode ser em série ou paralela, de modo que na primeira nenhum subsistema pode falhar pois caso ocorra o sistema para totalmente, e segunda, em paralelo, o sistema admite falhas sem ocorrer uma parada total. Um exemplo de sistema paralelo são os subsistemas de monitoramento, em alguns casos este tipo de sistema pode falhar e ser corrigido sem que haja a parada total do sistema.

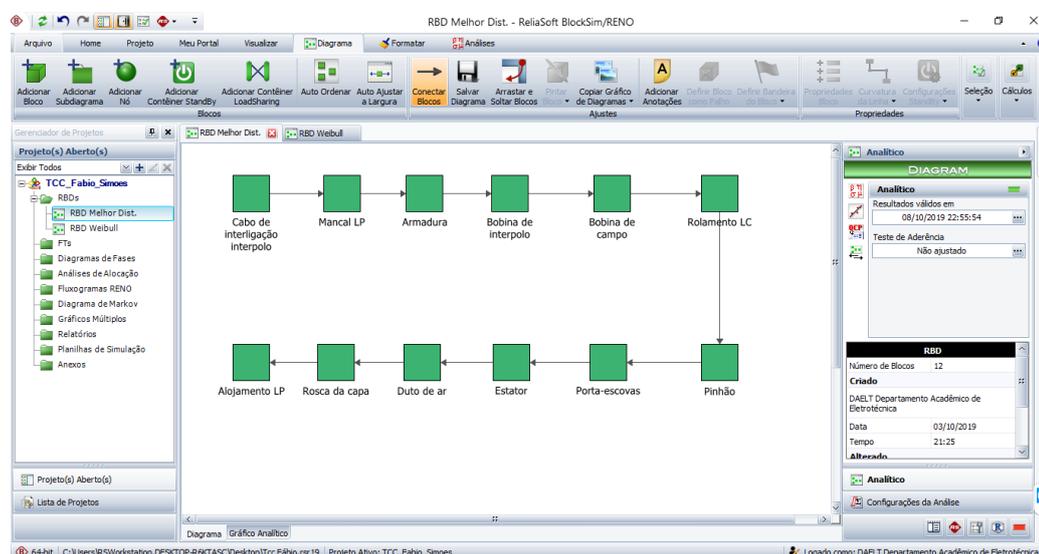
Os subsistemas são interligados em blocos, e neles são inseridas as informações do modelo de distribuição, e o *software* da Compass (BolckSim) realiza

a verificação do subsistema mais crítico levando em consideração a LDA. O *software* BlockSim é utilizado para definir dentro de diagrama de blocos todas as informações, desde a confiabilidade até mesmo a criticidade de cada bloco para o funcionamento do sistema.

No caso do MT, cada subcomponente é um bloco específico. Em cada um foi aplicado o modelo de distribuição e seus parâmetros obtidos através da LDA realizada individualmente, apresentadas no tópico anterior. Os blocos devem ter sua interligação em série, pois a falha de qualquer subcomponente resulta na inatividade do MT. As informações são inseridas de forma individual, conforme mostra o exemplo dado a partir dos dados do subcomponente bobina de interpolo.

O subcomponente bobina de interpolo teve a sua LDA com a melhor distribuição Weibull 2P com parâmetros β 0,870498 e η 45733,675345. O bloco é configurado com esses parâmetros para que o *software* tenha todas as projeções necessárias para realizar os cálculos já definidos em seu processamento. A Figura 4.4 ilustra o cadastro do diagrama do MT no *software* para verificação da confiabilidade do sistema.

Figura 4.4 – Diagrama de blocos dos subcomponentes do MT

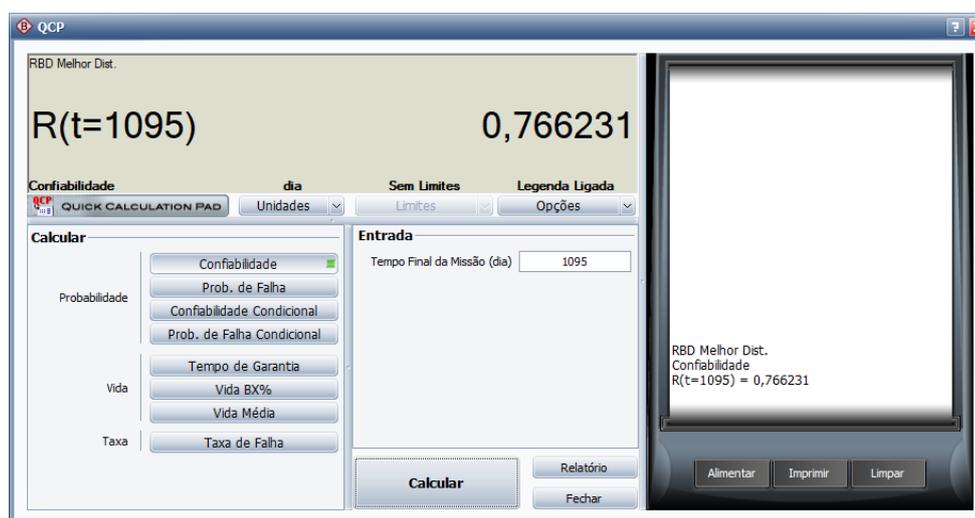


Fonte: Autoria própria (2019).

A confiabilidade do MT agora pode ser verificada através de uma calculadora pertencente ao *software*, que auxilia nos cálculos de vários parâmetros da Engenharia de Confiabilidade. Como o objetivo do trabalho é verificar e aumentar a confiabilidade, a Figura 4.5 demonstra a confiabilidade (calculada pelo *software*) em 1095 dias e a curva de confiabilidade (Gráfico 4.13) do MT com todas as LDAs levantadas através

