



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2021/07.12.20.10-TDI

SUPPORTABILIDADE DE SISTEMAS AEROESPACIAIS APLICADA A PLATAFORMAS DE COLETA DE DADOS DE REDES HIDROMETEOROLÓGICAS

Letícia Moreira de Backer Marchezin

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelos Drs. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, e Ana Paula de Sá Santos Rabello, aprovada em 05 de julho de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/453RLHS>>

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2021/07.12.20.10-TDI

SUPPORTABILIDADE DE SISTEMAS AEROESPACIAIS APLICADA A PLATAFORMAS DE COLETA DE DADOS DE REDES HIDROMETEOROLÓGICAS

Letícia Moreira de Backer Marchezin

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelos Drs. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, e Ana Paula de Sá Santos Rabello, aprovada em 05 de julho de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/453RLHS>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Marchezin, Letícia Moreira de Backer.

M332s Suportabilidade de sistemas aeroespaciais aplicada a plataformas de coleta de dados de redes hidrometeorológicas / Letícia Moreira de Backer Marchezin. – São José dos Campos : INPE, 2021.
xxii + 154 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2021/07.12.20.10-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientadores : Drs. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, e Ana Paula de Sá Santos Rabello.

1. Suportabilidade. 2. Manutenibilidade. 3. Confiabilidade. 4. Disponibilidade. 5. Análise de falhas. I.Título.

CDU 629.7.017



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE LETÍCIA MOREIRA DE BACKER MARCHEZIN
BANCA Nº 183/2021, REG 499736/2019.

No dia 05 de julho de 2021, as 14h00min, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

Título: “Suportabilidade de Sistemas Aeroespaciais Aplicada a Plataformas de Coleta de Dados de Redes Hidrometeorológicas”

Membros da banca:

Dr. Maurício Gonçalves Vieira Ferreira- Presidente - INPE
Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza - Orientador - INPE
Dra. Ana Paula de Sá Santos Rabello - Orientador – INPE
Dr. Adalberto Coelho da Silva Jr – Membro Interno – INPE
Dr. Eloy Martins de Oliveira Junior – Membro Externo - OPENCADD



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Goncalves Vieira Ferreira, Coordenador de Rastreo, Controle e Recepção de Satélites**, em 06/07/2021, às 10:21 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula de Sá Santos Rabello, Tecnologista**, em 06/07/2021, às 11:43 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eloy Martins de oliveira junior (E), Usuário Externo**, em 07/07/2021, às 08:43 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADALBERTO COELHO DA SILVA JUNIOR (E), Usuário Externo**, em 07/07/2021, às 10:56 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **marcelo lopes de oliveira e souza (E), Usuário Externo**, em 09/08/2021, às 21:21 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **7820662** e o código CRC **05BC5829**.

Dedico este trabalho aos meus queridos filhos Bruno e Larissa, e especialmente ao meu esposo Eduardo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu esposo, Eduardo, meu agradecimento especial pelo incentivo para a realização deste trabalho.

Aos meus filhos, Bruno e Larissa, pela paciência e compreensão.

Ao Prof. Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, que depositou toda a confiança e interesse em meu trabalho. Seus ensinamentos foram fundamentais para a condução e conclusão do estudo aqui apresentado; e à Dra. Ana Paula de Sá Santos Rabello, pelo apoio e convivência durante a realização do curso.

Ao Celso Fritsch, pela disponibilização do *Software* para as análises.

Ao CEMADEN, pela disponibilização dos dados históricos das PCDs.

Aos professores das disciplinas que realizei no INPE, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos membros da banca, pela disponibilidade em avaliar este trabalho.

E finalmente, agradeço a Deus, por toda a Graça e Paz.

RESUMO

Atualmente, sistemas aeroespaciais meio (por ex.: controle de tráfego aéreo, centros de controle e missão de satélites, etc..) e fim (por ex.: satélites, aviões, etc..) têm ciclos de vida, prazos, custos e tecnologias cada vez mais longos, caros e elaborados. Para tratá-los e conservá-los como ativos, e auxiliar em tais decisões, a métrica vetorial de Suportabilidade vem sendo proposta na literatura afim. Como esta, ela é variada e situacional; logo, demanda estudo e aplicação. Assim: Este trabalho tem por objetivo estudar a Suportabilidade de sistemas aeroespaciais aplicada a plataformas de coleta de dados de redes hidrometeorológicas. Isto inclui: 1) revisar a literatura e suas técnicas (RCM, LORA, FMECA, MTA, etc.) para demonstrar a importância da análise e aplicação da Suportabilidade (projetar para o suporte, projetar o suporte, suportar o projeto) no ciclo de vida de sistemas aeroespaciais; 2) estudar as métricas escalares de Manutenibilidade, Confiabilidade, etc. que, minimamente, compõem a Suportabilidade; 3) abordar seus impactos na Disponibilidade do sistema; 4) discutir, como estudo de caso, a política de manutenção de uma amostra de PCDs de uma rede brasileira de PCDs; 5) identificar os processos de operação e manutenção; 6) mapear as falhas e ações de manutenção realizadas; 7) ajustar pdfs (*probability density functions*) Weibull aos seus dados de vida, aplicando técnicas de estimativa da Confiabilidade, um método importante para a estimativa da probabilidade de falhas com dados reais do sistema instalado no seu ambiente operacional; 8) calcular a Manutenibilidade daquela amostra; 9) comparar o processo atual de manutenção daquela amostra com as melhores práticas, requisitos e processos de Suportabilidade disponíveis na literatura (padrões ECSS e projetos aeroespaciais de defesa). Isto tudo permitiu concluir que: 1) a Confiabilidade aumentou entre os anos de 2016-2018; e 2) diminuiu entre os anos de 2019-2020, evidenciando uma piora na manutenção realizada na amostra no período 2019-2020. E permitiu sugerir melhorias 1) na operação e na manutenção, 2) nos processos e nas atividades; realizadas pelas PCDs do estudo de caso.

Palavras-chave: Suportabilidade. Manutenibilidade. Confiabilidade. Disponibilidade. Análise de Falhas. Plataforma de Coleta de Dados Ambientais.

SUPPORTABILITY OF AEROSPACE SYSTEMS APPLIED TO DATA COLLECTING PLATFORMS OF HYDROMETEOROLOGICAL NETWORKS

ABSTRACT

Currently, end and mean aerospace systems have life cycles, deadlines, costs and technologies increasingly long, expensive and elaborated. To treat and preserve them as assets, and assist in such decisions, the Supportability vector metrics has been proposed in the related literature. Like this one, it is varied and situational; so, it demands study and application. Thus: This work aims to study the Supportability of aerospace systems applied to data collecting platforms of hydrometeorological networks. This includes to: 1) review the literature and its techniques (RCM, LORA, FMECA, MTA, etc.) to demonstrate the importance of the analysis and application of Supportability (design for support, design the support, support the design) in the life cycle of aerospace systems; 2) study the scalar metrics of Maintainability, Reliability, etc. that minimally compose Supportability; 3) assess its impacts on the system Availability; 4) evaluate, as a case study, a policy of maintaining a sample of the data collecting platforms of a brazilian network; 5) identify the operation and maintenance processes; 6) map the failures and maintenance actions performed; 7) adjust Weibull pdfs (probability density functions) to their life data, applying Reliability estimation techniques, an important method for estimating the probability of failures with real data of the system installed in its operating environment; 8) calculate the Maintainability of that sample; 9) compare the current process of maintaining that sample with the best practices, requirements and Supportability processes available in the literature (ECSS standards and defense aerospace projects). This allowed us to conclude that: 1) the Reliability increased between the years 2016-2018; and 2) it decreased between the years 2019-2020, showing a worsening in the maintenance performed on that sample in the period 2019-2020. In addition, it allowed us to suggest improvements 1) in operation and maintenance, 2) in the processes and activities; performed by the data collecting platforms of the case study.

Keywords: Supportability. Maintainability. Reliability. Availability. Failure Analysis. Environmental Data Collecting Platforms.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Atributos Qualitativos da Manutenibilidade.	15
Figura 2.2 – Diagrama com os fatores dos tempos de indisponibilidade.	17
Figura 2.3 – Ciclo da Manutenção Corretiva.	25
Figura 2.4 – Curva da Taxa de Falhas ou "Curva da Banheira"	29
Figura 2.5 – Representação Gráfica da Disponibilidade.	33
Figura 2.6 – Atividades da Análise de Suportabilidade no Ciclo de Vida de um Sistema.	37
Figura 2.7 – Requisitos de Suportabilidade do Sistema.	39
Figura 2.8 – Análise da Suportabilidade.	41
Figura 2.9 – Diagrama Simplificado da Lógica de Decisão do RCM.	43
Figura 2.10 – Etapas para execução de uma análise de RCM completa.	45
Figura 2.11 – Detalhamento das etapas para execução de uma análise de RCM completa.	45
Figura 2.12 – Infraestrutura de manutenção e suporte de um sistema.	50
Figura 2.13 – Curva P-F.	55
Figura 3.1 – Disciplinas do padrão ECSS.	61
Figura 3.2 – Visão Geral do Suporte Logístico Integrado na ECSS.	67
Figura 4.1 – Visibilidade do custo no ciclo de vida do produto.	71
Figura 5.1 – Localização e quantidade das plataformas instaladas no Brasil. .	75
Figura 5.2 – Processo atual de manutenção e coleta de dados de manutenção e falhas.	77
Figura 5.3 – Estrutura de uma PCD e seus componentes.	79
Figura 5.4 – Um extrato da planilha de trabalho com os dados brutos dos registros de manutenção das PCDs.	81
Figura 5.5 – Categorização das falhas das PCDs.	83
Figura 5.6 – Diagrama de Pareto com as causas das falhas das PCDs.	84
Figura 5.7 – Categorização das ações de manutenção nas PCDs.	85
Figura 5.8 – Ações de Manutenção nas PCDs.	86

Figura 6.1 – Modos de falha e a "curva da banheira".....	93
Figura 6.2 – Um extrato do Relatório de Operação e Manutenção com os tempos de operação de uma PCD.	96
Figura 6.3 – Um extrato do banco de dados com os tempos de operação de uma PCD.....	97
Figura 6.4 – Variação anual do número de falhas das amostras de 60 PCDs. 99	
Figura 6.5 – Histogramas anuais (2016-2020) dos tempos até a falha (em horas) das amostras de 60 PCDs.	100
Figura 6.6 – Papel de probabilidade para a distribuição Weibull por ano, em 2016-2020.	104
Figura 6.7 – Função densidade de probabilidade por ano, em 2016-2020. ...	105
Figura 6.8 – Confiabilidade do equipamento por um período de t (h), por ano, em 2016-2020.	106
Figura 6.9 – Evolução anual do MTTF.	107
Figura 7.1 – Evolução anual dos MDTs da amostra completa de 60 PCDs, em 2016-2020.	113
Figura 7.2 – Evolução anual dos MDTs da amostra completa de 60 PCDs entre 2016-2020, excluindo os tempos das PCDs inativas por mais de 48h.....	114
Figura 8.1 – Modelo de comparação.....	115

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Quadro comparativo do conceito de Suportabilidade e autores mencionados.....	11
Tabela 2.2 - Algumas Métricas de Manutenibilidade frequentemente usadas.	20
Tabela 2.3 - Evolução da Manutenção.....	22
Tabela 2.4 - Um resumo das características das etapas da "Curva da Banheira".....	30
Tabela 2.5 - Relação entre Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade.....	31
Tabela 2.6 - Métricas que podem compor a Suportabilidade.....	42
Tabela 2.7 - Classificação das Plataformas de Coleta de Dados e suas Aplicações.....	57
Tabela 3.1 - Principais Requisitos e atividades de Dependabilidade baseado na ECSS-Q-ST-30C (ECSS, 2009b), e aplicáveis aos conceitos de Suportabilidade.....	62
Tabela 3.2 - Principais Requisitos e atividades de Suporte Logístico Integrado baseado na ECSS-M-70A, e aplicáveis aos conceitos de Suportabilidade.....	68
Tabela 4.1 - Problemas comuns encontrados da fase de operação dos sistemas.....	70
Tabela 6.1 - Resultado dos parâmetros Weibull, MTTF e t (R=95%) entre 2016-2020.....	107
Tabela 7.1 - MDTs da amostra completa de 60 PCDs entre 2016-2020.....	112
Tabela 7.2 - MDTs da amostra completa de 60 PCDs entre 2016-2020, excluindo os tempos das PCDs inativas por mais de 48h.....	113

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADT	<i>Administrative Delay Time</i>
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>
ECSS	<i>European Cooperation for Space Standardization</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Modes, Effects and Criticality Analysis</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LDT	<i>Logistic Delay Time</i>
LORA	<i>Level of Repair Analysis</i>
LSE	<i>Least Square Estimation</i>
MDT	<i>Mean Down Time</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation Method</i>
MTA	<i>Maintenance Task Analysis</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTBM	<i>Mean Time Between Maintenance</i>
MTBO	<i>Mean Time Between Outages</i>
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PDF	<i>Probability Density Function</i>
RAM	<i>Reliability Availability Maintainability</i>
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
SINDA	Sistema Integrado de Dados Ambientais

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto e motivações	1
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Generalidade e utilidade.....	3
1.4 Organização deste trabalho.....	4
2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1 Engenharia de sistemas	6
2.2 Suportabilidade.....	7
2.2.1 Manutenibilidade.....	12
2.2.1.1 Aspectos qualitativos da Manutenibilidade	13
2.2.1.2 Medidas quantitativas de Manutenibilidade	15
2.2.1.3 Manutenibilidade x manutenção	21
2.2.1.4 Manutenção preventiva, manutenção corretiva e manutenção preditiva	22
2.2.2 Confiabilidade	26
2.2.2.1 Distribuições de confiabilidade.....	27
2.2.2.2 Curva de taxa de falhas ou "Curva da Banheira"	28
2.2.3 Disponibilidade.....	30
2.2.3.1 Disponibilidade inerente e disponibilidade atingida.....	33
2.2.3.2 Disponibilidade operacional	34
2.3 Dependabilidade.....	35
2.4 Análise da Suportabilidade	36
2.4.1 Projetar (o sistema) para o suporte.....	37
2.4.2 Projetar o suporte (para o sistema).....	39
2.4.3 Suportar o (sistema) projetado.....	40
2.5 Métricas que podem compor a Suportabilidade.....	41
2.6 Manutenção Baseada na Confiabilidade (<i>Reliability Centered Maintenance</i> - RCM).....	42

2.7	Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (<i>Failure Modes, Effects and Critically Analysis - FMECA</i>).....	46
2.8	Análise de Tarefas de Manutenção (<i>Maintenance Task Analysis - MTA</i>)..	47
2.9	Análise do Nível de Reparo (<i>Level of Repair Analysis - LORA</i>).....	48
2.10	Manutenção Baseada na Condição (<i>Condition Based Maintenance - CBM</i>)	50
2.11	Relatório de Análise de Falhas e Ação Corretiva do Sistema (<i>Failure Report Analysis and Corrective Action System - FRACAS</i>)	52
2.12	Falhas	53
2.12.1	Falha funcional.....	54
2.12.2	Falha potencial.....	54
2.12.3	Modos de falha	55
2.13	Plataforma de coleta de dados.....	56
3	PROCESSOS E REQUISITOS DE SUPORTABILIDADE BASEADO NO PADRAO ECSS	59
3.1	Requisitos de Dependabilidade baseados no padrão ECSS-Q-ST-30C (ECSS, 2009b)	61
3.2	Requisitos de Suporte Logístico Integrado baseados no padrão ECSS-M-70A (1996).....	65
4	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGENS PARA SUA SOLUÇÃO	70
4.1	Formulação do problema	70
4.2	Abordagens para sua solução	72
5	DESCRIÇÃO DO PROCESSO ATUAL DE MANUTENÇÃO, MAPEAMENTO DAS FALHAS E DAS AÇÕES DE MANUTENÇÃO DAS PCDs DO CEMADEN	74
5.1	Introdução.....	74
5.2	Descrição do processo atual de manutenção das PCDs do CEMADEN ...	75
5.3	Mapeamento das falhas e ações de manutenção das PCDs do CEMADEN entre os anos de 2014 e 2019.....	79
5.4	Resultados e discussão do mapeamento das falhas e ações de manutenção das PCDs do CEMADEN entre os anos de 2014 e 2019	82

6 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE UMA AMOSTRA DAS PCDs DO CEMADEN AJUSTANDO PDFS WEIBULL AOS SEUS DADOS DE VIDA ...	88
6.1 Introdução e objetivos deste Capítulo.....	88
6.2 Revisão da literatura relacionada aos objetivos deste Capítulo.....	89
6.3 Antecedentes matemáticos - noções básicas da distribuição Weibull	91
6.4 Taxa relativa de falhas e “Curva da Banheira”.....	92
6.5 Método de análise	94
6.5.1 Coleta e descrição dos dados	95
6.5.2 Variação anual do número de falhas e histogramas de frequência com os tempos até a falha	98
6.5.3 Determinação dos parâmetros de Weibull.....	101
6.6 Discussão e resultados.....	103
6.7 Conclusão da análise de Confiabilidade das amostras de PCDs	108
7 ANÁLISE DA MANUTENABILIDADE E DA DISPONIBILIDADE DAS AMOSTRAS DE PCDs	109
7.1 Alguns problemas comuns encontrados nas fases de operação e manutenção.....	109
7.2 Análise da Manutenibilidade e da Disponibilidade.....	110
8 COMPARAÇÕES ENTRE ITENS DA SUPORTABILIDADE DOS CAPS. 2-3, E ITENS AFINS DOS CAPS. 5-7; E PROPOSTAS DE MELHORIA.....	115
8.1 Diferenças e semelhanças entre focos, formas e conteúdos dos Caps. 2-7	115
8.2 Itens da Suportabilidade e afins dos Caps. 2-7 para comparações.....	116
8.3 Comparação entre itens da Suportabilidade cf. o Cap. 2 (DALLOSTA e DOD) e itens afins cf. os Caps. 5, 6, 7 (CEMADEN)	117
8.4 Comparação entre itens da Dependabilidade e do Suporte Logístico integrado do Cap. 3 (ECSS) e itens afins dos Caps. 5-7 (CEMADEN)	119
8.5 Propostas de melhoria	122
9 CONCLUSÃO, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
9.1 Conclusão.....	127
9.2 Recomendações ao estudo de caso.....	129

9.3 Sugestões para trabalhos futuros	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
GLOSSÁRIO.....	141
APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DE ALGUNS SISTEMAS DE COLETA DE DADOS EXISTENTES NO BRASIL	142
APÊNDICE B - APRESENTAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> PROCONF UTILIZADO NA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS DADOS DO ESTUDO DE CASO NESTE TRABALHO	144
APÊNDICE C - TEMPOS DE OPERAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PCDS APÓS O TRATAMENTO DOS DADOS BRUTOS, UTILIZADOS NA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE; E HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIA POR ANO	146
APÊNDICE D - TEMPOS DE INDISPONIBILIDADE DAS AMOSTRAS DE PCDS APÓS O TRATAMENTO DOS DADOS BRUTOS, UTILIZADOS NA ANÁLISE DE MANUTENABILIDADE; E MDT (<i>MEAN DOWN TIME</i>) POR ANO.	152

1 INTRODUÇÃO

Este documento apresenta a Dissertação da autora para obtenção do título de Mestre no Curso de Engenharia e Tecnologias Espaciais (ETE), Área de Concentração em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

1.1 Contexto e motivações

Atualmente, sistemas aeroespaciais meio (por ex.: controle de tráfego aéreo, centros de controle e missão de satélites, etc..) e fim (por ex.: satélites, aviões, etc..) têm ciclos de vida, prazos, custos e tecnologias cada vez mais longos, caros e elaborados. Para tratá-los e conservá-los como ativos, e auxiliar em tais decisões, a métrica vetorial de Suportabilidade vem sendo proposta na literatura afim. Como esta, ela é variada e situacional; logo, demanda estudo e aplicação, como feito a seguir.

Assim, embora o objetivo final na entrega de um sistema (seja um produto, p. ex.: satélite; ou serviço, p. ex.: coleta de dados) deva ser sua Disponibilidade para operar e executar a missão/função pretendida durante toda a sua vida útil esperada, o fabricante deve prover suporte por toda a vida operacional do produto. Logo, sua Suportabilidade requer uma combinação eficaz entre Manutenibilidade, Confiabilidade, Disponibilidade, Logística, Operações, Segurança, etc., para ter um sistema disponível para o uso pretendido em todo o tempo designado para a missão (LALLI et al., 1997). Manutenibilidade é uma qualidade determinante no suporte e na facilidade de manutenção do sistema, além de propiciar a capacidade de modificar e atualizar o sistema ao longo de sua vida útil. Entretanto, captura apenas a duração, custo e as condições técnicas do reparo. Já a Suportabilidade alia-a aos demais atributos relevantes ao sistema.

Com o rápido desenvolvimento da Engenharia Aeroespacial, a estrutura dos sistemas aeroespaciais tornou-se cada vez mais complexa e integrada. Em consequência, os requisitos de Suportabilidade (ex.: Manutenibilidade,

Confiabilidade, Disponibilidade, Logística, Operações, Segurança, etc.) também aumentaram. Assim, devido à complexidade do ambiente aerospacial, à alta integração entre as partes do sistema e às limitações de teste e manutenção, a operação anormal ou a falha do sistema devem ser evitadas e previstas ainda nas fases de desenvolvimento do projeto, através de análises de Suportabilidade (p.ex.: Manutenibilidade, Confiabilidade e Risco). A Suportabilidade têm um papel importante na Disponibilidade e/ou sobrevivência do sistema e torna-se um importante foco na pesquisa aeroespacial, sendo um motivador para este trabalho **(1ª Motivação)**.

Pesquisas bibliográficas mostram que as indústrias de defesa possuem uma vasta experiência na definição e aplicação de requisitos de Suportabilidade desde as fases iniciais de concepção e projeto do produto (ex: DALLOSTA, 2012A; DALLOSTA, 2012B, DALLOSTA, 2018; DOD, 2005, 2008A, 2008B, 2010, 2011A; BLANCHARD, 2016). Dentro desse contexto, outra motivação **(2ª Motivação)** é buscar o conceito de Suportabilidade (projetar para o suporte, projetar o suporte, suportar o projeto) das indústrias de defesa e aplicá-las em projetos aeroespaciais.

Após ampla busca por dados de campo, a disponibilidade de uma amostra de dados dos projetos de observação e monitoramento hidrometeorológico do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN que utilizam PCDs - Plataforma de Coleta de Dados, para coleta, armazenamento, e envio dos dados ambientais, motiva **(3ª motivação)** este trabalho, por permitir sugerir uma melhoria no processo de manutenção de um sistema já em operação, através da Análise da Suportabilidade aplicada a PCDs (estudo de caso), estabelecendo processos para o aumento da Disponibilidade de sistemas.

As PCDs do CEMADEN foram escolhidas como estudo de caso devido a disponibilidade de dados históricos de campo e pela similaridade de operação com as redes de PCDs do INPE, operadas pelo Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais (SBCDA). Dessa forma, os resultados obtidos neste trabalho são também aplicáveis às PCDs do INPE e a todos os sistemas

aeroespaciais.

1.2 Objetivo

Assim, o presente trabalho tem por objetivo sugerir melhorias de processo de manutenção de um sistema já em operação, através do estudo da Suportabilidade aplicada a Plataformas de Coleta de Dados Ambientais (estudo de caso), estabelecendo processos para a melhoria da Manutenibilidade e Confiabilidade, e o aumento da Disponibilidade de sistemas aeroespaciais.

Isto inclui: como estudo de caso, descrever o processo atual e a política de suporte e manutenção de uma amostra das plataformas de coleta de dados hidrológicos do CEMADEN e compará-las com processos de normas internacionais disponíveis na literatura com foco na Suportabilidade, propondo uma melhoria do processo de manutenção.

Este trabalho também inclui mostrar a importância da implementação dos conceitos da análise da Suportabilidade durante as fases iniciais de desenvolvimento do produto, a importância do monitoramento e análise dos dados de operação e das manutenções, e seus impactos positivos na Disponibilidade do sistema. Isto atende às 3 motivações deste trabalho e inclui o mapeamento de falhas do sistema, análises para estimativas da Manutenibilidade e da Confiabilidade, e avaliações da amostra para identificação da estratégia de manutenção mais adequada para o sistema. No Capítulo 3 serão apresentadas as abordagens para a solução e como alcançar este objetivo.

1.3 Generalidade e utilidade

A generalidade deste trabalho está em permitir a aplicação dos métodos e dos resultados obtidos aos projetos espaciais e atividades relacionadas à operação de redes hidrológicas e a outras áreas que tenham interesse na Suportabilidade, como as indústrias de defesa e aeronáutica.

A utilidade deste trabalho é colaborar com as atividades da equipe de gestão e infraestrutura do CEMADEN, através do estudo (1), descrição (2) e comparação (3) mencionados acima. E estimular o mesmo no Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais do INPE (SBDCA), constituído pelos satélites do programa CBERS e pelas diversas plataformas de coleta de dados espalhadas pelo território nacional (<http://sinda.crn.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/sobre.php>).

1.4 Organização deste trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta o contexto, as motivações, o objetivo, a generalidade e a utilidade deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos e a revisão da literatura disponível, relacionado aos conceitos de Suportabilidade.

O Capítulo 3 apresenta os Requisitos de Dependabilidade e Suporte Logístico Integrado da ECSS, relacionados aos conceitos de Suportabilidade aplicáveis a produtos aeroespaciais.

O Capítulo 4 apresenta a formulação do problema e as abordagens para sua solução.

O Capítulo 5 apresenta a descrição do processo de manutenção, o mapeamento das falhas e das ações de manutenção das PCDs do CEMADEN.

O Capítulo 6 apresenta a análise da Confiabilidade da amostra das plataformas de coleta de dados, ajustando as pdfs (*probability density function*) do tipo Weibull aos seus dados de vida.

O Capítulo 7 apresenta a análise da Manutenibilidade e da Disponibilidade das amostras das PCDs do estudo de caso.

O Capítulo 8 apresenta uma comparação do processo atual de manutenção da amostra da rede de PCDs com os processos e conceitos de Suportabilidade descritos na literatura (ECSS e projetos de defesa); e propostas de melhorias.

O Capítulo 9 apresenta as conclusões, recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO DA LITERATURA

Este Capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos básicos principais e a revisão da literatura disponível que estarão presentes neste trabalho.

2.1 Engenharia de sistemas

De acordo com a ECSS-E-ST-10C (ECSS, 2009a), a Engenharia de Sistemas é uma abordagem interdisciplinar que gerencia o esforço técnico total para transformar os requisitos em uma solução de sistema.

O Conselho Internacional de Engenharia de Sistemas (*International Council on Systems Engineering*) - (INCOSE, 2010a) define Engenharia de Sistemas como uma abordagem interdisciplinar e um meio para permitir a realização de sistemas de sucesso. Ela se concentra na definição das necessidades dos clientes e nas funcionalidades exigidas no início do ciclo de desenvolvimento, documentando requisitos; e, em seguida, realiza a síntese do projeto, exigida no fim do ciclo de desenvolvimento, e a validação do sistema considerando o problema completo. A Engenharia de Sistemas integra todas as disciplinas e grupos especializados em um esforço da equipe, formando um processo de desenvolvimento estruturado que procede do conceito à produção e à operação. A Engenharia de Sistemas considera tanto o negócio como as necessidades técnicas de todos os clientes com o objetivo de fornecer um produto que atenda às necessidades do usuário.

A definição de Engenharia de Sistemas referida por Blanchard (2016) é: a aplicação de esforços de engenharia para: 1) transformar uma necessidade operacional em parâmetros de desempenho do sistema e uma configuração do sistema por meio do uso de um processo iterativo de análise, projeto, síntese, teste e validação; 2) integrar os parâmetros técnicos relacionados e garantir a compatibilidade de todas as interfaces físicas, funcionais e de programa, de maneira que otimize a definição e o projeto; e 3) integrar Confiabilidade, Manutenibilidade, Usabilidade (fatores humanos), Segurança, Produtibilidade, Suportabilidade, Descartabilidade e outros fatores em um esforço de

engenharia para atender aos objetivos de custo, cronograma e desempenho técnico.

Para o propósito deste trabalho, a definição de Blanchard é parcialmente usada porque se concentra na aplicação dos esforços de engenharia em integrar Requisitos de Suportabilidade (Manutenabilidade, Confiabilidade, Disponibilidade, Segurança, Logística, etc..) para atender aos custos, cronograma e desempenho técnico, e é aplicada em um contexto aeroespacial.

2.2 Suportabilidade

A literatura sobre Suportabilidade é recente, escassa, e situacional, a saber:

Segundo Dallosta (2012a), Suportabilidade é uma medida do grau em que um sistema pode ser suportado em termos de suas características inerentes de Manutenabilidade e Confiabilidade e a eficácia dos vários elementos de suporte ao produto, para incluir peças de reposição, ferramentas, treinamento, e infraestrutura necessários para operá-lo e mantê-lo.

Segundo o guia de Aquisição do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (DOD) (2010), Suportabilidade refere-se às características inerentes ao sistema e que permitem a manutenção eficiente durante todo o ciclo de vida do sistema. É a capacidade do projeto do sistema apoiar as operações e ter prontidão para as necessidades durante toda a sua vida útil, a um custo acessível.

Segundo o DOD (2010), ao abordar a Suportabilidade como parte do projeto do sistema, o Gerente do Programa, por meio do Engenheiro de Sistemas e do Gerente de Suporte ao Produto, garante que o sistema atinja a capacidade operacional com os elementos necessários do sistema. Os benefícios para o programa são: economia de custos, criação de uma infraestrutura logística mais acessível, melhoria de material e Disponibilidade operacional.

Segundo Blanchard (2016), a Suportabilidade refere-se às características inerentes ao projeto que permitem o efetivo e eficaz suporte do sistema ao longo do seu ciclo de vida. Está intimamente relacionada à Manutenabilidade e à Confiabilidade, pois projetar boa Suportabilidade requer a incorporação de

características de Manutenibilidade e Confiabilidade no projeto (ou seja, acessibilidade, bons diagnósticos, intercambialidade, modularização, rotulagem, etc.).

De acordo com Owens e Weck (2017), Suportabilidade é uma métrica que descreve a facilidade com que um determinado sistema pode ser suportado em função de um amplo conjunto de características do sistema que direcionam a quantidade de logística e recursos requeridos para propiciar operações seguras e eficazes. Os recursos de logística e suporte incluem recursos físicos, como peças de reposição e consumíveis, além de recursos como equipe de manutenção (homem/hora). Ainda segundo apresentado por Owens e Weck (2017), algumas demandas de recursos são determinísticas, como aquelas relacionadas à manutenção de itens que são substituídos em uma manutenção programada ou consumíveis usados a uma taxa conhecida. Outras demandas, particularmente aquelas relacionadas a peças de reposição necessárias para reparar falhas aleatórias, são estocásticas. Como resultado, a Suportabilidade é uma análise entre risco e recursos. Ela define a quantidade mínima de recursos que deve ser alocada para atingir a mitigação de risco desejado em um determinado contexto operacional. Isso envolve análises de Manutenibilidade, Confiabilidade, Falhas, Logística, etc.

Owens e Weck (2017) também descrevem em seus trabalhos que o principal desafio do gerenciamento da Suportabilidade do sistema é equilibrar a logística, o tempo da equipe e o risco, a fim de alcançar os objetivos da missão de maneira segura e econômica.

Segundo Souza (2021), desde a sua criação, os sistemas aeroespaciais fim (por ex.: satélites, aviões, etc.) e meio (por ex.: controle de tráfego aéreo, centros de controle e missão de satélites, etc..) tornaram-se cada vez mais 1) complexos e/ou altamente integrados, 2) úteis e benéficos, com tais bônus cobrando os ônus de maiores, 3) prazos e custos de amortização, 4) repertórios e criticidades de falhas. Para tratar tais compromissos e auxiliar as tomadas de decisão ao longo dos ciclos de vida dos sistemas, criaram-se conceitos, definições e métricas escalares como Manutenibilidade, Confiabilidade, Disponibilidade,

etc., e seus processos, práticas, etc.. Aquelas conceituam, definem e mensuram (por probabilidades) características e atributos técnicos (operação, reparo, prontidão, etc.) dos sistemas fim vistos externamente (por seus usuários, clientes, *et alli.*). Mas ignoram características e atributos gerenciais e outros (custos, amortizações, rentabilidade, dificuldades, riscos, obsolescência, indisponibilidade, embargos, etc.) dos sistemas meio e fim vistos internamente (por seus mantenedores, investidores, *et alli.*), e relevantes para os compromissos e tomadas de decisão nas situações ou sistemas sob aplicação. Por isto, atualmente, aquelas estão sendo reunidas, priorizadas e generalizadas nos conceitos, definições e métricas vetoriais de Dependabilidade (ênfatisando a Confiabilidade, o tratamento das falhas e suas criticalidades, a operação correta e “dependável” dos sistemas fim, seus impactos externos, etc.) e de Suportabilidade (ênfatisando a Manutenibilidade, o tratamento dos ativos e suas amortizações, a operação rentável e “suportável” dos sistemas meio e fim, seus impactos internos, etc.), e seus processos, práticas, etc.

Para fins deste trabalho, e segundo Souza (2021), Suportabilidade é: um conceito, uma definição e uma métrica vetorial composta por outros conceitos, definições e métricas escalares (técnicas, gerenciais, e outras) de características e atributos típicos e essenciais da situação ou sistema sob aplicação, priorizadas e relevantes para os seus compromissos e tomadas de decisão.

Dependendo do autor e da situação ou aplicação, o vetor de conceitos, definições e métricas que representa a Suportabilidade pode ser composto por estes outros conceitos, definições e métricas:

- 1) Manutenibilidade;
- 2) Confiabilidade;
- 3) Disponibilidade;
- 4) Custo;
- 5) Suporte Logístico;

6) Suprimentos.

Na Tabela 2.1 abaixo é apresentado um comparativo do conceito de Suportabilidade de diversos autores e normas internacionais e o que será abordado neste trabalho.

Tabela 2.1 - Quadro comparativo do conceito de Suportabilidade e autores mencionados.

Conceito de Suportabilidade (Autores)	Manutenabilidade	Confiabilidade	Disponibilidade	Inerente ao projeto	Manutenção e operação do sistema	Ciclo de vida	Logística	Custo	Recursos	Risco	Homem-hora
Dallosta (2012)	x	x		x	x	x	x	x	x		
Blanchard (2016)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Guia de Aquisição e Logística de Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DOD) (2010)			x	x	x	x	x	x	x	x	
Owens and Weck (2017)					x		x	x	x	x	x
Souza (2021)	x	x	x								
Neste Trabalho	x	x	x								

Para fins deste trabalho, a Suportabilidade será composta da Manutenabilidade, Confiabilidade e Disponibilidade (usualmente referidas em Inglês como *Reliability, Availability, Maintainability* - RAM).

2.2.1 Manutenibilidade

Segundo a norma ABNT NBR 5462 (1994), Manutenibilidade é a probabilidade de **uma dada ação de manutenção efetiva**, para um item sob dadas condições de uso, **poder ser efetuada** dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é executada sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos.

Conforme a NASA (2007), Manutenibilidade é a medida da capacidade de **um item ser restaurado às condições especificadas** quando a manutenção é realizada por pessoas com habilidades específicas, usando recursos e procedimentos prescritos, em cada nível de manutenção prescrito. Isto alude a uma métrica (sem definí-la) sobre o conceito.

De acordo com Blanchard (2016), **Manutenibilidade é uma característica de instalação e projeto que representa a facilidade, precisão, segurança e economia no desempenho da manutenção**. Isto enfatiza o conceito sem citar métricas. Deve ser considerada juntamente com a Confiabilidade, Desempenho, Recursos Humanos, Produtividade, Descartabilidade, Custo, dentre outros fatores do projeto de sistemas.

Ainda, de acordo com Blanchard (2016), como um resultado da instalação e do projeto, a Manutenibilidade **pode ser medida em termos de tempo de manutenção**, frequência de manutenção, e custo de manutenção. O conceito e estas métricas podem estar presentes em diferentes formas, a saber:

- Uma característica de instalação e projeto que é medida como a probabilidade do item ser **mantido ou restaurado a uma condição** num dado intervalo de tempo, quando a manutenção é executada de acordo com procedimentos e recursos prescritos. **Esta definição enfatiza o tempo de manutenção e será adotada neste trabalho.**
- Uma característica de instalação e projeto que é medida pela probabilidade de uma manutenção não ser requerida mais do que x vezes num dado intervalo de tempo, quando o sistema é

operado de acordo com os procedimentos prescritos. **Esta definição enfatiza a frequência de manutenção** e, portanto, o mau atendimento da situação/a má qualidade do sistema.

- Uma característica de instalação e projeto que é medida pela probabilidade do custo de manutenção de um sistema não exceder *y dólares* por determinado período, quando o sistema é operado e mantido de acordo com procedimentos prescritos. **Esta definição enfatiza o custo de manutenção.**

Teoricamente, segundo Velasquez (2011), embora estas 3 métricas acima sejam algumas das formas de quantificar a Manutenibilidade, a abordagem baseada no tempo gasto na manutenção é, de longe, a mais utilizada na prática, pela complexidade tecnológica do projeto e a importância de capacitação permanente dos profissionais de manutenção.

Neste trabalho, e de acordo com Souza e Carvalho (2005), Manutenibilidade é a probabilidade de um sistema ser **mantido ou restaurado à condição operacional** em um período de tempo especificado, com procedimentos e recursos prescritos. Isto enfatiza uma métrica (de probabilidade) sobre o conceito.

2.2.1.1 Aspectos qualitativos da Manutenibilidade

Alguns exemplos dos princípios fundamentais da Manutenibilidade, segundo DOD-HDBK-791 (DOD, 1988), e que devem influenciar o desenvolvimento do projeto são:

Padronização:

- assegura a compatibilidade entre componentes.
- minimiza o número de peças sobressalentes em estoque.

Modularização:

- simplifica as tarefas de manutenção através da padronização dos procedimentos de substituição de conjuntos e/ou subconjuntos.

Intercambialidade:

- auxilia a troca de equipamentos em campo, sem a necessidade de retrabalho ou de ajustes.

Acessibilidade:

- facilidade em que um componente ou conjunto é acessado dentro de um sistema para substituição ou reparo no local.

Indicação da Falha:

- fornece uma indicação para o operador que o equipamento não está funcionando adequadamente, nos casos onde a falha não está aparente. É uma forma direta de Detecção (D) de falhas.

Localização da Falha:

- assegura que o mau funcionamento de um equipamento possa ser rastreado para delimitar a falha de um componente que requeira substituição ou reparo no local, mesmo que ferramentas suplementares sejam fornecidas somente para este propósito. Atualmente existem sistemas que podem funcionar internamente ao equipamento para indicar possíveis falhas (*Built-In Test*). É uma forma direta de Isolação (I) Falhas.

