



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.17.17.47-TDI

DISPONIBILIDADE DE ORGANIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS ESPACIAIS

Carlos Eduardo Andrade Lemonge

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Engenharia e Tecnologia Espaciais/
Gerenciamento de Sistemas
Espaciais, orientada pelo Dr. Geilson
Loureiro, aprovada em 28 de
fevereiro de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E5M4L5>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.17.17.47-TDI

DISPONIBILIDADE DE ORGANIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS ESPACIAIS

Carlos Eduardo Andrade Lemonge

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Engenharia e Tecnologia Espaciais/
Gerenciamento de Sistemas
Espaciais, orientada pelo Dr. Geilson
Loureiro, aprovada em 28 de
fevereiro de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E5M4L5>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Lemonge, Carlos Eduardo Andrade.

L544d Disponibilidade de organização no desenvolvimento de produtos espaciais / Carlos Eduardo Andrade Lemonge. – São José dos Campos : INPE, 2013.

xxii + 158 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.17.17.47-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientador : Dr. Geilson Loureiro.

1. subestações. 2. instalações de distribuição de força. 3. disponibilidade. 4. confiabilidade. 5. manutenibilidade. 6. engenharia simultânea de sistemas. I.Título.

CDU 629.7:621.311.4



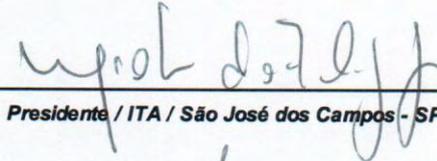
Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

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

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em

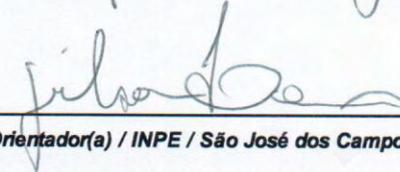
**Engenharia e Tecnologia
Espaciais/Gerenciamento de Sistemas
Espaciais**

Dr. Milton de Freitas Chagas Junior



Presidente / ITA / São José dos Campos - SP

Dr. Geilson Loureiro



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria



Convidado(a) / IAE/DCTA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

() unanimidade

Aluno (a): **Carlos Eduardo Andrade Lemonge**

São José dos Campos, 28 de Fevereiro de 2013

“Se enxerguei mais longe foi porque me apoiei sobre os ombros de gigantes”.

Isaac Newton

A minha esposa Michelle

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Julio e Marilene, por sua dedicação e amor, que me fizeram poder chegar até aqui.

As minhas irmãs, Juliana e Mariana pelo companheirismo.

Agradeço a minha esposa Michelle, minha fonte de inspiração para lutar e conquistar nossos sonhos, ao seu lado minha caminhada é muito mais bela e suave.

Aos meus amados animais, em especial a minha Bibi, que me fez enxergar cores em um mundo preto e branco.

Ao meu orientador, Professor Dr. Geilson Loureiro, meu sincero agradecimento por acreditar em mim e, assim, tornar possível a realização de um grande sonho. Obrigado pelos ensinamentos, pela paciência e oportunidade.

Ao amigo Carlos Fuliene, pelo constante incentivo.

Aos professores e colegas do Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais na Área de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais pelos ensinamentos.

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para calcular e racionalizar o planejamento de recursos organizacionais utilizados para o desenvolvimento de produtos espaciais de modo a garantir a sua disponibilidade de organização dada à demanda proposta. A metodologia proposta analisou a disponibilidade de organização atual e a necessária ao desenvolvimento de produtos espaciais através da integração da abordagem da engenharia simultânea de sistemas e suas ferramentas com os conceitos e ferramentas de disponibilidade. O sistema escolhido para a aplicação da metodologia foi à subestação principal de energia do INPE, que deveria ser capaz de atender as novas demandas de disponibilidade impostas pela organização. Como resultados da aplicação da metodologia, existiu incremento de disponibilidade na nova subestação de energia do INPE. A metodologia proposta nesta dissertação para a disponibilidade de organização para o desenvolvimento de produtos espaciais mostrou-se adequada, uma vez que calculou e racionalizou o planejamento de recursos organizacionais utilizados para o desenvolvimento de produtos espaciais de modo a garantir a sua disponibilidade de organização dada à demanda proposta.