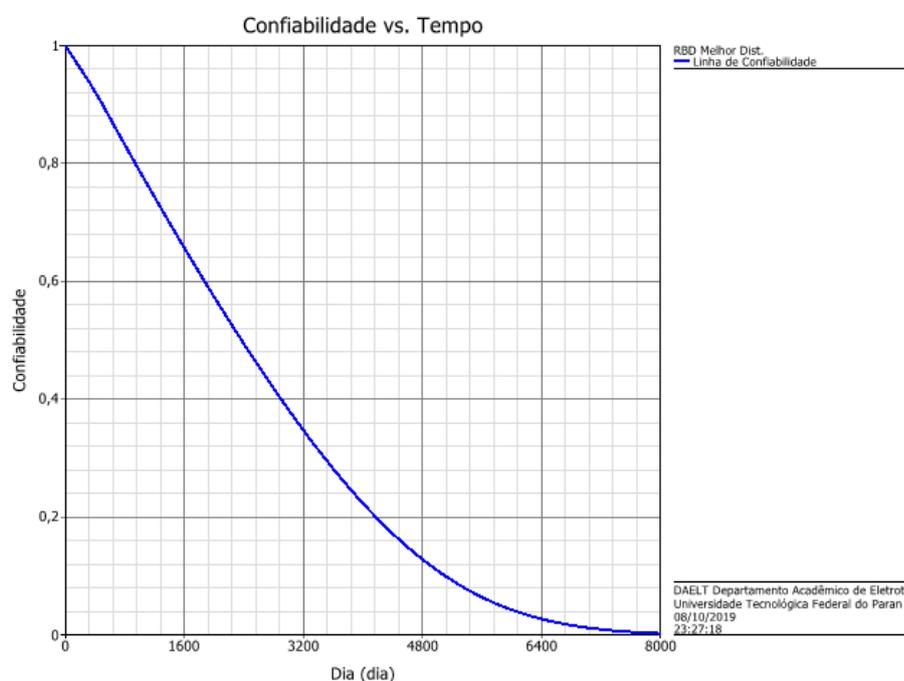
dos dados adquiridos com o auxílio de outras metodologias da Engenharia de Confiabilidade.

Figura 4.5 – Calculadora do *software* BlockSim com a confiabilidade do MT em 1095 dias



Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 4.13 – Curva de confiabilidade do MT obtida pelo diagrama de blocos

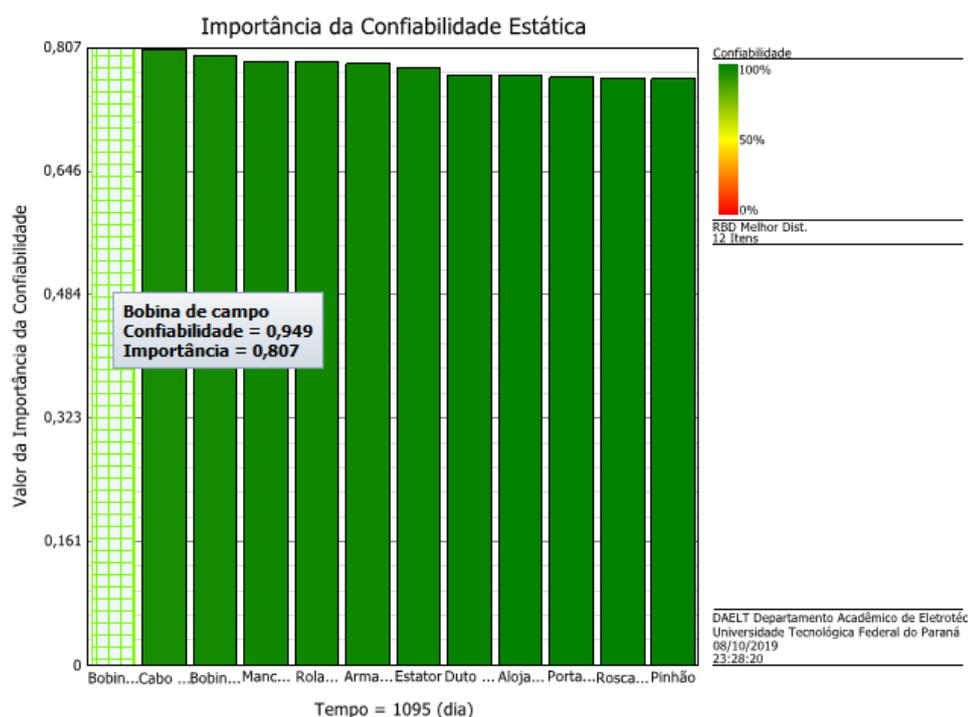


Fonte: Autoria própria (2019).

O aumento da confiabilidade é uma tarefa que necessita de direcionamento e, em alguns casos, até mesmo investimentos financeiros. Para auxiliar na assertividade das decisões é importante entender o ponto mais frágil, levando em

consideração a confiabilidade dos subcomponentes do MT. A visualização do subcomponente que mais representa falha pode ser obtida através de um gráfico de Pareto que o próprio *software* disponibiliza. O gráfico que demonstra essa realidade é o de importância da confiabilidade estática. Nele é possível visualizar a representação de cada subcomponente com sua importância para a confiabilidade do sistema. No MT, o subcomponente que mais teve importância para a confiabilidade (0,807) foi a bobina de campo. Com essa informação já é possível direcionar os esforços para traçar ações que irão resultar no aumento da confiabilidade. O Gráfico 4.14 apresenta o Pareto dos subcomponentes do MT, tendo como principal subcomponente a bobina de campo.