Identificação:

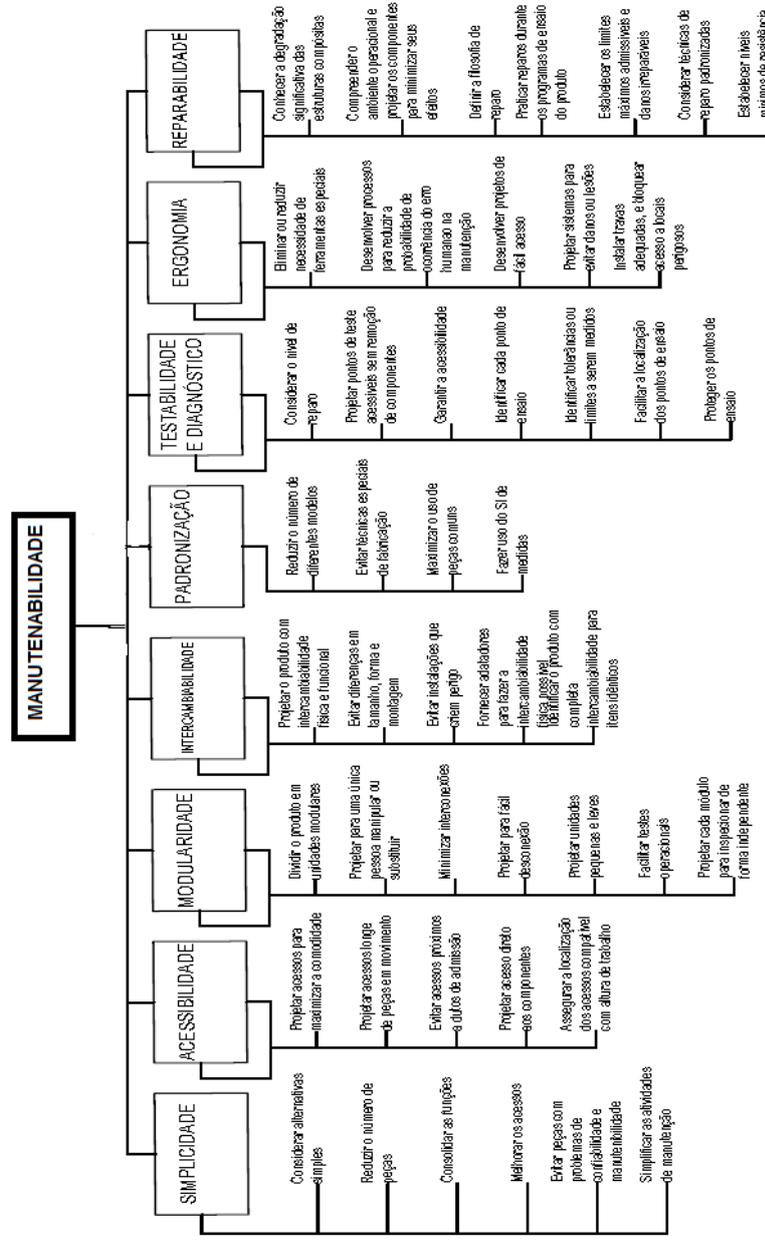
- utilização de número de série, marcas, etiquetas, rótulos, cores, para localizar rapidamente os componentes ou conjuntos sob os quais a manutenção corretiva, preventiva ou preditiva possam ser desempenhadas. É uma forma direta de Identificação (I) de Falhas.

Ergonomia:

- nível de dificuldade ergonômica que o operador encontra para executar a tarefa.

A Figura 2.1 apresenta um resumo dos atributos qualitativos de Manutenibilidade.

Figura 2.1 – Atributos Qualitativos da Manutenibilidade.



Fonte: Adaptado de Velasquez (2011).

2.2.1.2 Medidas quantitativas de Manutenibilidade

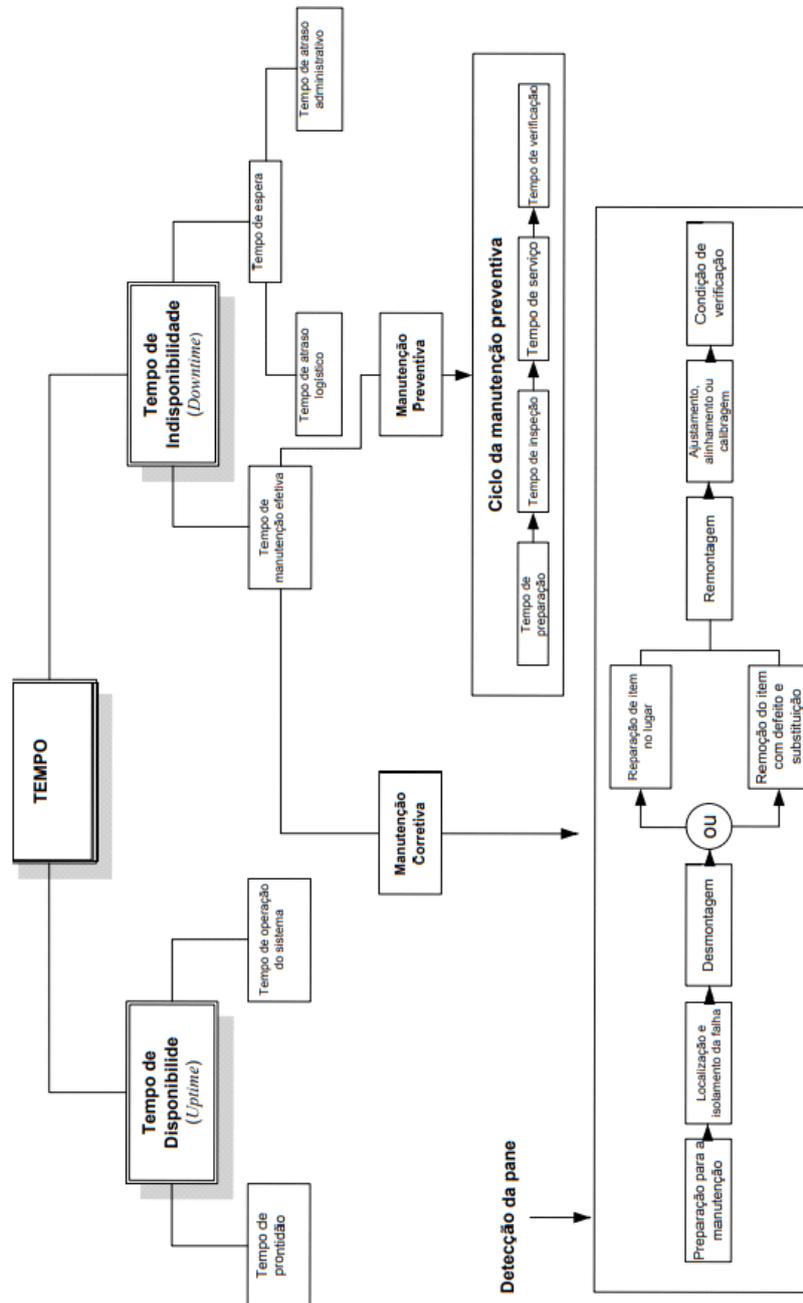
Segundo Blanchard (2004), e detalhando a sua 1ª. métrica, o tempo é uma das medidas geralmente mais utilizadas em Manutenibilidade e pode ser dividido em duas abordagens diferentes: o **Tempo de Disponibilidade (Uptime)** e o

Tempo de Indisponibilidade (*Downtime*) do equipamento. Ou seja, $T_{total} = T_{disponibilidade} + T_{Indisponibilidade}$. Ver a Figura 2.2.

De acordo com Reliasoft (2015), o tempo associado às ações de manutenção (preventivas ou corretivas) é geralmente conhecido como **Tempo de Indisponibilidade (*Downtime*)**, e é definido como o período de tempo que um item não está operacional. Existem várias parcelas e vários fatores que podem afetar o Tempo de Indisponibilidade, como as características físicas do sistema, disponibilidade de peças de reposição, disponibilidade da equipe de reparos, fatores humanos, fatores ambientais, etc.

A Figura 2.2 apresenta um diagrama com as parcelas e os fatores do Tempo de Indisponibilidade. Nela, note-se que $T_{indisponibilidade} = T_{manutenção\ efetiva} + T_{espera}$

Figura 2.2 – Diagrama com os fatores dos tempos de indisponibilidade.



Fonte: Adaptado de Blanchard (2004) e Velasquez (2011).

De acordo com a Figura 2.2 e com Reliasoft (2015), o Tempo de Indisponibilidade (*Downtime*) pode ser dividido em duas categorias, ou seja:

$$T_{\text{indisponibilidade}} = T_{\text{indisponibilidade ativa}} + T_{\text{indisponibilidade de espera}} = T_{\text{manutenção efetiva}} + T_{\text{espera}} = T_{\text{reparo}} + T_{\text{espera}}$$

1) **Tempo de Indisponibilidade (*Downtime*) Ativa ou Tempo de Manutenção Efetiva ou Tempo de Reparo.** Este é o tempo durante o qual o equipamento está inoperante e realmente passando por reparos. Refere-se ao período durante o qual o equipamento passa por manutenção corretiva e/ou preventiva. A duração do tempo de manutenção efetiva depende muito de fatores humanos, bem como do projeto do equipamento. Por exemplo, a facilidade de acessibilidade dos componentes em um sistema tem um efeito direto no tempo de manutenção efetiva. Ou seja, $T_{\text{indisponibilidade ativa}} = T_{\text{manutenção efetiva}} = T_{\text{reparo}} = T_{\text{manutenção preventiva}} + T_{\text{manutenção corretiva}}$ (Figura 2.2).

2) **Tempo de Indisponibilidade (*Downtime*) de Espera ou Tempo de Espera.** Este é o tempo durante o qual o equipamento está inoperante, mas ainda não está passando por reparos. Isso inclui e pode ser devido ao tempo que leva para as peças de reposição serem enviadas ou **Tempo Logístico**, o tempo de processamento administrativo ou **Tempo Administrativo**, etc. Ou seja, $T_{\text{espera}} = T_{\text{logístico}} + T_{\text{administrativo}}$ (Figura 2.2).

Para Reliasoft (2015), essas definições de tempo de Indisponibilidade são subjetivas, pois, por exemplo, pode ser necessário diagnosticar o problema antes de fazer o pedido das peças e, em seguida, esperar que as peças cheguem.

Segundo Smith (2011), existem vários parâmetros disponíveis para descrever a Manutenibilidade de um item. Em qualquer caso particular, é provável que haja um parâmetro mais apropriado que os outros.

Uma outra abordagem para medir a Manutenibilidade é através do **Tempo Médio de Reparo - MTTR (*Mean Time To Repair*)**, que é a medida básica de Manutenibilidade. Segundo a norma MIL-STD-721C (DOD, 1981), o MTTR é a soma dos tempos de **manutenção corretiva** ($T_{\text{manutenção corretiva}}$) em qualquer nível específico de reparo, dividido pelo número total de falhas em um item

reparado naquele nível, durante um intervalo particular sob condições estabelecidas e pode ser expresso da seguinte forma:

$$MTTR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (2.1)$$

onde:

Δt_i = tempo de execução da manutenção corretiva (reparo) = $T_{\text{manutenção corretiva}}$

n = número total de falhas

De acordo com Blanchard (2016), o MTTR, **também chamado de Tempo Médio de Manutenção Corretiva (Mean Corrective Maintenance Time - MCT)**, inclui o tempo necessário para a notificação da falha, o tempo gasto com o deslocamento do técnico de campo, o tempo gasto com o transporte da nova peça até o local de instalação e o tempo gasto no reparo ou troca propriamente dito. É um valor que representa a média aritmética dos tempos individuais de manutenção. Ou seja, $MCT = MTTR$.

De acordo com Blanchard (2004), outra abordagem para se medir a Manutenibilidade é o **MDT (Mean Down Time), ou seja, o Tempo Médio de Indisponibilidade**. O MDT é o tempo total que o sistema não está em condição de executar a sua função, **incluindo os tempos de manutenção ativa=efetiva preventiva e corretiva, tempos de atrasos logísticos e administrativos dividido pelo número total de falhas**. O MDT é, portanto, a média de todos os intervalos de tempo que incluem a realização, acesso, diagnóstico, aquisição de peças sobressalentes e substituição ou reparo. Ou seja: $MDT = T_{\text{indisponibilidade}} / n = (T_{\text{manutenção efetiva}} + T_{\text{espera}}) / n = (T_{\text{manutenção preventiva}} + T_{\text{manutenção corretiva}} + T_{\text{logístico}} + T_{\text{administrativo}}) / n$.

Segundo Firoozmand (2013), o MDT inclui o MTTR e todos os outros tempos que contribuem para a parada do equipamento durante a manutenção, pois:

$$MTTR = T_{\text{manutenção corretiva}} / n$$

Assim, o MTTR mede diretamente a Manutenibilidade e mede indiretamente a Indisponibilidade. Por isto, é o 1º. item da Tabela 2.2. Já o MDT mede diretamente a Indisponibilidade e mede indiretamente a Manutenibilidade. Por

isto, é o 3º. item da Tabela 2.2. **Esta abordagem será utilizada neste trabalho no Capítulo 7.**

A Tabela 2.2 apresenta algumas métricas de Manutenibilidade (citadas ou não acima) frequentemente usadas.

Tabela 2.2 - Algumas Métricas de Manutenibilidade frequentemente usadas.

Medida	Descrição	Referência
Tempo Médio para o Reparo (MTTR)	A soma dos tempos de manutenção corretiva em qualquer nível específico de reparo, dividido pelo número total de falhas em um item reparado naquele nível, durante um intervalo particular sob condições estabelecidas.	MIL-STD-721C (1981)
Tempo Médio de Manutenção Ativa	Média do tempo decorrido necessário para executar manutenção (preventiva e corretiva), excluindo tempos de atrasos logísticos e administrativos.	Blanchard (2004)
Tempo Médio de Inatividade ou de Espera (MDT - <i>Mean Down time</i>)	Média do tempo que um sistema não está operacional devido ao reparo ou manutenção preventiva. Inclui atrasos logísticos e administrativos.	Blanchard (2004)
Tempo Médio de Manutenção Preventiva	Média aritmética dos tempos de manutenção preventiva individual do sistema (inspeção, substituição, etc.)	Blanchard (2004)
Tempo Médio de Manutenção Corretiva (Mct - <i>Mean Corrective Maintenance Time</i>)	Equivalente ao MTTR	Blanchard (2004)
Custo por homem/hora	Custo de Manutenção por hora de operação do sistema	Blanchard (2004)
Custo por ação de manutenção	Custo de Manutenção por ação de manutenção	Blanchard (2004)

Segundo Reliasoft (2015), outra abordagem para a Manutenibilidade $M(t)$ é modelar o tempo de reparo $t = t_0 = \Delta t_r$ como uma variável aleatória, da mesma maneira que o tempo até a falha $t = t_0 = \Delta t_f$ é modelado como uma variável aleatória na Confiabilidade $R(t)$. Isto permite estender as mesmas distribuições de $R(t)$ a $M(t)$ **se houver dados suficientes de reparos da amostra ou população**. As distribuições de probabilidade que usualmente descrevem a função Manutenibilidade são a normal, a lognormal e a exponencial. Como exemplo, a equação de Manutenibilidade $M(t)$ para um sistema no qual os tempos de reparo são distribuídos exponencialmente é dada por:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (2.2)$$

onde μ é a taxa de reparo.

A média da distribuição pode ser obtida por:

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (2.3)$$

2.2.1.3 Manutenibilidade x manutenção

De acordo com a British Standard BS 4778 (1991), a Manutenção pode ser definida como a combinação de todas as ações técnicas administrativas, incluindo ações de supervisão, destinadas a substituir um componente ou restaurá-lo a um estado em que possa executar a sua função necessária.

Segundo Firoozmand (2013), a Manutenibilidade é uma característica do projeto, enquanto a Manutenção é uma consequência do projeto, que se traduz em uma série de ações a serem tomadas para restaurar ou manter um item operacional.

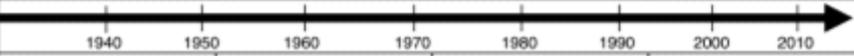
De forma geral, a Manutenção possui os seguintes objetivos:

- Reduzir as consequências da falha;
- Prolongar a vida útil do sistema, mantendo-o em condições adequadas por mais tempo;
- Certificar que o sistema é adequado e seguro para uso;
- Certificar que a condição do sistema atenda a todos os requisitos;
- Manter a Confiabilidade e alto nível de segurança;
- Manter a Disponibilidade do sistema.

Segundo Kardec e Nascif (2009), nos últimos anos, a atividade de manutenção passou por diversas mudanças. Essas mudanças são consequências dos projetos mais complexos, novas técnicas de manutenção, importância da manutenção como função estratégica para melhoria dos resultados do negócio, diversidades dos itens físicos, etc.

A evolução da Manutenção pode ser apresentada resumidamente conforme a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Evolução da Manutenção.

Evolução da Manutenção				
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
Ano				
Aumento das expectativas em relação à Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Conserto após a falha 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade crescente • Maior vida útil do equipamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Melhor relação custo-benefício • Preservação do meio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Preservação do meio ambiente • Segurança • Influir nos resultados do negócio
Visão quanto à falha do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se desgastam com a idade, e por isso falham 	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira 	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de padrões de falhas 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir drasticamente falhas prematuras
Mudança nas técnicas de Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidades voltadas para o reparo 	<ul style="list-style-type: none"> • Planejamento manual da manutenção • Computadores grandes e lentos • Manutenção Preventiva (por tempo) 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento da Condição • Manutenção Preditiva • Análise de risco • Computadores pequenos e rápidos • Softwares potentes • Grupos de trabalhos multidisciplinares • Projetos voltados para a confiabilidade • Contratação por mão de obra e serviços 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da Manutenção Preditiva e Monitoramento da Condição • Minimização nas Manutenções Preventiva e Corretiva não Planejada • Análise de Falhas • Técnicas de confiabilidade • Manutenibilidade • Engenharia da Manutenção • Projetos voltados para a confiabilidade, manutenibilidade e Custo do Ciclo de Vida • Contratação por resultados

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009).

2.2.1.4 Manutenção preventiva, manutenção corretiva e manutenção preditiva

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), há 3 tipos de manutenção que são basicamente: manutenção preventiva, manutenção corretiva e manutenção preditiva. Estas correspondem à 1ª. (prevenção), 3ª. (correção; ou 2ª. cf. alguns autores), e 4ª. (predição), abordagens para tratar falhas. A 2ª. (tolerância; ou 3ª., cf. alguns autores), usa redundância (física/real ou analítica/virtual) de um

componente para manter um sistema operando. A redundância é a existência, em um item, de mais de um meio de desempenhar uma função requerida. As 4 abordagens são usadas para tratar falhas em sistemas.

Segundo a norma ABNT NBR 5462 (1994), a **manutenção preventiva** é a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.

Na técnica da Manutenção Baseada na Confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance* - RCM), o programa de manutenção é elaborado no nível do modo de falhas; e é essencial a compreensão do tipo de manutenção mais adequado a cada tipo de comportamento da taxa de falhas. A Análise dos Modos de Falha e Criticidade (*Failure Modes, Effects and Critically Analysis* - FMECA), é a principal atividade da Manutenção Baseada na Confiabilidade, e permite identificar as tarefas de manutenção preventiva mais adequada ao sistema.

De acordo com Lafraia (2001), após a conclusão da FMECA, é possível estabelecer um Plano de Manutenção preventiva em função do efeito da falha e estabelecer tarefas aplicáveis e custo-eficientes em: detectar, monitorar, testar, restaurar, substituir e inspecionar o sistema.

Ainda, de acordo com Lafraia (2001), as tarefas da manutenção preventiva são divididas em:

- substituição, restauração ou inspeção, baseadas no tempo e destinadas à prevenção ou postergação da falha.
- teste para descobrir a falha ou revelar falhas ocultas/dormentes.

A **manutenção corretiva**, segundo a norma ABNT NBR 5462 (1994), é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.

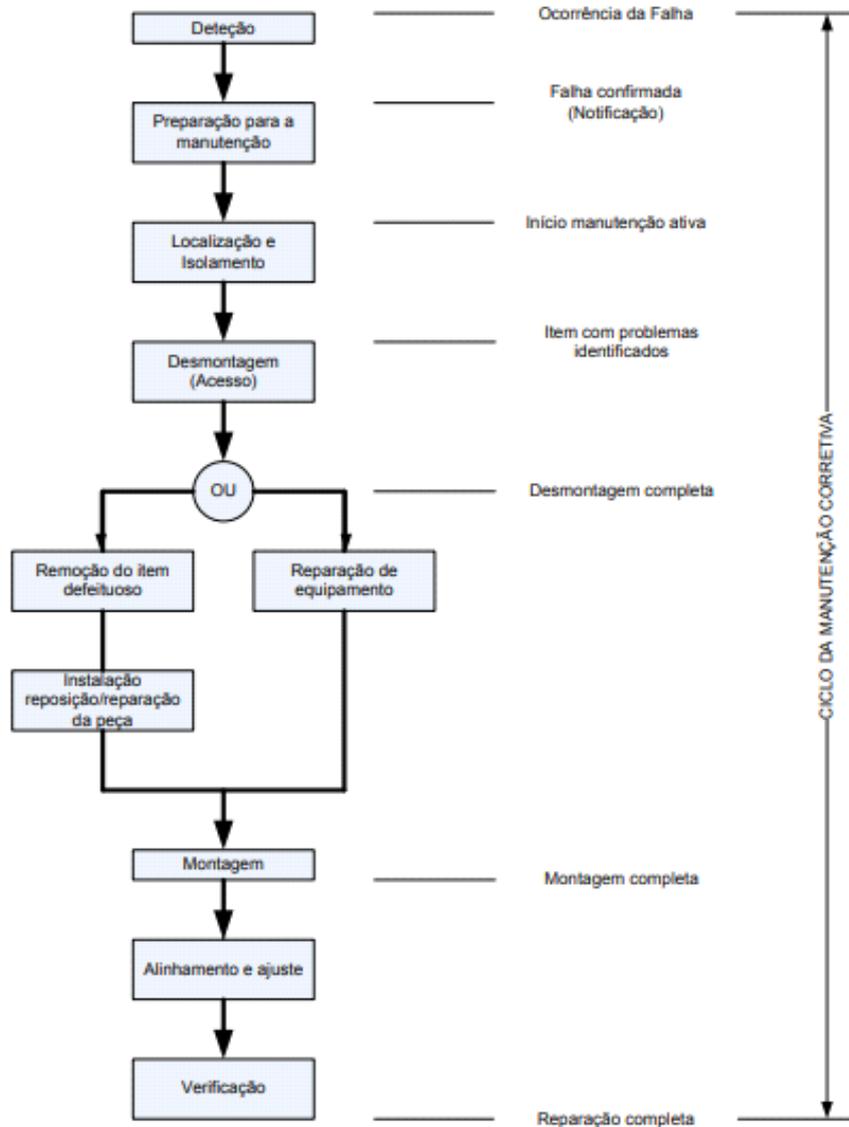
Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção corretiva ou não planejada é também chamada de manutenção emergencial. Caracteriza-se pela atuação da manutenção em fato já ocorrido, seja este uma falha ou um desempenho

menor do que o esperado. Normalmente, a manutenção corretiva não planejada implica altos custos pois a quebra inesperada pode acarretar perdas de produção, perda da qualidade do produto e elevados custos indiretos de manutenção. Ainda, segundo Kardec e Nascif (2009), um trabalho planejado é sempre mais barato, mais rápido e mais seguro do que um trabalho não planejado.

A Figura 2.3 ilustra o ciclo de manutenção corretiva, envolvendo um passo a passo geral com:

1. detecção da falha;
2. isolamento da falha;
3. desmontagem para ganhar acesso;
4. reparo e reposição;
5. montagem e;
6. verificação.

Figura 2.3 – Ciclo da Manutenção Corretiva.



Fonte: Adaptado de Blachard (2004).

Segundo Velasquez (2011), embora o ciclo de tarefas de manutenção corretiva seja um elemento na Manutenibilidade, sabe-se que a manutenção não é executada de forma isolada. Além das características físicas de projeto, o pessoal e as considerações dos fatores humanos envolvido nas atividades de manutenção são de primordial importância. Essas considerações incluem a experiência do técnico, formação exigida, nível de qualificação, supervisão necessária, técnicas utilizadas, bem como do número de técnicos e requisitos da equipe de trabalho.

Manutenção preditiva, segundo a norma ABNT NBR 5462 (1994), é a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

A manutenção preditiva, que pode utilizar sensoriamento remoto, análise de vibrações, termografia e outras técnicas, quando viável, deve ser escolhida, pois ela permite que reparos e substituições de peças sejam feitos aproximadamente quando necessários, antes da falha ocorrer.

Segundo Velasquez (2011), as condições básicas para se adotar a manutenção preditiva são as seguintes:

- o produto deve permitir algum tipo de monitoramento e medição;
- o produto deve merecer este tipo de ação devido aos custos envolvidos;
- as falhas devem ser oriundas de causas que possam ser monitoradas e deve ter sua progressão acompanhada.

2.2.2 Confiabilidade

Blanchard (2016), em seu trabalho apresenta a seguinte definição: Confiabilidade é a probabilidade de um sistema ou produto **realizar sua missão requerida de maneira satisfatória**, em um dado intervalo de tempo, quando utilizado sob condições operacionais específicas.

A Confiabilidade é uma métrica que reflete a probabilidade de determinado sistema ser **capaz de operar adequadamente quando solicitado** dentro de um intervalo de tempo e condições especificadas. Esta definição será adotada neste trabalho.

A Confiabilidade é uma grandeza mensurável a partir da análise estatística da ocorrência de uma falha. Uma medida de Confiabilidade é o Tempo Médio até a Falha (MTTF - *Mean Time to Failure*), ou Tempo Médio Entre Falhas (MTBF - *Mean Time Between Failures*). Essas medidas são as médias das distribuições

de probabilidade que se ajustam aos dados de falha, caso tais modelos sejam utilizados.

De acordo com a MIL-STD-785B (1980), os dados de Confiabilidade medidos devem atender às necessidades da gestão, além de ser uma base para determinar a conformidade com os requisitos quantitativos de Confiabilidade. As análises de Confiabilidade são insumos essenciais para operações e planejamento de suporte, decisões de peças de reposição e estimativas de custos do ciclo de vida.

2.2.2.1 Distribuições de confiabilidade

Há vários modelos estatísticos que podem ser utilizados para modelar matematicamente o comportamento de uma função de probabilidade. Em geral, a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória contínua pode ser representada por sua pdf (*probability density function*). As distribuições mais utilizadas para a representação da probabilidade de falhas de um componente são: Weibull, Lognormal, Normal, Gamma, Exponencial.

A função densidade de probabilidade de falhas (pdf), denotada por $f(t)$, permite determinar as probabilidades de falhas ao longo de um período de tempo.

De acordo com Souza (2005), a forma mais comum da pdf (*probability density function*) usada para representar as estatísticas de tempos de falha num dado intervalo de tempo é a distribuição de Weibull. Ela é amplamente utilizada em virtude de sua simplicidade e flexibilidade em acomodar diferentes formas de taxas de falhas. A função densidade de probabilidade de dois parâmetros de Weibull usada na modelagem de falhas é:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.4)$$

onde η é o parâmetro de escala; β é o parâmetro de forma (ou inclinação), ambos positivos.

Para esta função, a Confiabilidade $R(t)$ é dada por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.5)$$

E a Taxa de Falhas $\lambda(t)$ é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.6)$$

A função Taxa de Falhas ou de Risco, denotada por $\lambda(t)$, é a probabilidade da falha ocorrer em um intervalo de tempo $[t_1, t_2]$, dado que não ocorreu até t_1 . A função taxa de risco pode assumir uma forma (curva) de risco crescente, constante ou decrescente, variando de acordo com o fator de forma β .

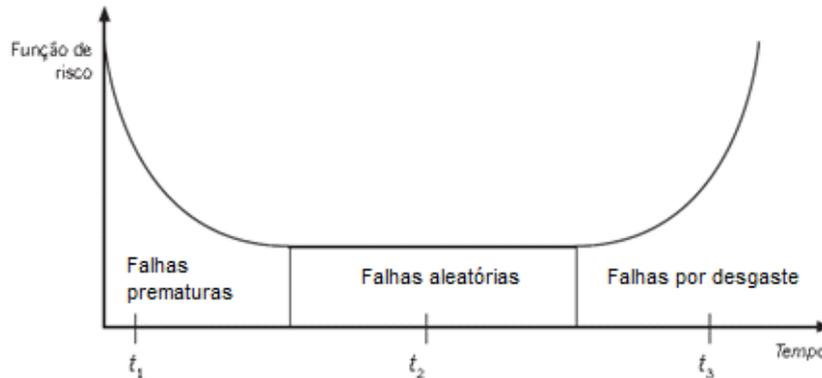
A função Confiabilidade $R(t)$, também denominada de função Sobrevivência, é uma das principais funções probabilísticas usadas para descrever estudos de sobrevivência e é definida como a probabilidade de um item não falhar até um certo tempo t .

2.2.2.2 Curva de taxa de falhas ou "Curva da Banheira"

A "Curva da Banheira" representa o comportamento da taxa de falhas de um equipamento ou sistema ao longo do ciclo de vida, classificando-o em três períodos: falhas prematuras ($\beta < 1$), falhas aleatórias ($\beta = 1$), falhas por desgaste ($\beta > 1$). A Figura 2.4 apresenta uma "Curva da Banheira" típica.

A Análise da Confiabilidade requer um bom entendimento do comportamento da taxa de falhas do produto. A Figura 2.4 apresenta a curva da taxa de falhas ou "Curva da Banheira".

Figura 2.4 – Curva da Taxa de Falhas ou "Curva da Banheira".



Fonte: Adaptado de Lafraia (2001).

Conforme apresentado por Lafraia (2001), no período de falhas prematuras, a taxa de falhas é decrescente. Essas falhas podem ter suas origens no processo de fabricação, controle de qualidade deficientes, mão-de-obra desqualificada, materiais fora de especificação, falhas devidas a transporte/estocagem indevidas, instalações impróprias, etc. Já o período de vida útil é caracterizado por taxa de falhas aproximadamente constante. Nele, geralmente as falhas são de natureza aleatória, pouco podendo ser feito para evitá-las. Alguns exemplos de falhas neste período são: fator de segurança insuficiente, cargas aleatórias maiores do que o esperado, resistência menor que a esperada, falhas não detectáveis pelo melhor programa de manutenção preventiva, fenômenos naturais imprevisíveis, etc. No período de desgaste, inicia-se o término da vida útil do componente e a taxa de falhas cresce continuamente. São causas do período de desgaste: envelhecimento, descarga/abrasão, degradação da resistência, fadiga, corrosão, deterioração mecânica, elétrica, química e hidráulica, manutenção insuficiente ou deficiente, vida do projeto muito curta, etc.

Um resumo das características das etapas da "Curva da Banheira" é apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Um resumo das características das etapas da "Curva da Banheira".

Falhas prematuras	Falhas aleatórias	Falhas por desgaste
Processos de fabricação deficientes	Interferência indevida tensão/resistência	Envelhecimento
Controle de qualidade deficiente	Fator de segurança	Desgaste/abrasão
Mão-de-obra desqualificada	Cargas aleatórias maiores que as esperadas	Degradação de resistência
Pré-teste insuficiente	Resistência menos que a esperada	Fadiga
Materiais fora de especificação	Defeitos abaixo do limite de sensibilidade dos ensaios	Corrosão
Componentes não testados	Erros humanos durante o uso	Deterioração mecânica, elétrica, química ou
Componentes que falharam devido a estocagem e transporte indevido	Aplicação indevida	Manutenção insuficiente
Erro humano	Falhas não detectáveis pelo programa de manutenção preventiva	Vida de projeto muito curta
Instalação imprópria	Fenômenos naturais imprevisíveis	

Fonte: Adaptado de Lafraia (2001).

2.2.3 Disponibilidade

Segundo a norma ABNT NBR 5462 (1994), Disponibilidade é a capacidade de um item **estar em condições de executar uma certa função** em um dado instante (Instantânea, $A(t)$) ou durante um intervalo de tempo (Média, $A(t_1;t_2)$), levando-se em conta os aspectos combinados de sua Confiabilidade, Manutenibilidade e Suporte de Manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. Isto é durante a Operação. A Disponibilidade durante o Desenvolvimento não será tratada aqui.

Reliasoft (2015) descreve a Disponibilidade (Operacional) como um requisito de desempenho de componentes reparáveis, que é suportada tanto pelas propriedades de Confiabilidade, como pelas de Manutenibilidade. É definida como **a probabilidade do componente operar corretamente quando**

solicitado ao uso. Isto enfatiza uma métrica (a probabilidade na amostra/população) sobre o conceito.

A Tabela 2.5 apresenta a relação entre a Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade.

Tabela 2.5 - Relação entre Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade.

Confiabilidade	Manutenabilidade	Disponibilidade
↔ Constante	↓ Diminui	↓ Diminui
↔ Constante	↑ Aumenta	↑ Aumenta
↑ Aumenta	↔ Constante	↑ Aumenta
↓ Diminui	↔ Constante	↓ Diminui

Fonte: Adaptado de Reliasoft (2015).

Ainda, segundo Reliasoft (2015), a definição de Disponibilidade é algo flexível e é amplamente baseada nos tipos de tempos de inatividade que se escolhe considerar na análise. Como resultado, há várias classificações diferentes de Disponibilidade, como:

- Disponibilidade Instantânea $A(t)$: é a probabilidade na amostra/população num instante t ;
- Disponibilidade Média $A_m(t_1;t_2)$: é a média de $A(t)$ num intervalo $[t_1; t_2]$;
- Disponibilidade em Estado Estacionário A_{ss} : é o limite de $A_i(t)$, se $t \rightarrow \infty$
- Disponibilidade Inerente A_i : é $A_m(t_1;t_2)$ só com os *downtimes* corretivos;
- Disponibilidade Atingida A_a : é $A_m(t_1;t_2)$ só com os *downtimes* preventivos e corretivos;
- Disponibilidade Operacional A_o : é $A_m(t_1;t_2)$ com todos os *downtimes*.

Assim, a Disponibilidade Média num intervalo [t1;t2] $A_m(t1;t2)$: é a média de $A(t)$ num intervalo [t1; t2]. É uma métrica que pode ser aproximada em função do Uptime e do Downtime totais naquele intervalo por:

$$A(t) = \frac{Uptime}{Uptime + Downtime} \quad (2.7)$$

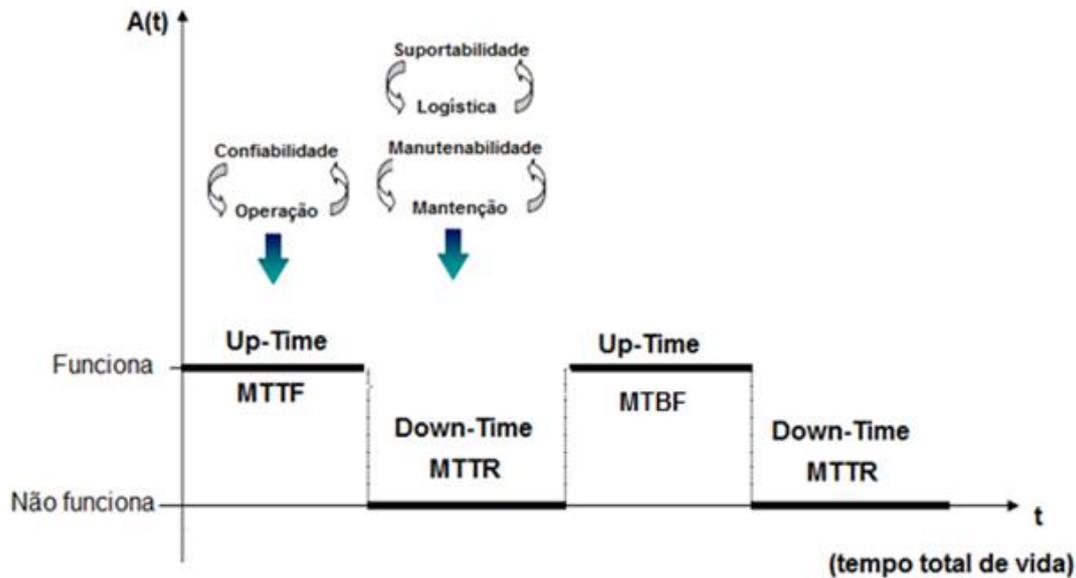
Calculando as médias de tais tempos na amostra/população de itens; ou aproximando-as dividindo-os pelo número de falhas naquele intervalo [t1;t2], ela também pode ser calculada em função do Tempo Médio até a Falha (*Mean Time To Failure* - MTTF) para sistemas não reparáveis, ou do Tempo Médio entre Falhas (*Mean Time Between Failures* - MTBF) para sistemas reparáveis, e do Tempo Médio para Reparo (*Mean Time To Repair* - MTTR), por:

$$A_I = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (2.8)$$

onde MTTF é o Tempo Médio até a Falha, MTBF é o Tempo Médio entre Falhas, e MTTR é o Tempo Médio de Reparo (com todos os *downtimes*).

A Figura 2.5 apresenta uma representação gráfica da Disponibilidade.

Figura 2.5 – Representação Gráfica da Disponibilidade.



Fonte: Adaptado de *Designing and Assessing Supportability In DOD Weapon Systems* (2003) e *Reliasoft* (2015).

A Tabela 2.5 se refere à Disponibilidade Operacional; porém, neste trabalho serão enfatizadas a Disponibilidade Inerente e a Disponibilidade Operacional pois são as mais utilizadas nos equipamentos em fase de operação, com base em eventos reais que aconteceram com o sistema.

2.2.3.1 Disponibilidade inerente e disponibilidade atingida

Segundo Reliasoft (2015), a Disponibilidade Inerente (A_i) é a disponibilidade quando se considera **apenas o tempo de inatividade (downtime) do equipamento por paradas para manutenção corretiva**. A Disponibilidade Inerente não leva em consideração a manutenção programada, nem os tempos de atrasos logísticos e administrativos. Ou seja, a A_i depende somente das características de projeto do equipamento. A manutenção preventiva não é considerada nessa definição. Matematicamente, ela é expressa por:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.9)$$

onde MTBF é o Tempo Médio entre Falhas e MTTR é o Tempo Médio para Reparo (só com os *downtimes* corretivos).

Já segundo Reliasoft (2015), a Disponibilidade Atingida é similar à Disponibilidade Inerente mas só com os *downtimes* preventivos e corretivos no MTTR.

2.2.3.2 Disponibilidade operacional

Segundo Reliasoft (2015), a Disponibilidade Operacional é uma medida da disponibilidade média ao longo de um intervalo de tempo $[t_1;t_2]$ e **inclui todas as fontes de tempo de inatividade, como o tempo de atrasos administrativos, tempo de atrasos logísticos, etc.** Ela é dada por:

$$A_o = \frac{Uptime}{Operating\ Cycle}$$

De acordo com Blanchard (2004), a Disponibilidade Operacional **é a disponibilidade que o cliente realmente experimenta**. Isto é, essencialmente com base em eventos reais que aconteceram com o sistema. Em muitos casos, a Disponibilidade Operacional não pode ser controlada pelo fabricante devido à variação de localização, recursos e outros fatores que são de competência exclusiva do usuário final do produto.