AVAILABILITY OF ORGANIZATION FOR THE DEVELOPMENT OF SPACE PRODUCTS

ABSTRACT

This dissertation proposes a methodology to calculate and rationalize the planning of organizational resources used for the development of space products to ensure their availability to the demand. The proposed methodology assessed the availability of current organization and the availability needed for product development by integrating the approach of systems concurrent engineering with availability's concepts and tools. The system chosen for the application of the methodology was the main power substation of INPE, unable to meet the new demands imposed by the availability of organization. The methodology proved to be applicable once it was for contracting INPE's new power substation and the substation met availability demand.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Cronologia dos Satélites do INPE	4
Fonte: INPE (2010).	4
Figura 1.2 – Síntese das Missões Propostas para o período 2011-2020	
Fonte: INPE, (2011).	5
Figura 2.1 - Funções de Engenharia de Sistemas.	11
Figura 2.2 - Framework de Visão Total	14
Figura 2.3 - Método de análise simultânea estruturado	15
Figura 2.4 - Engenharia Simultânea vs. Engenharia Tradicional.....	16
Figura 2.5 – Processos do Ciclo de Vida	16
Figura 2.6 – Diagrama de Contexto para o Processo de gestão da infraestrutura.	18
Figura 2.7 - Número de acidentados fatais típicos por 100.000 trabalhadores	22
Figura 2.8 - Número de acidentados fatais	22
Figura 2.9 - Custo Total Estimado de Acidentes do Trabalho por Ano no Setor Elétrico Brasileiro	24
Figura 2.10 - Número de acidentados por ano com Arco elétrico	27
Figura 2.11 - Curva da Banheira	32
Figura 2.12 - Relação entre confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade.	40
Figura 4.1 - Metodologia proposta.....	56
Figura 4.2 - Blocos de Confiabilidade para avião de 4 motores	59
Figura 4.3 - Diagrama de blocos de confiabilidade	59
Figura 4.4 - Sistema elétrico em estudo.....	61
Figura 4.5 - Diagrama de blocos de confiabilidade	62
Figura 4.6 - Fluxograma do processo de gestão da disponibilidade	70
Figura 4.7 - Abordagem de Engenharia de Sistemas.....	72
Figura 4.8 - Escopo do Esforço de Desenvolvimento.....	74
Figura 4.9 - Escopo do Esforço do Desenvolvimento da Organização	74
Figura 4.10 - <i>Stakeholders</i> e Interesses para o Processo de “Analisar Requisitos” para a organização.....	76
Figura 4.11 - <i>Stakeholders</i> e Interesses para produto	77
Figura 4.12 - Análise de Contexto	81
Figura 4.13 - DFD.....	82
Figura 4.14 - Diagrama de atividades	83
Figura 4.15 - Diagrama IDEF 0	83
Figura 4.16 - Diagrama de comportamento.....	84
Figura 4.17 - Diagrama passaporte.....	84
Figura 4.18 - Análise de contexto físico para produto	85
Figura 4.19 - Análise de contexto físico para organização.....	86
Figura 4.20 - Análise da arquitetura interna de produto	86
Figura 4.21 - Análise da arquitetura interna da organização.....	87

Figura 4.22 - Matriz de alocação funcional de subsistemas.....	87
Figura 5.1 - Cubículo de entrada de energia da subestação antiga.....	93
Figura 5.2 - Relés de proteção da subestação antiga.....	94
Figura 5.3 - Cubículos das seccionadoras da subestação antiga.....	94
Figura 5.4 - Diagrama unifilar da subestação antiga.....	96
Figura 5.5 - Cubículo das seccionadoras da subestação antiga.....	97
Figura 5.6 - Diagrama de blocos de confiabilidade da subestação antiga.....	99
Figura 5.7 - Disponibilidade pontual da subestação antiga.....	101
Figura 5.8 - Disponibilidade média da subestação antiga.....	101
Figura 5.9 - Tempos de disponibilidade e indisponibilidade da subestação antiga.....	102
Figura 5.10 - Número de falhas subestação antiga.....	102
Figura 5.11 - Probabilidade de falhas dos blocos da subestação antiga.....	103
Figura 5.12 - Falhas esperadas por blocos na subestação antiga.....	104
Figura 5.13 - Processos do ciclo de vida.....	105
Figura 5.14 - Escopo do esforço de desenvolvimento da organização.....	106
Figura 5.15 - <i>Stakeholders</i> e interesses para a subestação de energia.....	108
Figura 5.16 - <i>Stakeholders</i> e interesses para projeto preliminar da subestação	108
Figura 5.17 - <i>Stakeholders</i> e interesses para projeto detalhado da subestação	109
Figura 5.18 - Análise de contexto.....	112
Figura 5.19 - DFD.....	113
Figura 5.20 - Diagrama de blocos de confiabilidade da subestação nova.....	125
Figura 5.21 - Disponibilidade pontual da subestação nova.....	127
Figura 5.22 - Disponibilidade média da subestação nova.....	127
Figura 5.23 - Tempos de disponibilidade e indisponibilidade da subestação antiga.....	128
Figura 5.24 - Número de falhas subestação nova.....	128
Figura 5.25 - Probabilidade de falhas dos blocos da subestação nova.....	129
Figura 5.26 - Falhas esperadas por blocos na subestação nova.....	130
Figura A.1 - Diagrama trifilar da subestação nova (entrada, medição e cubículos).....	151
Figura A.2 - Diagrama trifilar da subestação nova (cubículos).....	152
Figura A.3 - Diagrama trifilar da subestação nova (cubículos).....	153
Figura A.4 - Diagrama trifilar da subestação nova.....	154
Figura A.5 - Diagrama trifilar da subestação nova.....	155
Figura B.1 - Entrada de energia.....	157
Figura B.2 - Fachada frontal da subestação.....	157
Figura B.3 - Fachada Posterior da subestação.....	158
Figura B.4 - Cubículos de distribuição.....	158

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 - Disponibilidade ao longo do ciclo de vida.....	71
Tabela 4.2 - Unidades Organizacionais	75
Tabela 4.3 - MoES dos <i>Stakeholders</i>	78
Tabela 4.4 - Requisitos dos <i>stakeholders</i>	79
Tabela 4.5 - Requisitos de sistema	80
Tabela 4.6 - Lista de eventos	82
Tabela 4.7 - FMEA	84
Tabela 5.1 - Resultados para a subestação antiga	100
Tabela 5.2 - Unidades Organizacionais	107
Tabela 5.3 - MoES dos <i>Stakeholders</i> para Projeto detalhado.....	110
Tabela 5.4 - Requisitos dos stakeholders para Projeto detalhado	111
Tabela 5.5 - Requisitos de sistema	112
Tabela 5.6 - Lista de eventos	113
Tabela 5.7 - FMEA	114
Tabela 5.8 - Resultados para a subestação nova	126