Gráfico 4.14 – Importância da confiabilidade do MT



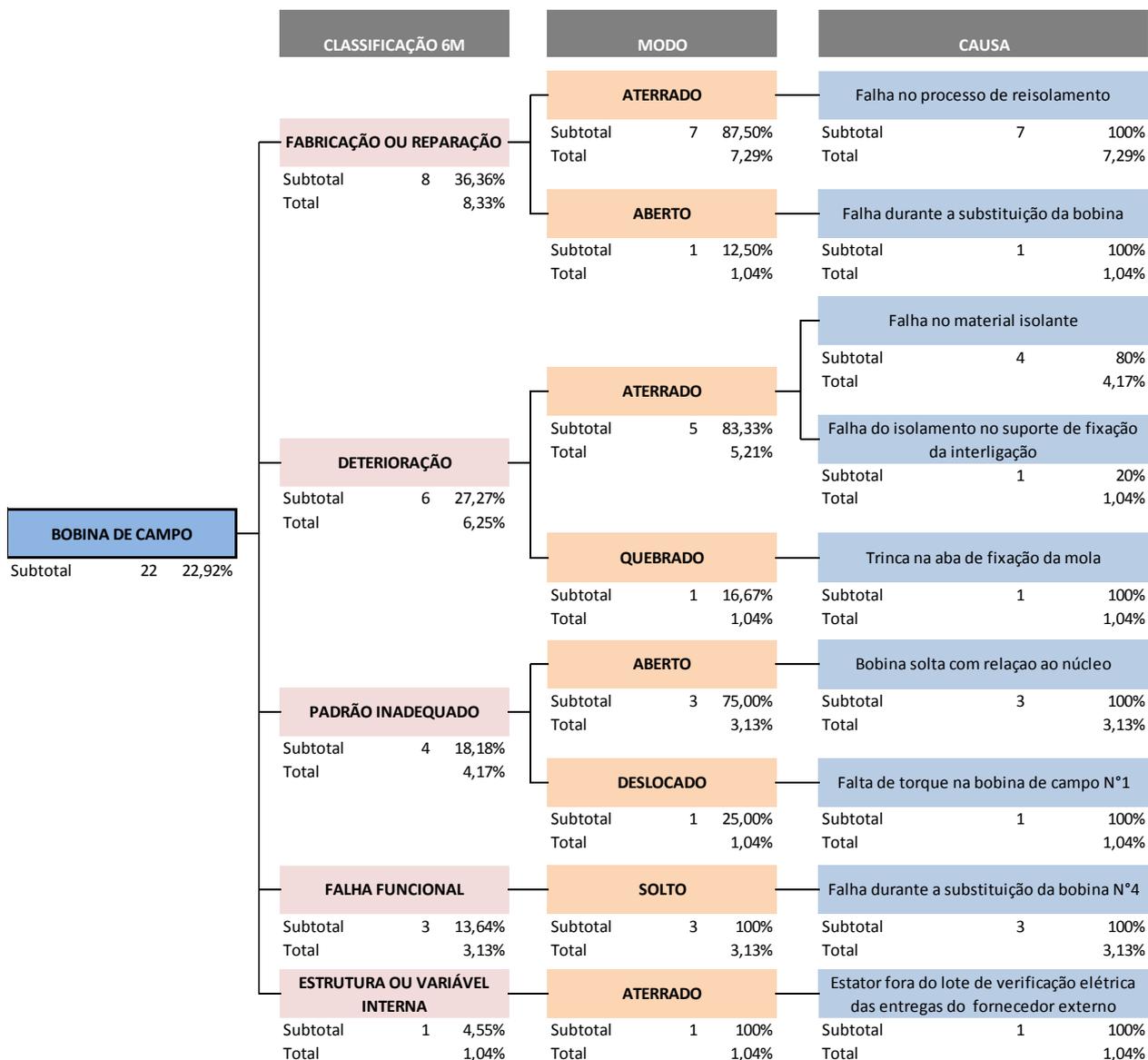
Fonte: Autoria própria (2019).

4.7 DEFINIÇÕES DE AÇÕES PARA AUMENTO DE CONFIABILIDADE

Definido o subcomponente de maior importância para a confiabilidade, o próximo passo é entender as causas raízes das falhas e verificar quais ações poderão ser implementadas para mensurar o aumento de confiabilidade obtido, após extinguir as causas raiz do sistema. As causas raiz das falhas no subcomponente bobina de

campo podem visualizadas na última coluna da árvore de eventos apresentada na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Árvore de eventos Bobina de Campo



Fonte: Autoria própria (2019).

Algumas das causas raízes demonstradas estão correlacionadas às falhas no processo de reparo que podem ser corrigidas com baixo custo e alteração de procedimento para reparo. As causas (a), (b) e (c) listadas se enquadram na definição e as ações foram direcionadas para uma projeção posterior da confiabilidade.

- Falha durante a substituição da bobina N°4;
- Bobina solta com relação ao núcleo;
- Falta de torque na bobina de campo N°1.

4.7.1 Ações para causa raiz “Falha durante a substituição da bobina N°4”

A falha durante a substituição da bobina N° 4 está ligada ao processo de substituição da bobina, em que é verificado o assentamento do parafuso de fixação e o torque realizado para manter a bobina fixa em seu ponto. As falhas ocorreram devido ao fato de não ter uma verificação da área de assentamento do parafuso, podendo gerar um falso torque durante a substituição. As Fotografias 4.5, 4.6 e 4.7 evidenciam essa falha, de modo que é possível visualizar a área que ficou com assentamento do parafuso danificada e, como consequência, perdeu o torque durante funcionamento.

Fotografia 4.5 – Área de assentamento do parafuso danificada



Fonte: Autoria própria (2019).

A Fotografia 4.6 mostra o parafuso na posição sem a verificação do torque, em que foi realizada uma marcação na cabeça deste e na parte de apoio. Essa marcação serve de referência para visualizar o deslocamento caso o parafuso ele se mova com a aplicação do torque.

Fotografia 4.6 – Deslocamento do parafuso devido ao torque incorreto I



Fonte: Autoria própria (2019).

A Fotografia 4.7 mostra o deslocamento do parafuso após a aplicação do torque.

Fotografia 4.7 – Deslocamento do parafuso devido ao torque incorreto II



Fonte: Autoria própria (2019).

Para sanar este tipo de problema foi alterado o procedimento e o *checklist*, realizando uma inspeção correta e o treinamento de todos os colaboradores que realizam esta atividade. Após a modificação do processo a falha não teve reincidência até junho 2019 evidenciando que a causa raiz não irá reincidir. O Quadro 4.3 apresenta a descrição das ações para mitigar as falhas.

Quadro 4.3 – Plano de ação para mitigar a causa raiz “Falha durante a substituição da Bobina de campo N° 4”

Motivo	Causa	Solução	Responsável	Prazo
Motor de tração com campo aberto	Falha durante a substituição da Bobina de campo N° 4	Inserir no checklist a verificação durante a substituição da bobina N°4, da face de apoio do parafuso, que deverá estar sem rebarba para não causar falso torque	Pessoa responsável pela alteração de documentação na empresa	Realizado
Motor de tração com campo aberto	Falha durante a substituição da Bobina de campo N° 4	Revisar procedimento inserindo a informação de verificação da face de apoio do parafuso quando for realizar a substituição das bobinas de campo dando ênfase na bobina N°4	Pessoa responsável pela alteração de documentação na empresa	Realizado
Motor de tração com campo aberto	Falha durante a substituição da Bobina de campo N° 4	Realizar treinamento com os colaboradores que realizam a atividade de substituição da bobina de campo N°4.	Pessoa responsável por dar treinamento na empresa	Realizado

Fonte: Autoria própria (2019).