A Disponibilidade Operacional é expressa por:

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (2.10)$$

nde MTBM = *Mean Time Between Maintenance*, que é o Tempo Médio Entre Manutenções, e MDT = *Mean DownTime*, é o Tempo Médio de Inatividade.

O MTBM, segundo a norma MIL-STD-721C, é uma medida da Confiabilidade que leva em consideração a política de manutenção. O MTBM é o tempo médio entre as tarefas de manutenção (preventiva e corretiva) para uma determinada unidade, e é expresso por:

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_u} + \frac{1}{MTBM_s}} \quad (2.11)$$

, onde $MTBM_u$ = *Mean Time Between Unscheduled Maintenance*, Tempo Médio entre Manutenções Não Planejadas, e $MTBM_s$ = *Mean Time Between Scheduled Maintenance*, é o Tempo Médio entre Manutenções Planejadas.

O MDT é uma medida de Manutenibilidade e é expresso por:

$$MDT = M + LDT + ADT \quad (2.12)$$

, onde M é o Tempo Médio de Manutenção Ativa (*Mean Active Maintenance Time*), o LDT é o Tempo de Atraso Logístico (*Logistic Delay Time*), e o ADT é o Tempo de Atraso Administrativo (*Administrative Delay Time*).

O MTBM leva em consideração tanto manutenção preventiva como corretiva, enquanto o MTBF considera somente o tempo entre as falhas. O MDT inclui o MTTR e todos os outros tempos que contribuem para a parada do equipamento durante a manutenção (FIROOZMAND, 2013). O MDT **será utilizado neste trabalho no Capítulo 7.**

2.3 Dependabilidade

Dependabilidade, conforme definido no Glossário da ECSS-P-001B (2004), é um termo coletivo usado para descrever o desempenho da Disponibilidade e sua dependência dos fatores: desempenho de Confiabilidade, desempenho de Manutenibilidade e desempenho do Suporte à Manutenção. A Dependabilidade é um termo usado apenas para descrições gerais em termos não quantitativos.

Rabello (2016) em seu trabalho descreve a Dependabilidade como sendo uma métrica vetorial composta por outras métricas escalares de atributos que forem

importantes para a tomada de decisão em questão. Os atributos da Dependabilidade mencionados por Rabello (2016) e que compõem a Dependabilidade são, nesta ordem: 1) Confiabilidade; 2) Manutenibilidade; 3) Disponibilidade.

2.4 Análise da Suportabilidade

Em seu trabalho, Dallosta (2012a) define a Análise de Suportabilidade como sendo um processo usado para determinar as necessidades de suporte do sistema. Segundo ele, a Análise de Suportabilidade utiliza a Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, Requisitos Operacionais, e Suporte Integrado ao Produto como insumos e desenvolve um plano de manutenção para identificar os recursos e fornecer suporte ao ciclo de vida do produto. A Análise de Suportabilidade é realizada para garantir que a Suportabilidade seja incluída como um requisito de desempenho do sistema e que o sistema seja simultaneamente projetado, desenvolvido e operado com a infraestrutura ideal para o suporte.

A Análise de Suportabilidade é um método que auxilia a tomada de decisões para a redução do custo de manutenção e o aumento da Disponibilidade, influenciando o projeto do sistema. Os métodos utilizados podem aumentar a Disponibilidade prevista e reduzir custos, acompanhando as alterações no projeto e definindo os requisitos de suporte. Mesmo que a análise seja freqüentemente usada nas fases iniciais de desenvolvimento, ela também pode ser útil para sistemas em operação; por exemplo, se a manutenção é considerada demorada ou se o sistema não atende mais aos requisitos de Disponibilidade.

A Análise da Suportabilidade é usada para:

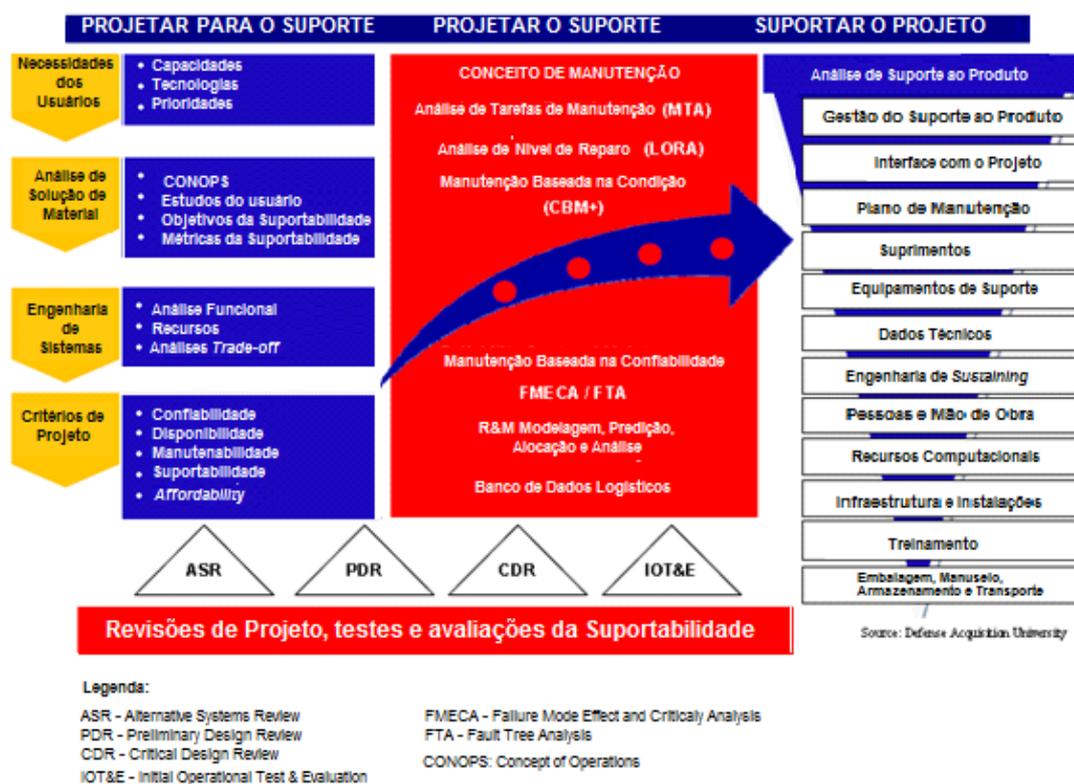
- Otimizar o suporte para ao sistema;
- Identificar e reduzir os elementos geradores de custos, influenciando o projeto;
- Identificar e reduzir parâmetros que afetam a Disponibilidade;

- Aumentar a compreensão dos custos de manutenção;
- Aumentar a Disponibilidade;
- Reduzir demandas logísticas.

A Figura 2.6 ilustra as atividades da Análise da Suportabilidade, que é descrita em termos de três processos distintos:

- Projetar (o Sistema) para o Suporte;
- Projetar o Suporte (para o Sistema);
- Suportar o (Sistema) Projetado.

Figura 2.6 – Atividades da Análise de Suportabilidade no Ciclo de Vida de um Sistema.



Fonte: Adaptado de Dallosta e Simcik (2012b).

2.4.1 Projetar (o sistema) para o suporte

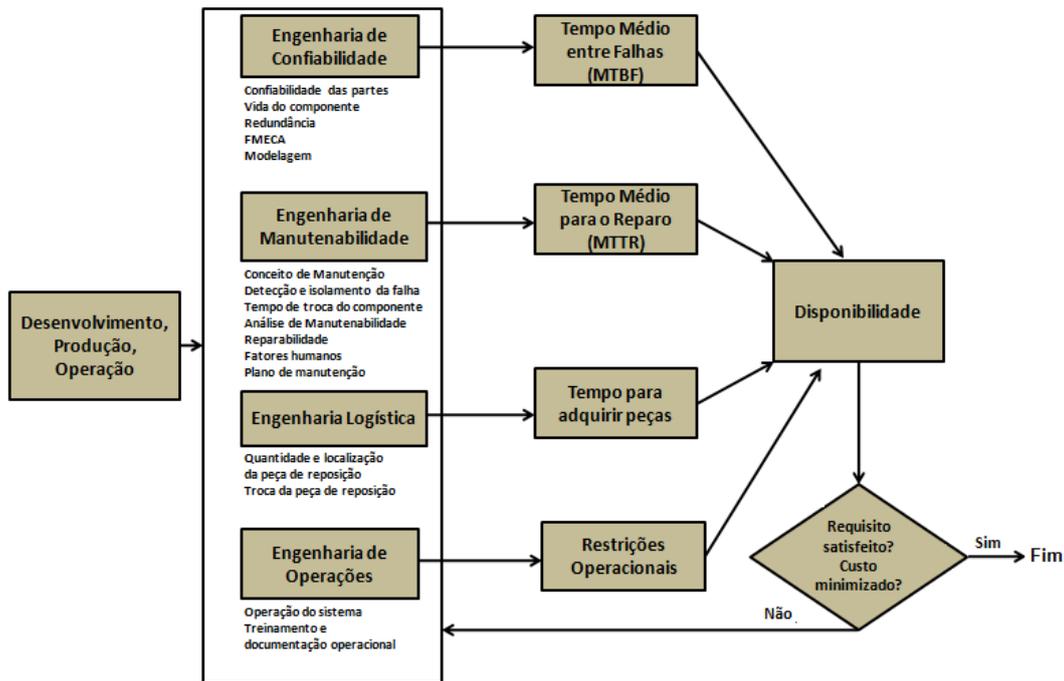
De acordo com Dallosta (2012b), "Projetar (o Sistema) para o Suporte" (Figura 2.6) inicia-se na 1ª fase do ciclo de vida do produto, quando as necessidades

do usuário são identificadas, capacidades definidas e prioridades estabelecidas. Durante esta fase, os objetivos da Suportabilidade, suas métricas associadas e os estudos comerciais iniciais são conduzidos dentro dos processos da Engenharia de Sistemas e resultam em requisitos específicos de projeto e instalação.

O Conceito de Operações (*Concept of Operations* - CONOPS) deve ser identificado para fornecer a base para definir os requisitos e recursos do sistema, bem como a definição inicial dos conceitos de manutenção e suporte do sistema.

Uma recomendação, de acordo com Lalli et al. (1997) é certificar-se de que os Requisitos de Suportabilidade do Sistema (Figura 2.7) estejam na documentação de Requisitos de Sistema. Isso pode ser conseguido fazendo com que os engenheiros de Logística, Manutenibilidade e Confiabilidade façam parte da organização de desenvolvimento. Requisitos de Suportabilidade, como Manutenibilidade, Confiabilidade e Disponibilidade devem ser identificados antecipadamente para qualquer programa de desenvolvimento e incluídos na documentação de requisitos para conduzir o projeto futuro do sistema.

Figura 2.7 – Requisitos de Suportabilidade do Sistema.



Fonte: Adaptado de Lalli et al. (1997).

2.4.2 Projetar o suporte (para o sistema)

De acordo com Dallosta (2012b), o Conceito de Manutenção é definido e especificado em termos gerais dos níveis de manutenção a serem implementados, diretrizes econômicas para decisões sobre reparo versus descarte de itens com falha no sistema, e a atribuição geral de medidas preventivas e corretivas a serem realizadas em cada nível de manutenção. Análises de Predição, Modelagem, Análises de Confiabilidade e Manutenibilidade, Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e Criticidade (*Failure Mode, Effect and Criticality Analysis - FMECA*), são realizadas, para incluir a Manutenção Baseada na Confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance - RCM*) ou a Manutenção Baseada na Condição (*Condition Based Maintenance - CBM*). Segundo Dallosta (2012b), as análises são conduzidas para avaliar os impactos da Confiabilidade e Manutenibilidade nas características do projeto do sistema. Essas características influenciam diretamente a adequação do projeto, resultando na eliminação de pontos de

falha única, aumentando o Tempo Médio entre Falhas (*Mean Time Between Failures* - MTBF) através da implementação de redundância e conceitos de Acessibilidade, Modularidade e Testabilidade, para reduzir o Tempo Médio para o Reparo (*Mean Time to Repair* - MTTR).

Ainda segundo Dallosta (2012b), essas análises, quando combinadas com as informações de manutenção fornecidas pela Análise de Tarefas de Manutenção (*Maintenance Task Analysis* - MTA), estabelecem os limites para a finalização do Conceito de Manutenção, conforme documentado pela Análise do Nível de Reparo (*Level of Repair Analysis* - LORA), o qual determina, baseado em critérios econômicos, o reparo *versus* o descarte de itens com falha; e a alocação de manutenção preventiva e corretiva, com as instalações, peças de reposição, ferramentas, equipamentos de teste, pessoal e treinamento em todos os níveis de manutenção.

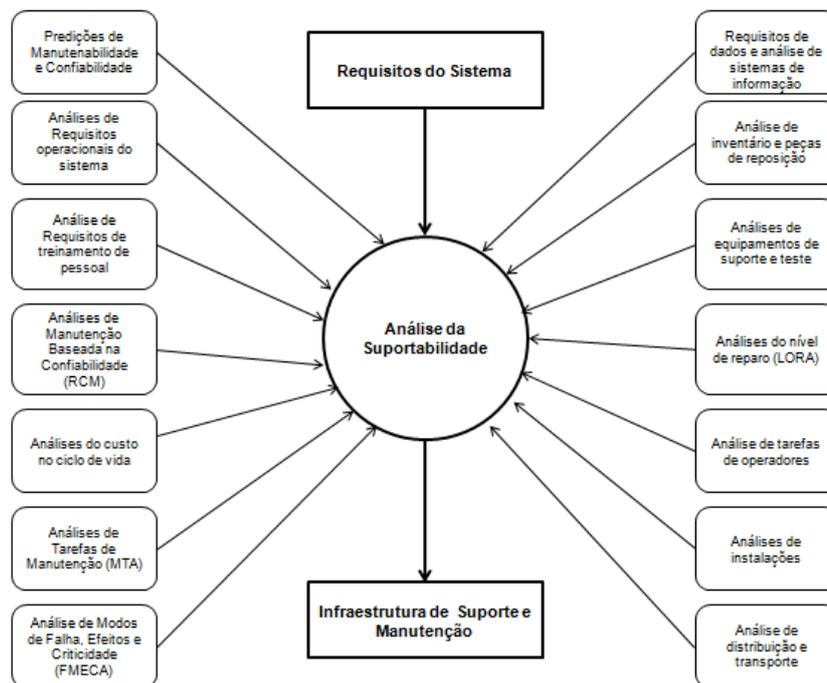
Dallosta (2012b) afirma que o processo “Projetar o Suporte (para o Sistema)” (Figura 2.6) baseia-se nas saídas do processo “Projetar (o Sistema) para o Suporte” (Figura 2.6), conforme descrito anteriormente, isto é, peças de reposição, ferramentas comuns e especiais, equipamentos de teste automáticos, treinamento de manutenção e instalações devem ser especificados e adquiridos nesta etapa do processo.

2.4.3 Suportar o (sistema) projetado

Por último, o processo "Suportar o (Sistema) Projetado" visa manter as características de operação do produto após a entrada em serviço, através de um gerenciamento do suporte em campo, elementos logísticos, procura de peças de reposição, atendimento ao cliente 24/7, análise de Disponibilidade de materiais, RCM/CBM sustentável, análises de custos, etc.

Ainda segundo Dallosta (2012b), o processo “Suportar o Projeto” é implementado através dos recursos do pacote de Suporte Integrado ao Produto e é o resultado final do processo de Análise da Suportabilidade (Figura 6). Como mostra a Figura 2.8, os doze elementos do Suporte Integrado ao Produto são definidos como um resultado da Análise de Suporte ao Produto e fornece os ativos necessários para a manutenção efetiva do sistema.

Figura 2.8 – Análise da Suportabilidade.



Fonte: Adaptado de Erasmus (2015).

2.5 Métricas que podem compor a Suportabilidade

Segundo Dallosta (2012b), à medida que o projeto avança através da Análise da Suportabilidade, as métricas que podem compor a Suportabilidade são identificadas e quantificadas, abrangendo os parâmetros de desempenho.

A Tabela 2.6 apresenta métricas comumente especificadas para a interface do projeto, cadeias de suprimentos e custo.

Tabela 2.6 - Métricas que podem compor a Suportabilidade.

Característica	Métrica
Manutenabilidade	• Tempo Médio para o Reparo
	• Tempo Médio de Inatividade
	• Taxa de Alarme Falso
	• Detecção de Falhas/Isolamento de Falhas
	• Frequência de manutenção
Confiabilidade	• Tempo Médio entre Falhas
	• Tempo Médio entre Manutenção não-Programada
	• Tempo Médio para a Falha
Disponibilidade/Prontidão	• Disponibilidade do material/Disponibilidade Operacional
	• Taxa de capacidade para a missão
	• Prontidão para as tarefas
Suprimentos	• Tempo de espera do cliente
	• Tempo de ciclo do pedido
Custo	• Custo de propriedade
	• Redução de custos operacionais de manutenção
Transporte	• Tempo de entrega/precisão de entrega
	• Porcentagem em trânsito

Fonte: Adaptado de Dallosta (2012b).

2.6 Manutenção Baseada na Confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance - RCM*)

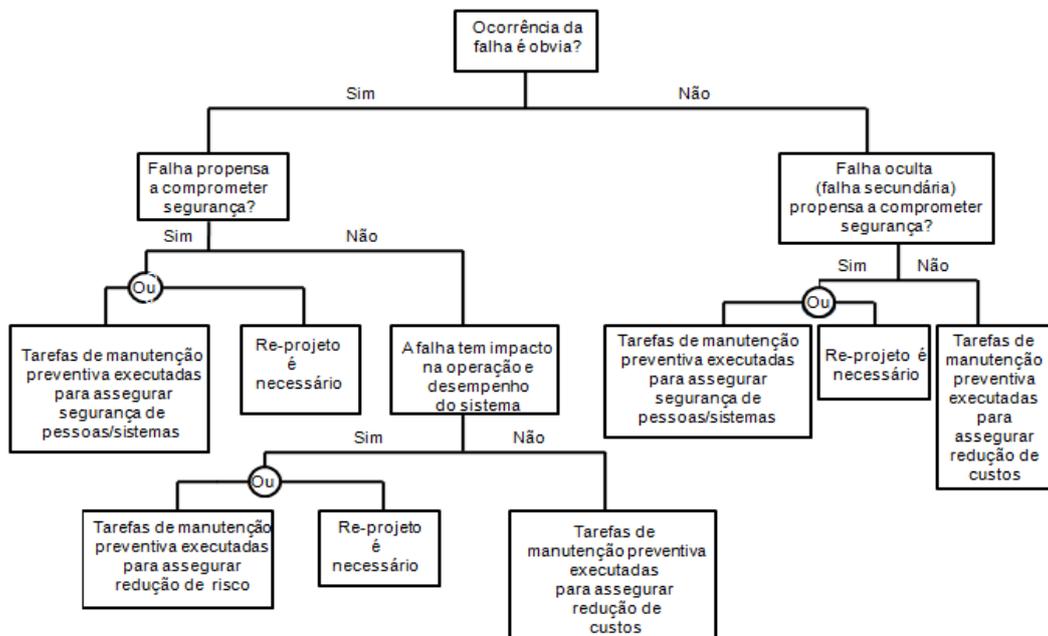
Conforme definido no Guia do Departamento de Defesa dos Estados Unidos - DOD 4151.22-M (2011b), a Manutenção Baseada na Confiabilidade é uma abordagem sistemática para analisar as funções do sistema e possíveis falhas para identificar e definir tarefas de manutenção preventiva para um equipamento.

Segundo INCOSE (2006), a Manutenção Baseada na Confiabilidade (RCM) é realizada para avaliar o programa de manutenção preventiva mais econômico para o sistema. Ela pode ser iniciada muito cedo na fase de desenvolvimento do produto e evolui ao longo da etapa de produção. O processo permite a definição de um regime de manutenção completo. Considera a manutenção como o meio para manter as funções do sistema, num contexto operacional definido. Como tal, também pode ser introduzida com sucesso em sistemas já em operação.

De acordo com Blanchard (2016), com a análise da RCM direcionada para a definição de um programa de manutenção preventiva, um pré-requisito necessário é a realização da Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA). Uma das saídas da FMECA pode levar à identificação de requisitos de manutenção preventiva, que podem ser justificados com base em informações de Confiabilidade.

A Figura 2.9 apresenta uma estrutura lógica de decisão onde a segurança do sistema é a principal consideração, juntamente com desempenho e custo. Seguindo os passos no diagrama, eles levarão à especificação de tarefas de manutenção preventiva ou a uma recomendação para o re-projeto do sistema.

Figura 2.9 – Diagrama Simplificado da Lógica de Decisão do RCM.



Fonte: Adaptado de Blanchard (2016).

O processo da RCM envolve: identificar o contexto operacional do sistema e desenvolver uma lista com Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA); determinar tarefas de manutenção adequadas para os modos de falha identificados na FMECA; empacotar essa lista de tarefas e definir periodicidades adequadas. Neste processo, seleciona-se a ação de manutenção apropriada para cada um dos componentes do sistema, usando as

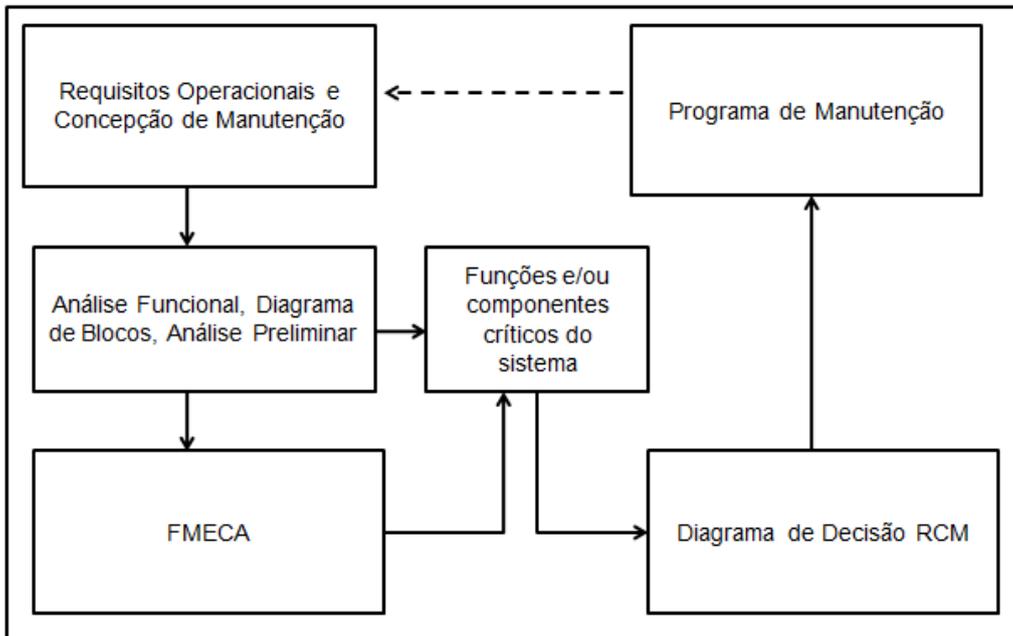
análises do modo de falha, com o objetivo principal de reduzir ou eliminar a falha.

Dessa forma, o contexto operacional permeia todo o processo de formulação de uma estratégia de manutenção. O contexto operacional influencia as funções e requisitos de desempenho, mas também influencia fortemente a natureza, os efeitos, as consequências e a frequência dos modos de falha.

Segundo Laffraia (2001), na RCM determina-se o que deve ser feito para assegurar que um equipamento continue a cumprir suas funções no seu contexto operacional. A ênfase é determinar a manutenção preventiva necessária para manter o sistema funcionando, ao invés de tentar restaurar o equipamento a uma condição ideal. O enfoque é nos efeitos funcionais (operacionais) das falhas, ao invés de focar nas características técnicas das falhas.

Ainda segundo Laffraia (2001), nos casos de equipamentos/sistemas, com inúmeras tarefas de manutenção preventiva, ou com um grande histórico de manutenção corretiva, é que a RCM tem o seu maior potencial, seja pela redução de manutenção preventiva desnecessária, seja pela adição de manutenção preventiva para reduzir manutenções corretivas indesejáveis. O resultado da aplicação da RCM é que tarefas de manutenção, dado o contexto operacional, são otimizadas através da análise das consequências de suas falhas funcionais (operacionais), sob o ponto de vista de segurança, meio ambiente, qualidade e custos. A aplicação da RCM resulta no decréscimo das atividades de manutenção preventiva e do custo dos programas de manutenção preventiva. As Figuras 2.10 e 2.11 a seguir descrevem e detalham as etapas para execução de uma análise de RCM completa.

Figura 2.10 – Etapas para execução de uma análise de RCM completa.



Fonte: Adaptado de Lafraia (2001)

Figura 2.11 –Detalhamento das etapas para execução de uma análise de RCM completa.

Requisitos Operacionais	Análise Funcional	Elaborar FMEA	Diagrama de Decisões	Programa de Manutenção
Montar equipe de análise	Identificar funções	Definir os modos de falhas	Aplicar diagrama de decisões	Comparar com atividades existentes
Identificar dados	Definir falhas funcionais	Definir as causas das falhas	Identificar tarefas de Manutenção Preventiva	Detalhar instruções
Coletar dados		Definir efeitos das falhas	Selecionar tarefas efetivas	Revisar planos
Descrever sistema		Classificar consequência	Estabelecer intervalos	Conduzir auditorias
Identificar elementos		Identificar sistemas mais críticos	Identificar mudanças de projeto	Conduzir mudanças de projetos
Definir fronteiras e interfaces				

Fonte: Adaptado de Lafraia (2001).

2.7 Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (*Failure Modes, Effects and Critically Analysis - FMECA*)

A FMECA foi originalmente desenvolvida pelas Forças Armadas dos Estados Unidos e pela NASA para aperfeiçoar e verificar a Confiabilidade dos equipamentos de seu programa espacial.

Conforme definido na norma MIL-STD-1629, a Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA) é um procedimento realizado no qual cada modo de falha potencial é analisado para determinar seus efeitos no sistema.

Como apresentado pela IEC (2006), a FMECA é composta de duas análises distintas: a FMEA - *Failure Mode and Effects Analysis* (Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos) e a Análise de Criticidade. A FMEA observa os modos de falha e seus efeitos e a Análise de Criticidade realiza a priorização de cada modo de falha em função do seu nível de importância, utilizando como parâmetros a medida combinada da probabilidade de ocorrência e da severidade do modo de falha.

Os objetivos da FMECA incluem:

- Identificação de pontos de falha única;
- Identificação do impacto da falha no desempenho do sistema;
- Classificação dos modos de falha de acordo com a gravidade;
- Classificação dos efeitos do fracasso no sucesso da missão e segurança de pessoal/equipamentos;
- Identificação do item crítico de Confiabilidade/segurança;
- Determinação de requisitos/arquitetura de diagnóstico;
- Avaliação dos requisitos de Confiabilidade/redundância;
- Condução das informações de Manutenibilidade na FMECA para determinar como as falhas potenciais são detectadas e para especificar ações de reparos necessários.

A Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA) deve ser realizada cedo o suficiente para influenciar o projeto do equipamento. O objetivo é otimizar requisitos de manutenção e, portanto, o custo.

A FMECA indica que podem ocorrer falhas em potencial que não podem ser removidas por meio de novo projeto, mas podem ser evitadas por meio de medidas preventivas de manutenção; ou ter um impacto não crítico e, portanto, podem ocorrer, com retificação subsequente através de manutenção corretiva.

A FMECA é talvez uma das metodologias mais poderosas na identificação de riscos de projeto que devem ser eliminados ou mitigados e no desenvolvimento das informações de manutenção que são usadas dentro da Análise de Tarefas de Manutenção (*Maintenance Task Analysis* - MTA) para o desenvolvimento de pesquisas de pane e procedimentos de reparo.

2.8 Análise de Tarefas de Manutenção (*Maintenance Task Analysis* - MTA)

De acordo com Dallosta (2012b), a Análise das Tarefas de Manutenção é uma ferramenta que detalha os recursos necessários para a realização da tarefa de manutenção, tais como equipamentos de apoio, materiais, consumíveis, habilidade de mão-de-obra, condições especiais e o tempo de reparo (MTTR).

O processo MTA fornece informações detalhadas para a identificação de requisitos para cada um dos elementos do suporte integrado ao produto necessários para operar e manter o sistema. A Análise de Tarefas de Manutenção também inclui uma análise de requisitos para identificar áreas onde melhorias de suporte podem ser obtidas. Durante a execução da Análise de Tarefas de Manutenção, serão determinados para cada operação e tarefa de manutenção os seguintes itens:

- Número de pessoas, níveis de habilidade, especialidades, horas de trabalho, e tempo decorrido;

- Peças de reposição, peças de reparo e consumíveis necessários;
- Equipamentos de suporte, teste, medição e equipamentos de diagnóstico;
- Materiais de treinamento e treinamentos necessários;
- Instalações necessárias;
- Embalagem, manuseio, armazenamento e transporte.

2.9 Análise do Nível de Reparo (*Level of Repair Analysis* - LORA)

Segundo Dalosta (2012), a Análise do Nível de Reparo é uma metodologia analítica usada para determinar se um item será reparado ou descartado e o nível de manutenção onde o reparo/descarte ocorrerá, com base nas considerações de custo e requisitos de Disponibilidade. A LORA aloca de maneira ideal as funções de manutenção em todos os níveis de manutenção para obter o máximo de acessibilidade e Disponibilidade. A Análise do Nível de Reparo atende ao requisito de eliminar ou minimizar ferramentas especiais e minimizar equipamentos de testes necessários para apoiar o sistema. Determina também uma estrutura eficaz de manutenção e suporte para um produto.

As entradas para o processo LORA são extraídas de:

- Predição de Confiabilidade e Manutenibilidade;
- Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA);
- Análise de Manutenção Baseada em Confiabilidade (RCM);
- Análise de Tarefas de Manutenção (MTA):
 - Requisitos de calibração
 - Análise tarefas preventivas
 - Análise de tarefas corretivas

As saídas do LORA ajudam diretamente no preparo do Plano de Manutenção e incluem:

- Decisões de reparo ou descarte para todos os níveis;
- Alocação de peças de reposição, mão de obra e equipamentos de apoio para os níveis de manutenção;
- Uma estimativa do custo do ciclo de vida do sistema para incluir o custo de peças de reposição iniciais, itens de consumo, equipamentos de apoio, mão de obra, transporte e instalações;
- A distribuição da carga de trabalho entre os níveis de manutenção.

De acordo com Kumar (2000), a hierarquia da realização de tarefas de manutenção é dividida em três (organizacional, intermediário, fornecedor ou *depot*). Os níveis de manutenção preocupam-se em agrupar as tarefas para os locais onde as atividades de manutenção são realizadas. Os critérios para seleção das tarefas de manutenção em cada nível são: complexidade da tarefa, habilidades dos técnicos, equipamentos e recursos de manutenção especial e medidas econômicas.

No **nível de manutenção organizacional**, as tarefas de manutenção são realizadas no sistema enquanto ele está em operação. Isso inclui tarefas como, por exemplo: reabastecimento, manutenção dos níveis de óleo, monitoramento de desempenho de atividades, testes operacionais, ajustes e substituição de componentes.

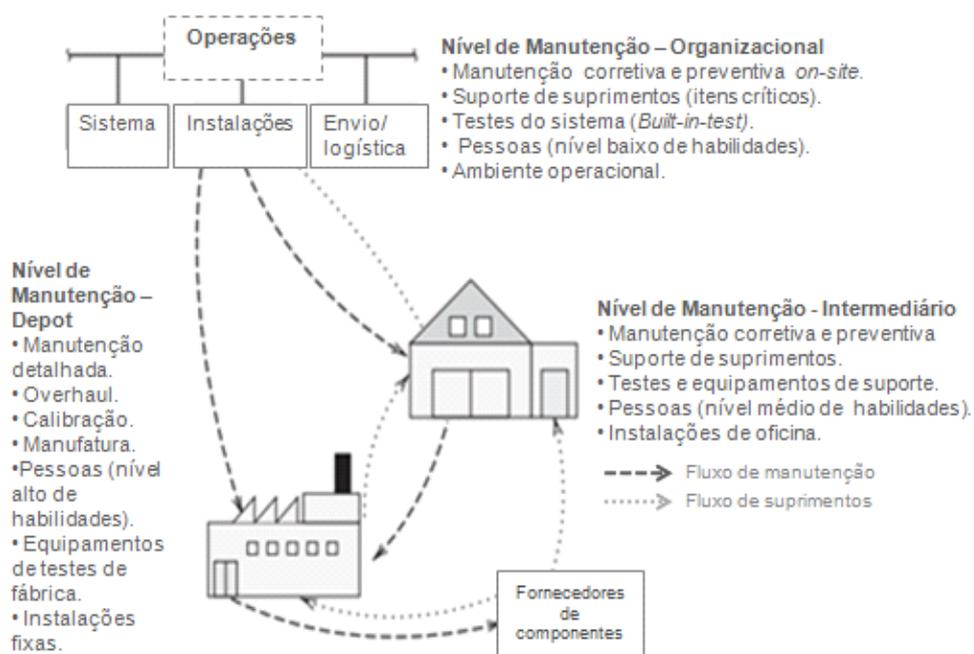
O **nível de manutenção intermediário** está relacionado às tarefas de manutenção que são realizadas em oficinas. Tarefas de manutenção comuns realizadas neste nível são geralmente reparos e substituição de componentes principais em um sistema, grandes revisões, modificações do sistema, etc. A execução de tarefas de manutenção neste nível requer habilidades técnicas mais altas do que aquelas em nível organizacional.

O **nível de manutenção fornecedor/depot** é relacionado às tarefas de manutenção que são realizadas além das capacidades de nível intermediário, especificamente em instalações do fabricante. As tarefas de manutenção neste nível são realizadas por especialistas altamente qualificados, em um local de reparo especializado ou no fabricante do equipamento. As tarefas de

manutenção no nível fornecedor/*depot* incluem revisão completa e reconstrução do sistema, ações de manutenção altamente complexas, etc. Eles também incluem tarefas que podem ser realizadas raramente, principalmente se exigirem equipamentos especiais caros.

A Figura 2.12 ilustra um exemplo de uma abordagem básica de manutenção em três camadas (ou seja, manutenção organizacional, manutenção de nível intermediário e manutenção do fornecedor/*depot*). Dependendo do tipo de sistema, a missão a ser realizada, a complexidade e Confiabilidade do sistema, a localização geográfica e onde é usado, custo total e assim por diante, podem existir variações nas políticas de reparo e a infraestrutura pode incluir apenas dois níveis de manutenção.

Figura 2.12 – Infraestrutura de manutenção e suporte de um sistema.



Fonte: Adaptado de Blanchard (2016).

2.10 Manutenção Baseada na Condição (*Condition Based Maintenance - CBM*)

Conforme apresentado por Kelly and Harris (1978) e Lafraia (2001), a Manutenção Baseada na Condição pode ser definida como a manutenção

realizada em resposta a uma deterioração de um equipamento, indicada pela alteração dos parâmetros de condição ou desempenho monitorados. Pode-se medir um parâmetro de desempenho diretamente e obter-se uma correlação com a iniciação da falha. Essa informação é usada para garantir que o sistema continuará em um estado de funcionamento sem risco e para decidir sobre o momento em que as tarefas de manutenção devem ser realizadas antes de o equipamento falhar.

Ainda segundo Lafraia (2001), ao seguir, numericamente ou graficamente, a evolução dos parâmetros medidos ao longo do tempo, o **estado da saúde** do equipamento pode ser detectado em qualquer momento. Juntamente com os **níveis de alarme** definidos, é possível identificar quando intervir para evitar uma falha, antecipando a identificação do momento da falha.

A Manutenção Baseada na Condição é um tipo de manutenção que possui **características preditivas**.

Holmberg et al. (2010) também confirmam que a Manutenção Baseada na Condição evita falhas detectando uma deterioração precoce, e anuncia a necessidade da manutenção quando ocorre a degradação da condição do equipamento. O componente normalmente é substituído ou reparado assim que o valor do nível de monitoramento excede o normal. As atividades fundamentam-se em medir parâmetros físicos como vibração, temperatura, pressão, condições de lubrificantes, e outras técnicas, para determinar qual combinação oferece a melhor indicação da "saúde" do equipamento. Envolve ainda estabelecer níveis de alarme para monitoramento de rotina. Quando um equipamento exceder um nível de alarme, o problema é diagnosticado e é verificado se alguma ação de manutenção é necessária naquele momento.

A Manutenção Baseada na Condição apresenta os seguintes benefícios:

- Melhor planejamento dos reparos;
- Evitam-se vários inconvenientes e danos com consequências caras;
- Redução da taxa de ocorrência de falhas, melhorando a Disponibilidade e a Confiabilidade;

- Redução de peças de reposição em estoque;
- Evita trabalho desnecessário, mantendo pequeno o time de reparo, mas com alta capacidade técnica.

2.11 Relatório de Análise de Falhas e Ação Corretiva do Sistema (*Failure Report Analysis and Corrective Action System - FRACAS*)

O FRACAS é um processo originado nas indústrias de defesa e aeroespaciais na década de 70.

De acordo com o Manual MIL-STD-2155 (DOD, 1985), o FRACAS é um processo de ciclo fechado usado para coletar, registrar, analisar e corrigir falhas. Ele promove a melhoria da Qualidade/Confiabilidade ao longo do ciclo de vida de um produto. Segundo a Reliasoft (2015), ele pode ser aplicado em projetos e re-projetos de produtos para identificar ou eliminar problemas, testes de desenvolvimento interno para melhorar produtos, processos ou serviços, testes em campo, produção e operação para melhorar eficiência, suporte para produtos em campos, fornecer dados de engenharia para informação corretiva, fornecer dados de falhas para análise de Confiabilidade, centralizar informações de lições aprendidas que podem ajudar a reduzir tempo para resolver problemas.

As etapas do FRACAS incluem (RELIASOFT, 2015):

- Registro do acontecimento;
- Atribuir um indivíduo responsável;
- Criar itens de ação apropriado para resolução;
- Executar análises de causa raiz;
- Identificar as ações corretivas apropriadas;
- Verificar se as ações corretivas são eficazes;
- Implementar ações corretivas;

- Prevenir a recorrência.

Os registros podem ser vindos de falhas do produto em campo, reclamações de clientes, falhas de processos, etc. A análise da falha auxiliará a encontrar a causa raiz do problema.

Quando a causa tiver sido determinada, um Plano de Ação Corretiva deve ser desenvolvido, documentado e implementado a fim de prevenir recorrências de falhas. As ações corretivas normalmente resultam em uma alteração no projeto de um sistema ou processo. Elas podem envolver também alterações em treinamentos, logística, manuais, etc.

2.12 Falhas

Falha é definida como “o término da capacidade de um item desempenhar sua função requerida”.

De acordo com Smith (2011), falhas podem ser classificadas de várias maneiras, tais como:

1. Causa:

- Uso incorreto: causado por operação fora do estresse especificado.
- Primário: Não causado por uma falha anterior.
- Secundário: causado por uma falha anterior.
- Desgaste: causado pela aceleração da taxa de falhas.
- Projeto: causado por uma fraqueza intrínseca.
- Software: causado por um erro de programa.