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	5
1.3. Objetivos específicos.....	6
1.4. Estrutura do trabalho	7
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1. Desenvolvimento de produtos complexos	9
2.2. Engenharia de Sistemas	10
2.3. Engenharia Simultânea de Sistemas.....	11
2.3.1. Ferramentas de Engenharia Simultânea.....	12
2.4. Gerenciamento da Infraestrutura.....	17
2.4.1. Aspectos de segurança no gerenciamento da infraestrutura	19
2.5. Confiabilidade.....	27
2.5.1. Parâmetros da Confiabilidade	27
2.5.2. Curva da Banheira	32
2.5.3. Distribuições aplicadas à Confiabilidade	33
2.6. Manutenibilidade	36
2.6.1. Tipos de Manutenção.....	38
2.7. Disponibilidade	39
2.8. Métodos e Técnicas para o Cálculo da Disponibilidade, Confiabilidade e Manutenibilidade	41
2.8.1. <i>Fault Tree Analysis-FTA</i>	42
2.8.2. <i>Failure Modes and Effects Analysis-FMEA</i>	42
2.8.3. <i>Dependence Diagram - DD</i>	43
2.8.4. <i>Markov Analysis-MA</i>	43
2.8.5. <i>Reliability Block Diagram -RBD</i>	44
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	45
4 MÉTODO	55
4.1. Demanda de disponibilidade proposta	56
4.2. Ciclo de Disponibilidade - Fase 1	57

4.2.1.	Seleção do sistema e subsistemas funcionais	57
4.2.2.	Elaborar RBD e/ou FTA	57
4.2.3.	Calcular disponibilidade	58
4.2.4.	Efetividade da disponibilidade	64
4.3.	Ciclo de Disponibilidade - Fase 2	65
4.3.1.	Seleção do sistema e subsistemas funcionais	65
4.3.2.	Engenharia simultânea de sistema integrada à disponibilidade	65
4.3.3.	Alocação de disponibilidade	69
4.3.4.	Abordagem de Engenharia simultânea de sistemas	71
5	APLICAÇÃO DO MÉTODO	89
5.1.	Aspectos de segurança	91
5.2.	Ciclo de disponibilidade Fase 1 - Avaliação da disponibilidade da subestação antiga	95
5.2.1.	Diagrama unifilar da subestação antiga	96
5.2.2.	Diagrama de blocos de confiabilidade da subestação antiga	96
5.3.	Ciclo de Disponibilidade Fase 2 - Subestação nova	104
5.4.	Abordagem de engenharia simultânea de sistemas	105
5.4.1.	Processos do Ciclo de Vida	105
5.4.2.	Escopo do esforço de desenvolvimento	106
5.4.3.	Análise de <i>stakeholders</i> e requisitos	108
5.4.4.	Análise funcional	112
5.5.	Análise de Arquitetura	115
5.5.1.	Materiais construtivos para a subestação nova	115
5.5.2.	Disjuntores	120
5.5.3.	Relés Digitais	122
5.6.	Avaliação da disponibilidade da subestação nova	124
5.6.1.	Diagrama trifilar da subestação nova	124
5.6.2.	Diagrama de blocos de confiabilidade da subestação nova	124
5.7.	Atendimento da disponibilidade ao longo do ciclo de vida	130
6	DISCUSSÃO	133
6.1.	A engenharia simultânea de sistemas	133
6.2.	Disponibilidade	134
7	CONCLUSÕES	141
7.1.	Objetivos atendidos	141

7.2. Contribuições.....	142
7.3. Sugestões para Trabalhos Futuros	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
APÊNDICE A - DIAGRAMA TRIFILAR DA SUBESTAÇÃO NOVA	151
APÊNDICE B - FOTOS DA SUBESTAÇÃO NOVA.....	157

1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação versa sobre a disponibilidade de organização para o desenvolvimento de produtos espaciais.

O objetivo geral da dissertação é propor uma metodologia para calcular e racionalizar o planejamento de recursos organizacionais utilizados para o desenvolvimento de produtos espaciais de modo a garantir a sua disponibilidade de organização dada à demanda proposta.

A complexidade dos sistemas desenvolvidos pelo homem aumentou para um nível sem precedentes. Isto levou a novas oportunidades, mas também impôs desafios maiores para as organizações que desenvolvem e utilizam tais sistemas. Esses desafios estão presentes em todo o ciclo de vida de um sistema e em todos os seus níveis de arquitetura. Entre os desafios encontrados está a falta de harmonização e integração das disciplinas envolvidas nos processos do ciclo de vida dos sistemas, incluindo a ciência, engenharia, administração e a gestão financeira (ISO/IEC 15288, 2008).

Existe, portanto, a necessidade de se desenvolver um modelo ou processo que seja capaz de melhorar a comunicação e cooperação entre as partes que criam, utilizam e administram os sistemas complexos, de forma que eles possam trabalhar de forma integrada e coerente durante todo o seu ciclo de vida.

1.1. Motivação

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cuja missão é produzir ciência e tecnologia nas áreas espacial e do ambiente terrestre e oferecer

produtos e serviços singulares em benefício do Brasil, tem sua sede principal localizada na cidade de São José dos Campos – SP, além de possuir diversas unidades regionais distribuídas por todo o Brasil (INPE, 2011).