As análises e ações mostradas são responsáveis por redução da causa raiz “Falha durante a substituição da bobina N°4” que contribui para uma melhora no resultado de confiabilidade do MT.

4.7.2 Ações para causa raiz “Bobina solta com relação ao núcleo” e “Falta de torque na bobina de campo N°1”

As causas raiz estão ligadas a correta fixação da bobina durante o processo de substituição. Ao realizar esta tarefa, o colaborador não realizava a verificação das fixações da bobina, não realizava verificação da condição da rosca e com isso o torque

era realizado de maneira incorreta e com isso a vibração de funcionamento normal do sistema a bobina se deslocava, danificava o isolamento e até mesmo rompia as interligações. A Fotografia 4.8 ilustra um caso em que o MT rompeu a interligação devido a causa raiz em questão.

Fotografia 4.8 – Rompimento da interligação de bobina de campo devido a causa raiz “Bobina de campo solta com relação ao núcleo”



Fonte: Autoria própria (2019).

Ações foram realizadas para que o modo de falha não voltasse a ocorrer no processo de reparo. O Quadro 4.4 informa as ações mapeadas para mitigar a causa raiz.

Quadro 4.4 – Plano de ação para mitigar a causa raiz “Bobina de campo solta com relação ao núcleo” e “Falta de torque na bobina de campo N°1”

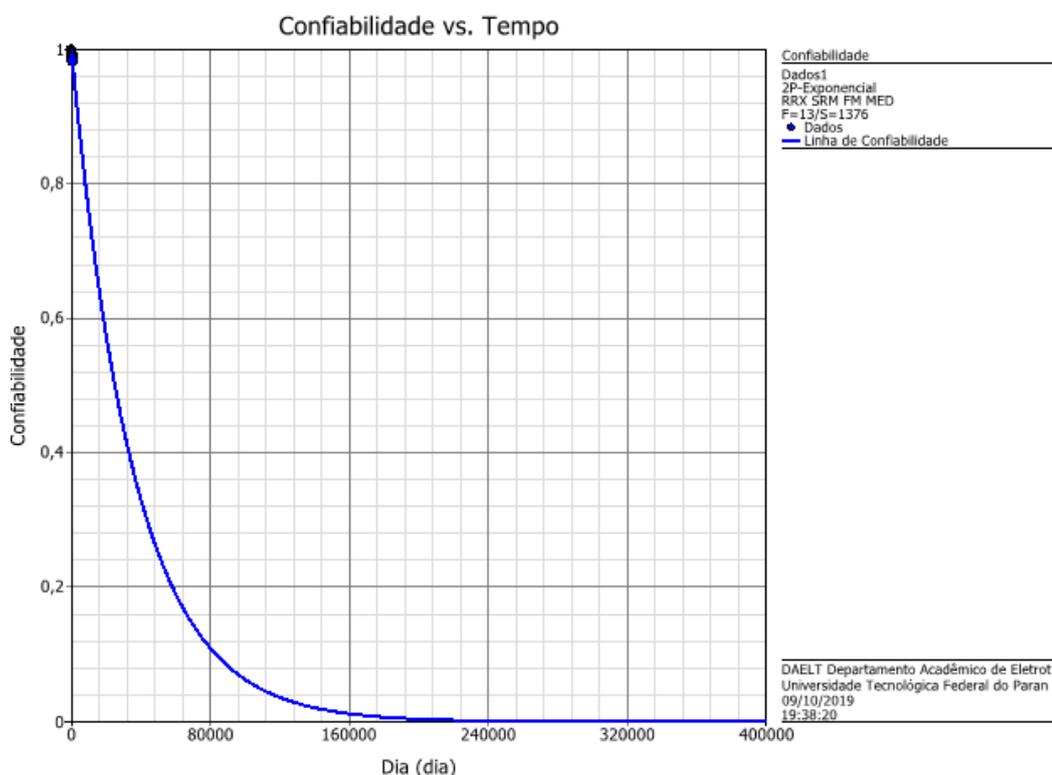
Motivo	Causa	Solução	Responsável	Prazo
Motor de tração com campo aberto	Bobina de campo solta com relação ao núcleo	Revisar procedimento inserindo a informação de verificação das rocas de fixação das bobinas de campo para não gerar falso torque.	Pessoa responsável pela alteração de documentação na empresa	Realizado

Motor de tração com campo aberto	Bobina de campo solta com relação ao núcleo	Realizar treinamento com os colaboradores que realizam a atividade de substituição da bobina de campo com o foco na fixação e no torque.	Pessoa responsável por dar treinamento na empresa	Realizado
----------------------------------	---	--	---	-----------

Fonte: Autoria própria (2019).

A implementação das ações citadas anteriormente gera uma redução na quantidade de falhas do subcomponente bobina de campo. O número de falhas relacionadas a estas causas são 8, e com a utilização das ferramentas de engenharia é possível mensurar o ganho em confiabilidade para o MT. A LDA do subcomponente foi modelada novamente, de modo que o Gráfico 4.15 mostra a curva de confiabilidade após a implementação das melhorias citadas anteriormente.

Gráfico 4.15 – Curva de confiabilidade bobina de campo após implementação de melhoria no processo