2. Tipo:

- Súbita: falha não prevista e sem degradação anterior.
- Degradação: redução gradual no desempenho.
- Intermitente: alternando entre a condição de falha e operação.

- **Dormente:** uma falha de componente que não causa falha do sistema, mas que em combinação com outra falha latente, causaria falha do sistema.
- **Aleatória:** a falha é igualmente provável em cada intervalo de tempo sucessivo.
- **Catastrófica:** término repentino e completo.

Um componente pode falhar e provocar a imediata paralisação de um sistema ou apresentar uma redução de seu desempenho. Qualquer uma destas situações deverá ser analisada para identificar as possíveis causas que conduziram a esta situação.

De acordo com Moubray (1991), dado que um padrão de desempenho se aplica a funções individuais, falha pode ser descrita pela definição de Falha Funcional.

2.12.1 Falha funcional

Moubray (1991) define Falha Funcional como a incapacidade de um ativo cumprir uma função que atenda a um padrão de desempenho especificado por um usuário. Para definir Falha Funcional de um componente ou sistema, é necessário entender as suas funções. Deve-se determinar todas as funções em um determinado contexto operacional, uma vez que a exata definição de falha para um ativo depende do seu contexto operacional.

Um estado de Falha Funcional sempre está associado a eventos que causam a falha (Modo de Falha).

2.12.2 Falha potencial

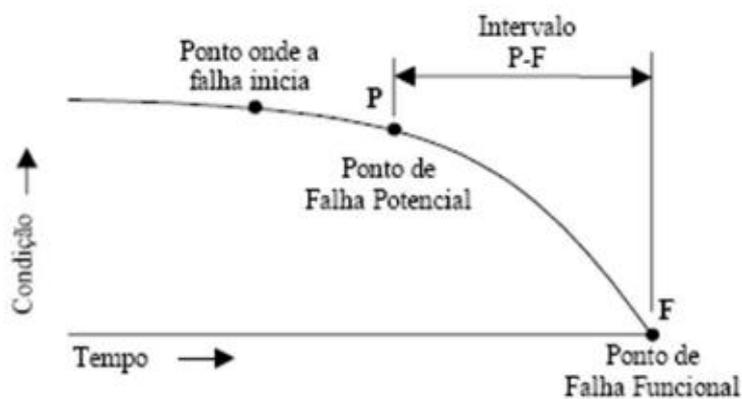
A Falha Potencial ou Parcial, segundo Moubray (1991), é quase sempre causada por diferentes modos da falha e as conseqüências são diferentes. Isso explica o motivo pelo qual todas as Falhas Funcionais que podem afetar cada função devem ser registradas.

A Falha Potencial é o momento em que a falha nasce no ativo, ou seja, ela ainda é uma falha em estágio inicial, e não compromete por completo o

funcionamento do equipamento, mas diminui seu desempenho ao longo do tempo. Representa o ponto onde o item físico começa a apresentar perda do desempenho da função.

A Figura 2.13 apresenta a relação entre Falha Potencial e Falha Funcional (curva P-F).

Figura 2.13 – Curva P-F.



Fonte: Adaptado de Moubray (1991).

2.12.3 Modos de falha

Segundo Moubray (1991), Modo de Falha é qualquer evento que possa levar um ativo (componente ou sistema) a falhar; ou seja, é qualquer evento que causa a Falha Funcional. Está associado às prováveis causas de cada Falha Funcional. A identificação dos Modos de Falha de um componente é um dos passos mais importantes da Manutenção Baseada na Confiabilidade.

O termo Modo de Falha refere-se à forma como a falha se manifesta.

Quando cada Modo de Falha é identificado em um sistema ou processo, torna-se possível verificar suas conseqüências (efeitos) e planejar ações para prevenir ou corrigir a falha, que pode ser realizada através da FMEA.

Alguns exemplos de Modos de Falha típicos são: fratura, separação, desgaste, corrosão, abrasão, desbalanceamento, trincas, dentre outros.

A Falha Funcional de um ativo pode ter sua origem devida a diversos

problemas e pode estar associada a alguns eventos, tais como: erro de projeto, erro de fabricação, programas de manutenção inadequados, postergação da manutenção, treinamento inadequado (operadores e/ou mantenedores), especificação dos componentes, erro de instalação e/ou montagem, dentre outros.

A investigação da falha pode compreender diversas fases, tais como:

- Coleta de dados e informações.
- Registros fotográficos ou similares.
- Análise do histórico de operação do equipamento.
- Avaliação das políticas de manutenção praticadas.
- Avaliar o nível de treinamento de todo pessoal envolvido.
- Consulta a banco de dados de casos parecidos ou similares.
- Condução de testes em laboratórios.
- Entrevistas (pessoal de operação, manutenção, engenharia).
- Uso de simulações.
- Análise das evidências.
- Formulação das conclusões.
- Relatório Final.

2.13 Plataforma de coleta de dados

Segundo Herschy (1980), uma plataforma de coleta de dados ambientais é um dispositivo eletrônico capaz de realizar observações e medições de diversas variáveis ambientais, propriedades físicas, químicas ou biológicas dos oceanos, rios, lagos, e atmosfera. Os dados são codificados e transmitidos das plataformas para o satélite, que retransmite o sinal para a estação terrestre central responsável pelo controle do próprio satélite.

Há várias aplicações possíveis para as plataformas, que podem ser classificadas como mostra a Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Classificação das Plataformas de Coleta de Dados e suas Aplicações.

Tipo de Plataforma	Aplicação
Internacional	Muda a área de visualização de um satélite geoestacionário para outro, geralmente a bordo de aeronaves ou navios. É suportado por cada operador do satélite operador.
Regional	Permanece dentro da área de visualização de um satélite .
Fixa	Normalmente regional, por exemplo estação hidrológica.
Móvel	Navio ou no ar. Inclui todos os PCDs internacionais.
Cronometrada	Produz relatório de dados de um sensor em horários fixos.
Alerta	Transmite mensagens de alerta curtas para o centro de controle quando predefinido os valores do sensor foram excedidos

Fonte: Adaptado de Herschy (1980).

Em um sistema de coleta de dados de satélite, parâmetros como temperatura, pressão ou outros, as variáveis são detectadas na plataforma e os dados codificados, formatados e transmitidos para instalações de processamento por meio de um enlace (*link*) de comunicação via satélite.

Segundo Taillade-Carriere (1979), muitos dos aplicativos envolvem o rastreamento de plataformas móveis (balões meteorológicos, bóias, animais selvagens), bem como a coleta de dados de locais fixos (bóias ancoradas, estações de pesquisa). Na operação, os dados são retransmitidos das plataformas remotas para um satélite de forma aleatória ou após um comando interrogatório.

Os dados podem ser armazenados a bordo do satélite para leitura em um local de recepção central ou podem ser retransmitidos diretamente para uma instalação de processamento de controle ou para um terminal de usuário regional local. Uma vez os dados são recebidos no local, as informações são

formatadas e divulgadas aos usuários. No caso de localização de posição, as coordenadas são calculadas e divulgadas para o usuário junto com as informações sensoriais coletadas.

As PCDs são equipamentos que possuem sensores capazes de realizar medições de diversas variáveis ambientais. São equipamentos capazes de realizar a transmissão automática e em tempo real dos dados coletados para as estações de processamento por meio de telemetria, através de satélites ou outras tecnologias como o *General Packet Radio Service* (GPRS).

As PCDs do estudo de caso deste trabalho transmitem os dados ambientais coletados via telefonia celular, através da tecnologia GPRS (*General Packet Radio Service*). Estes e os demais conceitos citados serão aplicados a seguir.

3 PROCESSOS E REQUISITOS DE SUPORTABILIDADE BASEADO NO PADRAO ECSS

A ECSS é uma iniciativa da Agência Espacial Européia para desenvolver um único padrão para uso em atividades espaciais européias. A ECSS apresenta três ramos de aplicabilidade em projetos espaciais: Gerenciamento, Engenharia, e Garantia de Produto. O INPE comumente utiliza a ECSS como referência em seus projetos espaciais.

A pesquisa às referências da ECSS, realizada para este trabalho, mostrou que o termo Suportabilidade não é utilizado explicitamente nelas. Mas elas utilizam os termos Dependabilidade (para abordar a Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, etc.); e Suporte Logístico Integrado (para abordar os Custos Logística, Suprimentos, etc.) apresentados dentro dos 3 ramos de aplicabilidade na ECSS (Gerenciamento, Engenharia, e Garantia de Produto). Assim, os termos mais freqüentemente utilizados neste contexto são Dependabilidade e Suporte Logístico Integrado.

O Capítulo 2 deste trabalho mostra os conceitos básicos principais e a revisão bibliográfica disponível na literatura para o termo Suportabilidade e o processo da análise da Suportabilidade em sistemas de defesa e aeroespaciais.

Neste trabalho, Suportabilidade é uma métrica vetorial composta por outras métricas técnicas, gerenciais e administrativas relevantes para a tomada de decisão. O vetor de métricas que representa a Suportabilidade pode ser composto, por exemplo, por estas outras métricas:

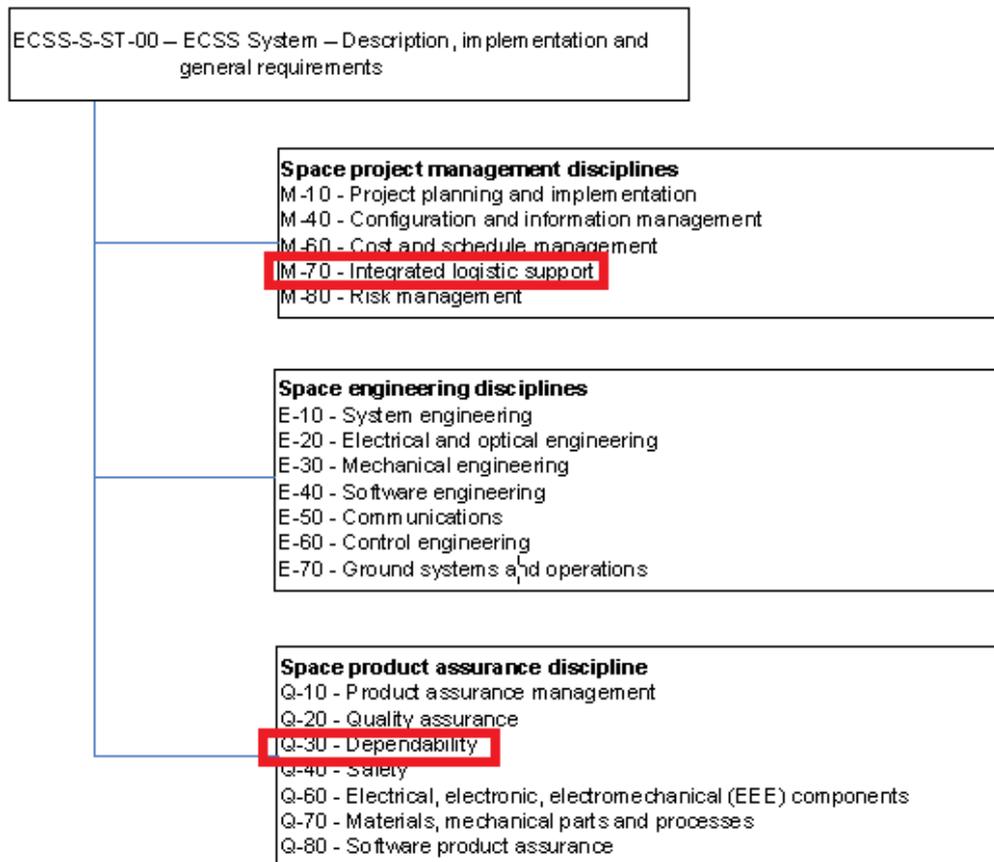
- 1) Manutenibilidade;
- 2) Confiabilidade;
- 3) Disponibilidade;
- 4) Custo;
- 5) Suporte Logístico Integrado;
- 6) Suprimentos.

Dependabilidade, conforme definido no glossário da ECSS-P-001B (2004), é um termo coletivo usado para descrever o desempenho da Disponibilidade e sua dependência dos fatores: desempenho de Confiabilidade, desempenho de Manutenibilidade e desempenho do Suporte à Manutenção. A Dependabilidade é um termo usado apenas para descrições gerais em termos não quantitativos.

Rabello (2016) em seu trabalho descreve a Dependabilidade como uma métrica vetorial composta por outras métricas escalares de atributos que forem importantes para a tomada de decisão em questão. Os atributos da Dependabilidade mencionados por Rabello (2016), e que compõem a Dependabilidade são, nesta ordem: 1) Confiabilidade; 2) Manutenibilidade; 3) Disponibilidade.

A Figura 3.1 apresenta as disciplinas da ECSS e assinala as referências que serão consultadas neste Capítulo para a captura de Requisitos relacionados aos processos e atividades de Suportabilidade com foco em Manutenibilidade.

Figura 3.1 – Disciplinas do padrão ECSS.



Fonte: Adaptado de ECSS-S-ST-00C (ECSS, 2008a).

Conforme mencionado anteriormente, os conceitos de Suportabilidade não estão presentes explicitamente na ECSS. No entanto, podemos considerar para fins de análise neste trabalho, que os conceitos de Dependabilidade em conjunto com os conceitos de Suporte Logístico Integrado, abordados na ECSS, são equivalentes aos conceitos de Suportabilidade descritos no Capítulo 2 deste trabalho. Seus requisitos e normas ECSS são vistos a seguir.

3.1 Requisitos de Dependabilidade baseados no padrão ECSS-Q-ST-30C (ECSS, 2009b)

A ECSS-Q-ST-30C (ECSS, 2009b) define os requisitos de Dependabilidade para sistemas espaciais. A Tabela 3.1 relaciona os principais requisitos de Dependabilidade aplicáveis aos conceitos de Suportabilidade.

Tabela 3.1 - Principais Requisitos e atividades de Dependabilidade baseado na ECSS-Q-ST-30C (ECSS, 2009b), e aplicáveis aos conceitos de Suportabilidade.

Ramo de Aplicação	Conceitos e Requisitos de Dependabilidade baseado na ECSS-Q-ST-30C (2009)
Integração da Dependabilidade no Projeto	A Dependabilidade deve ser integrada como parte do processo de projeto.
	As características de Dependabilidade devem ser analisadas (<i>trade-off</i>) com outros atributos do sistema, como massa, tamanho, custo e desempenho durante a otimização do projeto em todas as fases do projeto.
	A Dependabilidade é uma característica inerente ao produto.
	Fabricação, montagem, integração, teste e operações não devem degradar os atributos de Dependabilidade introduzidos no projeto.
Requisitos de Dependabilidade na Especificação Técnica	Os Requisitos de Dependabilidade devem ser incluídos nas especificações técnicas e devem incluir a definição do Conceito de Manutenção; tarefas de manutenção e Requisitos para habilidades especiais; Requisitos para manutenção preventiva, ferramentas especiais e equipamentos de testes especiais; detecção, isolamento, diagnóstico e recuperação do sistema das falhas e sua restauração a um estado aceitável; Requisitos ambientais, operacionais e funcionais.
Abordagem no projeto	O fornecedor deve confirmar que a Confiabilidade está incluída no projeto usando tolerância a falhas e margens de projeto.
	O projeto deve apresentar a implementação de detecção, isolamento e recuperação de falhas, permitindo o processamento adequado das falhas por meio de medidas dedicadas, e considerando os tempos de detecção ou reconfiguração em relação aos tempos de propagação dos eventos nas piores condições.
	Garantia de que o equipamento embutido pode ser inspecionado e testado.
	Disponibilização de acessibilidade ao equipamento.
Classificação de Produtos e Funções Críticas	Durante a fase de projeto preliminar, o contratado deve classificar as funções, operações e produtos de acordo com seu nível de criticidade.
	A disciplina de Dependabilidade deve apoiar: <ol style="list-style-type: none"> 1. definição das características e objetivos do teste; 2. seleção de parâmetros de medição, e 3. avaliação estatística dos resultados do teste.

continua

Tabela 3.1 - Continuação.

Ramo de Aplicação	Conceitos e Requisitos de Dependabilidade baseado na ECSS-Q-ST-30C (2009)
Envolvimento dos Aspectos Operacionais	O fornecedor deve garantir que a Dependabilidade e pessoal qualificado para: 1. contribuir para a definição do manual de procedimentos e operações; 2. revisar manual de operações e procedimentos para verificação de consistência com análises de Dependabilidade.
Classificação e Identificação de Eventos Indesejáveis	O fornecedor deve identificar eventos indesejáveis que levam à perda ou degradação de desempenho do produto, juntamente com sua classificação em categorias relacionadas à gravidade das consequências de suas falhas.
Avaliação dos Cenários de Falhas	O fornecedor deve analisar os possíveis cenários que levem à ocorrência de eventos indesejáveis.
	O fornecedor deve identificar modos de falha, origens e causas de falha, efeitos de falha detalhados levando a eventos indesejáveis.
Análise de Dependabilidade e Ciclo de Vida do Projeto	As análises de Dependabilidade devem ser realizadas em todos os projetos espaciais ao longo do ciclo de vida do projeto para apoiar as tarefas e requisitos.
	A análise de Dependabilidade deve ser implementada a fim de: 1. garantir a conformidade com os Requisitos de Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade, e; 2. identificar todos os modos de falha em potencial e riscos técnicos; 3. fornecer informações para a avaliação e redução de riscos e suas medidas de controle alinhadas com o processo de gestão de riscos no projeto.
Análise de Confiabilidade	Técnicas de previsão de confiabilidade devem ser utilizadas com os seguintes objetivos: 1. para otimizar a confiabilidade de um projeto contra restrições concorrentes, como custo e massa; 2. para prever a confiabilidade em serviço de um produto; 3. fornecer dados de probabilidade de falha para fins como avaliação de risco.
	Modelos de confiabilidade devem ser preparados para suportar previsões e FMEA/FMECA.

continua

Tabela 3.1 – Continuação.

Ramo de Aplicação	Conceitos e Requisitos de Dependabilidade baseado na ECSS-Q-ST-30C (2009)
FMEA/FMECA	Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) / Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA) devem ser realizados no projeto.
	Todos os modos de falha em potencial devem ser identificados e classificados de acordo com a gravidade (FMEA) ou criticidade (FMECA) de suas consequências.
	Medidas devem ser propostas na análise e introduzidas no projeto do produto e no controle dos processos para tornar todas essas consequências aceitáveis para o projeto.
	Quando quaisquer alterações de projeto ou processo são feitas, o FMEA / FMECA deve ser atualizado e os efeitos de novos modos de falha introduzidos pelas alterações devem ser avaliados.
	As disposições para detecção de falhas e ações de recuperação devem ser identificadas como parte do FMEA/FMECA.
Análise Zonal	<p>A análise zonal deve ser realizada, a fim de avaliar as consequências devido a potenciais interações subsistema a subsistema inerentes à instalação do sistema. O objetivo da análise zonal é:</p> <ul style="list-style-type: none"> • identificar a possível interação entre os subsistemas, • fornecer uma avaliação dessas possíveis interações, • produzir recomendações para mitigação.
Análise de Manutenibilidade	<p>Os Requisitos de Manutenibilidade devem ser repartidos para definir os requisitos de Manutenibilidade para produtos de nível inferior para estar em conformidade com o Conceito de Manutenção e os requisitos de Manutenibilidade do sistema. O objetivo da análise de Manutenibilidade é:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. identificar as possíveis tarefas de manutenção corretiva e preventiva, 2. fornecer MTBF e MTTR para análise de Disponibilidade, 3. fornecer recomendações para melhorias.
	<p>A previsão de Manutenibilidade deve ser realizada em nível de sistema e usada como uma ferramenta de projeto para avaliar e comparar alternativas de projeto com relação aos Requisitos quantitativos de Manutenibilidade especificados para prever:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. o tempo para diagnosticar (ou seja, detectar e isolar) falhas de itens, 2. o tempo para remover e substituir o item com defeito, 3. o tempo para retornar o sistema ou subsistema à sua configuração nominal e para realizar as verificações necessárias, e 4. as taxas de falha do item.
	A análise da manutenção preventiva deve ser realizada no nível do sistema para estabelecer o plano de manutenção.

continua

Tabela 3.1 – Conclusão.

Ramo de Aplicação	Conceitos e Requisitos de Dependabilidade baseado na ECSS-Q-ST-30C (2009)
Análise de Disponibilidade	O fornecedor deve realizar análises de Disponibilidade ou simulações para avaliar a Disponibilidade do sistema.
	Os resultados são usados para: 1. otimizar o conceito do sistema no que diz respeito ao projeto, operações e manutenção, 2. verificar a conformidade com os requisitos de Disponibilidade, 3. fornecer dados para estimar o custo geral de operação do sistema.
	A saída da análise de Disponibilidade deve incluir uma lista de todas as interrupções potenciais identificadas (conforme definido no projeto), suas causas, probabilidades de ocorrência e duração. Em vez de probabilidades de interrupção, taxas de falha associadas a interrupções podem ser fornecidas.
	A análise de Disponibilidade deve ser realizada no nível do sistema usando os modelos de Confiabilidade e Manutenibilidade do sistema, bem como os dados das interrupções.
Teste de Dependabilidade e Demonstração	O teste de Disponibilidade e a demonstração devem ser realizados de acordo com os requisitos do projeto, a fim de validar ou justificar as bases de dados utilizadas para as demonstrações teóricas (duração das interrupções e probabilidade de ocorrência).
Demonstração da Manutenibilidade	A demonstração da Manutenibilidade deve ser realizada realizando a verificação dos requisitos de Manutenibilidade aplicáveis e garantindo que as atividades de manutenção preventiva e corretiva sejam realizadas com sucesso dentro do escopo do Conceito de Manutenção.
	A demonstração de Manutenibilidade deve verificar a capacidade de: 1. detectar, diagnosticar e isolar cada unidade substituível de linha defeituosa; 2. remover e substituir cada unidade substituível de linha ou unidade substituível de órbita; 3. realizar reparos essenciais para a missão em unidades que não se destinam a ser substituídas; 4. verificar se o produto está totalmente funcional após a conclusão das ações de manutenção; 5. demonstrar que nenhum risco à segurança é introduzido como resultado das ações de manutenção; 6. demonstrar que as operações de manutenção podem ser realizadas dentro das restrições aplicáveis, incluindo as operações necessárias para preparar um sistema durante a campanha de lançamento.
Coleta de Dados de Dependabilidade e Monitoramento do Desempenho de Dependabilidade	Os dados de Dependabilidade, conforme especificado no contrato, devem ser coletados por um período acordado com o cliente a partir de fontes como relatórios de não conformidade e problemas ou falhas e relatórios de manutenção. Os dados de Dependabilidade podem ser usados para o monitoramento do desempenho de Dependabilidade por meio de modelos especificados.

3.2 Requisitos de Suporte Logístico Integrado baseados no padrão ECSS-M-70A (1996)

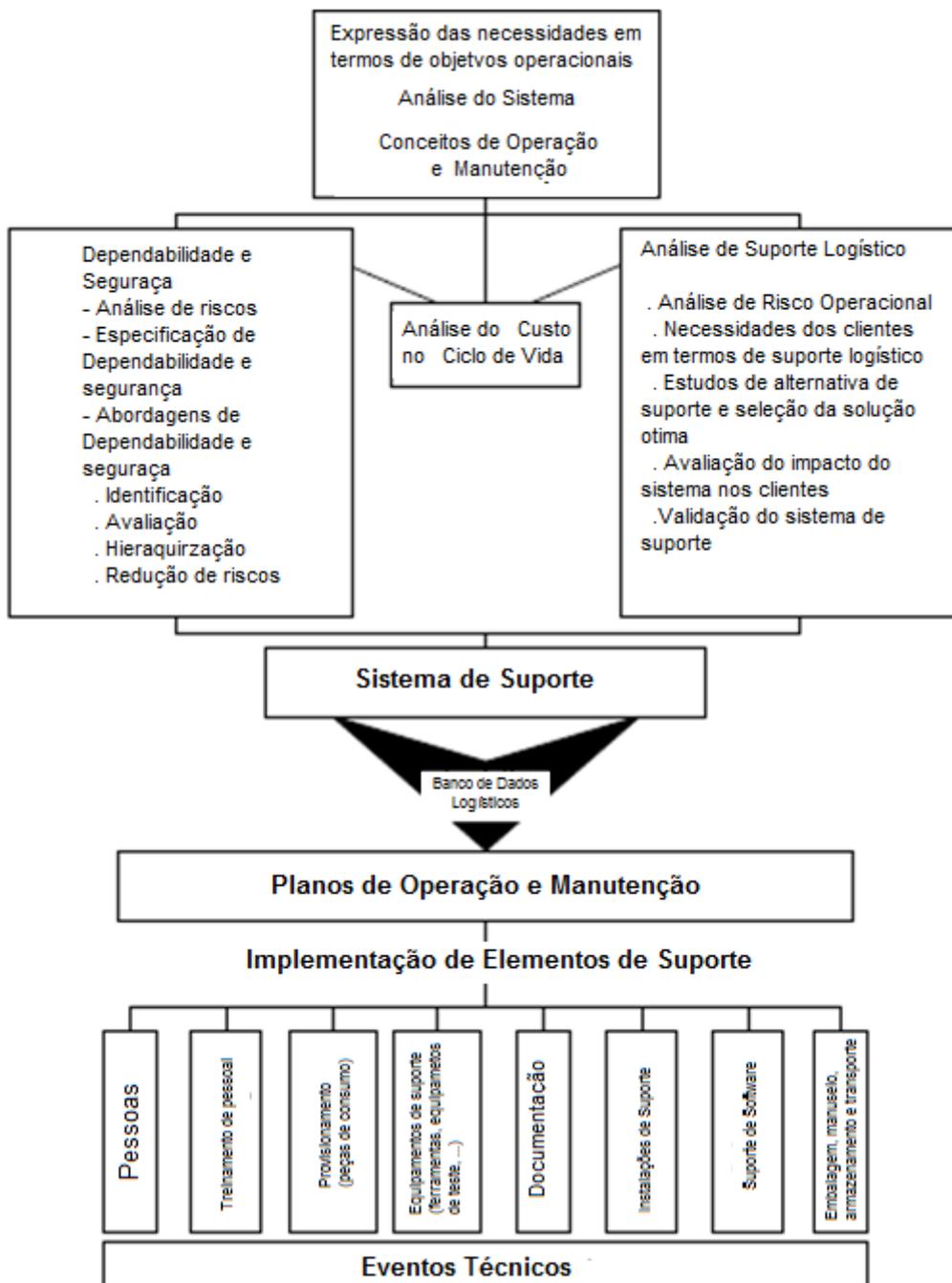
O Suporte Logístico Integrado visa garantir o suporte efetivo e econômico de um sistema em seu ciclo de vida. Isso inclui:

- restrições relativas à manutenção (por exemplo, periodicidade mínima, duração da intervenção, infraestrutura, ferramentas, modos de intervenção);
- embalagem, transporte, manuseio e armazenamento;

- treinamento de usuários de produtos;
- documentação do usuário;
- implementação do produto no site do usuário;
- reutilização do produto ou de seus elementos.

A Figura 3.2 apresenta uma visão geral do Suporte Logístico Integrado na ECSS.

Figura 3.2 – Visão Geral do Suporte Logístico Integrado na ECSS.



Fonte: Adaptado da ECSS-M-70A (1996).

A ECSS-M-70A (1996) define os requisitos de Suporte Logístico Integrado para sistemas espaciais. A Tabela 3.2 relaciona os principais requisitos de Suporte Logístico Integrado aplicáveis aos conceitos de Suportabilidade.

Tabela 3.2 - Principais Requisitos e atividades de Suporte Logístico Integrado baseado na ECSS-M-70A, e aplicáveis aos conceitos de Suportabilidade.

Ramo de Aplicação	Requisitos de Suporte Logístico Integrado baseado na ECSS-M-70A (1996)
Requisitos para Análises Logísticas	<p>O fornecedor deve definir as alternativas potenciais para o sistema de suporte, avaliar cada alternativa e determinar o sistema de Suporte mais adequado aos requisitos operacionais. A avaliação pode abranger aspectos como:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Análise do Nível de Reparo (LORA), 2) Análise da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), 3) Análise de desempenho técnico e de disponibilidade a serem mantidos, Conceitos de operação e manutenção baseados na confiabilidade e análise de segurança.
Requisitos para Definição e Desenvolvimento dos Elementos de Suporte	<p>O fornecedor deve definir os elementos de suporte necessários para o desempenho e tarefas de manutenção para a operação do sistema em seu ambiente de uso. Para cada tarefa, deve ser definido:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) a natureza e o tipo da tarefa, a frequência (ou periodicidade), a duração alocada para a tarefa; 2) os Requisitos de recursos quantificados, em relação às necessidades logísticas em termos de: equipamentos de apoio (ferramentas, equipamentos de teste, ...), embalagem, manuseio, armazenamento e transporte (PHST), habilidades pessoais e mão de obra, treinamento, suporte de <i>software</i>, instalações de apoio, fornecimento de peças sobressalentes e consumíveis, material de documentação (operação, manutenção e procedimentos), feedback de dados de eventos técnicos.
	<p>O fornecedor deve prever, para o Sistema Suportado, a taxa de consumo de peças de reposição, consumíveis e outros elementos de suporte e devem garantir a continuidade do reabastecimento.</p>
	<p>O fornecedor deve analisar todos os eventos operacionais não programados para determinar sua causa.</p>

continua

Tabela 3.2 - Conclusão.

Ramo de Aplicação	Requisitos de Suporte Logístico Integrado baseado na ECSS-M-70A (1996)
<p align="center">Requisitos de Gerenciamento dos Elementos de Suporte</p>	<p>O fornecedor deve avaliar, antes da aquisição de ferramentas de desenvolvimento, equipamento de teste, etc., a conveniência e viabilidade de ter equipamentos capazes de serem usados durante o desenvolvimento e na fase de utilização.</p>
	<p>O fornecedor deve estabelecer um plano de provisionamento que identifica e peças sobressalentes, peças de reparo e consumíveis recorrentes.</p>
	<p>O fornecedor deve estabelecer um plano de aquisição de equipamentos de suporte.</p>
	<p>O fornecedor deve estabelecer um plano para embalagem, manuseio, armazenamento e transporte (plano PHST - <i>packing, handling, storage, transportation</i>). O plano PHST deve levar em consideração: os itens de hardware a serem fabricados (recipientes, sistemas de manuseio, armazenamento e meios de transporte ...), os serviços de PHST a serem implementados durante a entrega, implantação e utilização nas fases, o estabelecimento de documentação dos procedimentos necessários para o PHST.</p>
	<p>O fornecedor deve estabelecer um plano de suporte de software. O suporte de software aborda pacotes de software integrados ao suporte do sistema, usados para tarefas de manutenção, no treinamento e na administração. O plano cobre hardware e software necessários para o serviços de suporte em toda a fase de utilização e</p>
	<p>O fornecedor deve estabelecer um plano de treinamento para o pessoal de operação e manutenção.</p>
	<p>O fornecedor deve estabelecer um plano de assistência técnica para atender as necessidades em termos de mão de obra e habilidades para realizar a operação e manutenção.</p>

4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGENS PARA SUA SOLUÇÃO

4.1 Formulação do problema

Como exposto anteriormente, este trabalho propõem-se a estudar a Suportabilidade de sistemas aeroespaciais aplicada a plataformas de coleta de dados de redes hidrometeorológicas. E isto porque, em geral, os conceitos da Suportabilidade ainda não são amplamente utilizados nas fases iniciais de desenvolvimento do produto, gerando consequências nas fases posteriores de operação e manutenção.

Alguns problemas comuns observados e relatados em muitas organizações na fase de operação dos sistemas são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Problemas comuns encontrados da fase de operação dos sistemas.

Item	Descrição do problema
1	Altos custos de operação e manutenção dos sistemas
2	Dificuldade de diagnóstico das falhas dos sistemas
3	Altos tempos de manutenção
4	Dificuldades logísticas
5	Falta de treinamento de pessoal
6	Problemas com fornecedores
7	Os problemas com a empresa de manutenção e fornecedores não são registrados ou quantificados
8	Não é realizada a coleta e registro dos dados e falhas ou o registro é realizado de forma manual
9	Falta <i>feedback</i> sobre a solução das ações corretivas
10	Não há validação após a ação corretiva para encerrar a falha encontrada. O processo não fecha o ciclo.
11	Não há rapidez para obter um relatório de falhas de campo que possam apresentar os principais riscos, custos e oportunidades de melhoria
12	Não há processos padronizados para as ações tomadas quando uma falha é registrada
13	Não há banco de dados, ou os bancos de dados geram relatórios de difícil visualização, os dados são fragmentados, difíceis de localizar e rastrear

Esses problemas podem influenciar no aumento dos custos operacionais.

A Figura 4.1 apresenta um modelo da visibilidade do custo no ciclo de vida do produto. Como é possível observar, as maiores parcelas destes custos são ocultas; e aproximadamente 70% do total são determinados nas fases iniciais de concepção do projeto (BATTAGLIA, 2010). Ainda, segundo Battaglia (2010), a maior porcentagem dos custos não visíveis está associada particularmente à operação e suporte do sistema, freqüentemente esquecidos durante as fases iniciais de desenvolvimento, onde o foco é geralmente associado aos custos de aquisição e desenvolvimento.

Figura 4.1 – Visibilidade do custo no ciclo de vida do produto.



Fonte: Adaptado de Battaglia (2010).

As Plataformas de Coleta de Dados ambientais (PCDs) do sistema brasileiro CEMADEN foram escolhidas como estudo de caso devido à disponibilidade de dados históricos de campo e pela similaridade de operação com as redes de PCDs operadas pelo Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais do INPE (SBCDA), constituído pelos satélites do programa CBERS e pelas diversas plataformas de coleta de dados espalhadas pelo território nacional (<http://sinda.crn.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/sobre.php>). Assim, os resultados obtidos neste trabalho são também aplicáveis às plataformas de coleta de dados do INPE e a todos os sistemas aeroespaciais.

A análise desses dados obtidos permitirá realizar o mapeamento das falhas e das ações de manutenção das estações pluviométricas.

Além disso, O CEMADEN possui um banco de dados históricos com os tempos até a falha e de inatividade de cada PCD instalada. Uma amostra desses dados será utilizada para estimar a Confiabilidade e a Manutenibilidade do sistema.

Assim, o mapeamento das falhas, das ações de manutenção, a análise da Confiabilidade e da Manutenibilidade das PCDs, em conjunto com o conceito de Suportabilidade utilizado nas indústrias de defesa e espacial, permitirão sugerir melhorias ao processo de manutenção e definir as atividades apropriadas para a melhoria do suporte e manutenção da rede do sistema.

Os problemas descritos acima justificam a aplicação dos conceitos de Suportabilidade no ciclo de vida do sistema.

Outro problema a ser tratado refere-se à obsolescência dos equipamentos. Tendo em vista o tempo de operação das PCDs, novas tecnologias são desenvolvidas e a substituição dos equipamentos pode se tornar necessária. A análise da Suportabilidade é um processo aplicável tanto ao produto na fase de operação, quanto ao desenvolvimento ou à aquisição de novos produtos.

4.2 Abordagens para sua solução

Neste trabalho, a abordagem usada para a solução do problema é a apresentação de um processo aplicável a sistemas aeroespaciais que englobam os 3 processos da análise da Suportabilidade (projetar para o suporte, projetar o suporte, suportar o projeto).

Logo, existe a necessidade de se conhecer o sistema do estudo de caso, seus subsistemas, componentes, política de manutenção e sua operação. Portanto, como seqüência deste trabalho, propõe-se descrever o sistema do estudo de caso, a política atual de manutenção e operação, analisar dados para mapear as falhas, ações atuais de manutenção, e realizar a análise da amostra de dados de vida para estimar a Confiabilidade e a Manutenibilidade, o desempenho do processo de manutenção e monitorar as falhas.

Como parte do detalhamento do processo atual de manutenção e operação das PCDs, serão realizados os seguintes passos:

- Descrição da política atual de manutenção e operação das PCDs do estudo de caso;

- Mapeamento das falhas e ações de manutenção realizadas nas PCDs nos últimos anos, através da coleta e tratamento dos dados históricos.
- Levantamento de uma amostra dos dados históricos de operação das PCDs, análise dos tempos até a falha e tempos de inatividade, análises da Confiabilidade e Manutenibilidade, para visibilidade e monitoramento do desempenho do sistema.

Somente com o entendimento adequado dos mecanismos da falha, por meio da modelagem dos dados de falha, é que a manutenção e o suporte podem ser desenvolvidos de forma adequada. Conforme apresentado por Kumar (2000), uma vez que uma boa Manutenção consegue melhorar a Confiabilidade, é possível sentir os reflexos na Disponibilidade, sendo que ambas têm uma variável em comum, o MTBF (*Mean Time Between Failures*). O MTBF compõe o cálculo de Disponibilidade e Confiabilidade. Portanto, se a manutenção atuar com foco na elevação do MTBF, ambos os indicadores podem se elevar.

5 DESCRIÇÃO DO PROCESSO ATUAL DE MANUTENÇÃO, MAPEAMENTO DAS FALHAS E DAS AÇÕES DE MANUTENÇÃO DAS PCDS DO CEMADEN

5.1 Introdução

O objetivo deste Capítulo é descrever o processo atual, apresentar um mapeamento das falhas e das ações de manutenção das estações pluviométricas do estudo de caso. Após a coleta e o tratamento dos dados históricos, o diagrama de Pareto é utilizado para quantificar e classificar as causas dos eventos, ilustrando as frequências dos tipos de falha ou defeito e as ações de manutenção correspondentes.