O INPE realiza pesquisa e desenvolvimento em áreas como: Ciências Espaciais e Atmosféricas; Previsão de Tempo e Estudos Climáticos; Engenharia e Tecnologia Espacial; Observação da Terra; Ciência do Sistema Terrestre; Rastreamento e Controle de Satélites; além de contar com diversos laboratórios entre os quais se destaca o Laboratório de Integração e Testes (LIT) que desenvolve atividades especializadas de qualificação de componentes e sistemas espaciais, realizando desenvolvimento, montagem, integração e testes em sistemas espaciais, como também a qualificação e análise de falhas de componentes para uso espacial e para o setor industrial do país, com padrão internacional (INPE, 2011).

Os objetivos estratégicos do INPE são listados a seguir:

- 1) Ampliar e consolidar competências em ciência, tecnologia e inovação nas áreas espacial e do ambiente terrestre para responder a desafios nacionais.
- 2) Desenvolver, em âmbito mundial, liderança científica e tecnológica nas áreas espacial e do ambiente terrestre enfatizando as especificidades brasileiras.
- 3) Ampliar e consolidar competências em previsão de tempo e clima e em mudanças ambientais globais.
- 4) Consolidar a atuação do INPE como instituição singular no desenvolvimento de satélites e tecnologias espaciais.
- 5) Promover uma política espacial para a indústria visando atender às necessidades de desenvolvimento de serviços, tecnologias e sistemas espaciais.

- 6) Fortalecer o relacionamento institucional do INPE em âmbitos nacional e internacional.
- 7) Prover a infraestrutura adequada para o desenvolvimento científico e tecnológico.
- 8) Estabelecer uma política de recursos humanos para o INPE, baseada na gestão estratégica de competências e de pessoas.
- 9) Identificar e implantar modelo gerencial e institucional, adequado às especificidades e desafios que se apresentam para o INPE.

Em atenção especial ao item 7 dos objetivos estratégicos, o INPE conta com uma rede de facilidades e instalações de apoio ao desenvolvimento de seus produtos, tais como redes de dados e voz, iluminação e distribuição de energia elétrica, sistemas hidráulicos, sistemas de ar condicionado, rede de gases entre outros, que compõem um complexo sistema de instalações.

Toda estrutura descrita faz com que essas facilidades se tornem instrumento indispensável à realização das atividades de pesquisa e desenvolvimento do INPE.

A terceira revisão do Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), que cobre o período de 2005 a 2014 em seu Anexo III descreve que os recursos humanos e de infraestrutura disponíveis no País deverão ser reconhecidos como escassos e, conseqüentemente, especialmente valorizados, preservados e utilizados de forma otimizada. Neste contexto, deverão ser observados, ainda, os seguintes aspectos:

- A análise das propostas de novas iniciativas deverá levar em conta as necessidades e disponibilidades de recursos humanos e de infraestrutura, buscando-se evitar tanto a duplicação de esforços quanto a sobrecarga e o desmembramento de equipes; e

- As instalações laboratoriais implantadas nas instituições governamentais de pesquisa e desenvolvimento para atender ao Programa Nacional de Atividades Espaciais deverão ser compartilhadas com universidades e empresas nacionais, sem prejuízo de suas funções precípuas.

Tradicionalmente, a demanda de desenvolvimento de satélites pelo INPE não impôs à sua infraestrutura grande esforço de disponibilidade conforme Figura 1.1.