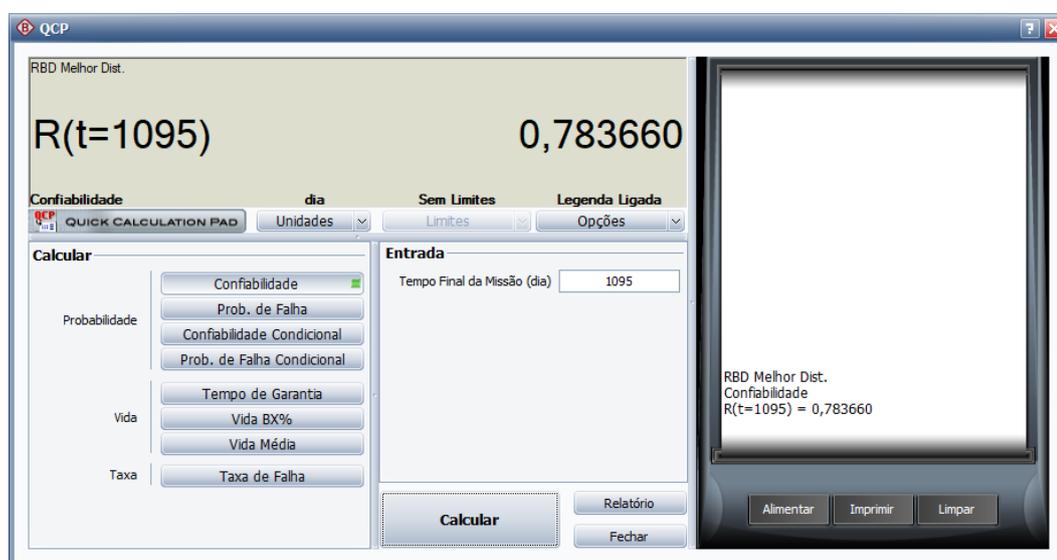


Fonte: Autoria própria (2019)

O diagrama de blocos do MT foi atualizado com a nova LDA do subcomponente bobina de campo e verificado o ganho de confiabilidade. A

confiabilidade antes das melhorias implementadas estava com valor de 76,62% em 1095 dias, a projeção da confiabilidade após implantação das melhorias é de 78,36%. As ações foram somente comportamentais e de detalhamento de processo sem nenhum investimento financeiro e com ganho de 1,74% de confiabilidade. A Figura 4.7 mostra a calculadora do *software*, e o Gráfico 4.16 apresenta a curva de confiabilidade com o novo cálculo de confiabilidade.

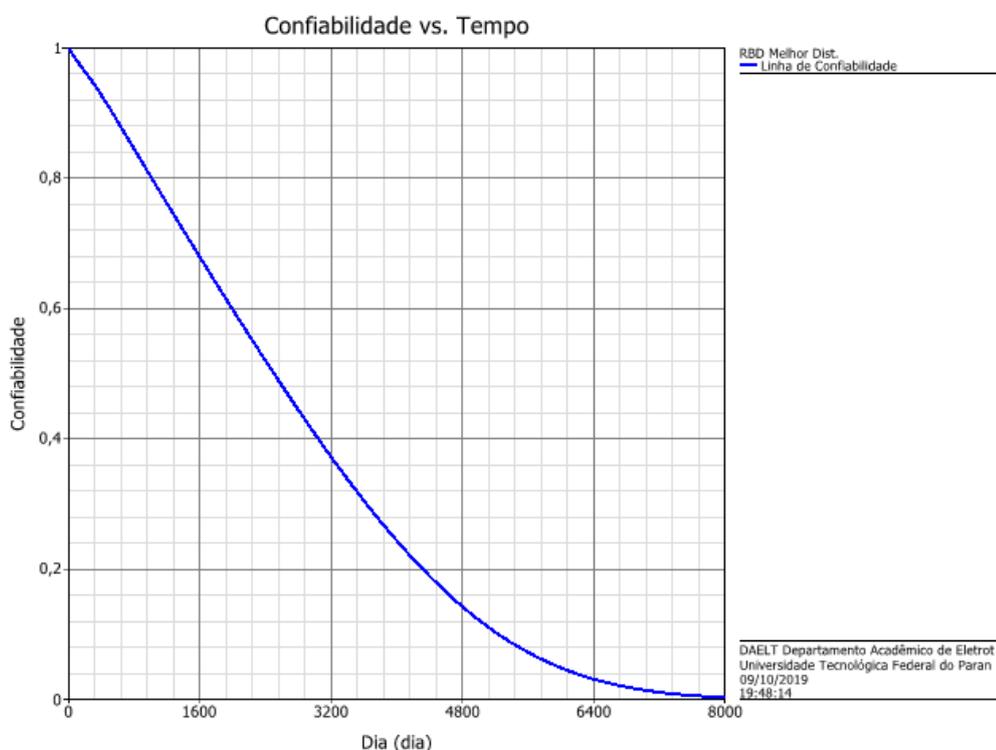
Figura 4.7 – Calculadora do *software* BlockSim com a confiabilidade do MT em 1095 dias após melhorias implementadas



Fonte: Autoria própria (2019).

A confiabilidade do MT teve alteração após a implementação das ações e teve aumento na proporção citada anteriormente. O Gráfico 4.16 demonstra a curva após as melhorias implementadas.

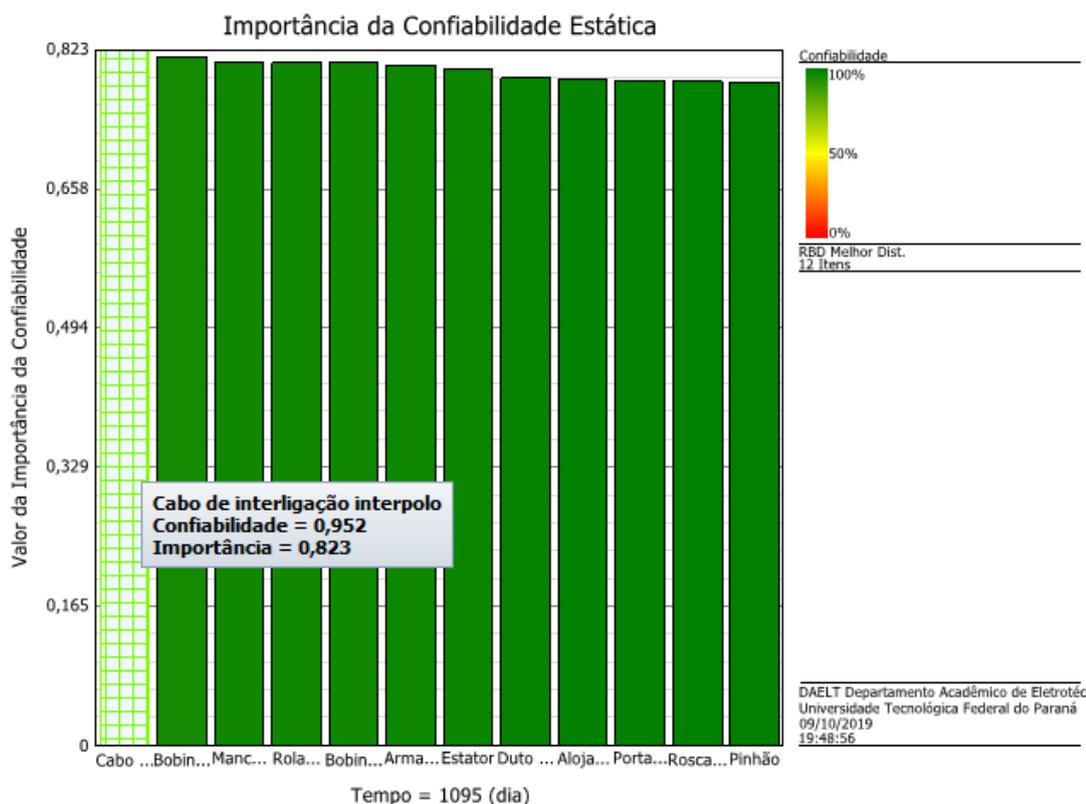
Gráfico 4.16 – Curva de confiabilidade do MT obtida pelo diagrama de blocos após implantação das melhorias