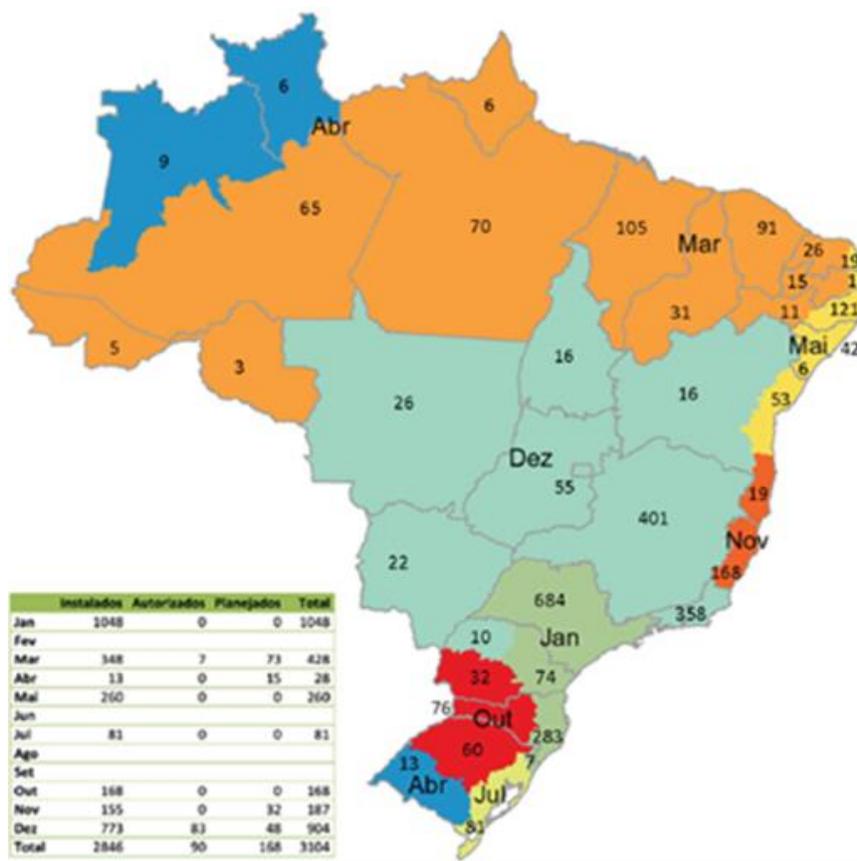
De acordo com Moraes et al. (2016a), o CEMADEN tem como missão realizar o monitoramento, previsão e alertas de eventos hidrológicos críticos aos municípios vulneráveis a inundações e suscetíveis à ocorrência de desastres naturais; e é responsável pela gestão das manutenções preventivas e corretivas das suas Plataformas de Coleta de Dados (PCDs). O serviço de manutenção das PCDs tem por objetivo manter a rede de monitoramento em estado operacional, enviando informações confiáveis e em tempo real ao CEMADEN.

As PCDs são instaladas ao longo do território nacional em ambientes severos e suscetíveis a intempéries. Durante sua operação e vida útil, falhas e danos são coletados e registrados pela equipe de manutenção preventiva e corretiva. As PCDs são sistemas fundamentais nas redes de monitoramento hidrometeorológico nacional, capazes de realizar a transmissão automática e em tempo real dos dados ambientais.

Em 2016, o CEMADEN possuía 2846 PCDs espalhadas em todo o território nacional. Mais 90 estavam autorizadas, e mais 168 estavam planejadas. Nos últimos seis anos (entre 2014 e 2019), foram registradas cerca de 9000 inspeções de manutenção por falhas previstas ou ocorridas nas PCDs pela equipe de manutenção contratada pelo CEMADEN.

A Figura 5.1 indica a localização e quantidade das plataformas instaladas no Brasil.

Figura 5.1 – Localização e quantidade das plataformas instaladas no Brasil.



Fonte: Moraes et al. (2016a).

5.2 Descrição do processo atual de manutenção das PCDs do CEMADEN

De acordo com Moraes et al. (2016b), a operação e manutenção das plataformas de coleta de dados do CEMADEN é realizada conforme o seguinte processo:

As PCDs são gerenciadas por uma equipe técnica pertencente à instituição, a qual é responsável por: monitorar a qualidade dos dados ambientais recebidos remotamente; gerenciar os equipamentos instalados em campo e o estoque de peças de reposição; realizar o planejamento da manutenção, definindo calendários e prioridades nas atividades de campo; além de fiscalizar a

empresa contratada na execução do contrato de prestação de serviços de manutenção em campo.

O processo atual de manutenção da rede de PCDs envolve as atividades de limpeza, teste, reconfiguração e substituição de componentes; e pode ser dividida entre manutenção preventiva, manutenção corretiva (regular ou emergencial), e remoções.

A manutenção preventiva das PCDs é realizada em intervalos de tempo pré-programados com o intuito de prevenir falhas da rede de PCDs. O planejamento é realizado primeiramente pela equipe técnica que estabelece um calendário para as visitas a campo, que fornece um cronograma anual contando o período mais propício à manutenção das PCDs por região, considerando o período das chuvas.

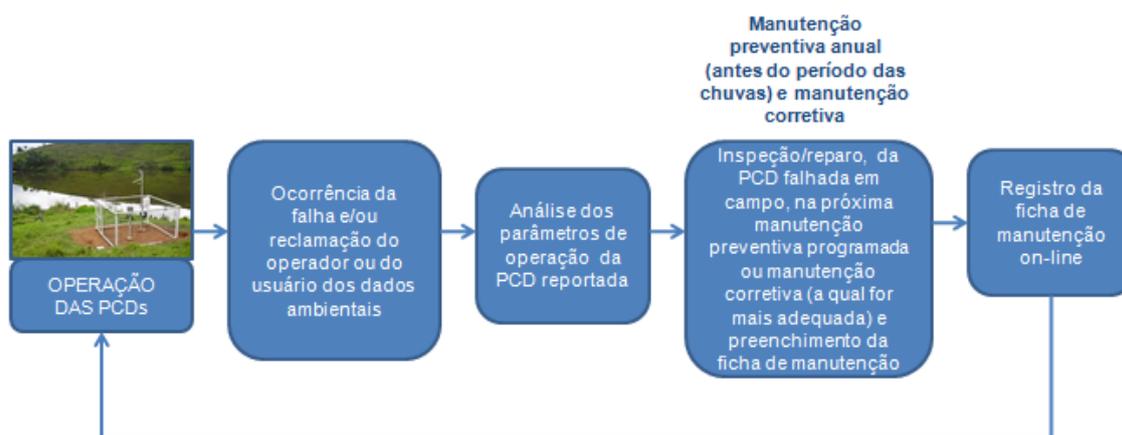
Espera-se que, através de contratação, a manutenção preventiva seja realizada em intervalos de 12 meses ou bianual para cada PCD, e planejadas para cada região do território nacional antes do período das chuvas. Os registros de manutenção são feitos no Relatório de Manutenção das PCDs pluviométricas. Como as condições de operação podem ser mais agressivas para determinadas PCDs (acúmulo de sujeira, folhagem, sombreamento do painel, etc.), é realizado em paralelo um controle de qualidade dos dados e monitoramento remoto da saúde das PCDs (através dos dados remotos de manutenção) quando há acionamento pelo operador (até alertado por um usuário). O operador pode indicar uma redução no intervalo de manutenção preventiva para algumas PCDs que apresentarem condições adversas de operação.

Parâmetros de operação, tais como tensão da bateria, corrente do painel solar, etc., são disponibilizados; entretanto, não é realizada nenhuma ação proativa sobre os parâmetros fora dos limites. Não há algoritmo sistemático para detecção das falhas através dos parâmetros, sendo estas analisadas caso a caso quando algum operador reporta problemas ou ausência dos dados ambientais para monitoramento dos desastres naturais.

A manutenção corretiva das PCDs é realizada quando não é possível aguardar até a próxima manutenção preventiva.

O processo atual de manutenção e registro dos dados de manutenção e das falhas encontradas nas manutenções preventivas das PCDs é realizado conforme o fluxo apresentado na Figura 5.2. As fichas de manutenção são preenchidas manualmente nas visitas ao campo. Não há algoritmo para análise sistemática dos dados de manutenção.

Figura 5.2 – Processo atual de manutenção e coleta de dados de manutenção e falhas.



A manutenção das PCDs do CEMADEN baseia-se nos seguintes documentos:

- **Contrato de Serviços de Manutenção de Plataformas de Coleta de Dados Pluviométricos** (MORAES et al., 2016a) pertencentes à rede de monitoramento ambiental do CEMADEN, incluindo suporte logístico com fornecimento de materiais. O Contrato de serviços de manutenção descreve a prestação do serviço de manutenção de plataformas de coleta de dados pluviométricos.

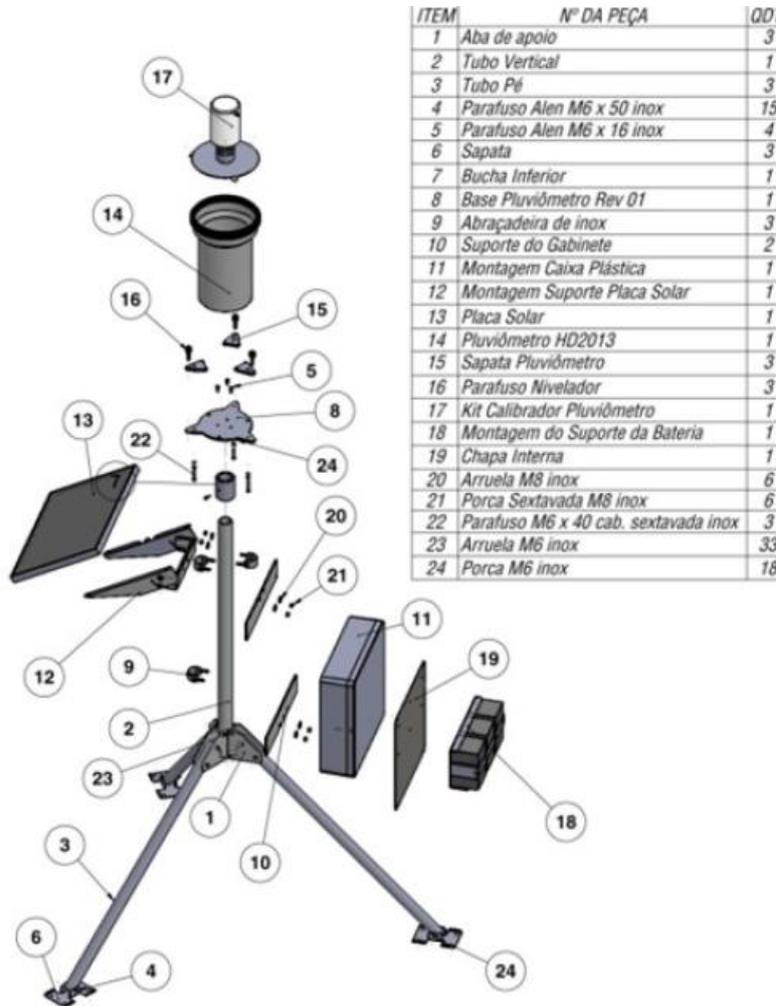
São necessários serviços de logística de campo, comparecendo aos locais de instalação dos instrumentos para executar limpeza, reparo e reconfiguração, entre outras atividades complementares.

- **Especificações Técnicas da Operação da Rede Hidrológica** (MORAES et al., 2016b). Este documento especifica os serviços técnicos de operação e manutenção de estações hidrológicas. No processo de manutenção atual, a relação de serviços inclui a manutenção programada, manutenção corretiva/emergencial e as remoções.

A **manutenção programada** no processo de manutenção do estudo de caso pode ser compreendida como sendo a manutenção preventiva e corretiva planejadas. **A manutenção emergencial** no processo de manutenção é compreendida como sendo a manutenção corretiva não planejada. Esta manutenção tem como objetivo atender/restabelecer um equipamento baseado nas necessidades do CEMADEN. **A remoção** de uma estação pelo processo de manutenção é caracterizada pela desinstalação de um equipamento em campo e envio para a sede.

A Figura 5.3 mostra a estrutura de uma plataforma de coleta de dados e seus componentes.

Figura 5.3 – Estrutura de uma PCD e seus componentes.



Fonte: Moraes et al. (2016a).

5.3 Mapeamento das falhas e ações de manutenção das PCDs do CEMADEN entre os anos de 2014 e 2019.

A abordagem usada se baseia em: 1) coletar dados históricos das manutenções preventivas e corretivas das PCDs do estudo de caso; 2) tratá-los; e 3) usar o diagrama de Pareto para classificá-las.

1º. Passo: Os dados apresentados foram coletados dos registros das manutenções realizadas entre os anos de 2014 e 2019, totalizando aproximadamente 9000 inspeções em 2846 plataformas de coleta de dados

instaladas ao longo do território nacional.

A Figura 5.4 apresenta um extrato da planilha de trabalho com os dados brutos dos registros de manutenção das PCDs.

2º. Passo: Os dados históricos coletados não permitiam uma análise quantitativa satisfatória. Foi necessário realizar o tratamento dos dados para padronizar e parametrizar os tipos de falhas e ações de manutenção.

O tratamento dos dados foi baseado nas seguintes informações:

- Código da estação pluviométrica;
- Data da manutenção;
- Diagnóstico com o registro das falhas encontradas em cada inspeção;
- Ações de manutenção realizadas na data da inspeção.

Após a fase de entendimento e padronização dos dados históricos, foram listadas e quantificadas as falhas e as ações de manutenção. Através destes dados, foi possível construir diagramas de Pareto com os dados entre 2014 e 2019.

O diagrama de Pareto é a representação gráfica dos problemas do processo na ordem de classificação do mais freqüente ao menos freqüente. É utilizado quando se deseja priorizar problemas ou ações relativas a um determinado tema.

A análise da curva da porcentagem acumulada pode ser útil para a definição de quantos tipos de falhas e ações de manutenção devem ser priorizadas, para que seja possível atingir certo objetivo de resultado.

3º. Passo: os dados foram categorizados e organizados em quatro colunas: causa das falhas, número de ocorrências, porcentagem que as ocorrências representam no total, e porcentagem acumulada. Após lançar todas as informações nas colunas, o número de ocorrências foi organizado do maior para o menor.

5.4 Resultados e discussão do mapeamento das falhas e ações de manutenção das PCDs do CEMADEN entre os anos de 2014 e 2019

Através dos dados históricos de manutenção das PCDs, foi possível realizar o tratamento de dados e construir diagramas de Pareto com as principais falhas

e ações de manutenção ocorridas entre os anos de 2014 e 2019.

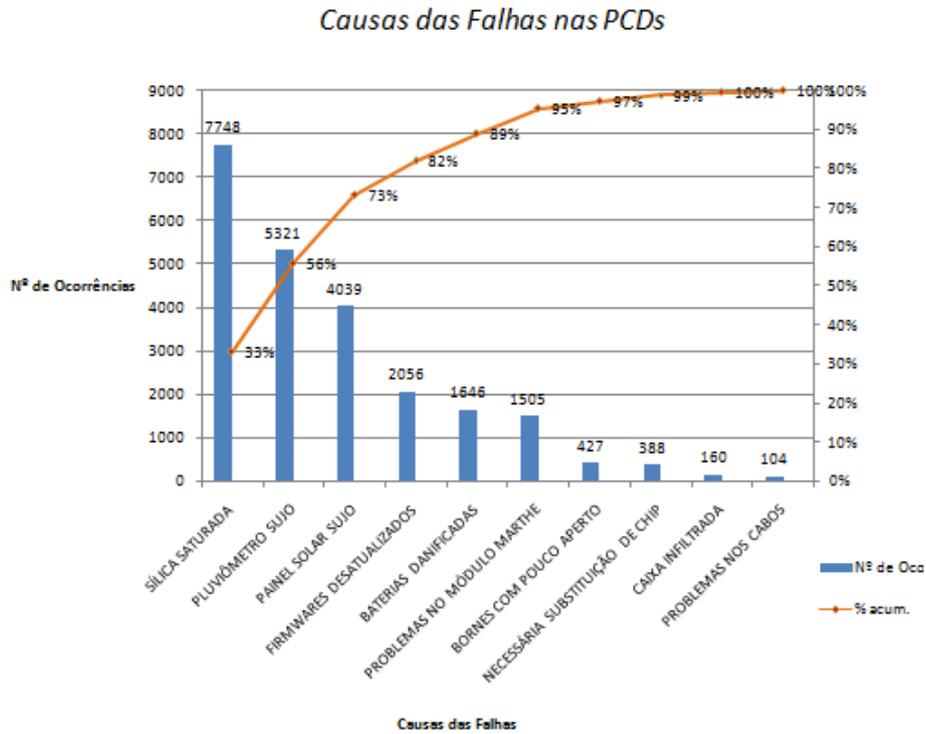
A Figura 5.5 apresenta a categorização das 10 principais causas das 23394 falhas encontradas nas 2846 PCDs durante aproximadamente 9000 inspeções e 36340 ações de manutenção entre os anos de 2014 e 2019.

Figura 5.5 – Categorização das falhas das PCDs.

Causas das Falhas	Nº de Ocorrências	% Total	% acum.
SÍLICA SATURADA	7748	33%	33%
PLUVIÔMETRO SUJO	5321	23%	56%
PAINEL SOLAR SUJO	4039	17%	73%
FIRMWARES DESATUALIZADOS	2056	9%	82%
BATERIAS DANIFICADAS	1646	7%	89%
PROBLEMAS NO MÓDULO MARTHE	1505	6%	95%
BORNES COM POUCO APERTO	427	2%	97%
NECESSÁRIA SUBSTITUIÇÃO DE CHIP	388	2%	99%
CAIXA INFILTRADA	160	1%	100%
PROBLEMAS NOS CABOS	104	0%	100%
Total de Ocorrências	23394		

O diagrama de Pareto com as 10 principais causas das 23394 falhas nas 2846 PCDs durante aproximadamente 9000 inspeções e 36340 ações de manutenção entre os anos de 2014 e 2019 é mostrado na Figura 5.6. Nota-se que as seis primeiras falhas: sílica saturada, pluviômetro sujo, painel solar sujo, firmwares desatualizados, baterias danificadas e problemas no módulo Marthe, corresponderam a aproximadamente 95% das falhas ocorridas no período.

Figura 5.6 – Diagrama de Pareto com as causas das falhas das PCDs.



A Figura 5.7 apresenta a categorização em 16 principais tipos das 36340 ações de manutenção durante aproximadamente 9000 inspeções realizadas nas 2846 PCDs entre os anos de 2014 e 2019.

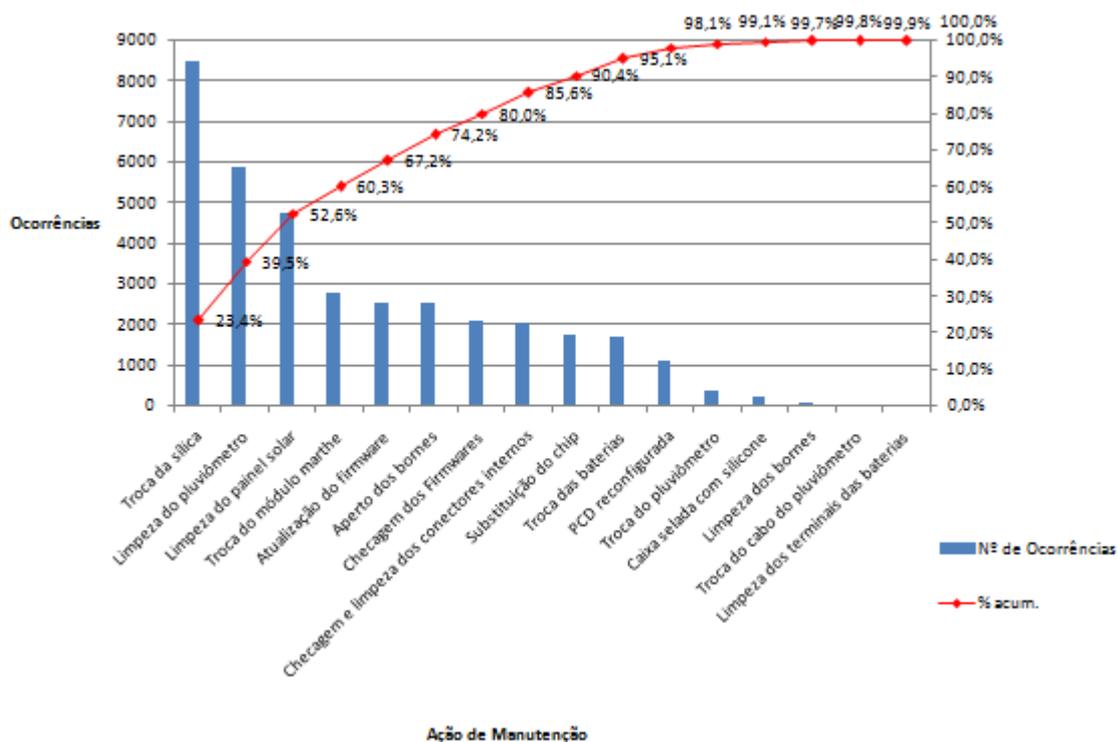
Figura 5.7 – Categorização das ações de manutenção nas PCDs.

Ação de Manutenção	Nº de Ocorrências	% Total	% acum.
Troca da sílica	8497	23,4%	23,4%
Limpeza do pluviômetro	5862	16,1%	39,5%
Limpeza do painel solar	4766	13,1%	52,6%
Troca do módulo marthe	2777	7,6%	60,3%
Atualização do firmware	2535	7,0%	67,2%
Aperto dos bornes	2532	7,0%	74,2%
Chechagem dos Firmwares	2100	5,8%	80,0%
Chechagem e limpeza dos conectores in	2042	5,6%	85,6%
Substituição do chip	1752	4,8%	90,4%
Troca das baterias	1690	4,7%	95,1%
PCD reconfigurada	1105	3,0%	98,1%
Troca do pluviômetro	356	1,0%	99,1%
Caixa selada com silicone	207	0,6%	99,7%
Limpeza dos bornes	58	0,2%	99,8%
Troca do cabo do pluviômetro	34	0,1%	99,9%
Limpeza dos terminais das baterias	27	0,1%	100,0%
Total de Ocorrências	36340		

O diagrama de Pareto com os 16 principais tipos das 36340 ações de manutenção realizadas durante aproximadamente 9000 inspeções nas 2846 PCDs entre os anos de 2014 e 2019 é mostrado na Figura 5.8.

Figura 5.8 – Ações de Manutenção nas PCDs.

Ação de Manutenção nas PCDs



Nota-se que as sete principais ações de manutenção: troca da sílica, limpeza do pluviômetro, limpeza do painel solar, troca do módulo Marthe, atualização do *firmware*, aperto dos bornes e checagem dos *firmwares* corresponderam em torno de 80% das ações de manutenção ocorridas no período.

A análise de um grande volume de dados brutos como os apresentados neste estudo de caso pode tornar-se um desafio. As planilhas com os extratos dos registros de manutenção, embora ricos em conteúdo informativo, apresentavam dados não estruturados. Diante deste cenário, foi necessário um processamento que consistiu na preparação dos dados para a análise (filtragem, padronização, separação e agrupamento dos dados). Após o processamento dos dados, ainda foi necessário estabelecer uma forma de visualização dos resultados de forma a explicitar as informações relevantes obtidas. O diagrama de Pareto foi o método utilizado para extrair informações deste grande conjunto de dados e transformá-lo em uma estrutura compreensível e de rápida visualização dos resultados.

O diagrama de Pareto mostrou que 95% do total das ocorrências estão relacionadas a seis tipos de falhas e 80% das ações de manutenção realizadas no período concentram-se em sete atividades, permitindo desta forma a priorização das ações e recursos.

Uma proposta para trabalhos futuros envolve o desenvolvimento de uma nova ficha de manutenção com a parametrização das principais falhas observadas e o estabelecimento de referências cruzadas entre a falha apresentada e ação de manutenção realizada e a severidade da falha. Outra proposta seria desenvolver uma ferramenta *online* (aplicativo) para coleta, registro e posterior análise dos dados de manutenção. Neste aplicativo poderiam ser acrescentadas informações sobre o tempo que ocorreu a falha, estabelecendo desta forma dados para o cálculo do MTBF (*Mean Time Between Failures*).

As seções anteriores podem ser complementadas com uma Análise da Manutenibilidade de uma amostra das PCDs do CEMADEN. Esta será realizada no Capítulo 7, por utilizar dados e tratamentos complementares aos do Capítulo 6.

6 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE UMA AMOSTRA DAS PCDs DO CEMADEN AJUSTANDO PDFs WEIBULL AOS SEUS DADOS DE VIDA

A análise estatística dos dados de vida de um sistema, equipamento, componente, etc., fornece uma ferramenta útil para sua estimativa da Confiabilidade, ações de manutenção, avaliação de risco, etc. Muitas funções densidade de probabilidade padrão (pdfs), especialmente pdfs Weibull, são utilizadas para esta finalidade, geralmente ordenadas pela qualidade do ajuste a estes dados. Portanto, este Capítulo apresenta uma análise da Confiabilidade de uma amostra das plataformas de coleta de dados (do sistema brasileiro CEMADEN), ajustando as pdfs Weibull a uma amostra dos seus dados de vida. Isto inclui: 1) a análise da literatura relacionada e seus antecedentes matemáticos; 2) o detalhamento do seu método de tratamento e análise dos dados; 3) mostrar os resultados (incluindo as pdfs Weibull com dois parâmetros de melhor ajuste) e suas discussões; e 4) apresentar algumas conclusões. As conclusões podem ser aplicadas à melhoria da Suportabilidade e ao gerenciamento do ciclo de vida das PCDs e de outros sistemas.

6.1 Introdução e objetivos deste Capítulo

Blanchard (2016), em seu trabalho, aborda os conceitos gerais de Confiabilidade, ou seja, a probabilidade de que um sistema, equipamento, componente, etc., execute sua missão exigida de forma satisfatória, em um determinado intervalo de tempo, quando utilizado sob condições operacionais específicas.

Uma estimativa da Confiabilidade do sistema é freqüentemente obtida através da análise estatística de amostras dos seus **dados de vida**. Muitas distribuições de probabilidade padrão são usadas para esta finalidade, geralmente ordenadas pela qualidade do ajuste a estes dados. Os resultados são úteis pois eles podem estimar a Confiabilidade desse sistema após sua instalação em um ambiente operacional, ao contrário de estimativas baseadas

em **manuais** ou mesmo obtidas através de **testes acelerados de vida**, que podem não refletir as condições reais de operação do componente.

Nas fases de operação e manutenção de um sistema, a análise estatística de amostras dos seus dados de vida pode fornecer informações preciosas e servir de entrada para outras análises, como a previsão de consumo de peças de reposição, melhoria do projeto, seleção da estratégia de manutenção, suprimentos e planejamento de custos.

Ao realizar análises de Confiabilidade, é possível fazer previsões sobre a vida de todas as unidades da população ajustando uma pdf (modelo) aos dados de vida de representantes da população (amostra) (RELIASOFT, 2015). Isto é um elemento chave para o seguinte:

A função básica de um sistema de plataformas de coleta de dados ambientais é fornecer aos usuários dados automáticos para o monitoramento hidrológico e alertas. A Confiabilidade do sistema fornece um papel importante no cumprimento dessa função principal. Além disso, o estabelecimento de um programa de manutenção bem sucedido, que pode reduzir o custo do ciclo de vida e aumentar a Disponibilidade do sistema, depende do conhecimento preciso da Confiabilidade do sistema e de seus componentes.

Portanto, este Capítulo apresenta uma análise da Confiabilidade de uma amostra das plataformas de coleta de dados do CEMADEN , ajustando as pdfs Weibull a uma amostra dos seus dados de vida. Isso visa: 1) estimar a Confiabilidade desse sistema ao longo dos anos; e 2) sugerir ações de manutenção para esse sistema.

6.2 Revisão da literatura relacionada aos objetivos deste Capítulo

Em relação ao objetivo 1, um dos principais usos da análise estatística, especialmente da análise de Weibull, é prever o número de ocorrências de um modo de falha de um sistema em função do tempo (ABERNETHY, 1983). Esta análise descreve as diferentes fases da vida de um sistema, geralmente caracterizadas pela “curva da banheira”: 1) falhas prematuras ($0 < \beta < 1$); 2)

falhas aleatórias ($\beta = 1$); e 3) falhas por desgaste ($1 < \beta$), de acordo com as alterações dos parâmetros β . Essa estimativa é importante porque fornece à gerência uma visão clara da magnitude potencial de um problema. Além disso, se essa estimativa de Confiabilidade for realizada com diferentes modos de falha, a gestão é capaz de definir a prioridade para a solução de cada problema (ABERNETHY, 1983).

Muitos autores descrevem a aplicabilidade das distribuições Weibull para modelos de Confiabilidade e discutem sobre os métodos ótimos para estimar seus parâmetros. Métodos para estimar parâmetros de Weibull como a Estimativa de Máxima Verossimilhança (MLE) e a Estimativa de Mínimos Quadrados (LSE) são profundamente discutidos na literatura. Por exemplo: Djeddi et al. (2015) propuseram análises qualitativas e quantitativas usando Confiabilidade operacional para a operação segura em instalações de óleo e gás, e usando distribuições Weibull com três parâmetros. Elmahdy (2014) propôs uma abordagem para modelar os dados de vida para componentes do sistema que possuem modos de falha por diferentes modelos Weibull, e os parâmetros foram obtidos por diferentes métodos estatísticos computacionais, como o método gráfico baseado no Gráfico de Probabilidade de Weibull (*Weibull Probability Plot* - WPP), a Estimativa de Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation* - MLE), estimadores de Bayes, Regressão Não Linear de Classificação de Medianas de Bernard (*Non-Linear Bernard's Median Rank Regression*). Pasha et al. (2006) fizeram uma pesquisa sobre a análise empírica da distribuição de Weibull para dados de falha e usou a Regressão de Classificação Mediana ou (*Median Ranking Regression* - MRR) como método de ajuste de dados.

Em direção ao objetivo 2, é evidente que os modelos de distribuição Weibull para eventos de falha e sua estimativa de parâmetros foram profundamente estudados e investigados. No entanto, de acordo com Sgarbossa et al. (2018), há uma lacuna sobre os efeitos da estimativa de parâmetros (como MTTF ou β) nos custos de manutenção preventiva, definidos por peças de reposição e recursos. A política de Manutenção Preventiva visa reduzir as falhas por meio de testes periódicos e substituição de peças sobressalentes relacionadas à

taxa de falhas.

De acordo com Kumar (1998), medidas de Confiabilidade operacional são usadas para prever o desempenho do sistema quando operado em um ambiente planejado, incluindo o efeito combinado do projeto, qualidade, ambiente, manutenção, suporte, etc. Medidas como o Tempo Médio entre Manutenções (MTBM), Tempo Médio entre Revisões (MTBO), etc, se enquadram nesta categoria.

Segundo Coetzee (1997), a análise de dados de falhas é um método importante no desenvolvimento de uma estratégia de manutenção para equipamentos. Isso normalmente é realizado através da análise probabilística dos dados de falha. Somente com o entendimento adequado dos mecanismos de falhas, por meio da modelagem dos dados de falhas, a manutenção pode ser desenvolvida de forma adequada.

6.3 Antecedentes matemáticos - noções básicas da distribuição Weibull

Souza e Carvalho (2005) sugerem várias funções (modelos) que são freqüentemente utilizadas para representar a probabilidade de falhas no tempo $t=T$. Sendo T uma variável aleatória contínua, a probabilidade de falhas no tempo $t=T$ possui uma densidade, também referida como Função Densidade de Probabilidade (*Probability Density Function* - pdf), no tempo $t=T$, $f(T)$, que no caso mais popular é a distribuição de Weibull de três parâmetros, de acordo com a eq. (6.1).

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (6.1)$$

, onde $T > 0$ representa o tempo de falha, $\gamma \in \mathbb{R}$ é o parâmetro de localização, $\beta > 0$ é o parâmetro de forma e $\eta > 0$ é o parâmetro de escala da distribuição. A equação (6.1) é geralmente referida como **distribuição Weibull de 3 parâmetros**. A função densidade de probabilidade no tempo $t = T$, denotada por $f(T)$, permite a determinação das probabilidades de falha ao longo de um período de tempo.

A probabilidade de falhas até o tempo $t=T$, também referida como Função de Distribuição Cumulativa (*Cumulative Distribution Function* – cdf) $F(T)$, Não-Confabilidade $Q(T)$, no tempo $t = T$, pode ser integrada da Equação (6.1) e é expressa como:

$$F(T) = Q(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (6.2)$$

A Taxa Relativa de Falhas no tempo $t=T$ correspondente é:

$$\lambda(T) = \frac{f(T)}{R(T)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (6.3)$$

Assim, a Confiabilidade no tempo $t=T$ é:

$$R(T) = 1 - F(T) = 1 - Q(T) = e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (6.4)$$

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), a distribuição Weibull é amplamente utilizada por ser uma distribuição bastante flexível, caracterizando-se pela capacidade de modelar vários tipos de dados de tempos de falhas, especialmente com $\gamma = 0$, a distribuição de dois parâmetros.

6.4 Taxa relativa de falhas e “Curva da Banheira”

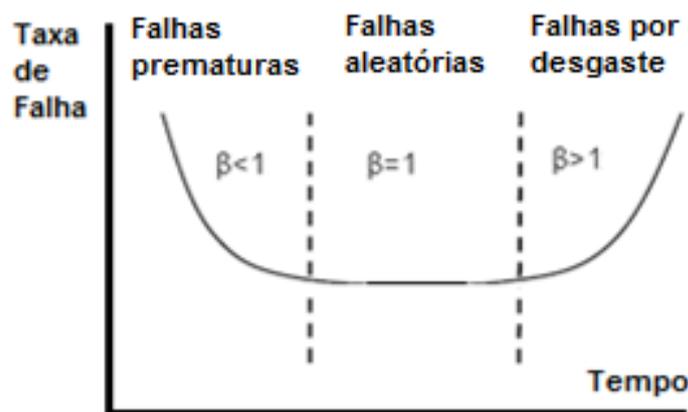
Souza e Carvalho (2005) apresentam a Taxa Relativa de Falhas em seus trabalhos. A partir de um ambiente operacional previamente definido, o sistema composto por N_0 unidades idênticas está em operação. O número de componentes operando no início de cada intervalo de tempo foi anotado N_0 , operando em t_0 . No final do intervalo Δt , no tempo $t = t_0 + \Delta t$, várias unidades com falha podem ser observadas e chamadas de N_F . Assim, a taxa relativa de falhas nesse intervalo é definida como:

$$\text{Failure Rate} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} E\left(\frac{N_F}{N_0 \Delta t}\right) = \lambda(t) \quad (6.5)$$

Pode-se esperar que os resultados dos dados de tempo de vida tenham o caráter geral de uma “curva da banheira”.

Segundo Nelson (1985), a distribuição Weibull é freqüentemente usada na análise de vida do produto porque descreve o aumento e a diminuição das taxas de falhas. **A distribuição Weibull de dois parâmetros ($\gamma = 0$) requer valores de vida característica (η) e fator de forma (β).** Conforme apresentado na seção 6.2, Beta (β) determina a forma da distribuição. Se β for maior que 1, a taxa relativa de falhas é crescente. Se β for menor que 1, a taxa relativa de falhas é decrescente. Se β for igual a 1, a taxa relativa de falhas é constante. A Figura 6.1 apresenta o efeito de β (parâmetro de forma) na "curva da banheira".

Figura 6.1 – Modos de falha e a "curva da banheira".



Fonte: Adaptado de Zhai et al. (2013).

Resumindo:

- $0 < \beta < 1$ indica falhas prematuras (λ decrescente);
- $\beta = 1$ indica falhas aleatórias (λ constante, independente do tempo);
- $\beta > 1$ indica falhas por desgaste (λ crescente).

Por outro lado, de acordo com Zhai et al. (2013), o parâmetro de escala η , as vezes também chamado de vida característica, representa o tempo típico de falha na análise de Weibull. Na análise de Weibull, η é definido como o momento em que 63,2% do produto terá falhado. Possui as mesmas unidades que t , por exemplo, horas, meses, ciclos. O parâmetro de forma é um número

puro sem unidade. Ele determina a forma da distribuição.

Sellitto (2005) sugere que é possível associar uma estratégia de manutenção para cada fase da curva da banheira. **Na fase de falhas prematuras ($0 < \beta < 1$)**, a taxa de falhas é decrescente. As falhas são causadas por erros de projeto, peças defeituosas, instalação incorreta, entre outros. Nesta fase, a estratégia é a **manutenção corretiva**, que corrige deficiências no projeto ou instalação do equipamento. Com a correção, **na fase de falhas aleatórias ($\beta=1$)**, ainda existem falhas devido a fatores que não são controláveis, tais como: erros humanos, sobrecarga, impactos, acidentes, matérias-primas ou operação incorreta. Nesta fase, a estratégia é a **manutenção preditiva**, baseada em inspeções e medições de parâmetros. Finalmente, **na fase de mortalidade senil ou de desgaste ($1 < \beta$)**, a taxa de falhas é crescente, causada por desgaste, corrosão, fim de vida e degradação mecânica. A estratégia é a **manutenção preventiva**, com a troca de peças e reparo de subsistemas.

6.5 Método de análise

A abordagem proposta neste Capítulo usa dados históricos de campo para coletar informações sobre o tempo até a falha do estudo de caso (uma amostra das PCDs do CEMADEN). O método utilizado neste estudo de caso será a modelagem quantitativa de sua pdf. Depois disso, baseado no comportamento de Confiabilidade do sistema, uma política de manutenção adequada pode ser selecionada. O modelo de distribuição usado para os dados de tempos até a falha será a distribuição Weibull de 2 parâmetros, por ser o modelo que mais se adequou aos dados.

As seguintes etapas serão seguidas para cumprir os objetivos deste Capítulo:

- Etapa 1: coleta e descrição dos dados.
- Etapa 2: análise preliminar e tratamento dos dados.
- Etapa 3: seleção do modelo.
- Passo 4: estimativa e adequação dos parâmetros.
- Etapa 5: seleção da estratégia de manutenção.

6.5.1 Coleta e descrição dos dados

Barabadi (2013) sugere que a coleta de amostras é um elemento decisivo na estimativa da Confiabilidade de um sistema ou componente. Além disso, todos os fatores que influenciam a Confiabilidade do componente (eficiência de manutenção, especialização técnica dos técnicos, ambiente operacional como temperatura, poeira, etc., modos de falhas) devem ser considerados durante a coleta de dados.

Neste Capítulo, a amostra consistiu de 60 diferentes PCDs, e retiradas do conjunto de dados original, usando seleção aleatória, correspondendo a aproximadamente 10% das (684 em Jan 2016, cf. a Figura 5.1) plataformas de coleta de dados ambientais instaladas no Estado de São Paulo. Para esta análise de Confiabilidade, foram utilizados os bancos de dados históricos de um período de cinco anos (de 2016 a 2020) obtidos a partir dos Relatórios de Operação e Manutenção das plataformas de coleta de dados ambientais do CEMADEN.

A escolha da amostra baseou-se nas seguintes premissas:

- 1) A população total de PCDs do CEMADEN distribuídas no Brasil é de 2846 unidades (Figura 6.1). O Estado de São Paulo é o estado brasileiro que mais possui PCDs instaladas, somando-se 684 unidades ativas. Para a análise dos dados de vida, foram escolhidas aleatoriamente 60 unidades da população do Estado de São Paulo, correspondendo a aproximadamente 10% da população deste Estado.
- 2) As PCDs instaladas em todo o território nacional integram uma ampla população. Amostras coletadas da população de diferentes Estados do Brasil poderiam representar diferentes ambientes operacionais, modos de falha, etc. Para evitar a influência dessas variáveis regionais e ambientais que afetam a Confiabilidade, as amostras foram selecionadas aleatoriamente da população do estado que possui o maior número de PCDs instaladas, ou seja, o Estado de SP.
- 3) O levantamento dos dados abrangeu um período de cinco anos, desde

2016, quando ocorreu o início dos registros de operação, até 2020. Os dados de operação foram organizados em planilhas criadas no *software* Microsoft Excel, com os tempos de operação até a interrupção da transmissão dos dados por falhas.