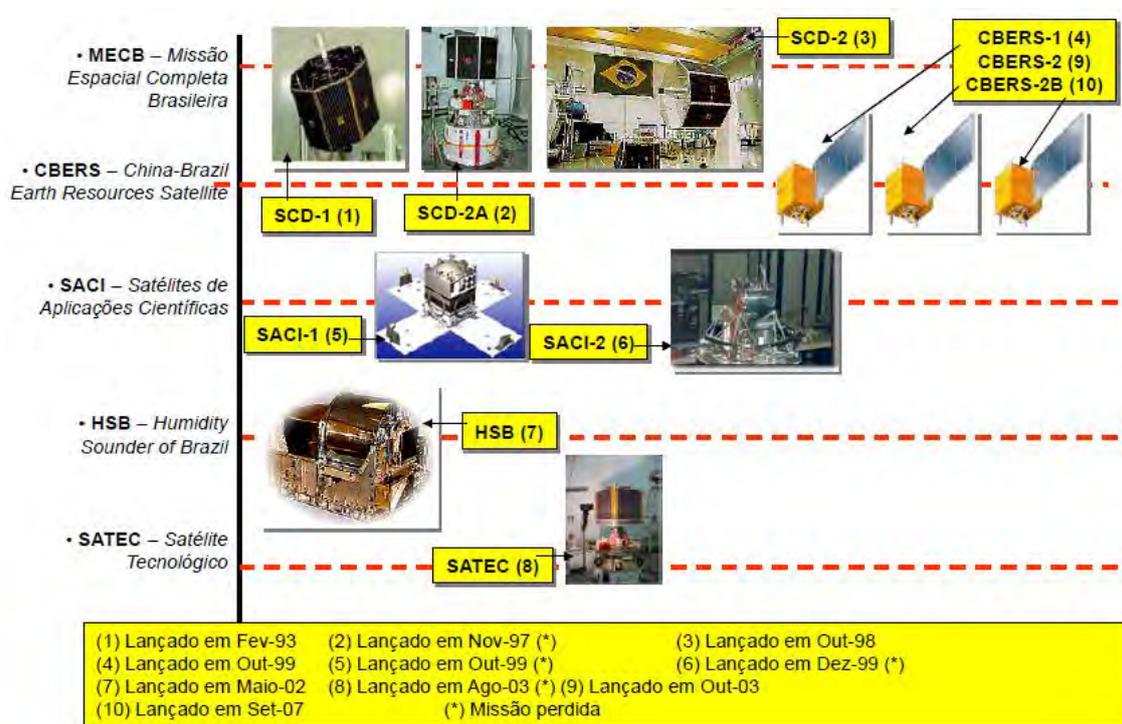


Figura 1.1 – Cronologia dos Satélites do INPE

Fonte: INPE (2010).

Além do desenvolvimento e integração dos satélites da Figura 1.3, o INPE também participou das atividades de integração dos satélites argentinos da família SAC, e dos satélites de telecomunicações BRASILSAT. Assim o INPE participou de um total de 14 missões espaciais nacionais e estrangeiras lançadas até o final de 2010.

Com o crescimento dessa demanda conforme Figura 1.2, a disponibilidade de organização pode se tornar um fator crítico.

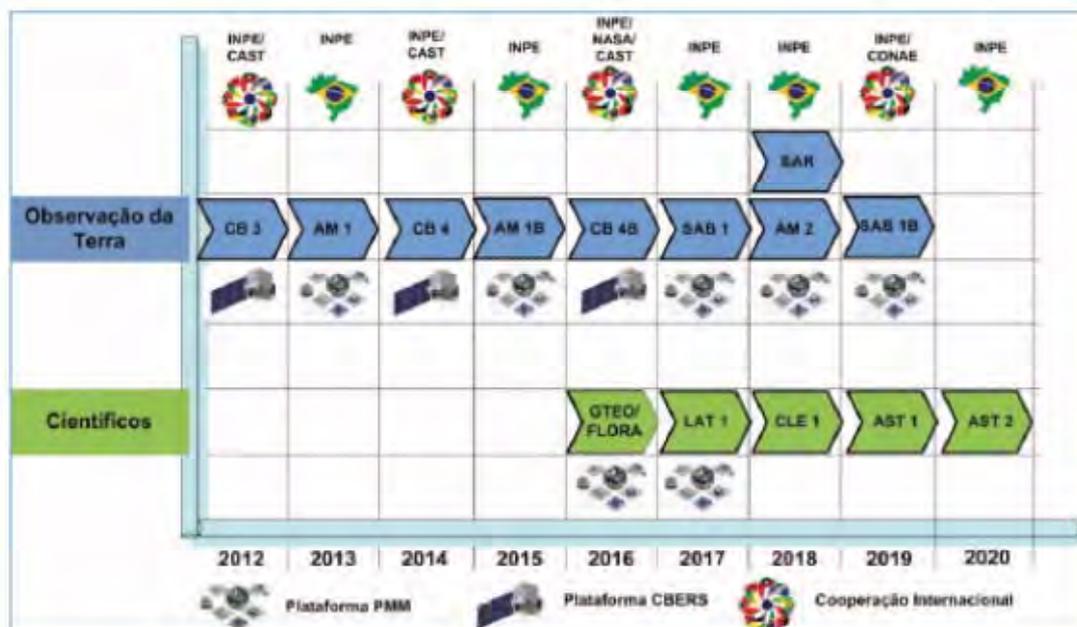


Figura 1.2 – Síntese das Missões Propostas para o período 2011-2020
 Fonte: INPE (2011).

1.2. Objetivos

A metodologia proposta analisará a disponibilidade da organização atual e a necessária ao desenvolvimento de produtos espaciais através da integração da abordagem da engenharia simultânea de sistemas, proposta por Loureiro (1999), e suas ferramentas com os conceitos e ferramentas de disponibilidade. Caso a disponibilidade de organização atual dada à demanda proposta seja efetiva (eficaz e eficiente), ações organizacionais não serão necessárias, entretanto, se a disponibilidade de organização não for efetiva, ações para a garantia de disponibilidade de organização serão necessárias.

A Figura 1.3 mostra como objeto deste projeto, um subsistema muito importante no ciclo de vida de produtos espaciais, a infraestrutura requisitada bem como os seus processos de organização.