Fonte: Autoria própria (2019).

O Pareto de importância de confiabilidade também foi alterado após o registro das melhorias implementadas. O subcomponente com maior representação passou a ser cabo de interligação do interpolo e a bobina de campo passou a ficar na quinta barra de criticidade. Os Gráficos 4.17 e 4.18 apresentam o Pareto com a representação dos dois subcomponentes citados.

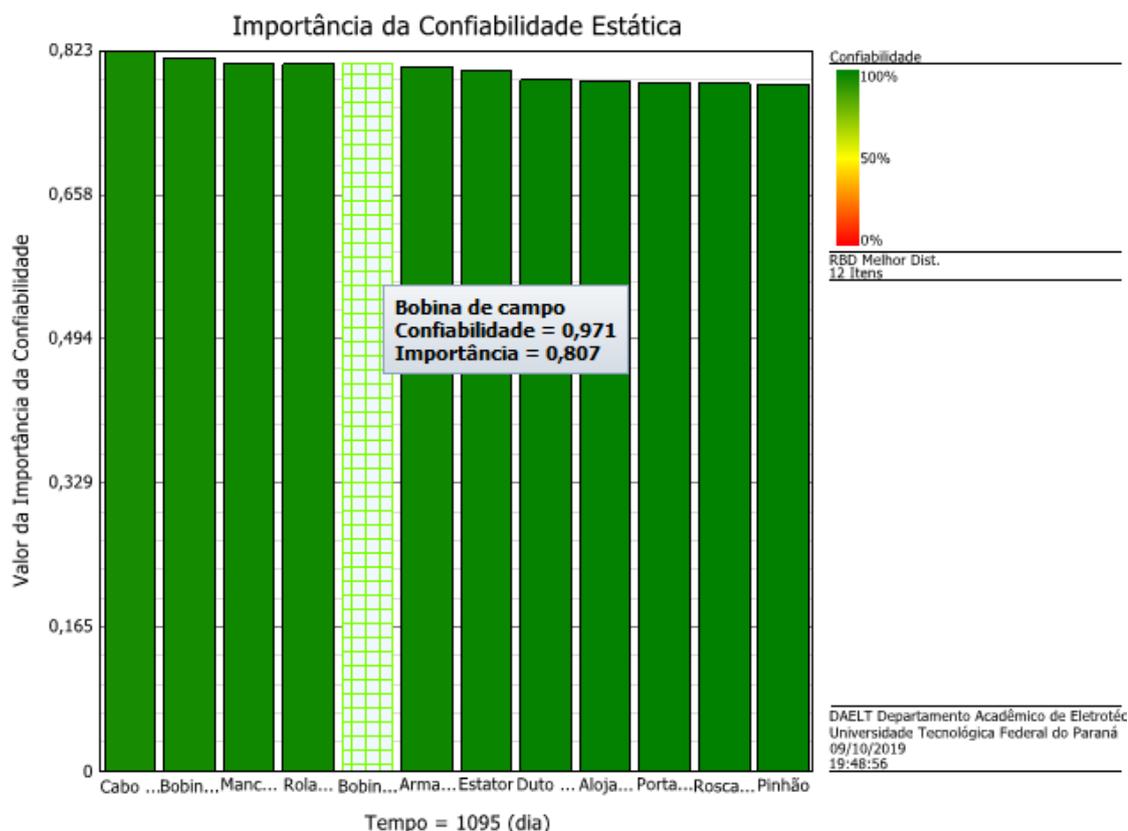
Gráfico 4.17 – Novo Pareto de Importância da confiabilidade após implementação das ações



Fonte: Autoria própria (2019).

No Pareto do Gráfico 4.18 é possível verificar que o subcomponente bobina de campo, após a implementação e solução das causas raiz, passou a ser classificado na quinta barra do Pareto de importância da confiabilidade.

Gráfico 4.18 – Pareto de Importância da confiabilidade após implementação das ações com a nova classificação da bobina de campo



Fonte: Autoria própria (2019).

O desenvolvimento evidenciado neste capítulo acabou definindo um processo que pode ser usado para solução de todas as causas raízes definidas para o componente MT. Seguindo todo o procedimento é possível obter ganho na confiabilidade proporcional a importância do subcomponente demonstrada no Gráfico 4.17.

5 CONCLUSÃO

A engenharia de confiabilidade e suas metodologias proporcionam facilidades nas tomadas de decisões, auxiliando no direcionamento dos esforços para chegar ao objetivo, seja ele para entendimento de um sistema ou para aumentar a confiabilidade. Para que isso tenha um sucesso é necessário que a base de dados retrate a realidade, pois, caso não represente, corre-se o risco de perda financeira e até mesmo de horas de trabalho com o foco errado.

Os pontos positivos durante o estudo foi a comprovação que o direcionamento das ferramentas de confiabilidade demonstra uma quebra de paradigma no setor de manutenção. A grande maioria as análises são realizadas através do volume das falhas (reincidência de falhas) e nem sempre esse é o fator primordial para o foco da tomada de decisão. Quando o contexto é analisado, considerando o tempo de vida de um sistema, fica mais evidente se a repetição da falha é um fator preponderante ou não. Neste ponto, algo essencial é saber qual a confiabilidade que o sistema necessita para um bom funcionamento. Mas dizer somente um valor de confiabilidade não nos diz tudo, é necessário informar até quando a confiabilidade informada será exigida. Como foi apresentado durante o estudo, a base de cálculo de 1095 dias é o período que a confiabilidade precisa ser verificada e estudada no MT.