4) Os dados brutos analisados foram baseados nos Relatórios do Histórico Operacional obtidos dos bancos de dados das PCDs. A Figura 6.2 apresenta um extrato do Relatório de Operação com os tempos de operação de uma PCD. A Figura 6.3 apresenta um extrato do banco de dados com os tempos de operação de uma PCD.

Figura 6.2 – Um extrato do Relatório de Operação e Manutenção com os tempos de operação de uma PCD.



Relatório do histórico operacional
PCD: 350970004A / Bela Vista
UF / Município: SP / CAMPOS DO JORDÃO
Manutenções: exibindo
Período do histórico: de 02/07/2019 00:00 à 01/07/2020 12:02

Data / hora	Descrição	Informação adicional
22/06/2020 14:01	IAT 8 dias, 22 horas e 1 minuto	PCD não está transmitindo arquivos.
22/06/2020 13:07	<i>SUSP 54 minutos</i>	PCD atrasada na transmissão de arquivos.
22/06/2020 12:02	OPER 1 hora e 5 minutos	
16/06/2020 15:47	IAT 5 dias, 20 horas e 15 minutos	PCD não está transmitindo arquivos.
16/06/2020 14:58	<i>SUSP 48 minutos</i>	PCD atrasada na transmissão de arquivos.
16/06/2020 12:06	OPER 2 horas e 51 minutos	
15/06/2020 14:01	IAT 22 horas e 5 minutos	PCD não está transmitindo arquivos.
15/06/2020 13:11	<i>SUSP 49 minutos</i>	PCD atrasada na transmissão de arquivos.
15/06/2020 11:57	OPER 1 hora e 14 minutos	
09/06/2020 14:43	IAT 5 dias, 21 horas e 14 minutos	PCD não está transmitindo arquivos.
09/06/2020 13:54	<i>SUSP 48 minutos</i>	PCD atrasada na transmissão de arquivos.
09/06/2020 12:23	OPER 1 hora e 31 minutos	
07/06/2020 14:57	IAT 1 dia, 21 horas e 25 minutos	PCD não está transmitindo arquivos.
07/06/2020 14:08	<i>SUSP 49 minutos</i>	PCD atrasada na transmissão de arquivos.
07/06/2020 12:12	OPER 1 hora e 55 minutos	
02/06/2020 17:43	IAT 4 dias, 18 horas e 28 minutos	PCD não está transmitindo arquivos.
02/06/2020 16:56	<i>SUSP 47 minutos</i>	PCD atrasada na transmissão de arquivos.

Relatório do histórico operacional e de manutenção 01/07/2020 12:03 Página 1 de 9

Fonte: CEMADEN (2020).

Figura 6.3 – Um extrato do banco de dados com os tempos de operação de uma PCD.

PCD	Data/hora	Estado
170215801A	06/05/2017 18:03	Operacional
170215801A	06/05/2017 14:13	Inativa
170215801A	06/05/2017 13:23	Suspeita
170215801A	06/05/2017 12:18	Operacional
170215801A	06/05/2017 10:13	Inativa
170215801A	06/05/2017 09:28	Suspeita
170215801A	06/05/2017 08:17	Operacional
170215801A	06/05/2017 08:10	Inativa
170215801A	06/05/2017 07:22	Suspeita
170215801A	06/05/2017 05:43	Operacional
170215801A	06/05/2017 05:28	Suspeita
170215801A	06/05/2017 03:28	Operacional
170215801A	06/05/2017 03:23	Suspeita
170215801A	06/05/2017 01:37	Operacional
170215801A	06/05/2017 01:32	Suspeita
170215801A	05/05/2017 22:38	Operacional
170215801A	05/05/2017 22:28	Suspeita
170215801A	05/05/2017 17:21	Operacional
170215801A	05/05/2017 16:44	Suspeita
170215801A	05/05/2017 15:33	Operacional
170215801A	05/05/2017 15:27	Suspeita
170215801A	05/05/2017 13:46	Operacional
170215801A	05/05/2017 13:28	Suspeita
170215801A	05/05/2017 11:11	Operacional

Fonte: CEMADEN (2020).

5) O Relatório informa a data, hora e os tempos de cada PCD para os estados: operacional, suspeito e inativo. A descrição dos estados operacionais de cada PCD é descrito a seguir:

- OPERACIONAL: unidade transmitindo arquivos em tempo real.
- INATIVO: unidade não está transmitindo arquivos.
- SUSPEITO: unidade atrasada na transmissão de arquivos.

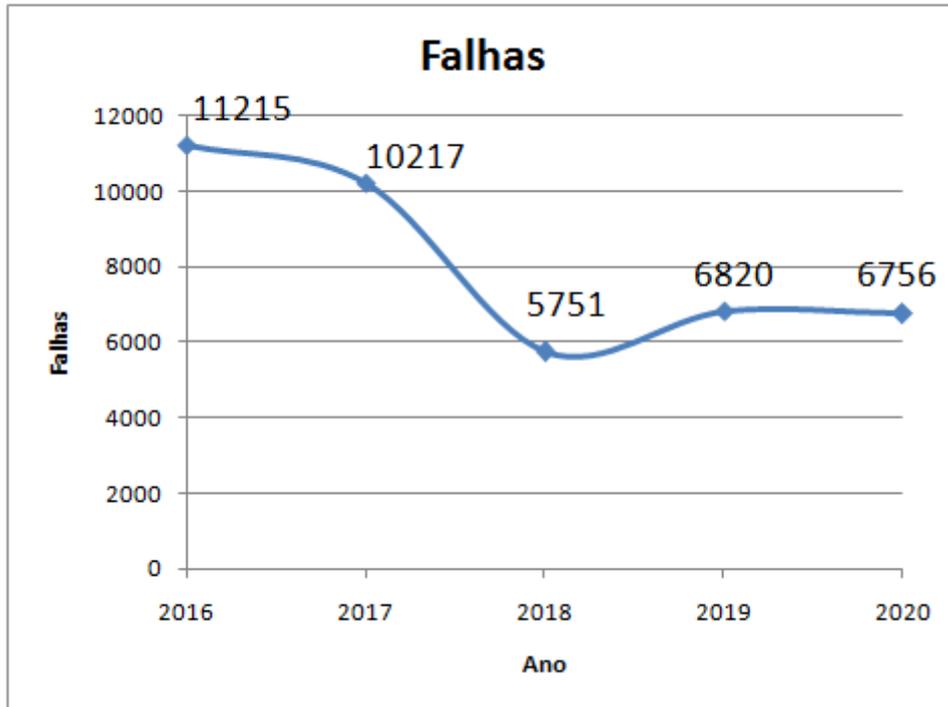
6) A PCD no estado operacional "suspeito" significa que está atrasada na transmissão de arquivos. A PCD entra em estado "inativo" após 2h sem transmitir arquivos.

7) No tratamento dos dados, foram considerados os tempos do estado operacional, excluindo-se os tempos dos estados "suspeito" e "inativo". Nesta análise levou-se em consideração os dados transmitidos chegando aos servidores do CEMADEN. Resumidamente, algum problema de transmissão dos arquivos pode ser: problemas nos chips de telefonia, problemas nas baterias, problemas no painel solar, etc. (Figura 5.5).

6.5.2 Variação anual do número de falhas e histogramas de frequência com os tempos até a falha

A Figura 6.4 apresenta uma visibilidade do número de falhas por ano da amostra selecionada (60 PCDs). É possível observar que entre 2016 e 2018, o número de falhas diminuiu continuamente; mas em 2019-2020, aumentou significativamente. O conjunto de dados do ano 2020 é parcial, relativo à seis meses.

Figura 6.4 – Variação anual do número de falhas das amostras de 60 PCDs.

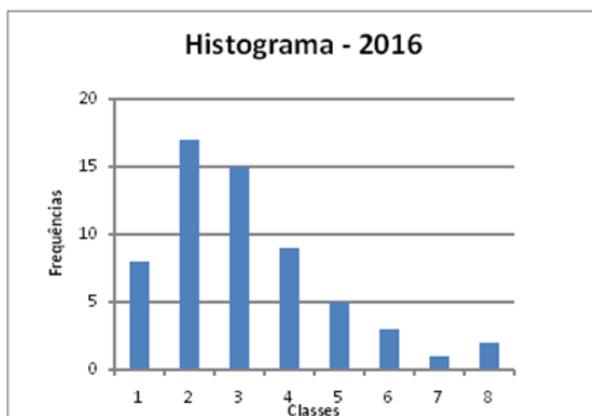


Os tempos até a falha de cada amostra foram organizados, agrupados e classificados. A densidade de falhas para um dado intervalo de tempo pode ser calculada e plotada num histograma de intervalos de falhas convencional, mostrando por forma, uma idéia inicial de qual modelo pode fornecer o melhor ajuste.

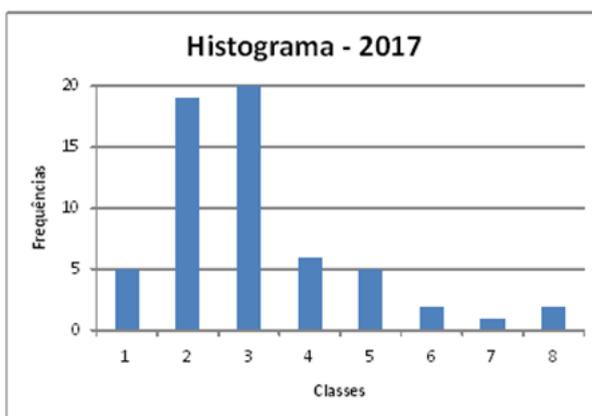
Para avaliar se o modelo é adequado, os gráficos dos histogramas das amostras das PCDs são apresentados na Figura 6.5. Os formatos dos histogramas sugerem a aplicação da distribuição Weibull de 2 parâmetros para os dados analisados.

O Apêndice C apresenta os tempos até a falha por ano das amostras coletadas do banco de dados histórico (de operação) das PCDs, após o tratamento dos dados brutos.

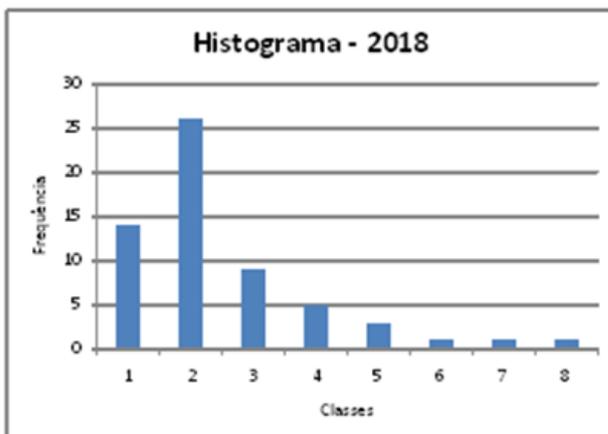
Figura 6.5 – Histogramas anuais (2016-2020) dos tempos até a falha (em horas) das amostras de 60 PCDs.



Classes	Min. (h)	Max.(h)	Frequência
1	5,0	27,6	8
2	27,6	50,3	17
3	50,3	73,0	15
4	73,0	95,6	9
5	95,6	118,3	5
6	118,3	141,0	3
7	141,0	163,6	1
8	163,6	186,3	2



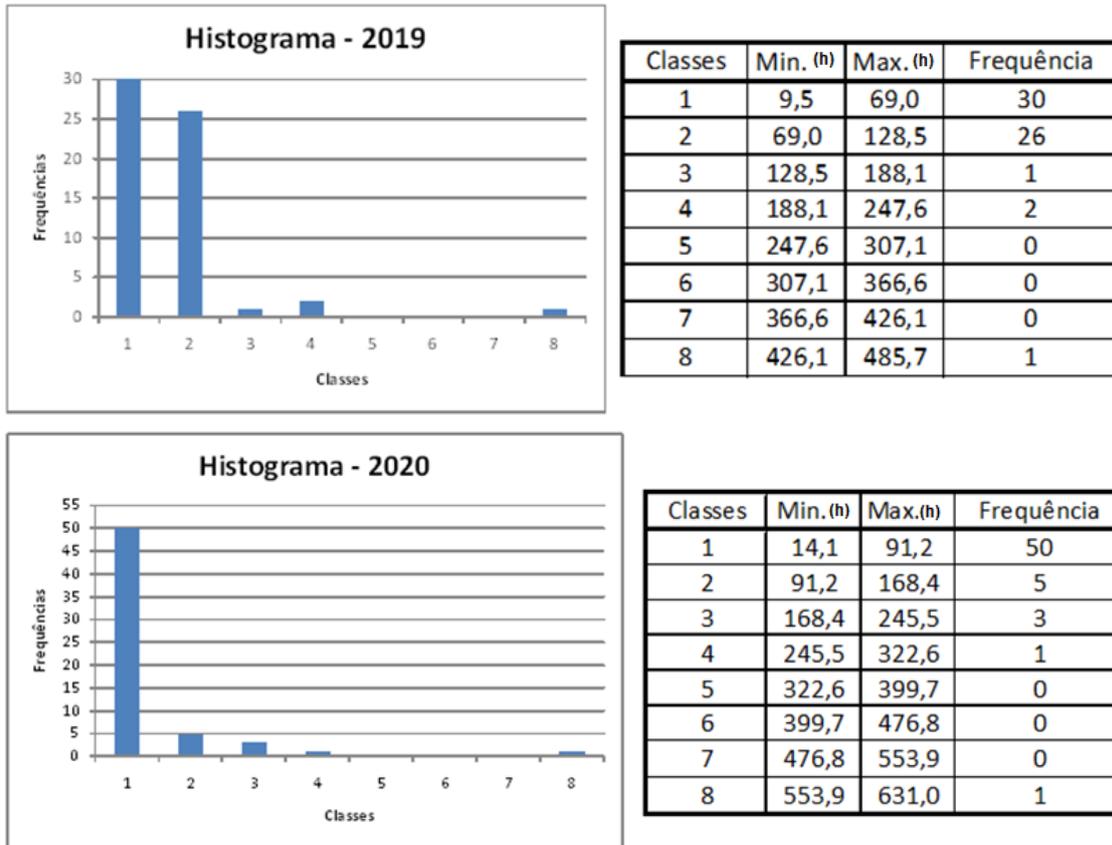
Classes	Min. (h)	Max.(h)	Frequência
1	3,3	27,0	5
2	27,0	50,8	19
3	50,8	74,5	20
4	74,5	98,3	6
5	98,3	122,0	5
6	122,0	145,8	2
7	145,8	169,5	1
8	169,5	193,3	2



Classes	Min. (h)	Max.(h)	Frequência
1	2,1	58,7	14
2	58,7	115,2	26
3	115,2	171,8	9
4	171,8	228,3	5
5	228,3	284,9	3
6	284,9	341,4	1
7	341,4	398,0	1
8	398,0	454,5	1

continua

Figura 6.5 - Conclusão.



6.5.3 Determinação dos parâmetros de Weibull

Kumar (2000) sugere vários métodos para adequar os valores de tempo de vida a uma distribuição. Este estudo mostrará um dos métodos mais frequentemente usados, o *Median Rank Regression* (MRR), que é bastante popular na indústria.

O primeiro passo para a estimativa dos parâmetros é linearizar a função de distribuição cumulativa $F(T)$ ou função de Não Confiabilidade ou (*Unreliability Function*) $Q(T)$. Para a distribuição Weibull de 2 parâmetros, ela é:

$$F(T) = 1 - e^{-kT^m} \quad (6.6)$$

Linearizando-se a função e tirando-se o logaritmo natural de ambos os lados da equação duas vezes, tem-se a equação de uma linha reta.

$$-\ln(1 - F(T)) = kT^m \quad (6.7)$$

$$\ln(-\ln(1 - F(T))) = \ln(k) + m \ln(T) \quad (6.8)$$

Considerando-se:

$$y = \ln(-\ln(1 - F(T))) \quad (6.9)$$

$$a = \ln(k), \quad b = m, \quad x = \ln(T) \quad (6.10)$$

Tem-se a equação de uma linha reta representada por $y = a + bx$.

Para a estimativa dos parâmetros, as seguintes fórmulas serão usadas:

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \bar{y} - \hat{b} \bar{x} \quad (6.11)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N}} \quad (6.12)$$

Onde \hat{a} e \hat{b} são os parâmetros estimados para a e b , respectivamente, \bar{y} e \bar{x} são as médias para os valores das amostras y_i e x_i , respectivamente, e N é o número de amostras. Dessa forma:

$$y_i = \ln(-\ln(1 - F(T_i))) \quad (6.13)$$

$$x_i = \ln(T_i) \quad (6.14)$$

O valor de $F(T_i)$ pode ser dado pelo estimador do *ranking* de medianas de acordo com a fórmula de Bernard, cujo i -ésimo valor é dado pela expressão:

$$r_i = \frac{i-0,3}{N+0,4} \quad (6.15)$$

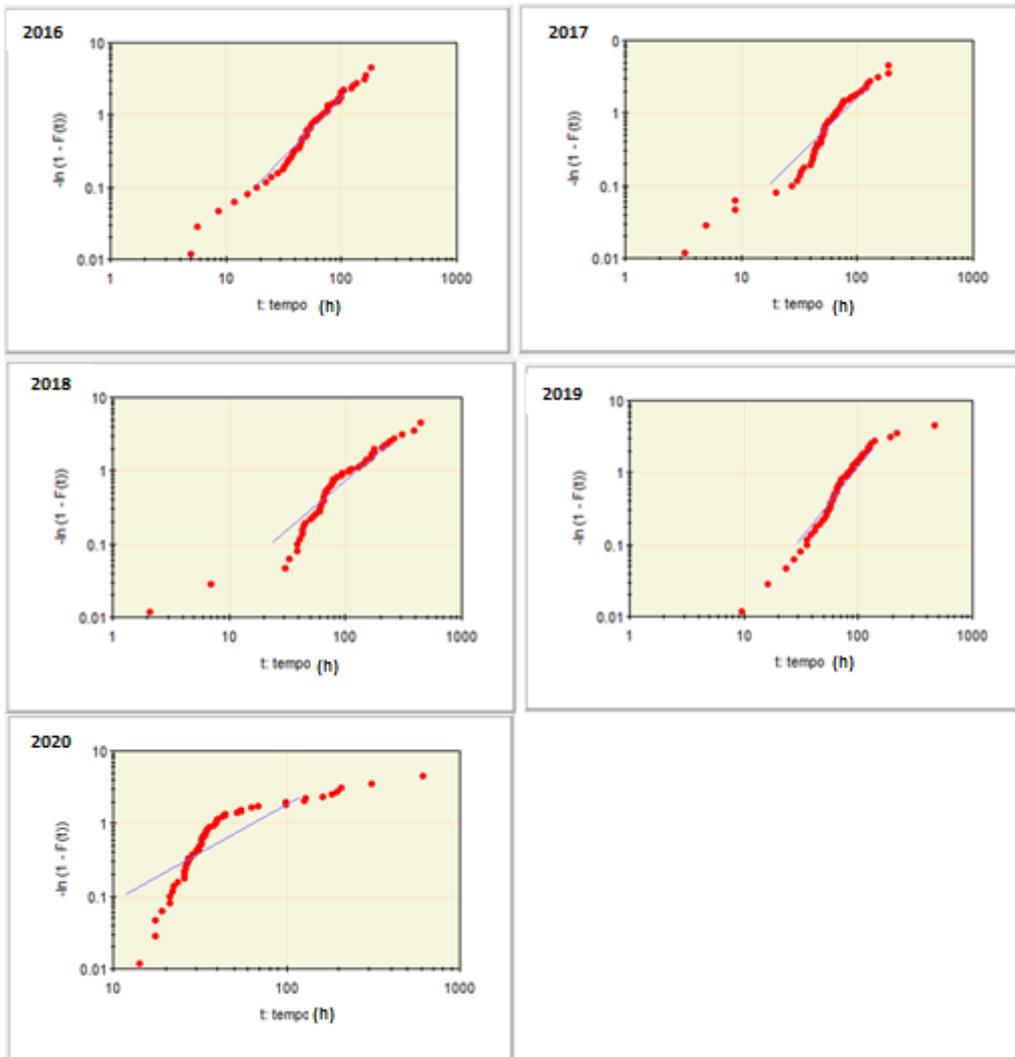
O *ranking* de medianas de Bernard é usado pois mostra o melhor desempenho e é o mais usado para estimar $F(T_i)$.

6.6 Discussão e resultados

As características de Confiabilidade de um item, como a probabilidade de falha, podem ser estimadas com o modelo de tempo até a falha apropriado. O software ProConf (FRITSCH E RIBEIRO, 1998) foi a ferramenta usada para analisar os dados de vida. O software calcula automaticamente os parâmetros β e η da distribuição Weibull e gera uma série de gráficos, como o da função densidade de probabilidade e o da Confiabilidade.

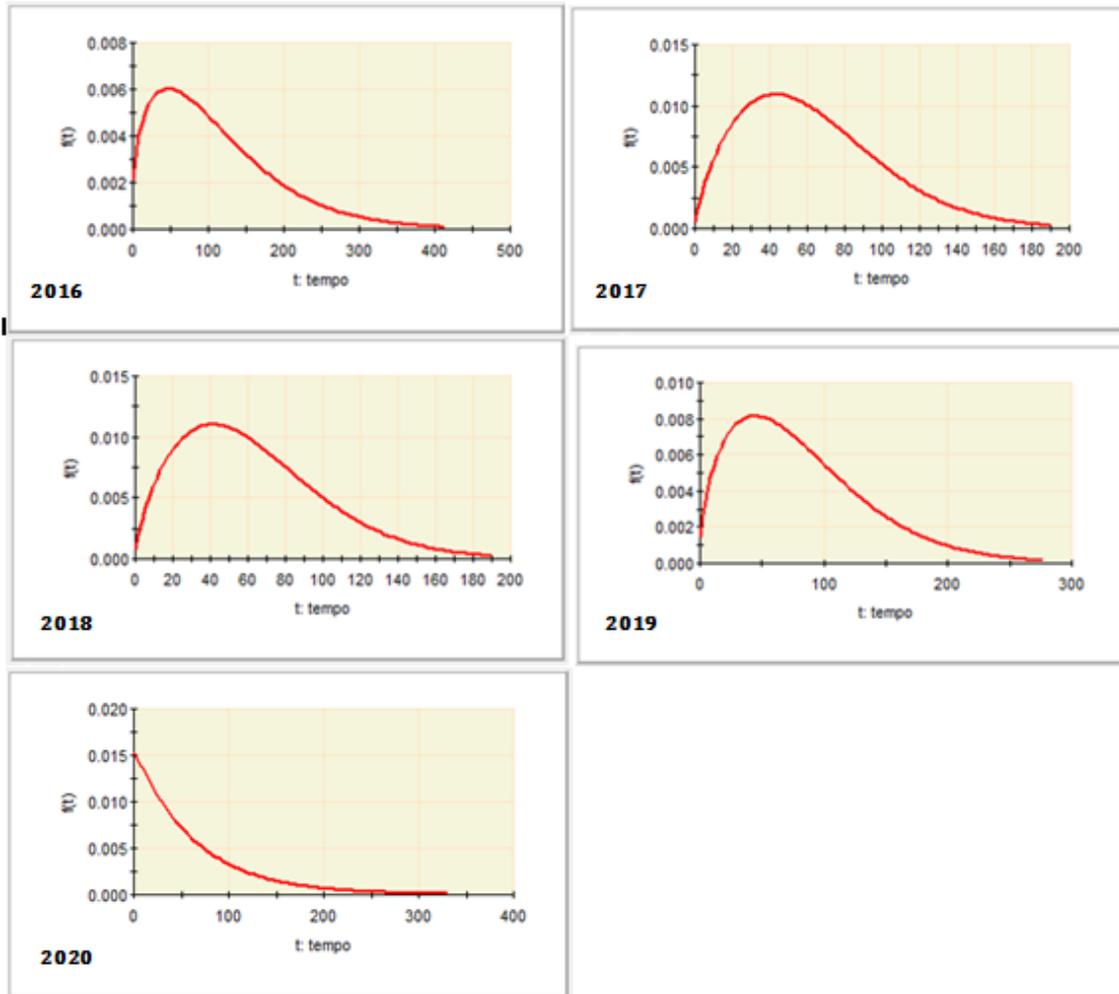
A análise pelos papéis de probabilidade, apresentados na Figura 6.6, confirma a distribuição Weibull como a melhor opção, pois os dados seguem a linha de tendência para esta distribuição com poucos desvios. Os papéis de probabilidade são um recurso gráfico para verificar a qualidade do ajuste de uma distribuição (FOGLIATTO E RIBEIRO, 2009). As escalas di-log são transformadas cf. as eqs. 6.6-6.14, de forma que a função densidade cumulativa da distribuição $F(t)$ utilizada seja representada por uma linha reta $y = a + bx$.

Figura 6.6 – Papel de probabilidade para a distribuição Weibull por ano, em 2016-2020.



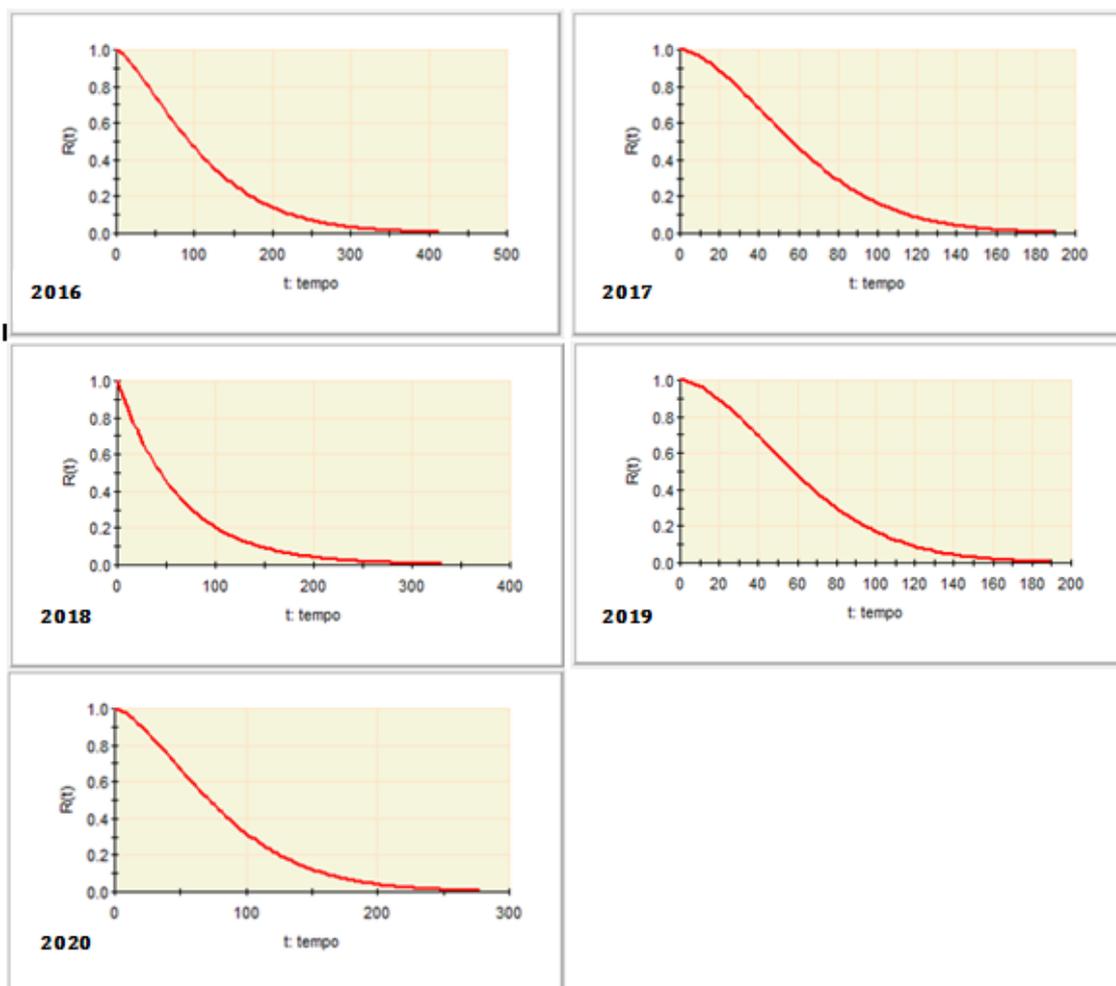
A função densidade de probabilidade (pdf) das amostras por ano pode ser representada por uma expressão analítica ou por um gráfico, onde o eixo x representa o tempo (em horas). A Figura 6.7 mostra as pdf obtidas a partir da amostragem e da aproximação pela distribuição Weibull para os anos de 2016-2020.

Figura 6.7 – Função densidade de probabilidade por ano, em 2016-2020.



Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), a função de Confiabilidade $R(t)$ mostra a probabilidade da unidade apresentar sucesso na operação (ou seja, ausência de falhas) por um período de tempo, em um ambiente específico. A função de Confiabilidade $R(t)$ também é chamada de **Função de Sobrevivência**. O gráfico da função de Confiabilidade, obtido a partir dos dados coletados do equipamento, é mostrado na Figura 6.8.

Figura 6.8 – Confiabilidade do equipamento por um período de t (h), por ano, em 2016-2020.



Os resultados para cada ano dos parâmetros β e η da distribuição Weibull, o MTTF (Tempo Médio até a Falha) e o Tempo de Missão previsto para 95% de Confiabilidade em horas, são mostrados na Tabela 6.1.

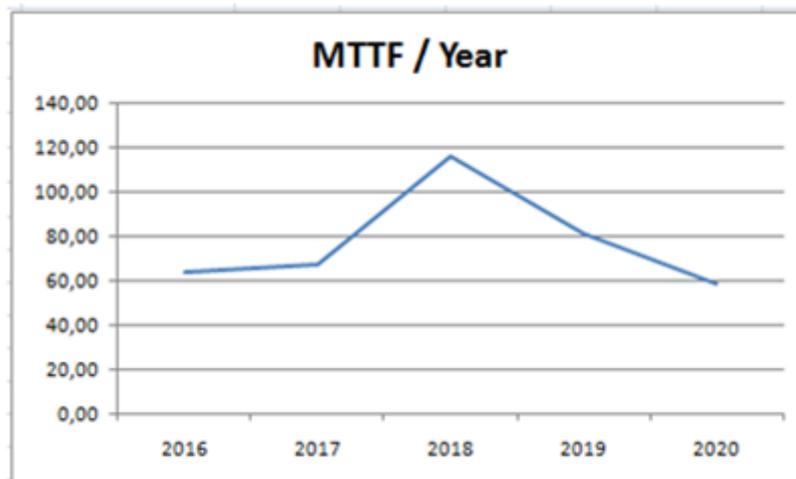
Tabela 6.1 - Resultado dos parâmetros Weibull, MTTF e t (R=95%) entre 2016-2020.

Year	β	η	MTTF	t (R=95%)*
2016	1,64	71,83	64,26	12,07
2017	1,58	74,97	67,29	12,77
2018	1,36	126,45	115,75	13,86
2019	1,99	91,50	81,10	12,75
2020	1,34	64,23	58,99	3,34

*Tempo de missão (t) para uma confiabilidade de 95% - horas

A Figura 6.9 mostra os resultados da evolução da Confiabilidade da amostra das plataformas de coleta de dados ambientais. Tendo como parâmetro a evolução do MTTF ao longo dos anos, verifica-se uma evolução da Confiabilidade entre os anos de 2016 e 2018; mas nos anos de 2019 a 2020, verifica-se uma queda significativa nos valores do MTTF, o que sugere fortemente problemas na manutenção realizada.

Figura 6.9 – Evolução anual do MTTF.



6.7 Conclusão da análise de Confiabilidade das amostras de PCDs

Este Capítulo apresentou uma análise da Confiabilidade de uma amostra das 2846 plataformas de coleta de dados do CEMADEN, ajustando pdfs Weibull aos dados de vida da amostra de 60 PCDs, visando: 1) estimar a Confiabilidade da amostra desse sistema ao longo dos anos; e, com base nisso, 2) sugerir ações de manutenção nesse sistema. Ambos podem ser aplicados à melhoria da Suportabilidade e gerenciamento do ciclo de vida do produto desse e de outros sistemas. As principais conclusões desta análise são que:

1) O número de falhas anual da amostra das plataformas de coleta de dados ambientais diminuiu continuamente entre 2016 e 2018; mas aumentou significativamente em 2019-2020.

2) De acordo com o fator de forma (β) calculado, todos os equipamentos da amostra estão na fase de desgaste ($1 < \beta$) do ciclo de vida da “curva da banheira”; 3) uma otimização da estratégia de manutenção do componente ou sistema pode ser realizada; 3) uma Análise de Criticidade deve ser realizada para identificar os modos de falha, seus efeitos e criticidade no equipamento. Para isso, um método que pode ser útil é a elaboração da FMECA.

7 ANÁLISE DA MANUTENABILIDADE E DA DISPONIBILIDADE DAS AMOSTRAS DE PCDS

Baseados nos conceitos apresentados nos Capítulos 2 e 3, e complementando as análises apresentadas nos Capítulos 5 e 6, neste Capítulo 7 será feita uma Análise da Manutenibilidade e da Disponibilidade da amostra com 60 PCDS do CEMADEN usadas no Capítulo 6, para compor um vetor de análises da sua Suportabilidade.

7.1 Alguns problemas comuns encontrados nas fases de operação e manutenção

Inicialmente, nota-se que se estes conceitos e análises não forem aplicados corretamente nas fases iniciais de desenvolvimento do projeto, gerarão problemas futuros na operação e manutenção do sistema. Assim, o Mapeamento das Falhas no Capítulo 5, e a Análise de Confiabilidade das PCDS no Capítulo 6, sugerem que alguns problemas comuns encontrados nas fases de operação e manutenção dos equipamentos listados na Tabela 4.1 do Capítulo 4, ocorrem no sistema, a saber:

- dificuldades logísticas;
- falta de coleta e registro dos dados e falhas; ou o registro é realizado de forma manual;
- falta de *feedback* sobre a solução das ações corretivas;
- validação após a ação corretiva para encerrar a falha encontrada não é realizada. O processo não fecha o ciclo;
- falta de rapidez para obter um relatório de falhas de campo com os principais riscos, custos e oportunidades de melhoria;
- faltam processos padronizados para as ações tomadas quando uma falha é registrada;

- faltam bancos de dados, ou os bancos de dados geram relatórios de difícil visualização e análise, os dados são fragmentados, difíceis de localizar e rastrear.

Para evitar tais problemas, os Requisitos listados no Capítulo 4, poderiam ter sido implementados no desenvolvimento do produto. Isto será comparado com o Capítulo 5 e sugerido no Capítulo 8.

7.2 Análise da Manutenibilidade e da Disponibilidade

Os seguintes trechos do Capítulo 2, são essenciais para as análises a seguir:

1) Na Seção 2.2.1: De acordo com Blanchard (2016), Manutenibilidade é uma característica de instalação e projeto que representa a facilidade, **precisão, segurança e economia no desempenho** da manutenção. [...] como um resultado da instalação e do projeto, a Manutenibilidade **pode ser medida em termos de tempo de manutenção [...]**

2) Na Seção 2.2.1.2: De acordo com Blanchard (2004), outra abordagem para se medir a Manutenibilidade é o **MDT (Mean Down Time)**, ou seja, o **Tempo Médio de Indisponibilidade**. O MDT é o tempo total que o sistema não está em condição de executar a sua função, e inclui os tempos de manutenção **ativa=efetiva preventiva e corretiva**, tempos de atrasos logísticos e administrativos **dividido pelo número total de falhas**. O MDT é, portanto, a média de todos os intervalos de tempo que incluem a realização, acesso, diagnóstico, aquisição de peças sobressalentes e substituição ou reparo. Ou seja: $MDT = T_{\text{indisponibilidade}} / n = (T_{\text{manutenção efetiva}} + T_{\text{espera}}) / n = (T_{\text{manutenção preventiva}} + T_{\text{manutenção corretiva}} + T_{\text{logístico}} + T_{\text{administrativo}}) / n$;

3) Na Seção 2.2.1.2: Segundo Firoozmand (2013), o MDT inclui o MTTR e todos os outros tempos que contribuem para a parada do equipamento durante a manutenção, pois $MTTR = T_{\text{manutenção corretiva}} / n$;

4) Na Seção 2.2.1.2: Assim, o MTTR mede diretamente a Manutenibilidade e mede indiretamente a Indisponibilidade. Por isto, é o 1º. da Tabela 2.2. Já o

MDT mede diretamente a Indisponibilidade, e mede indiretamente a Manutenibilidade. Por isto, é o 3º. da Tabela 2.2.

Esta abordagem será utilizada a seguir para medir os Tempos de Indisponibilidade das amostras. As amostras e o banco de dados utilizados para o cálculo do MDT são os mesmos utilizados na estimativa da Confiabilidade realizada no Capítulo 6 deste trabalho, ou seja:

- amostras de 60 diferentes PCDs foram retiradas do conjunto de dados original usando seleção aleatória, correspondendo a aproximadamente 10% das (684 em Jan 2016, cf. a Figura 5.1) plataformas de coleta de dados ambientais instaladas no Estado de São Paulo. Foram utilizados os bancos de dados históricos de um período de cinco anos (de 2016 a 2020) obtidos a partir dos Relatórios de Operação e Manutenção das plataformas de coleta de dados ambientais do CEMADEN.

As Figuras 6.2 e 6.3, apresentadas no Capítulo 6, ilustram um extrato do relatório de operação e manutenção e um extrato do banco de dados com os tempos de inatividade (Indisponibilidade) das PCDs.

As premissas utilizadas para o cálculo da Manutenibilidade neste trabalho foram:

- i. O Tempo de Indisponibilidade (*Downtime*) foi considerado como sendo a soma dos tempos das PCDs no estado não operacional (estado operacional INATIVO) ou não transmitindo dados; ou seja, $T_{\text{indisponibilidade}} = \sum T_{\text{inativo}}$. **Para isto, desprezou-se a soma dos tempos das PCDs no estado duvidoso (estado operacional SUSPEITO) por suas indecisões;** ou seja, isto equivale a fazer $\sum T_{\text{suspeito}} = 0$.
- ii. O Tempo de Reparo (*Time to Repair*) foi considerado como o Tempo de Indisponibilidade (*Downtime*); ou seja, $T_{\text{reparo}} = T_{\text{indisponibilidade}}$. Para isto, incluiu-se nele o Tempo de Espera (*Waiting Time*) por não se ter medidas separadas deles; ou seja, isto equivale a fazer $T_{\text{espera}} = 0$.
- iii. O Tempo de Reparo (*Time to Repair*) foi considerado como a soma dos tempos de manutenções preventivas e de manutenções corretivas, pois estas

podem também ter sido realizadas simultaneamente; ou seja, $T_{\text{reparo}} = T_{\text{manutenção preventiva}} + T_{\text{manutenção corretiva}}$.

O Apêndice D apresenta os tempos para o reparo por ano (tempos das 60 PCDs em estado não operacional) da amostra coletada do banco de dados histórico das PCDs, após o tratamento dos dados brutos. As médias anuais dos Tempos de Indisponibilidade foram consideradas no cálculo do *Mean Down Time* - MDT. A Tabela 7.1 apresenta os MDTs da amostra completa de 60 PCDs entre 2016-2020.