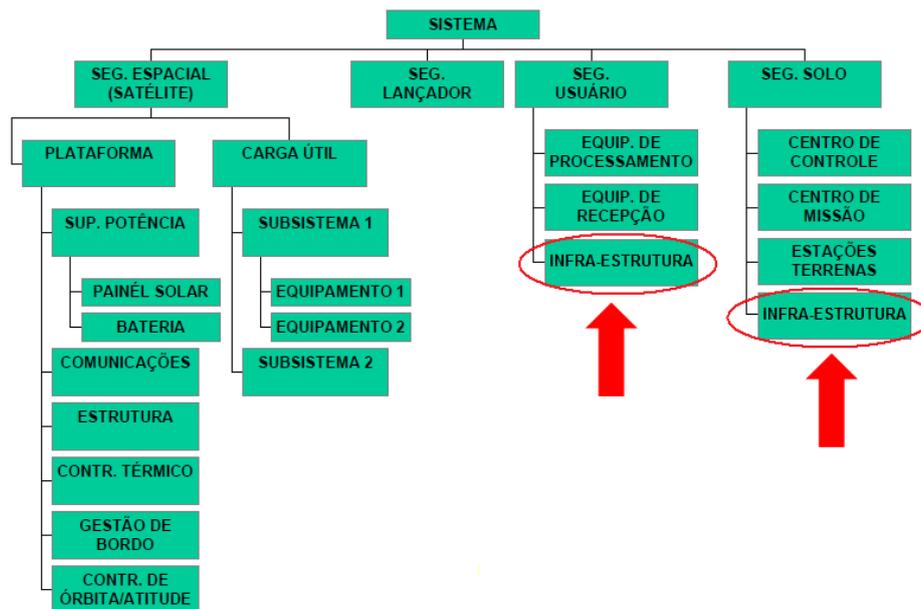


Figura 1.3 – Estrutura de Divisão de Trabalho.

Fonte: Adaptada de Souza (2008).

1.3. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- 1) Combinar ferramentas de planejamento disponíveis para propor uma técnica de racionalização visando garantir a disponibilidade de recursos;
- 2) Comparar os métodos de planejamento tradicionais usados pelo INPE com a combinação de técnicas propostas neste trabalho.

Este trabalho tem por objetivo antecipar-se a este novo cenário de missões espaciais do INPE e propor uma metodologia para garantir a disponibilidade de organização dada à demanda proposta.

1.4. Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos:

- Capítulo 1 (Introdução): este Capítulo no qual foram apresentados a introdução, motivação e objetivos desta dissertação.
- Capítulo 2 (Fundamentação Teórica): são apresentados os conceitos necessários para a realização deste trabalho abordando o processo de engenharia de sistemas, engenharia simultânea, confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade.
- Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica): são apresentados trabalhos na área de disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade.
- Capítulo 4 (Método): é o método proposto nesta dissertação com a integração dos processos de engenharia de sistemas as técnicas e ferramentas para o cálculo de disponibilidade.
- Capítulo 5 (Aplicação do método): é apresentado o cálculo de disponibilidade da subestação de energia do INPE, utilizando o método proposto no Capítulo 4.
- Capítulo 6 (Discussão): apresenta as contribuições deste trabalho comparado com outros da literatura.

- Capítulo 7 (Conclusão): este capítulo conclui o trabalho em relação aos objetivos desta dissertação, de acordo com a motivação descrita no Capítulo 1.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é realizada a revisão dos principais conceitos e recursos de apoio ao desenvolvimento desta dissertação.

2.1. Desenvolvimento de produtos complexos

O desenvolvimento integrado de produto desenvolve simultaneamente o produto, seus processos do ciclo de vida e as organizações que implementam esses processos. São levados em consideração, desde o início, os requisitos de organização dos processos, que juntos com os requisitos específicos do produto, guiam o processo de desenvolvimento do produto (LOUREIRO, 2003).

O produto espacial é um produto complexo (STEVENS et al., 1998). Seu processo de desenvolvimento e seus outros processos do ciclo de vida também são complexos. Por conseguinte, as organizações que implementam esses processos também o são.

A complexidade dos sistemas feitos pelo homem aumentou para um nível sem precedentes. Isto levou a novas oportunidades, mas também impôs desafios maiores para as organizações que desenvolvem e utilizam tais sistemas. Esses desafios estão presentes em todo o ciclo de vida de um sistema e em todos os seus níveis de arquitetura (ISO/IEC 15288, 2008). Entre os desafios encontrados está a falta de harmonização e integração das disciplinas envolvidas nos processos do ciclo de vida dos sistemas, incluindo a ciência, engenharia, administração e a gestão financeira.

Existe, portanto, a necessidade de se propor um modelo ou ferramenta que seja capaz de melhorar a comunicação e cooperação entre as partes que desenvolvem, utilizam e administram os sistemas complexos, de forma que

eles possam trabalhar de forma integrada e coerente durante todo o seu ciclo de vida.

O processo comumente utilizado para o desenvolvimento de produtos complexos é a engenharia de sistemas.

2.2. Engenharia de Sistemas

O *handbook* do INCOSE (INCOSE, 2011) define engenharia de sistemas como uma abordagem interdisciplinar e os recursos que permitem a realização de sistemas bem sucedidos. Concentra-se na definição dos requisitos dos clientes e nas funcionalidades necessárias no início do ciclo de desenvolvimento, na documentação de requisitos, e depois em seus processos tais como a síntese do projeto e a validação do sistema, considerando simultaneamente o problema completo: operações, custo e cronograma, desempenho, treinamento e suporte, teste, fabricação e descarte. A engenharia de sistemas considera o negócio e as necessidades técnicas de todos os clientes com o objetivo de fornecer um produto de qualidade que atenda às suas necessidades.

A Agência Espacial Europeia (ESA), através de sua norma ECSS-E-ST-10C, 2009 define engenharia de sistemas como uma abordagem interdisciplinar administrada pelo esforço total técnico para transformar requisitos numa solução de sistema. A Figura 2.1 ilustra as funções de engenharia de sistema segundo a ESA.