Determinar uma confiabilidade para um sistema, com a definição de tempo e valor da confiabilidade mínima necessária é uma tarefa muito difícil. O acompanhamento do sistema deve ser feito através dos mínimos detalhes e com profissionais experientes que entendam a fundo sistema. A base de dados deve ser padronizada de maneira a conseguir todas as informações necessárias para um estudo de confiabilidade. Não existe um padrão para o levantamento dos dados, existem metodologia que orientam como devem ser feitas as coletas, mas não estabelecer *a priori*, por exemplo, os modos de falhas e causas raiz padrão. As padronizações devem ser realizadas à medida que as análises forem se desenvolvendo, verificando sempre o histórico de falha para certificar se que aquela causa raiz foi registrada no passado, porém com uma descrição diferente da que aparece na atualidade. Padronizar a descrição da causa raiz gera volume à análise, que pode servir de base para comprovação de ganho financeiro, uma vez que a

redução de muita falha leva ao aumento de disponibilidade do sistema, podendo operar mais horas e gerar mais lucros para a empresa.

A rastreabilidade é um conceito chave para o sucesso do processo de definição da metodologia LDA. Quando se fala em LDA sempre é necessário estabelecer um parâmetro de tempo, quilometragem, temperatura, entre outras, para se basear na projeção do objeto de estudo. Para ter o dado correto sobre qualquer uma dessas bases, é necessário a rastreabilidade do sistema. No estudo realizado foi necessário um acompanhamento de 1 ano e 6 meses de todos os MTs produzidos e recebidos com falha. Os TTF foram controlados via sistema da empresa que utiliza o MT, em que um componente é rastreado pelo número de série, ou seja, para instalação e remoção na locomotiva é necessária a informação do número de série. Essa rastreabilidade assegurou que os dados de TTF fossem levantados de forma correta.

A divisão de um grande sistema em subsistemas é importante pois, assim, é possível verificar o local exato de atuação para implementar melhorias. No sistema grande é possível verificar a confiabilidade, mas caso seja necessária alguma atuação, não haverá dado assertivo para uma atuação eficiente. A atuação a partir de tentativa e erro em um sistema grande sem a sua devida divisão, é a alternativa mais fácil de ser seguida. Porém, para obter os dados mais corretos, no estudo o MT (sistema grande) foi dividido em subcomponentes e, com isso, ficou mais fácil a decisão do ponto que se deveria atuar para aumentar a confiabilidade.

As distribuições estatísticas foram criadas para ser possível, por meio de um banco de dados, projetar as falhas ou a confiabilidade de qualquer sistema. É importante saber qual distribuição foi utilizada, e quando o *software* específico para o cálculo estatístico foi utilizado, para ser mais fácil verificar a melhor distribuição para o conjunto de dados propostos. Caso não tenha a disponibilidade do *software*, é recomendável utilizar a distribuição Weibull 2P, pois, conforme informado no capítulo de referencial teórico, ela tem um parâmetro de forma (β) que consegue imitar variados tipos de distribuição. Assim, levantados os dados de vida do sistema pode-se explorar mais uma ferramenta da engenharia de confiabilidade que é o diagrama de blocos.

O diagrama de blocos é uma ferramenta que auxilia nas simulações de funcionamento do sistema, levando em consideração as particularidades dos subsistemas definidos anteriormente. Esta ferramenta é responsável por direcionar

em qual ponto foi necessário a intervenção para se ter sucesso naquele sistema. No caso do estudo, foi possível a verificação que o subcomponente com maior representação era a bobina de campo e nele foi inserida alterações de processo para aumento de confiabilidade. Apesar de não ter sido um número expressivo de aumento de confiabilidade (1,74%), a comprovação da eficiência das ferramentas de Engenharia de Confiabilidade existiu. As causas raízes definidas para as devidas falhas foram priorizadas devido ao fato de não ser necessário nenhum tipo de investimento. Somente com alteração do processo e treinamento seria possível reduzir as causas raízes apontadas. O aumento pode ser ainda maior desde que as outras causas mapeadas na árvore de eventos sejam tratadas da mesma forma, assim, podendo ter maior ganho de confiabilidade do sistema.

5.1 DIFICULDADES DURANTE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Sempre que se fala em estudo de confiabilidade, a principal dificuldade é a aquisição de dados corretos para dar sequência às ferramentas da Engenharia de Confiabilidade. Para superar essa dificuldade foi elaborado uma base com informações padronizadas que foram preenchidas para cada falha que ocorresse. Nesta base foi apresentado o levantamento de tempo de vida dos componentes que falharam, os sintomas que o MT possuía quando foi removido da locomotiva, o subcomponente que foi afetado pela falha, o modo de falha e a causa raiz. Para o preenchimento dos dados que envolveram a análise da falha foram levados em consideração todo o seu histórico. Com este preenchimento padronizado, o processo de passar os dados para o *software* e continuar o desenvolvimento do trabalho se tornou mais fácil.

As tratativas para as falhas mapeadas é um fator complicador pois, em sua maioria, podem necessitar de investimento de alto custo. Quando o aumento da confiabilidade chegar a este patamar, ou seja, todas as ações de processo já foram implementadas e mesmo assim a confiabilidade necessária para o sistema não foi atingida, é necessário realizar um estudo de viabilidade, que é um tipo de análise suportada pela metodologia de LDA. O valor a ser investido em um determinado ativo para o processo vai ser viabilizado através da projeção de ganho de confiabilidade, e assim é possível quantificar a diminuição das falhas e o custo atrelado a cada falha evitada.

5.2 COMPROVAÇÃO DE SUCESSO DO ESTUDO

O objetivo do estudo era verificar, a partir das ferramentas de confiabilidade, uma metodologia que se aplicaria ao MT. A demonstração foi de sucesso apesar do baixo ganho de confiabilidade (1,74%), que foi resultado de medidas simples. A metodologia de FMEA foi utilizada nas definições de sintoma, subcomponente, modo de falha e causa raiz. Essa ferramenta foi utilizada em todas as análises, sendo elas reconhecidas como falha de processo ou como falha de variável externa ao MT.