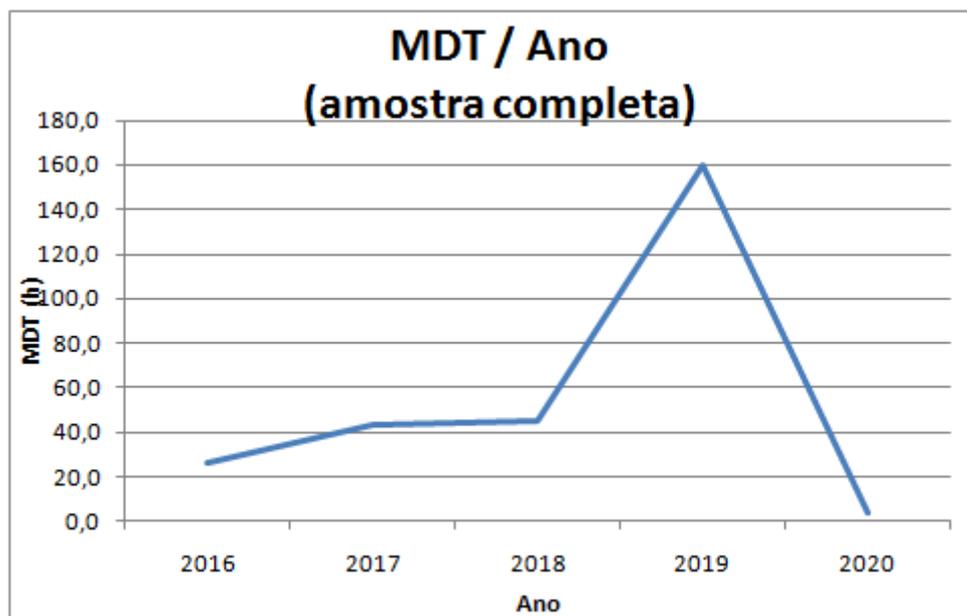
Tabela 7.1 - MDTs da amostra completa de 60 PCDs entre 2016-2020.

Ano	MDT (horas)
2016	26,2
2017	43,1
2018	44,7
2019	159,6
2020	4,06

Nota: Os dados de 2020 são parciais; portanto, as manutenções programadas anuais podem não ter sido contabilizadas.

A Figura 7.1 apresenta a evolução anual dos MDTs da amostra completa de 60 PCDs entre 2016-2020.

Figura 7.1 – Evolução anual dos MDTs da amostra completa de 60 PCDs, em 2016-2020.



A Tabela 7.2 apresenta os MDTs considerando os tempos em estado INATIVO abaixo de 48h; ou seja, foram removidas as PCDs com tempos muito longos de inatividade (Apêndice D.2).

Tabela 7.2 - MDTs da amostra completa de 60 PCDs entre 2016-2020, excluindo os tempos das PCDs inativas por mais de 48h.

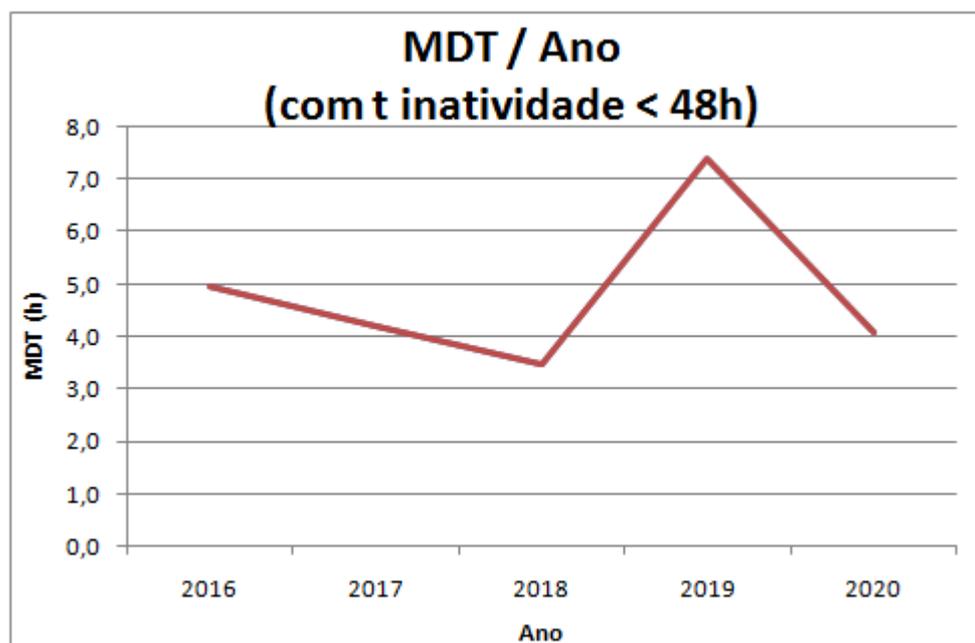
Ano	MDT (horas)
2016	5,0
2017	4,2
2018	3,5
2019	7,4
2020	4,06

Fonte: Autor. Nota: Os dados de 2020 são parciais; portanto, as manutenções programadas anuais podem não ter sido contabilizadas.

A Figura 7.2 apresenta o gráfico dos MDTs da amostra completa de 60 PCDs entre 2016-2020, excluindo os tempos das PCDs inativas por mais de 48h. Nota-se uma melhora significativa da Manutenibilidade entre os anos 2016 e 2018, demonstrada através da queda consistente do valor do MDT, e no ano

de 2019 o MDT saltou para 7,4 horas, mais que o dobro do ano anterior. Esta tendência de piora já havia sido percebida no cálculo do MTTF (Figura 6.9), o que sugere fortemente problemas na manutenção realizada.

Figura 7.2 – Evolução anual dos MDTs da amostra completa de 60 PCDs entre 2016-2020, excluindo os tempos das PCDs inativas por mais de 48h.



Os trechos 1 a 4 do Capítulo 2 citados acima e as premissas i, ii, iii, adotadas acima tornam o MDT uma métrica da Manutenabilidade além de ser uma métrica da Disponibilidade da amostra de 60 PCDs. As Tabelas 7.1 e 7.2, e as Figuras 7.1 e 7.2 dão visões delas.

As análises acima, junto com as dos Capítulos 5 e 6, compõem um vetor de análises da Suportabilidade da amostra de 60 PCDs.

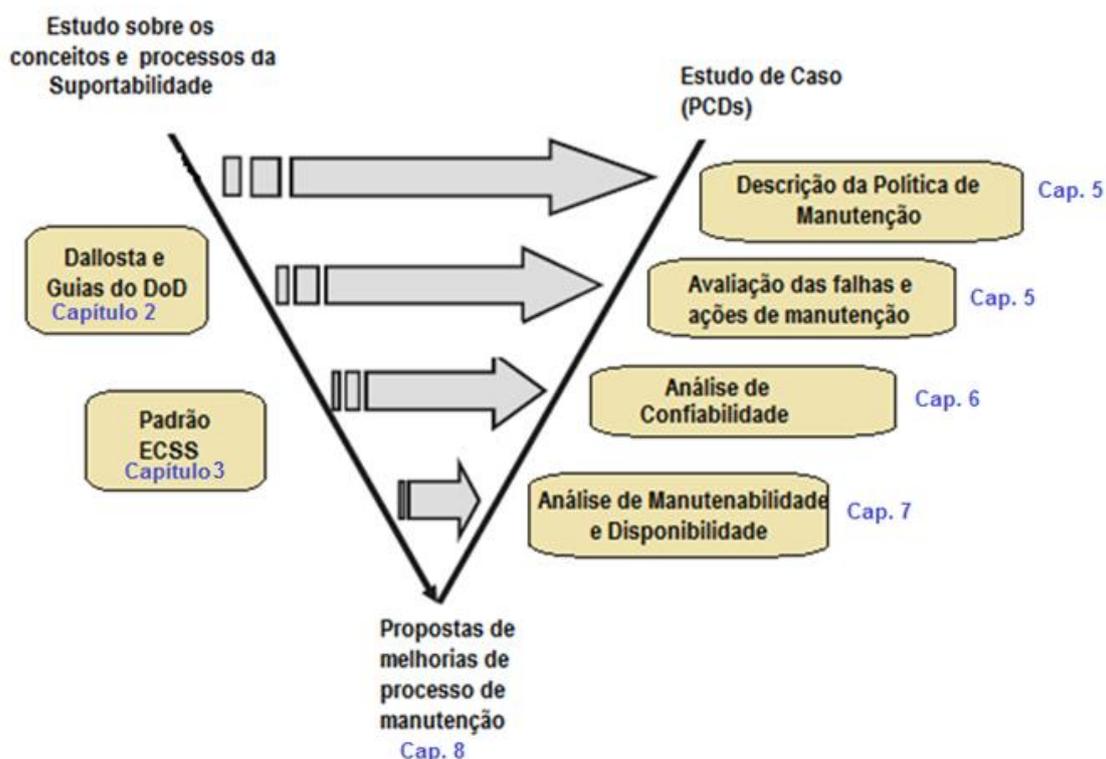
Todas poderão ser refinadas, estendidas e melhoradas se e quando houver mais dados discriminando, medindo e registrando cada um dos tempos mencionados acima. Assim e então, todas poderão contribuir para reduzir alguns problemas listados na Tabela 4.1 e citados na Seção 7.1 e em outras.

8 COMPARAÇÕES ENTRE ITENS DA SUPORTABILIDADE DOS CAPS.

2-3, E ITENS AFINS DOS CAPS. 5-7; E PROPOSTAS DE MELHORIA

Nos Capítulos 2-3, foi realizado um estudo sobre os conceitos e processos da Suportabilidade, Requisitos da Dependabilidade, Suporte Logístico integrado, e para não deixar estes conceitos de forma abstrata, realizou-se uma demonstração desses conceitos e processos no estudo de caso (Caps. 5-7). A Figura 8.1 apresenta o modelo de comparação realizado.

Figura 8.1 – Modelo de comparação.



8.1 Diferenças e semelhanças entre focos, formas e conteúdos dos Caps. 2-7

Nos focos, formas e conteúdos dos Capítulos 2-7, as diferenças limitam mas as semelhanças permitem realizar; 1) comparações entre itens da Suportabilidade

cf. o Capítulo 2 (DALLOSTA, 2012a, 2012b, 2018; e DOD 2005, 2008a, 2008b, 2010, 2011a), o Cap. 3 (ECSS), e itens afins cf. os Caps. 5-7 (CEMADEN); e 2) propostas de melhoria cf. todos, até o Cap. 4 (problemas comuns), como será feito a seguir:

Embora os ciclos de vida para missões espaciais e projetos típicos de defesa tenham grandes **diferenças** entre si, e as atividades de manutenção não sejam tão frequentemente encontradas em projetos espaciais como em projetos típicos de defesa, existem grandes **semelhanças** entre os requisitos e processos de Suportabilidade para projetos de Defesa (DALLOSTASIMCIK, 2012a,b; DALLOSTA, 2018) e instruções do Departamento de Defesa dos EUA - DOD (1988, 2003, 2005, 2008a,b, 2010, 2011a), e a Dependabilidade e o Suporte Logístico Integrado (na falta dos de Suportabilidade) (ECSS 1996, 2004, 2008a, 2009a,b).

Em programas de missões espaciais, bem como em projetos típicos de defesa, é evidente a preocupação com a identificação de requisitos funcionais e não-funcionais desde as fases iniciais de desenvolvimento do produto. Os requisitos funcionais são os de missão. Os requisitos não-funcionais são de: interfaces, desempenho, ambientais, recursos, físicos, qualitativos ou projeto, (LOUREIRO, 1999), e os requisitos de Manutenibilidade, Confiabilidade, Disponibilidade, Logística, Custos estão entre eles. Aqui eles são itens numerados para facilitar:

8.2 Itens da Suportabilidade e afins dos Caps. 2-7 para comparações

O Capítulo 2 apresentou: os conceitos básicos e a literatura revisada, sobretudo de **1) objetivos e requisitos** de Suportabilidade segundo Dallosta (2012 a,b; 2018) e DOD (1988, 2003, 2005, 2008a,b, 2010, 2011a), e da Análise de Suportabilidade, na Seção 2.4. As duas abordagens apresentam preocupações com: análises de **2) Confiabilidade, 3) Manutenibilidade, 4) Disponibilidade, 5) Segurança, 6) Prazos 7) Custos**, em todo o **8) Ciclo de Vida**. Dallosta (2012b) e DOD (2003) sugerem que a análise de **9) Suportabilidade** é uma metodologia usada durante o processo de **10)**

desenvolvimento ou aquisição do produto, mas que também pode ser usada em sistemas que já estejam em **11) operação**, como é o presente estudo de caso. Diante disso, é possível sugerir alguns recursos e processos que podem ser progressivamente implementados para **12) reduções dos prazos e custos** de manutenção e **13) aumento da Disponibilidade** do sistema.

O Capítulo 4 apresentou: a Tabela 4.1 com **0) problemas comuns** encontrados na fase de operação dos sistemas.

O Capítulo 3 apresentou: os principais **14) objetivos e requisitos** de **15) Dependabilidade e 16) Suporte Logístico Integrado** (na falta dos de Suportabilidade) segundo os padrões ECSS (1996, 2004, 2008a,b, 2009a,b) e que devem ser utilizados desde as fases iniciais de **17) desenvolvimento ou aquisição** do produto, para **18) reduções de prazos e custos** de manutenção e o **19) aumento da Disponibilidade**, influenciando o **20) projeto do sistema** e definindo os requisitos de suporte baseado no **21) conceito de operação**.

O Capítulo 5 apresentou: descrições do **22) processo atual** de **23) Manutenção** da **24) rede de PCDs** do CEMADEN, em conjunto com o **25) mapeamento das falhas** e **26) ações de manutenção** via o **27) contrato de serviços** prestados na fase de **28) operação** do sistema.

Os Capítulos 6 e 7 apresentaram as análises da **29) Confiabilidade, 30) Manutenibilidade e 31) Disponibilidade**, de **32) uma amostra** com 60 PCDs com **33) dados de vida** entre 2016-2020, em fase de **34) operação**.

8.3 Comparação entre itens da Suportabilidade cf. o Cap. 2 (DALLOSTA e DOD) e itens afins cf. os Caps. 5, 6, 7 (CEMADEN)

Tal comparação será feita pelas **semelhanças** e relações entre itens afins e será resumida na Tabela 8.1, a saber:

35) os **1) objetivos e requisitos** são parcialmente atendidos pelo **22)**

processo atual;

36) as **Análises de 2) Confiabilidade, 3) Manutenibilidade, e 4) Disponibilidade**, são parcialmente atendidas pelas **Análises de 29) Confiabilidade, 30) Manutenibilidade e 31) Disponibilidade**;

37) A **9) Análise de Suportabilidade** é parcialmente atendida pelas descrições do **22) processo atual, 23) Manutenção, 24) rede de PCDs, 25) mapeamento das falhas, 26) ações de manutenção, 27) contrato de serviços, 28) operação**; e pelas **Análises de 29) Confiabilidade, 30) Manutenibilidade e 31) Disponibilidade**;

38) o **10) desenvolvimento ou aquisição** é parcialmente demonstrado pela **24) rede de PCDs**;

39) a **11) operação** é parcialmente demonstrada pela **28, 34) operação**;

40) o **13) aumento da Disponibilidade** é parcialmente demonstrado pela **32) amostra e seus 33) dados de vida**.

41) A **5) Segurança**, os **6) Prazos**, os **7) Custos**, o **8) Ciclo de Vida**, as **12) reduções dos prazos e custos** não foram analisados. Os **0) problemas comuns** terão sugestões de solução na Seção 8.5 e outras.

Tabela 8.1: Comparação entre itens da Suportabilidade cf. o Cap. 2 (DALLOSTA e DOD) e itens afins cf. os Caps. 5-7 (CEMADEN).

Itens 1-13 do Capítulo 2	Itens 22-28 do Capítulo 5	Itens 29-34 dos Capítulos 6-7
1) objetivos e requisitos	22) processo atual	
2) Confiabilidade		29) Confiabilidade
3) Manutenibilidade		30) Manutenibilidade
4) Disponibilidade		31) Disponibilidade
5) Segurança	Não analisado	Não analisado
6) Prazos	Não analisado	Não analisado
7) Custos	Não analisado	Não analisado
8) Ciclo de Vida	Não analisado	Não analisado
9) Suportabilidade (*)	22) processo atual	29) Confiabilidade
	23) Manutenção	30) Manutenibilidade
	24) rede de PCDs	31) Disponibilidade
	25) mapeamento das falhas	
	26) ações de manutenção	
	27) contrato de serviços	
	28) operação	
10) desenvolvimento ou aquisição	24) rede de PCDs	
11) operação	28) operação	34) operação
12) reduções dos prazos e custos	Não analisado	Não analisado
13) aumento da Disponibilidade		32) amostra
		33) dados de vida

* Em **9) Suportabilidade**, só as atividades do 3º. processo, Suportar o Projeto: a) Gerenciamento do Suporte do Produto, b) Interface com o Projeto (N.A.), c) Plano de Manutenção, d) Suporte de Suprimentos, e) Equipamentos para Suporte, f) Dados Técnicos/Manuais de Operação e Manutenção, g) Pessoas, Habilidades e Mão de Obra, h) Recursos Computacionais, i) Infraestrutura e Instalações, j) Treinamento, Embalagem, Manuseio, Armazenamento e Transporte; cf. o Cap. 2, Seção 2.4, Figura 2.6 (DALLOSTA e Simcick (2012b)), são parcialmente satisfeitas pelos itens 22-28, 29-31 dos Caps. 5-7 (CEMADEN).

Fonte: Souza e Marchezin (2021).

8.4 Comparação entre itens da Dependabilidade e do Suporte Logístico integrado do Cap. 3 (ECSS) e itens afins dos Caps. 5-7 (CEMADEN)

Tal comparação será feita pelas semelhanças e relações entre itens afins e será resumida na Tabela 8.2, a saber:

42) os **14) objetivos e requisitos** são parcialmente atendidos pelo **22) processo atual**;

43) a **15) Dependabilidade (*)** é parcialmente atendida pelo **25) mapeamento das falhas, 26) ações de manutenção 29) Confiabilidade, 30) Manutenibilidade e 31) Disponibilidade**;

44) o **16) Suporte Logístico Integrado** é parcialmente atendido pela **23) Manutenção, 25) mapeamento das falhas, 26) ações de manutenção, 27) contrato de serviços**;

45) o **17) desenvolvimento ou aquisição** são parcialmente demonstrados pela **24) rede de PCDs**;

46) o **19) aumento da Disponibilidade** é parcialmente demonstrado pela **32) amostra e seus 33) dados de vida**;

47) o **20) projeto do sistema** é parcialmente demonstrado pela **24) rede de PCDs**;

48) o **21) conceito de operação** é parcialmente demonstrado pela **28, 34) operação**;

49) As **18) reduções de prazos e custos** não foram analisadas. Os **0) problemas comuns** terão sugestões de solução na Seção 8.5 e em outras.

Tabela 8.2: Comparação entre itens da Dependabilidade e do Suporte Logístico Integrado do Cap. 3 (ECSS) e itens afins dos Caps. 5-7 (CEMADEN).

Itens 14-21 do Capítulo 4	Itens 22-28 do Capítulo 5	Itens 29-34 dos Capítulos 6-7
14) objetivos e requisitos	22) processo atual	
15) Dependabilidade (*)	25) mapeamento das falhas	29) Confiabilidade
	26) ações de manutenção	30) Manutenibilidade
		31) Disponibilidade
16) Suporte Logístico Integrado (**)	23) Manutenção	
	25) mapeamento das falhas	
	26) ações de manutenção	
	27) contrato de serviços	
17) desenvolvimento ou aquisição	24) rede de PCDs	
18) reduções de prazos e custos	Não analisado	Não analisado
19) aumento da Disponibilidade		32) amostra;
		33) dados de vida
20) projeto do sistema	24) rede de PCDs	
21) conceito de operação	28) operação	34) operação

* Em **15) Dependabilidade**, só os requisitos: a) Avaliação dos Cenários de Falhas, b) Análise de Confiabilidade, c) Análise da Manutenibilidade, d) Análise de Disponibilidade, e) Coleta de Dados de Dependabilidade e Monitoramento do Desempenho da Dependabilidade; cf. o Cap. 3, Seção 3.1 (ECSS-Q-ST-30C (2009b), Tabela 3.1 (Principais requisitos e atividades de Dependabilidade), são parcialmente satisfeitos pelos itens 27-28 e 31-33 dos Caps. 5-7 (CEMADEN).

** Em **16) Suporte Logístico Integrado**, os grupos de requisitos: a) Requisitos para análises logísticas, b) Requisitos para definição e desenvolvimento dos elementos de suporte, c) requisitos para gerenciamento dos elementos de suporte; cf. o Cap. 3 (ECSS), Seção 3.2 (ECSS-M-70A (1996)), Tabela 3.2 (Principais Requisitos de Suporte Logístico Integrado), são parcialmente satisfeitos pelos itens 25, 27-29, dos Caps. 5-7 (CEMADEN).

Fonte: Souza e Marchezin (2021).

8.5 Propostas de melhoria

A logística de peças e equipes de manutenção em um país de dimensões continentais é um desafio a ser enfrentado. Como foi visto, o CEMADEN possui 2846 PCDs espalhadas em todo o território nacional (Figura 5.1) e aproximadamente $9000/6=1500$ inspeções de manutenção são registradas por ano. Então observa-se que a questão das distâncias é um fator impactante para a gestão logística; e os custos, conseqüentemente, são altos.

Em geral, num programa de manutenção periódica, a Confiabilidade aumenta conforme a frequência de inspeção aumenta. Entretanto, os Custos de manutenção e inspeção também aumentam conforme a frequência das inspeções aumentam. Como resultado, deve haver uma análise de compromisso (*tradeoff*) entre a Confiabilidade da rede e o custo de manutenção. Nesse contexto, há variáveis que podem ser ajustadas de forma que um resultado final específico seja otimizado. As análises de compromisso (*tradeoff*) envolvendo custos de implantação, recursos, ambiente operacional, custos de manutenção, mudança de projeto, etc. devem ser realizadas logo nas fases iniciais do ciclo de vida do produto para evitar mudanças tardias que elevem os custos.

O Capítulo 5 mostrou que: 1) a manutenção preventiva das PCDs é realizada em intervalos de 12 meses ou bianual, e planejadas para cada região do território nacional antes do período das chuvas; 2) as principais atividades realizadas são de limpeza, teste, reconfiguração e substituição de componentes; e que 3) estas podem ser divididas entre manutenção preventiva e manutenção corretiva.

O Capítulo 5 também apresentou o mapeamento das falhas e das ações de manutenção realizadas nas PCDs nos últimos anos. Este levantamento permitiu conhecer as principais falhas e as atividades de limpeza, troca e os reparos efetuados nas plataformas de coleta de dados. Ao coletar as estatísticas de falhas do sistema em uso no campo, pode-se rapidamente identificar os defeitos mais comuns, priorizar suas melhorias ou correções e estimativa de peças de reposição.

O Capítulo 6 apresentou a análise dos dados de vida e uma estimativa da Confiabilidade utilizando o histórico de operação de uma amostra com 60 PCDs em 2016-2020. A análise dos tempos até a falha, com o cálculo do MTTF, permitiu visualizar o desempenho operacional do sistema. A Análise da Confiabilidade atende ao requisito de Análise da Confiabilidade apresentado na ECSS para produtos espaciais e também aos processos da Análise da Suportabilidade em projetos de defesa.

O Capítulo 7 apresentou o cálculo do MDT entre os anos de 2016 e 2020, e foi possível visualizar o Tempo Médio de Indisponibilidade anual das PCDs. O MDT é um indicador que pode auxiliar nas modificações necessárias, a fim de diminuir ao máximo tais interrupções, bem como o tempo de reparo.

O Capítulo 8, Seções 8.1-8.4 apresentou e comparou os itens relevantes dos Capítulos 2-7.

Assim, com base em todo o exposto, a Tabela 8.3 apresenta um comparação de processos e proposta de melhorias da Análise da Suportabilidade para sistemas aeroespaciais, cf. **explicita** a Figura 2.6 de Dallosta e Simcik (2012b):

Tabela 8.3 – Comparação de processos e suas atividades (colunas 1-4) e proposta de melhorias (coluna 5) da Análise da Suportabilidade para sistemas aeroespaciais.

Processos do ciclo de vida da Análise da Suportabilidade	Proposta de atividades de Análise da Suportabilidade para produtos aeroespaciais (Fonte: Dallosta & Simcik (2012)).	Referência (DALLOSTA & SIMCIK (2012)).	CEMADEN realiza?	Melhoria aplicável ao CEMADEN?
Projetar para o Suporte (1º processo)	Identificar necessidades dos usuários	x		x
	Definir prioridades	x		x
	Definir capacidades	x		x
	Tecnologias alternativas	x		x
	Definir CONOPS	x		x
	Objetivos da Suportabilidade	x		x
	Métricas da Suportabilidade	x		x
	Análise Funcional	x		x
	Análise custo-benefício	x		x
	Requisitos de Confiabilidade	x		x
	Requisitos de Manutenibilidade	x		x
	Requisitos de Suportabilidade	x		x
	Análise de custos	x		x
Projetar o Suporte (2º processo)	Análise de tarefas de Manutenção	x		x
	Análise do Nível de Reparo	x		x
	Manutenção Baseada na Condição	x		x
	Manutenção Baseada na Confiabilidade	x		x
	FMECA	x		x
	Modelagem e predição de Manutenibilidade e Confiabilidade	x		x
	Banco de dados Logísticos	x	x	x
Suportar o Projeto (3º processo)	Gerenciamento do Suporte ao produto	x	x	x
	Interface com Projeto	x		x
	Plano de Manutenção	x	x	x
	Suporte de Suprimentos	x	x	x
	Equipamentos para Suporte	x	x	x
	Dados Técnicos/Manuais de operação e Manutenção	x	x	x
	Pessoas, habilidades e mão de obra	x	x	x
	Recursos Computacionais	x	x	x
	Infraestrutura e Instalações	x	x	x
	Treinamento	x	x	x
	Embalagem, manuseio, armazenamento e transporte	x	x	x

Como é possível observar na coluna 5 da Tabela 8.3, todos os processos da Análise da Suportabilidade são **progressivamente** aplicáveis ao estudo de caso, a saber:

1. **O Mapeamento das Falhas e Ações de Manutenção** realizado no Capítulo 5 através do tratamento de dados históricos de manutenção permitiu classificar as principais falhas reportadas nas inspeções programadas realizadas no campo. Porém, **seria fundamental** fazer uma avaliação mais criteriosa, em nível de fabricante ou oficina, dos problemas encontrados nas peças que foram substituídas (*shop findings*), identificando o modo de falha e classificando-os em termos de Criticalidade=Probabilidade de Ocorrência X Severidade. Tal análise ajudaria a indicar falhas que poderiam ser removidas por meio de novo projeto ou que poderiam ser evitadas por meio de medidas preventivas de manutenção. Além disso, novos procedimentos de reparos de peças em campo poderiam ser desenvolvidos utilizando-se como parâmetros a Severidade do

modo de falha e sua Probabilidade de Ocorrência, evitando-se, desta forma, a troca desnecessária de componentes e minimizando o custo.

2. **A Análise da Confiabilidade** é uma técnica analítica demonstrada no Capítulo 6 e que atende a um dos requisitos de Análise da Suportabilidade. Trata-se de uma poderosa ferramenta que **permitiria** acompanhar o desempenho ao longo do tempo de importantes parâmetros, como por exemplo o MTTF, avaliando desta maneira a evolução da Confiabilidade e a qualidade da manutenção executada em campo.

3. **A Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA)** é outro processo da Suportabilidade com grande potencial de ganho na aplicação no estudo de caso, pois **permitiria** identificar e avaliar as falhas e determinar seus efeitos no sistema. A FMECA é a principal atividade da Manutenção Baseada na Confiabilidade (RCM), e permitiria identificar as tarefas de manutenção preventiva mais adequadas para a rede do sistema.

4. **O Sistema de Relato, Análise e Ações Corretivas de Falhas (*Failure Reporting, Analysis and Corrective Action Systems - FRACAS*)** é um processo que **poderia** ser implementado na fase de operação visando a criação de um ciclo fechado de realimentação para coletar, registrar, analisar e corrigir as falhas. Dessa forma, poderiam-se estabelecer rotinas para o acompanhamento de ações corretivas. Esse processo atenderia a um dos Requisitos de Dependabilidade da ECSS com aplicação na Suportabilidade (Tabela 3.1), onde os dados coletados devem ser registrados a partir de relatórios de não conformidade e relatórios de manutenção. Neste sentido, sugere-se também a otimização dos registros dos dados em campo através de uso de aplicativos e *software*, com codificação e parametrização das falhas.

5. **A Análise das Tarefas de Manutenção (MTA)** **poderia** ser implementada com o objetivo de identificar de forma mais precisa e antecipada os requisitos e recursos de suporte logístico para cada tarefa de manutenção, tais como: número de pessoas, níveis de habilidade, horas de trabalho, peças de reposição, peças de reparo e consumíveis necessários, equipamentos de suporte, teste, medição e equipamentos de diagnóstico; instalações

necessárias; intervalo e frequência das tarefa de manutenção no ambiente operacional pretendido.

6. **A Análise do Nível de Reparo (LORA)** é também uma técnica da Suportabilidade que **poderia** ser útil na manutenção da rede de PCDs pois permitiria determinar se um item será reparado ou descartado e o nível de manutenção onde o reparo/descarte ocorreria, com base nas considerações de custo e requisitos de Disponibilidade. O planejamento e alocação de peças de reposição, mão-de-obra e equipamentos de apoio para todos os níveis de manutenção (no campo ou em oficina especializada) seria realizado neste processo.

7. Na aquisição de novas PCDs, uma **Análise de Prazos e Custos de Manutenção** versus prazos e custos de aquisição deveria ser realizada. Uma análise de compromissos (*trade-off*) realizada durante a fase inicial do projeto que levasse em conta os prazos e custos de manutenção e operacionais poderia levar a um processo otimizado ou até mesmo a escolha de uma tecnologia diferente para a transmissão dos dados pluviométricos.

8. Como resultado direto das ações discutidas anteriormente, o **Contrato seria** um acordo entre o cliente e o prestador de serviços que estabeleceria parâmetros claros que especificariam o tempo máximo em que os serviços poderiam ficar indisponíveis e o tempo máximo para repará-los (SMITH, 2011). Os contratos com fornecedores deveriam prever métricas bem claras de Confiabilidade, Manutenibilidade, e Disponibilidade.

9 CONCLUSÃO, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

9.1 Conclusão

Este trabalho teve por objetivo principal estudar a Suportabilidade de sistemas aeroespaciais aplicada a plataformas de coleta de dados de redes hidrometeorológicas.

Estudar os aspectos que envolvem a Manutenibilidade e a Confiabilidade são muito importantes para que seja possível avaliar o seu impacto na Disponibilidade do sistema. Entender as falhas, as características de manutenção e operação da rede de PCDs a partir da perspectiva da Confiabilidade permitiu sugerir melhorias no processo de manutenção e operação do sistema. Assim, a Suportabilidade (Manutenibilidade, Confiabilidade, Disponibilidade, etc.) passa a ser um indicador fundamental a ser considerado nas aplicações em sistemas aeroespaciais, e deve ser incluída em futuros contratos de prestação de serviços de manutenção e aquisição de novos equipamentos.

Por não ser um termo utilizado no padrão ECSS para sistemas espaciais, procurou-se demonstrar no estudo bibliográfico a importância da análise e aplicação da Suportabilidade de projetos de Defesa (projetar para o suporte, projetar o suporte, suportar o projeto) no ciclo de vida de sistemas aeroespaciais, apresentando os conceitos associados aos seus processos e como aplicá-los, levando-se em consideração suas técnicas analíticas, tais como o RCM, LORA, FMECA e MTA, e suas métricas escalares de Manutenibilidade e Confiabilidade.

Nas seções de aplicação, adotou-se uma rede real de PCDs de um sistema brasileiro como estudo de caso, identificando-se o processo de manutenção e operação, mapeando as falhas e ações de manutenção realizadas; e, amostrando-a, calculou-se a Manutenibilidade do sistema, e aplicaram-se técnicas de estimativa da Confiabilidade, através do ajuste dos pdfs Weibull aos seus dados de vida, um método importante para a estimativa da

probabilidade de falhas com dados reais do sistema instalado no seu ambiente operacional.

Mesmo considerando-se que a Análise de Suportabilidade é uma metodologia mais eficaz se usada desde o início do processo de desenvolvimento ou aquisição do produto, foram apresentados resultados importantes e propostas de melhorias em um sistema já em operação, como é o presente estudo de caso das PCDs. Evidentemente os resultados estão associados à validade das hipóteses, premissas, métodos e amostra aqui adotadas.

A partir da avaliação da Confiabilidade de uma amostra da rede do sistema, pode-se concluir que a Confiabilidade aumentou entre os anos de 2016-2018 e diminuiu entre os anos de 2019-2020, sugerindo uma piora na manutenção da amostra realizada no sistema no período. Este decréscimo pode ser explicado pela diminuição da frequência das inspeções de manutenção realizadas a partir de 2019. A escolha da melhor estratégia de manutenção deve levar em conta os custos envolvidos e a criticidade do serviços, porém, baseado na análise de Confiabilidade, evidenciou-se que: 1) de acordo com o fator de forma (β) calculado, todos os equipamentos da amostra estão na fase de desgaste ($1 < \beta$) do ciclo de vida da “curva da banheira”, onde a manutenção preventiva é a mais adequada; 2) uma otimização da estratégia de manutenção do componente ou sistema pode ser realizada; 3) uma Análise de Criticidade deve ser realizada para identificar os Modos de Falha, seus Efeitos e Criticidade no equipamento. Para isso, um método que pode ser útil é a elaboração do FMECA.

A partir do exposto neste trabalho é possível conduzir a escolha da melhor estratégia de manutenção com maior segurança e objetividade. Assim, os processos e atividades aqui apresentados devem ser encarados como uma ferramenta de auxílio, na medida que mostra através da análise comparativa realizada entre o processo atual de manutenção da rede de PCDs com as melhores práticas, requisitos e processos de Suportabilidade disponíveis na literatura (padrões ECSS e projetos aeroespaciais de Defesa), alguns dos pontos mais importantes para o aumento da Disponibilidade do sistema.

Cabe salientar que o presente trabalho não objetiva obter resultados definitivos para a Confiabilidade e Manutenibilidade do sistema, mas sim sugerir melhorias nos processos de operação e manutenção, assim como avaliar a possibilidade do uso de uma metodologia na solução de problemas reais similares.

Finalmente, deve-se destacar que a Análise de Suportabilidade é de grande valia no processo de desenvolvimento de um novo sistema espacial, em contratos de prestação de serviços de manutenção ou aquisição de produto, pois pode diminuir os prazos e custos do ciclo de vida.

9.2 Recomendações ao estudo de caso

Após a comparação do processo atual de manutenção de uma amostra da rede de PCDs com as melhores práticas e padrões disponíveis na literatura, foi possível sugerir progressivas melhorias no processo e nas atividades realizadas. Algumas recomendações adicionais à Seção 8.5 sobre a processo de manutenção para o sistema de PCDs do estudo de caso são listadas a seguir:

1. Obter os dados dos componentes para a determinação das suas taxas de falhas e modos de falhas. Para isso, sugere-se a coleta otimizada das informações das falhas, dos tempos e das ações de manutenção realizadas no equipamento durante as visitas ao campo, através do uso de um aplicativo e *software*, para registro dos dados das falhas, dos tempos e das ações de manutenção realizada, parametrizando e codificando as informações.
2. Registrar e capturar os relatos de discrepâncias, problemas e dificuldades relevantes para a maturidade da operação do sistema.
3. Analisar as informações e as falhas registradas periodicamente. Para isso, sugere-se o desenvolvimento de algoritmos para auxílio na análise dos dados registrados, realizando o monitoramento das falhas, dos tempos e das ações de manutenção executadas nas PCDs.
4. Acompanhar modificações de engenharia, fornecedores e prestadores de

serviços relacionadas aos componentes, peças de reposição, mudança de consumíveis, procedimentos, etc.

5. Fazer o monitoramento da Confiabilidade e Manutenibilidade durante a operação do sistema, com a emissão de relatórios e visibilidades periódicas de indicadores de Confiabilidade do produto, com metas bem definidas; e montar planos de ação para recuperação.

6. Implementar o Sistema de Relato, Análise e Ações Corretivas de Falhas - FRACAS, de acordo com a MIL-STD-2155 (1985). FRACAS é processo de ciclo fechado de realimentação usado para coletar, registrar, analisar e corrigir as falhas. É um processo de captura, classificação e análise das dificuldades enfrentadas na operação/manutenção do sistema e, a gestão dos futuros assuntos de campo com seus planos de ação identificados.

7. Listar os principais problemas de campo com plano de ações identificados.

8. Estabelecer rotinas para acompanhamento de ações corretivas.

9. Implementar a metodologia FMECA, que é a base para elaboração de um plano de Manutenção Baseada na Confiabilidade (RCM).

10. Registrar e documentar todas as informações coletadas dos equipamentos (falhas, tempos de manutenção, procedimentos realizados, etc.) para:

a) Inclusão de requisitos de maturidade e lições aprendidas no desenvolvimento de futuros projetos ou aquisição de novos produtos.

b) Melhorias de manuais de manutenção e procedimentos de manutenção, manuais operacionais, alteração de periodicidade das atividades de manutenção e correção de desvios de informações.

11. Na aquisição de novos sistemas, os contratos com fornecedores devem prever métricas bem claras de Manutenibilidade, Confiabilidade e Disponibilidade. Frequentemente, os requisitos de Manutenibilidade e Confiabilidade são expressos em termos de parâmetros mensuráveis, possibilitando assim uma avaliação quantitativa.

12. No desenvolvimento ou na aquisição de novos sistemas, os requisitos de

Suportabilidade devem fazer parte do processo de requisitos e ter *flowdown* nos contratos com fornecedores.

13. Ter uma equipe dedicada de Suportabilidade dentro do processo de desenvolvimento integrado de novos produtos ou aquisição de novos produtos.

14. Realizar treinamentos para orientar a equipe técnica como proceder quando encontrar discrepâncias ou falhas.

15. Realizar modelagens para previsões de peças de reposição e consumíveis.

16. Desenvolver uma nova Ficha de Manutenção com a parametrização das principais falhas observadas e o estabelecimento de referências cruzadas entre a falha apresentada e a ação de manutenção realizada e a Severidade da falha.

17. Desenvolver uma ferramenta online (aplicativo) para coleta, registro e posterior análise dos dados de manutenção. Neste aplicativo poderiam ser acrescentadas informações sobre o tempo que ocorreu a falha, estabelecendo desta forma dados para o cálculo do MTBF (*Mean Time Between Failures*).

9.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se ainda o estudo da Confiabilidade qualitativa dos modos de falha de cada equipamento, com o objetivo de se entender como as falhas ocorrem.