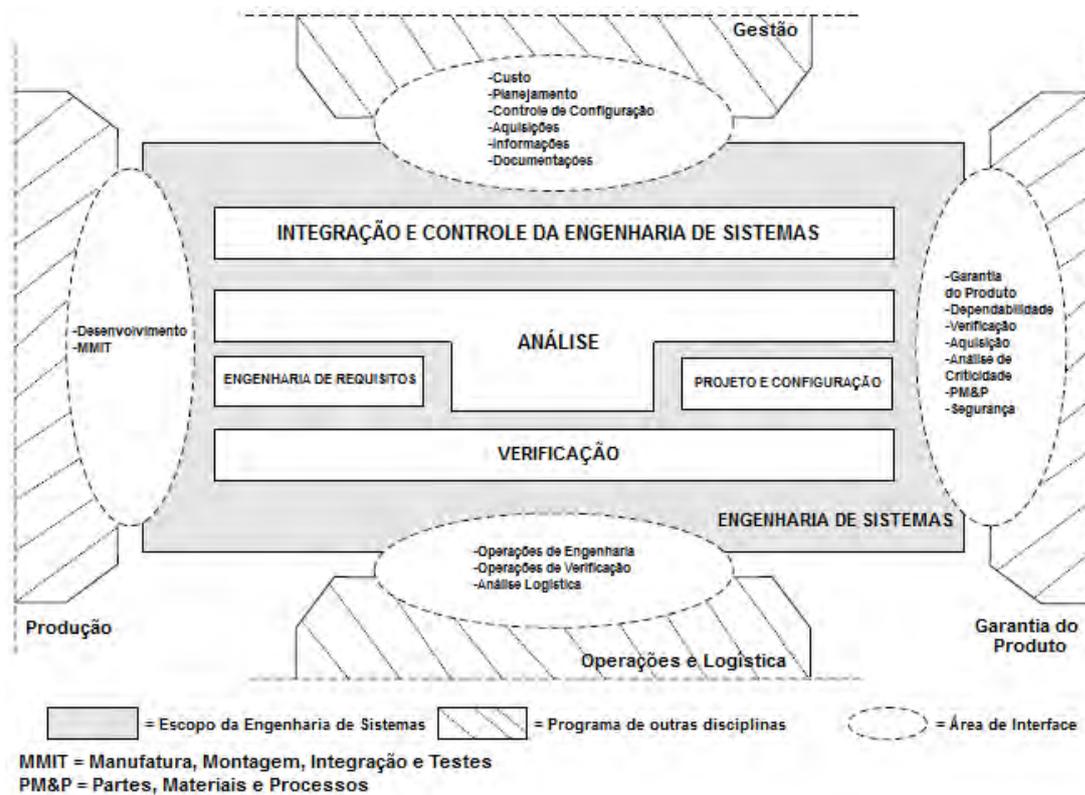


Figura 2.1 - Funções de Engenharia de Sistemas.

Fonte: Adaptada de ESA (2009).

2.3. Engenharia Simultânea de Sistemas

O termo Engenharia Simultânea foi usado pela primeira vez nos Estados Unidos da América em 1986. É essencialmente uma expressão para a ambição de aumentar a competitividade, diminuindo o *lead-time* e ainda melhorar a qualidade e reduzir custos. A metodologia principal é integrar o desenvolvimento do produto e o desenvolvimento dos processos de projeto e produção. Dessa forma, a Engenharia Simultânea é um rótulo para uma era de desenvolvimento da tecnologia de fabricação. Para ser bem sucedida deve basear-se em teorias relevantes, utilizar ferramentas eficientes e ser conduzida

pela gerência específica. A educação e a capacidade de trabalho em equipe são essenciais para o sucesso (SOHLENIUS, 1992).

Engenharia Simultânea é uma abordagem sistemática para o projeto integrado e concorrente de produtos e de seus processos relacionados, incluindo manufatura e suporte. Essa abordagem intenciona estimular os desenvolvedores para que, desde o início, considerem todos os elementos conhecidos envolvidos no ciclo de vida do produto desde a sua concepção até o seu descarte, fim de sua vida útil, incluindo qualidade, custo, prazos e os requisitos dos clientes (WINNER et al., 1988).

O elemento chave para o sucesso do processo de engenharia simultânea é reunir uma equipe completa e competente para a realização do projeto. Todas as disciplinas que fazem parte do projeto e que serão afetadas pelas configurações de hardware e software devem estar representadas (NASA, 2011).

Várias técnicas e ferramentas têm sido desenvolvidas para apoiar esses métodos de trabalho e elas são essenciais para o sucesso da engenharia simultânea. Huang (1996) e Galina (1998) descrevem várias dessas ferramentas, tais como *Design to Cost* (DFC), Prototipação Rápida, Projeto Robusto, *Product Data Management* (PDM), *Quality Function Deployment* (QFD) dentre outras, a seguir são apresentadas, de forma resumida, algumas das técnicas/ferramentas que serão utilizadas no método proposto neste trabalho.

2.3.1. Ferramentas de Engenharia Simultânea

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) - é um método para detectar possíveis falhas do produto tão cedo quanto possível no processo de

desenvolvimento. Isso possibilita melhoria na qualidade dos produtos com consequente diminuição de reclamações dos clientes e minimização de custos relacionados a essas reclamações.

Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) - possibilita que o projeto de um produto seja relacionado aos processos de manufatura, otimizando as operações de produção. Envolve softwares que alertam o projetista de produtos sobre as implicações de seu trabalho na fase de manufatura.