A análise de dados de vida foi a base de todo o estudo, pois foi realizada variadas projeções de confiabilidade com o suporte desta ferramenta. As distribuições e seus ajustes trouxeram projeções muito próximas à realidade, que, assim, suportam todas as decisões tomadas nos próximos passos para o aumento de confiabilidade.

Os subcomponentes interligados em série no diagrama de blocos e suas devidas distribuições cadastradas, demonstraram o ponto de priorização (mais representação de confiabilidade) em que foi direcionado o esforço e comprovado o ganho em confiabilidade. O sucesso desta pequena amostra traz expectativa para alcançar ganhos maiores de confiabilidade para o MT.

O estudo do MT é mais uma comprovação de que as ferramentas da Engenharia de Confiabilidade aplicadas de forma precisa, são de utilidade expressiva para melhoria de processos.

5.3 BENEFÍCIOS DO ESTUDO

O benefício maior do estudo é comprovar que as ferramentas podem ser utilizadas em variadas situações, não necessariamente em ativos físicos. Elas podem ser utilizadas na investigação de acidentes, em projetos de melhorias, em desenvolvimento de produtos, entre outras situações da qual seja possível modelar de forma estatística.

Para a empresa que foi realizado a coleta de dados, fica comprovada a efetividade do uso das metodologias para os componentes e também para a locomotiva.

A expansão dos estudos de confiabilidade fica como sugestão futura para a empresa, pois essas metodologias direcionarão melhor o aporte financeiro disponibilizado, tendo maior ganho direto no sistema que for aplicada a metodologia.

5.4 TRABALHOS FUTUROS

Conforme foi visto no início deste trabalho, a locomotiva possui diversos componentes, e em todos eles podem ser aplicadas as metodologias da Engenharia de Confiabilidade utilizadas neste trabalho. Assim, em possíveis trabalhos futuros, é possível realizar essa análise em outros componentes, resultando em melhorias tanto no componente, quanto na confiabilidade da locomotiva como um todo.

Definindo a LDA dos principais subcomponentes, a configuração do diagrama de blocos da locomotiva e inserindo os dados no *software* BolckSim, é possível direcionar os esforços para solução de problemas para ter maior ganho. Caso a empresa não disponibilize recursos para solução de todos os componentes, é possível verificar o ponto de atuação que traz o maior ganho de confiabilidade. Este trabalho de análise do sistema da locomotiva pode trazer mais ganhos a empresa uma vez que ajuda a direcionar corretamente os recursos.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, H. Benefícios que a cabotagem pode trazer para o país. **ILOS**, 31 jan. 2019. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/tag/matriz-de-transportes/>. Acesso em: 18 out. 2019.

BENTES, D. **Motores elétricos de tração**. Mecânicas de Locomotivas II, Aula 9. Maputo: ISUTC, 2019. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/16154263/>. Acesso em: 18 out. 2019.

BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. **Systems Engineering and Analysis**. Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall College, 1990.

CARACTERÍSTICAS da Distribuição Weibull. **ReliaSoft**, ed. 3, maio 2005. Disponível em: https://www.portal-energia.com/downloads/aulas/Weibull_Topicos.pdf. Acesso em: 18 out. 2019.

DUSSAULT, B. H. Automated FMEA - Status and Future. **Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium**, San Francisco, p. 1-5, 1984.

FREITAS, L. F. **Elaboração de um plano de manutenção em uma pequena empresa do setor metal mecânico de Juiz de Fora com base nos conceitos da manutenção preventiva e preditiva**. 2016. 96p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2016. Disponível em: <http://www.ufjf.br/mecanica/files/2016/07/TCC-Laís-Fulgêncio-Freitas.pdf>. Acesso em: 18 out. 2019.

LIFE Data Analysis Reference. Tucson: ReliaSoft, 2015. Disponível em: http://www.synthesisplatform.net/references/Life_Data_Analysis_Reference.pdf. Acesso em: 18 out. 2019.

MRS adquire as primeiras locomotivas que operam em Corrente Alternada do Brasil. **LogWeb**, 12 out. 2008. Disponível em: <http://www.logweb.com.br/mrs-adquire-as-primeiras-locomotivas-que-operam-em-corrente-alternada-do-brasil/>. Acesso em: 18 out. 2019.

PUENTE, J. *et al.* A decision support system for applying failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 19, n.2, p. 137-150, 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/235250603_A_decision_support_system_for_applying_failure_mode_and_effect_analysis. Acesso em: 18 out. 2019.

RAMOS JUNIOR, J. F. **Análise de dados de vida**. Apostila. Curitiba: UTRPF, jun. 2019

RIBEIRO, R. A. Manutenção baseada na confiabilidade. PCMusina, 13 jul. 2011. Disponível em: <https://pcmusina.wordpress.com/2011/07/13/manutencao-baseada-na-confiabilidade/>. Acesso em: 18 out. 2019.

RIGONI, Emerson. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**. Apostila. 2019.

RUMO LOGÍSTICA. **Dados internos da empresa**. 2019.

SENAI. **Backshop – Elétrica**. Apostila de treinamento. Pinhais: SENAI/Sistema FIEP, set. 2018.

SILVEIRA, C. B. Confiabilidade e disponibilidade de máquinas: um exemplo prático. **Citisystems**, 2019b. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/confiabilidade-disponibilidade-maquinas/>. Acesso em: 18 out. 2019.

SILVEIRA, C. B. Motor CC: Saiba como Funciona e de que forma Especificar. **Citisystems**, 2019a. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/MOTOR-CC/>. Acesso em: 18 out. 2019.

SPANÓ, C. C. **Ensaio acelerados de vida**. Apostila. Curitiba: UTRPF, ago. 2018.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from theory to execution**. 2. ed. Milwaukee, Winsconsin: ASQ Quality Press, 2003.

STRAUSS, A. L.; CORBIN, J. **Basics of qualitative research: grounded theory procedures and techniques**. 2 ed. Thousand Oaks: Sage, 1998.

VINADÉ, C. A. C. *et al.* FMEA aplicado no desenvolvimento de sistemas hidráulicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 3, 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, set. 2001.

VOLLERTT JUNIOR, J. R. **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. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1996. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/76954/141782.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 out. 2019.