Sugere-se também a replicação do estudo de Confiabilidade e Manutenibilidade em outras amostras e outros estados brasileiros que apresentam altas frequências de falhas, realizar estudos de quais estados apresentam mais falhas, estratificando as falhas e ações de manutenção executadas, de forma a aumentar a Confiabilidade dos equipamentos por meio de estratégias adequadas de manutenção, além de identificar possíveis fatores comuns de ocorrência de falhas que afetam a Disponibilidade do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABERNETHY, R.; BRENEMAN, J. E.; MEDLIN, C. H.; REINMAN, G. L. **Weibull analysis handbook**. West Palm Beach, Florida: Pratt & Whitney Aircraft, 1983.
- AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB). **Dados ambientais**. Disponível em: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/programa-espacial-brasileiro/aplicacoes-espaciais/dados-ambientais>. Acesso em: 16 mar. 2021.
- ANDRAWUS, J.; WATSON, J.; KISHK, M. Modeling system failures to optimize wind turbine maintenance. **Wind Engineering**, v.30, n. 6, p. 471–486, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, nov. 1994. 37 p.
- BALESTRASSI, P. P.; DE PAIVA, A. P. **Estatística aplicada**. Itajubá: UNIFEI, 2007. 263 p.
- BARABADI, A. Reliability model selection and validation using Weibull probability plot: a case study. **Electric Power Systems Research**, v.101, p.96-101, aug. 2013.
- BARABADI, A.; BARABADY, J.; MARKESET, T. **A methodology for throughput capacity analysis of a production facility considering environment condition**. Tromsø, Norway: University of Tromsø, 2011.
- BLANCHARD, B. S. **Logistics engineering and management**. 5.ed. Virginia, New York, NY: Pearson Education, 2004. 276 p.
- BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. **System engineering and analysis book**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2016. 788 p.
- BATTAGLIA, M. **Design for supportability**. 2010. Disponível em: <https://c3.nasa.gov/dashlink/static/media/other/Design4Supportability.pdf> . Acesso em: 27 fev. 2021.
- BRITISH STANDARD INSTITUTES. **BS 4778**: glossary of international terms. London, UK, 1991.
- CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). **Histórico**. Disponível em: <https://www.cemaden.gov.br/historico/>. Acesso em: 09 fev. 2021.
- CIRILLO, W.; AASENG, G.; GOODLI, K.; STROMGREN, C.; MAXWELL, A. Supportability for beyond low Earth orbit missions. In: AIAA SPACE CONFERENCE & EXPOSITION, 2011. **Proceedings...** AIAA, 2011.

COETZEE, J. The role of NHPP models in the practical analysis of maintenance failure data, reliability engineering and system safety. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 56, n.2, p.161-168, 1997.

CROSS INDUSTRY STANDARD PROCESS FOR DATA MINING (*CRISP-DM*). **The CRISP-DM consortium**. [S.I.]: SPSS, 2000.

DALLOSTA, P. M. Practitioner's guide to supportability. In: PSM WORKSHOP, 2018. **Proceedings...** 2018.

DALLOSTA, P. M.; SIMCIK, T. A. **Designing for supportability: driving reliability, availability, and maintainability**. [S.I.]: Defense Acquisition University, 34-38, 2012a.

DALLOSTA, P. M.; SIMCIK, T. A. Supportability analysis. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2012. **Proceedings...** 2012b.

DJEDDI, A.; HAFIFA, A.; SALAM, A. Operational reliability analysis applied to a gas turbine based on three parameter Weibull distribution. **Mechanika**, v. 21, n.3, p.187-192, 2015.

ELMAHDY E. A new approach for Weibull modeling for reliability life data analysis. **Applied Mathematics and Computation**, v. 250, p.708-720, 2015.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **ECSS-M-70A**: integrated logistic support. Noordwijk, 1996.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **ECSS P-001B**: glossary of terms. Noordwijk, 2004.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **ECSS-S-ST-00C**: system description, implementation and general requirements. Noordwijk, 2008a.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **ECSS-Q-ST-09C Rev.1**: availability analysis. Noordwijk, 2008b.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **ECSS-E-ST-10C**: space product engineering – system engineering general requirements. Noordwijk, 2009a.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **ECSS-Q-ST-30C Rev.1**: dependability. Noordwijk, 2009b.

EUROPEAN ORGANISATION FOR THE EXPLOITATION OF METEOROLOGICAL SATELLITES (EUMETSAT). **International data collection system users' guide**. Germany:EUMESAT, 2009.

ERASMUS, L. et al. **Engineering logistics of personnel and computer resources of a command and control centre**: desk study. [S.l.]: University of Pretoria, 2015.

FIROOZMAND, F. **Manutenabilidade**. São José dos Campos: ITA, 2013. Apostila de curso.

FOGLIATTO, F.; RIBEIRO, D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 282 p.

FORTESCUE, P.; STARK, J.; SWINERD, G. **Spacecraft systems engineering**. 3.ed. London: John Wiley & Sons, 2003. 678 p.

FRITSCH, C.; RIBEIRO, J.L.D. Proconf: um *software* orientado para análises de confiabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP), 1998, Porto Alegre. **Anais...** ABEBRO, 1998. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep1998_art234.pdf. Acesso em: 20 ago. 2020.

HOLMBERG, K. et al. **Book E-maintenance**. London: Springer, 2010.

HERSWHY, R. W. **Hydrological data transmission by satellite-a user's experience**. [S.l.]: Water Services, 1980.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION'S. **IEC 60812**: analysis techniques for system reliability – procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). 2.ed. Switzerland, 2006.

INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING - INCOSE. **International council on systems engineering**. 2010a. Disponível em: <http://www.incose.org/>. Acesso em: 02 fev, 2021.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção**: função estratégica. 3.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KELLY, A.; HARRIS, M. J. **Management of industrial maintenance**. London: Butterworth-Heinemann, 1978. 262 p.

KOTHAMASU, R.; HUANG, S. H.; VERDUIN, W. H. **Handbook of maintenance management and engineering**. [S.l.]: Springer, 2009. 741p.

KUMAR, U.; KNEZEVIC, J. Supportability - critical factor on operational availability. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v. 15, n. 4, p. 366 – 376, 1998. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/02656719810214332>. Acesso em: 20 ago. 2020.

LAFRAIA, J. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark, 2001. 374 p.

LALLI, V.; PACKARD, M. Designing for maintainability and system availability. In: THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PRODUCT QUALITY AND INTEGRITY, 1997. **Proceedings...** IEEE, 1997.

LOUREIRO, G. A. **A systems engineering and concurrent engineering framework for the integrated development of complex products**. 1999. 607 p. Tese (Doutorado em Manufacturing Engineering), Loughborough University, Loughborough, 1999.

LYLE, R. G. **Maintainability engineering design notebook: revision II, and cost of maintainability**. [S.l.]: Martin Marieta Aerospace, 1975. 378 p.

MAIOLINO J. **Uma proposta para a atualização do segmento espacial do sistema brasileiro de coleta de dados orientada pela engenharia de sistemas**. 2011. 224 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2011.

MARQUEZ, C. A. **The maintenance management framework**. [S.l.]: Springer, 2007. 135p.

MARCHEZIN, L. et al. Mapeamento de falhas em plataformas de coleta de dados do CEMADEN. In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS (WETE), 11., 2020, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2020.

MORAES, E. et al. **Contratação de serviços de manutenção de plataformas de coleta de dados pluviométricos**. São José dos Campos: CEMADEN, 2016a.

MORAES, E. et al. **Especificações técnicas da operação da rede hidrológica**. São José dos Campos: CEMADEN, 2016b.

MOUBRAY, J. **Reliability-centred maintenance**. [S.l.: s.n.], 1991. 164 p.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Recommended techniques for effective maintainability**. Washigton: NASA, 1994.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Reliability centered maintenance guide for facilities and collateral equipment**. Washington: NASA, 2000. 472p.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Systems engineering handbook**. Washington: NASA, 2007. 297p.

NELSON, W. Weibull analysis of reliability data with few or no failures. **Journal of Quality Technology**, v. 17, n.3, p.140-146, 1985.

NELSON, W. Hazard plotting methods for analysis of life data with different failure modes. **Journal of Quality Technology**, v. 2, n.3, p.126-149, 1970.

O'CONNOR, P.; KLEYNER, A. **Practical reliability engineering**. 5.ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. 484 p.

OWENS, A.C.; WECK, O.L.; STROMGREN, C.; CIRILLO, W.; GOODLI, K. Supportability challenges, metrics, and key decisions for future human spaceflight. In: AIAA SPACE AND ASTRONAUTICS FORUM AND EXPOSITION, 2017. **Proceedings...** AIAA, 2017.

PASHA, G.; KHAN, M.; PASHA, A. Empirical analysis of the Weibull distribution for failure data. **Journal of Statistics**, v.13, n.1, 2006.

RABELLO, A. P. S. S. **Um novo processo para melhorar a dependabilidade de sistemas espaciais entre as fases de planejamento e projeto detalhado incluindo extensões do Diagrama de Markov (DMEP) e da FMECA (FMPE) a projetos**. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais .São José dos Campos, 2017.

RELIASOFT. **Reliability engineering and textbook library: system analysis (RBDs or fault trees)**. 2015. Disponível em: https://www.reliawiki.com/index.php/System_Analysis_Reference. Acesso em: 10 ago. 2020.

RELIASOFT. **Life data analysis reference book**. 2015. Disponível em: https://www.reliawiki.com/index.php/Life_Data_Analysis_Reference_Book. Acesso em: 10 ago. 2020.

ROCHA, D. et al. Análise dos dados de vida para ativos industriais utilizando distribuição weibull. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 17, n. 1, p. 53-60, jan./mar. 2020. Disponível em: <https://www.tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/2176-1523.20202032>. Acesso em: 20 nov. 2020.

ROMANI, M.; LAHOZ, C.; YANO, E. Identifying dependability requirements for space *software* systems. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 2, n.3, p. 287-300, 2010.

SANTANA, W. **Estudo sobre modelagem e avaliação de confiabilidade em redes óticas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Informação) - Universidade Federal do ABC, Santo André, 2010.

SELLITTO, M.; BRASIUS, W. Maintenance strategy based on reliability analytical models for three parallel mechanical transformation machines. **IEEE Latin America Transactions**, v.15, n. 5, p.988- 993, 2017.

SELLITTO, M. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Revista Produção**, v.13, n. 2, p. 759-783, 2013. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo>. Acesso em: 20 nov. 2020.

SELLITTO, M. A.; CERVEIRA, D. S. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. **Revista Produção**, v.15, n. 2, p. 405- 432, 2015. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo>. Acesso em: 20 nov. 2020.

SILVA, E.; FERREIRA, G.; SANTOS, M.; ANDRADE, P.. ROSA, R. Análise de dados de falha de um transmissor de fibra óptica. **Revista Thema**, v.14, n. 4, p. 259-266, 2017.

SGARBOSSA, F. et al. Impacts of Weibull parameters estimation on preventive maintenance costs. **IFAC-Papers OnLine**, v.51, n.11, p. 508-513, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318314940>. Acesso em: 20 nov. 2020.

SHANG-YI, C.; NILIMA, S.; HUNG-WEI, L.; YEONG-HWA, C. Predictive maintenance with sensor data analytics on a raspberry pi-based experimental platform. **Sensors**, v.19, n.18, 2019.

SÍRIO, D.; SOUSA, P.; BRAGA, L.; AZEVEDO, K.; BARBASSA, A. A importância das manutenções corretivas e preventivas nas plataformas de coleta de dados da rede de monitoramento hidrometeorológico nacional com ênfase no estado do Maranhão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015. **Anais...** 2015.

SOUZA, M.L.O., MARCHEZIN, L.M.B. **Compilação e formato para a comparação entre itens do trabalho** [comunicação pessoal]. Mensagem recebida por Letícia Moreira de Backer Marchezin em 18 jun. 2021.

SOUZA, M.L.O. Discussão sobre conceitos. [comunicação pessoal]. Mensagem recebida por Letícia Moreira de Backer Marchezin em 10 abr. 2021.

SOUZA, M. L. O; CARVALHO, T. R. The fault avoidance and the fault tolerance approaches for increasing the reliability of aerospace and automotive systems. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAIS DE TECNOLOGIA DA MOBILIDADE (SAE), 2005, São Paulo, Brasil. **Anais...** 2005.

SMITH, D. **Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers**. 8.ed. [S.I.]: Elsevier, 2011.

STAPELBERG, R. **Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design.** [S.l.]: Springer-Verlag, 2009.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **Designing and assessing supportability in DOD weapon systems:** a guide to increased reliability and reduced logistics footprint. Washington, DC: Department of Defense, 2003.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **DOD-HDBK-791:** maintainability design techniques. Washington, DC: Department of Defense, 1988.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **DOD instruction 5000.01:** the defense acquisition system. Washington, DC: Department of Defense, 2003.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **DOD instruction 5000.02:** operation of the defense acquisition system. Washington, DC: Department of Defense, 2008b.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **Guide for achieving reliability, availability, and maintainability.** Washington, DC: Department of Defense, 2005.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **Condition based maintenance plus guidebook.** Washington, DC: Department of Defense, 2008.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **Defense acquisition guidebook.** Washington, DC: Department of Defense, 2010.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **Product support manager guidebook.** Washington, DC: Department of Defense, 2011a.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **Reliability centered maintenance.** Washington, DC: Department of Defense, 2011b.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-HDBK-388B:** electronic reliability design handbook. Washington, DC: Department of Defense, 1998.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-HDBK-470A:** Designing and developing maintainable products and systems. Washington, DC: Department of Defense, 1997.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-HDBK-502:** Product support analysis handbook. Washington, DC: Department of Defense, 2013.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-721C**: Military standard, definitions of effectiveness terms for reliability, maintainability, human factors and safety. Washington, DC: Department of Defense, 1996.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-1629A**: procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis. Washington DC: Department of Defense, 1984.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-2155(AS)**: failure reporting analysis and corrective action system. Washington, DC: Department of Defense, 1985.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-2173**: reliability-centered maintenance requirements for naval aircraft, weapons systems and support equipment. Washington, DC: Department of Defense, 1986.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-721C**: definitions of terms for reliability and maintainability. Washington, DC: Department of Defense, 1981.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-785B**: reliability programs for system and equipment development and production. Washington, DC: Department of Defense, 1980.

TAILLADE-CARRIÈRE, M. Satellite data collection systems hydrological application. In: CEFIGRE - SEMINAIRE TELETRANSMISSION, 1979, Toulouse. **Annales...** 1979.

VELASQUEZ, E. **Estabelecimento de diretrizes e recomendações com enfoque em manutenibilidade para o projeto de aeronaves de asas rotativas**. 2011. 150p. Dissertação (Mestrado em Segurança de Aviação e Aeronavegabilidade) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.

VERMA, D.; BECK, J.; PARRY, T. **Designing and assessing supportability in DoD weapon systems**: a guide to increased reliability and reduced logistics footprint. Washington: Department of Defense, 2003.

VIANA, H.; MARQUES, A.; BIRANI, S.; SENA, S.; NOBUMASA, G. Manutenção centrada em confiabilidade: aplicação em motoredutores de transportadores de correias em uma refinaria de alumina. **Revista Gestão Industrial**, v. 14, n. 2, p. 186-205, abr./jun. 2018.

WEIBULL. **Characteristics of the Weibull distribution**. Disponível em: <https://www.weibull.com/hotwire/issue14/re basics14.htm>. Acesso em: 12 fev. 2021.

YAMAGUTI, W. et al. Sistema brasileiro de coleta de dados ambientais: status e planos futuros. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1633-1640.

ZHAI, L. et al. Analysis of time-to-failure data with Weibull model in product Life cycle management. In: CIRP INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING, 20., 2013, Singapore. **Proceedings...** 2013.

GLOSSÁRIO

Confiabilidade: Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo, NBR-5462 (1994).

Dependabilidade: métrica vetorial composta por outras métricas escalares de atributos que forem importantes para a tomada de decisão em questão. Os atributos que compõem a Dependabilidade são, nesta ordem: 1) Confiabilidade; 2) Manutenibilidade; 3) Disponibilidade, Rabello (2016).

Disponibilidade: é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo, levando-se em conta os aspectos combinados de sua Confiabilidade, Manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados, NBR-5462 (1994).

Engenharia de Sistemas: uma abordagem interdisciplinar que gerencia o esforço técnico total para transformar os requisitos em uma solução de sistema, ECSS-E-ST-10C (ECSS, 2009a).

Manutenibilidade: é a probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é executada sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos, NBR-5462 (1994).

Manutenção: é a combinação de todas as ações técnicas administrativas, incluindo ações de supervisão, destinadas a substituir um componente ou restaurá-lo a um estado em que possa executar a sua função necessária, BS 4778 (1991).

Suportabilidade: métrica vetorial composta por outras métricas escalares de atributos que forem importantes para a tomada de decisão em questão. Os atributos que compõem a Suportabilidade são, nesta ordem: 1) Manutenibilidade; 2) Confiabilidade; 3) Disponibilidade, Souza (2021).

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DE ALGUNS SISTEMAS DE COLETA DE DADOS EXISTENTES NO BRASIL

O CEMADEN foi criado em julho de 2011 e é unidade integrante do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações – MCTIC. O CEMADEN tem como missão realizar o monitoramento das ameaças naturais em áreas de riscos em municípios brasileiros suscetíveis à ocorrência de desastres naturais (cf. <https://www.cemaden.gov.br/missao-do-cemaden/>); e é responsável pela previsão e alertas de eventos hidrológicos críticos aos municípios vulneráveis a inundações e pela manutenção corretiva das plataformas de coleta, de dados ambientais (PCDs).

As PCDs são equipamentos que possuem sensores capazes de realizar medições de diversas variáveis ambientais. São equipamentos capazes de realizar a transmissão automática e em tempo real dos dados coletados para as estações de processamento por meio de telemetria, através de satélites ou outras tecnologias como General Packet Radio Service (GPRS). As PCDs do CEMADEN transmitem os dados através da tecnologia GPRS.

No Brasil existem outros sistemas de coleta de dados ambientais por satélite, tais como o Sistema de Satélites de Coleta de Dados (SCD), construído e operado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O Sistema de Satélites de Coleta de Dados (SCD) conta com a operação de dois satélites brasileiros específicos para coleta de dados meteorológicos da série SCD (SCD-1 e SCD-2) e é ainda constituído pelo satélite CBERS-4, por redes de plataformas de coleta de dados espalhadas pelo território nacional, pelas Estações de Recepção de Cuiabá (MT) e de Alcântara (MA) e por um Centro de Missão que processa e repassa os dados aos seus usuários, conhecido como Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA) (<https://www.gov.br/aeb/pt-br/programa-espacial-brasileiro/aplicacoes-espaciais/dados-ambientais>).

O Sistema de Coleta de Dados ARGOS, gerenciado pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e pelo Centre National d'Études Spatiales (CNES), apresenta compatibilidade com o Sistema Brasileiro de Coleta de

Dados em relação as plataforma de coleta de dados. As frequências e as potências utilizadas nas plataformas, bem como os formatos utilizados são totalmente compatíveis entre si. A França junto com os Estados Unidos estabeleceram o Sistema Argos. Ao NOAA coube o fornecimento dos satélites da série NOAA e ao CNES o fornecimento das cargas úteis denominadas de Argos-1, Argos-2 e Argos-3. A empresa CLS Argos localizada em Toulouse faz o processamento, armazenamento e a distribuição dos dados das plataformas para os usuários, cobrando pelos custos de processamento.

O Sistema ARGOS tem sido utilizado no Brasil para recepção e localização de bóias de deriva (Atlântico) ou plataformas de coleta de dados instaladas na Antártica, que não podem ser recebidas com o Sistema Brasileiro. É também utilizada para rastreamento de animais em área fora de cobertura das estações brasileiras (MAIOLINO, 2011).

Outra forma de se realizar a aquisição de dados de plataformas de coleta de dados, é através do uso de satélites geoestacionários como o sistema METEOSAT e GOES. As plataformas em solo possuem horários pré-determinados, definidos na configuração do sistema pelo operador dos satélites (NOAA), para a transmissão dos dados. Este sistema permite a coleta em horários sinóticos e sua aplicação é orientada para a meteorologia. Este sistema é incompatível com as plataformas do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados (MAIOLINO, 2011).

APÊNDICE B - APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE PROCONF UTILIZADO NA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS DADOS DO ESTUDO DE CASO NESTE TRABALHO

O *software* utilizado na estimativa de Confiabilidade do estudo de caso neste trabalho foi o ProConf. A escolha deste *software* foi baseada no fato dele incorporar os principais modelos matemáticos encontrados na literatura (Exponencial, Weibull, Gamma, Normal e Lognormal), que representam os tempos de falha, auxiliando na escolha da distribuição que melhor se adapta aos dados. Além disso, o *software* é amigável e de fácil utilização pelo usuário, fornecendo gráficos que permitem a visualização da função de Confiabilidade, taxa de risco, densidade de probabilidade e densidade acumulada de probabilidade.

O *software* Proconf já foi utilizado em análises de Confiabilidade similares em outros trabalhos acadêmicos. Viana H. et al. (2018) apresentou uma aplicação do estudo de Confiabilidade através da análise de dados contemplando seu uso na base operacional da área de filtragem de hidrato de uma refinaria de alumina. Silva E. et al. (2017) apresentou um trabalho sobre análise de dados de falha de um transmissor de fibra óptica. Já Sellitto M. (2013) utilizou o *software* ProConf em análises com o objetivo de definir a estratégia de manutenção mais adequada para uma bomba centrífuga petrolífera.

Segundo Fritsch e Ribeiro (1998), o ProConf *software* é um programa computacional para o ajuste de distribuições de tempos de falha para dados de Confiabilidade, através do uso de métodos analíticos e métodos gráficos. Ele fornece estimativas dos parâmetros da distribuição e seus respectivos intervalos de confiança, com cálculos do tempo médio até a falha (MTTF), taxa de risco e Confiabilidade para determinado tempo.

Neste *software*, os parâmetros da distribuição são calculados utilizando o método da máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation* - MLE), fornecendo também a variância e intervalos de confiança.

Para a distribuição de Weibull, que foi o modelo que melhor se adequou os dados do estudo de caso, o *software* Proconf usa a seguinte função densidade de probabilidade $f(t)$:

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

onde η é o parâmetro de escala; β é o parâmetro de forma (ou inclinação).

**APÊNDICE C - TEMPOS DE OPERAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PCDS APÓS
O TRATAMENTO DOS DADOS BRUTOS, UTILIZADOS NA ANÁLISE DE
CONFIABILIDADE; E HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIA POR ANO**

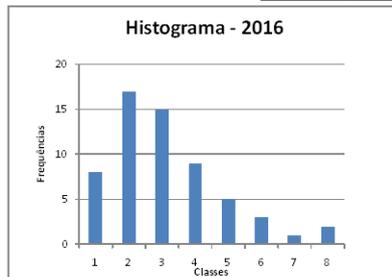
C.1 Dados do histograma de frequência - Ano 2016

Ordem (N)	time_to_failure (h)
1	5,0
2	5,7
3	8,6
4	11,7
5	15,3
6	18,6
7	22,2
8	24,6
9	28,2
10	31,5
11	31,9
12	33,6
13	35,1
14	36,4
15	37,9
16	38,9
17	39,2
18	42,3
19	44,1
20	44,2
21	44,5
22	45,1
23	45,9
24	49,3
25	50,3
26	50,5
27	50,6
28	50,7
29	52,7
30	53,5
31	54,5
32	55,1
33	57,3
34	59,7
35	60,8
36	63,4
37	64,7
38	66,3
39	68,7
40	69,6
41	74,6
42	75,8
43	76,0
44	76,4
45	76,4
46	83,0
47	87,7
48	93,1
49	94,6
50	98,2
51	99,1
52	99,3
53	100,3
54	104,3
55	121,2
56	125,8
57	134,5
58	158,0
59	165,2
60	180,6

Minimo	5
Maximo	180,6
Media	67,2
Tamanho (N)	60
Mediana	54
Classes	8
incremento	23
Moda	N/A

Classes	Min.	Max.	Frequência
1	5,0	27,6	8
2	27,6	50,3	17
3	50,3	73,0	15
4	73,0	95,6	9
5	95,6	118,3	5
6	118,3	141,0	3
7	141,0	163,6	1
8	163,6	186,3	2

Classes	Frequência
1	8
2	17
3	15
4	9
5	5
6	3
7	1
8	2



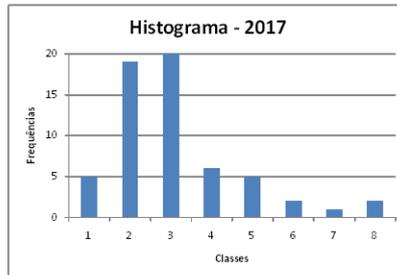
C.2 Dados do histograma de frequência - Ano 2017

Ordem (N)	time_to_failure (h)
1	3,3
2	4,9
3	8,8
4	8,8
5	19,9
6	27,6
7	30,3
8	32,1
9	33,1
10	34,5
11	39,1
12	40,7
13	41,3
14	41,5
15	42,3
16	42,8
17	44,1
18	45,0
19	45,4
20	49,0
21	49,3
22	49,4
23	49,5
24	49,7
25	51,5
26	51,6
27	51,7
28	52,4
29	52,8
30	52,9
31	53,8
32	55,3
33	57,4
34	59,7
35	61,7
36	61,7
37	64,0
38	65,5
39	65,7
40	67,2
41	69,5
42	70,9
43	72,4
44	74,3
45	74,8
46	75,6
47	75,8
48	85,7
49	88,8
50	93,9
51	100,4
52	108,6
53	111,4
54	117,8
55	118,2
56	123,2
57	127,4
58	152,2
59	184,7
60	187,3

Minimo	3,3
Maximo	187,3
Media	64,5
Tamanho (N)	60
Mediana	53
Classes	8
incremento	24
Moda	N/A

Classes	Min.	Max.	Frequência
1	3,3	27,0	5
2	27,0	50,8	19
3	50,8	74,5	20
4	74,5	98,3	6
5	98,3	122,0	5
6	122,0	145,8	2
7	145,8	169,5	1
8	169,5	193,3	2

Classes	Frequência
1	5
2	19
3	20
4	6
5	5
6	2
7	1
8	2



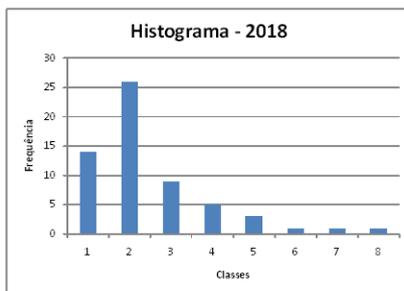
C.3 Dados do histograma de frequência - Ano 2018

Ordem (N)	time_to_failure (h)
1	2,1
2	6,9
3	30,4
4	32,7
5	38,2
6	38,6
7	40,3
8	42,3
9	43,0
10	44,2
11	45,4
12	50,0
13	52,5
14	55,6
15	60,2
16	60,9
17	61,7
18	62,3
19	63,0
20	64,9
21	64,9
22	65,5
23	66,8
24	67,1
25	68,6
26	68,9
27	72,7
28	73,8
29	75,7
30	76,1
31	78,3
32	79,1
33	82,2
34	83,8
35	91,0
36	94,2
37	94,7
38	106,4
39	107,0
40	112,7
41	128,2
42	132,2
43	142,0
44	146,0
45	150,0
46	150,9
47	164,2
48	166,0
49	169,0
50	175,2
51	176,0
52	177,6
53	205,7
54	217,0
55	229,0
56	242,7
57	265,0
58	308,1
59	392,1
60	440,2

Minimo	2,1
Maximo	440,2
Media	111,7
Tamanho (N)	60
Mediana	77
Classes	8
incremento	57
Moda	N/A

Classes	Min.	Max.	Frequência
1	2,1	58,7	14
2	58,7	115,2	26
3	115,2	171,8	9
4	171,8	228,3	5
5	228,3	284,9	3
6	284,9	341,4	1
7	341,4	398,0	1
8	398,0	454,5	1

Classes	Frequência
1	14
2	26
3	9
4	5
5	3
6	1
7	1
8	1



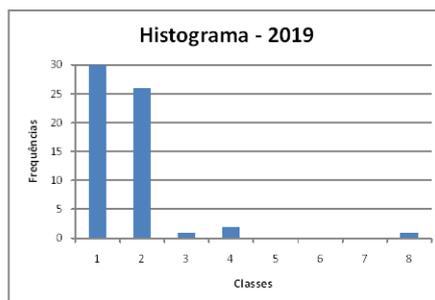
C.4 Dados do histograma de frequência - Ano 2019

Ordem (N)	time_to_failure (h)
1	9,5
2	16,3
3	23,3
4	27,7
5	31,4
6	35,5
7	35,8
8	38,9
9	41,3
10	43,3
11	46,8
12	49,4
13	50,9
14	52,4
15	52,8
16	55,3
17	56,4
18	56,5
19	57,3
20	57,9
21	59,9
22	60,0
23	61,9
24	62,2
25	64,2
26	64,5
27	65,3
28	65,4
29	66,2
30	67,0
31	69,7
32	70,1
33	70,8
34	71,5
35	74,3
36	78,4
37	80,0
38	81,3
39	82,2
40	83,7
41	87,9
42	88,6
43	88,6
44	91,5
45	97,0
46	97,2
47	100,1
48	101,0
49	106,0
50	106,2
51	110,1
52	117,8
53	120,9
54	122,3
55	126,8
56	128,1
57	138,0
58	192,9
59	215,5
60	470,6

Minimo	9,5
Maximo	470,6
Media	82,4
Tamanho (N)	60
Mediana	68
Classes	8
incremento	60
Moda	N/A

Classes	Min.	Max.	Frequência
1	9,5	69,0	30
2	69,0	128,5	26
3	128,5	188,1	1
4	188,1	247,6	2
5	247,6	307,1	0
6	307,1	366,6	0
7	366,6	426,1	0
8	426,1	485,7	1

Classes
1
2
3
4
5
6
7
8



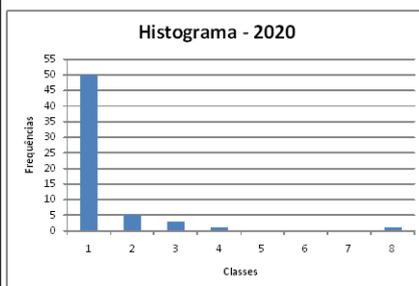
C.5 Dados do histograma de frequência - Ano 2020

Ordem (N)	time_to_failure (h)
1	14,1
2	17,5
3	17,6
4	19,0
5	21,1
6	21,3
7	21,8
8	22,2
9	23,4
10	25,7
11	25,7
12	25,9
13	26,2
14	26,4
15	26,8
16	27,1
17	27,1
18	27,9
19	28,4
20	29,6
21	29,9
22	31,0
23	31,0
24	31,9
25	32,1
26	32,2
27	32,4
28	32,5
29	32,7
30	33,1
31	33,9
32	34,1
33	34,7
34	34,9
35	35,0
36	35,8
37	37,7
38	38,5
39	39,2
40	39,5
41	39,6
42	40,0
43	43,1
44	44,0
45	44,1
46	51,6
47	54,2
48	55,0
49	62,7
50	69,0
51	99,4
52	99,5
53	126,1
54	129,6
55	161,1
56	184,0
57	195,5
58	207,5
59	309,6
60	611,4

Minimo	14,1
Maximo	611,4
Media	63,1
Tamanho (N)	60
Mediana	34
Classes	8
incremento	77
Moda	N/A

Classes	Min.	Max.	Frequência
1	14,1	91,2	50
2	91,2	168,4	5
3	168,4	245,5	3
4	245,5	322,6	1
5	322,6	399,7	0
6	399,7	476,8	0
7	476,8	553,9	0
8	553,9	631,0	1

Classes	Frequência
1	50
2	5
3	3
4	1
5	0
6	0
7	0
8	1



Nota: O conjunto de dados do ano 2020 é parcial, relativo a seis meses.

APÊNDICE D - TEMPOS DE INDISPONIBILIDADE DAS AMOSTRAS DE PCDS APÓS O TRATAMENTO DOS DADOS BRUTOS, UTILIZADOS NA ANÁLISE DE MANUTENABILIDADE; E MDT (*MEAN DOWN TIME*) POR ANO.

D.1 Dados considerando a amostra completa de 60 PCDs; e MDT por ano

<i>Time-to-repair (non-operational times), hours</i>					
PCD	2016	2017	2018	2019	2020
1	9,3	48,2	162,8	7,5	3,2
2	169,8	14,6	195,7	127,5	2,3
3	1,9	1,4	1,6	5,9	2,0
4	1,8	2,0	2,2	6,2	2,1
5	1,9	1,4	2,0	5,3	2,1
6	35,4	12,4	16,0	7,3	3,3
7	2,1	2,2	2,4	4,5	2,3
8	1,8	2,2	2,0	4,2	2,1
9	7,0	5,0	2,8	4,7	2,8
10	1,8	1,9	2,3	953,0	4,4
11	1,6	2,3	2,0	6,1	1,7
12	2,2	1,7	3,1	5,0	2,1
13	1,7	2,9	1,3	5,3	1,8
14	1,5	2,0	2,1	4,9	2,7
15	3,2	2,0	5,0	7,6	4,1
16	3,3	2,4	2,0	7,5	1,4
17	2,6	2,3	4,1	5,7	2,0
18	2,6	1,7	2,3	5,4	1,9
19	2,1	2,3	2,1	5,2	1,8
20	4,2	2,1	3,0	4443,0	4,0
21	284,8	108,8	490,6	5,5	44,2
22	5,3	6,9	1,3	5,7	1,9
23	3,6	2,2	13,8	6,3	6,4
24	1,7	2,5	1,9	6,2	1,7
25	1,6	331,2	2,8	5,9	1,9
26	126,1	63,5	4,6	33,4	6,4
27	6,1	3,3	4,4	8,4	4,1
28	2,0	2,2	4,1	8,5	3,6
29	27,0	7,0	135,7	7,2	3,2
30	9,1	1,3	326,6	7,1	4,4
31	3,9	2,2	3,6	905,0	2,4
32	1,9	1,9	2,2	1460,0	2,2
33	3,4	2,3	174,0	6,1	5,0
34	89,9	2,7	3,2	4,7	2,2
35	2,2	3,8	4,7	15,0	5,3
36	2,0	2,2	169,0	5,5	5,1
37	9,1	3,4	2,8	6,2	2,2
38	1,6	2,0	2,7	6,0	2,1
39	1,8	1,7	2,4	6,1	2,1
40	3,1	11,2	100,6	5,4	2,2
41	6,7	6,1	461,7	816,3	2,0
42	2,2	2,7	103,1	9,5	4,5
43	48,9	13,7	140,2	19,1	10,8
44	1,7	2,0	1,1	3,2	1,9
45	6,8	4,1	2,6	6,4	2,2
46	3,0	1,9	2,1	7,1	5,9
47	2,1	2,3	2,5	4,8	2,0
48	2,2	2,5	2,3	4,9	2,2
49	582,0	2,6	2,7	5,2	2,2
50	11,5	42,3	58,0	52,7	24,1
51	35,9	6,8	18,5	26,5	7,3
52	1,9	1,8	3,1	5,4	2,0
53	2,2	1,8	2,3	6,0	6,1
54	1,7	2,0	1,0	5,4	2,0
55	1,5	2,1	2,1	4,3	1,7
56	1,9	5,5	2,0	4,6	1,9
57	2,1	1801,0	3,6	5,9	1,9
58	1,6	2,3	2,8	13,1	1,9
59	2,4	2,3	2,1	434,0	0,4
60	7,7	2,8	3,1	6,0	1,9

Ano	MDT - Mean Down Time (horas)
2016	26,2
2017	43,1
2018	44,7
2019	159,6
2020	4,06

Nota: o conjunto de dados de 2020 é parcial, relativo a 6 meses.

D.2 Dados considerando a amostra de 60 PCDs, e excluindo os tempos com estado não operacional acima de 48h; e MDT por ano

<i>Time-to-repair (non-operational times), hours</i>					
PCD	2016	2017	2018	2019	2020
1	9,31	14,56	1,59	7,47	3,20
2	1,89	1,41	2,15	5,91	2,25
3	1,77	1,99	1,98	6,16	1,95
4	1,91	1,42	16,00	5,34	2,10
5	35,40	12,40	2,37	7,31	2,13
6	2,12	2,23	1,95	4,54	3,30
7	1,78	2,16	2,84	4,22	2,28
8	7,02	4,95	2,27	4,68	2,07
9	1,79	1,93	2,01	6,07	2,79
10	1,55	2,27	3,10	4,96	4,42
11	2,21	1,70	1,27	5,29	1,72
12	1,68	2,85	2,10	4,88	2,09
13	1,51	2,04	5,01	7,60	1,80
14	3,16	2,01	1,98	7,50	2,65
15	3,25	2,40	4,09	5,65	4,12
16	2,59	2,27	2,30	5,44	1,41
17	2,59	1,71	2,13	5,15	2,00
18	2,05	2,31	3,01	5,53	1,89
19	4,20	2,06	1,34	5,70	1,84
20	5,34	6,91	13,80	6,27	4,02
21	3,57	2,20	1,93	6,21	44,22
22	1,66	2,52	2,79	5,85	1,92
23	1,55	3,31	4,64	33,41	6,41
24	6,07	2,18	4,38	8,38	1,67
25	2,04	6,97	4,14	8,49	1,90
26	27,00	1,33	3,60	7,17	6,40
27	9,14	2,19	2,20	7,08	4,13
28	3,94	1,94	3,21	6,10	3,61
29	1,93	2,32	4,74	4,66	3,21
30	3,39	2,65	2,78	14,99	4,35
31	2,15	3,79	2,70	5,49	2,37
32	1,98	2,15	2,40	6,20	2,17
33	9,06	3,44	1,13	6,01	5,01
34	1,56	1,99	2,60	6,11	2,22
35	1,83	1,73	2,10	5,36	5,32
36	3,07	11,22	2,46	9,49	5,14
37	6,68	6,08	2,31	19,09	2,18
38	2,20	2,73	2,65	3,23	2,08
39	1,73	13,69	18,47	6,39	2,14
40	6,83	2,02	3,10	7,13	2,20
41	2,95	4,08	2,29	4,77	1,98
42	2,06	1,93	1,04	4,85	4,50
43	2,16	2,25	2,08	5,19	10,80
44	11,49	2,45	1,98	26,47	1,89
45	35,88	2,64	3,55	5,41	2,19
46	1,87	42,34	2,78	5,98	5,92
47	2,15	6,76	2,12	5,41	2,01
48	1,71	1,76	3,09	4,27	2,17
49	1,51	1,83		4,62	2,16
50	1,93	2,04		5,91	24,11
51	2,14	2,09		13,14	7,25
52	1,55	5,50		5,99	1,99
53	2,41	2,30			6,14
54	7,70	2,29			1,95
55		2,83			1,69
56					1,94
57					1,91
58					1,93
59					0,37
60					1,91

Ano	MDT - Mean Down Time (horas)
2016	5,0
2017	4,2
2018	3,5
2019	7,4
2020	4,06

Nota: os dados de 2020 são parciais, relativo a 6 meses.