Design for Reliability (DFR) – é um método sistêmico de engenharia simultânea que se baseia em um conjunto de ferramentas de engenharia de confiabilidade juntamente com uma compreensão adequada de quando e como usar essas ferramentas, descreve a ordem geral de implantação que uma organização deve seguir a fim de projetar a confiabilidade em seus produtos para assegurar que as expectativas dos clientes para a confiabilidade sejam plenamente alcançadas ao longo do ciclo de vida do produto (RELIASOFT, 2011).

Design for Maintainability (DFM) - é um método cuja ênfase está na utilização de peças e componentes com comprovada longa vida útil, no uso de unidades, módulos acessíveis e intercambiáveis, bem como na facilidade de inspeção e recursos de manutenção, além do uso de sistemas de diagnóstico.

No entanto, tradicionalmente a engenharia simultânea é caracterizada por focar somente no projeto das partes e tratar os processos do ciclo de vida isoladamente em relação uns aos outros (LOUREIRO, 1999).

O *framework* e o método propostos por Loureiro (1999) integram os conceitos de engenharia de sistemas e engenharia simultânea. Eles proveem um conjunto total de elementos de produto, seus processos de ciclo de vida, e as organizações que implementam esses processos, e as interações entre esses elementos desde o início do processo de desenvolvimento. O *framework* estende a aplicação do processo de engenharia de sistemas para as organizações que implementam os processos de ciclo de vida do produto e

aplica engenharia simultânea em todos os níveis da árvore produto. As saídas do método são requisitos, atributos funcionais, atributos físicos e as interações entre eles (LOUREIRO, 1999).

As Figuras 2.2 e 2.3 apresentam respectivamente a abordagem de uma visão total, chamada de 'Framework de Visão Total' e o método de Análise Simultânea estruturado proposto por Loureiro (1999).

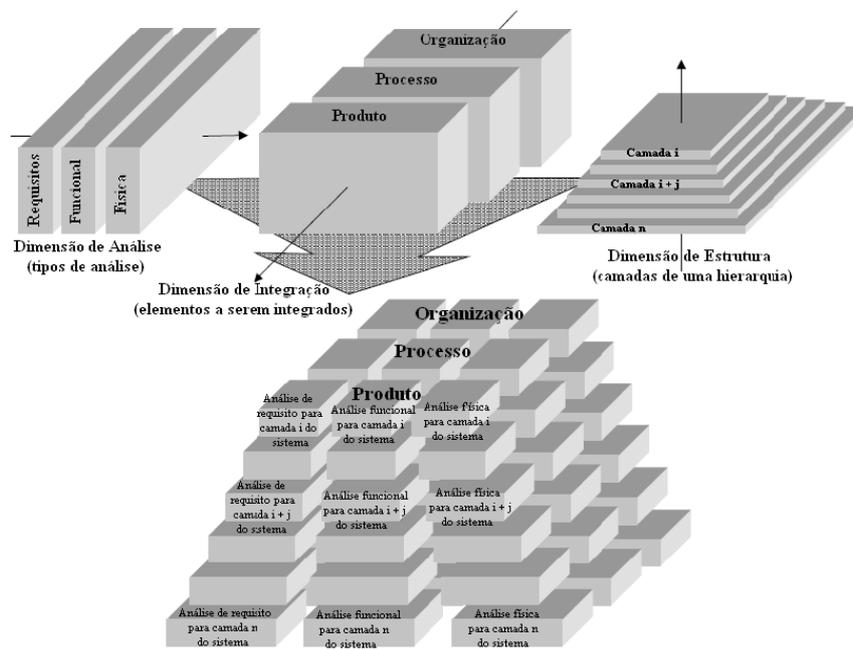


Figura 2.2 - Framework de Visão Total

Fonte: Adaptada de Loureiro (1999).

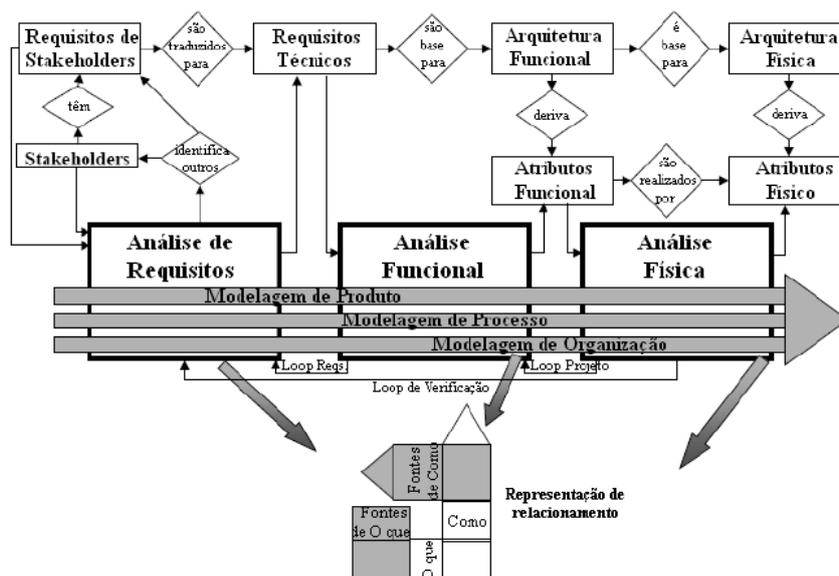


Figura 2.3 - Método de análise simultânea estruturada
 Fonte: Adaptada de Loureiro (1999).

A abordagem da Engenharia Simultânea é focada em três preocupações: a integração antecipada e coordenada entre as áreas de conhecimento relevantes ao desenvolvimento de produtos, organização da equipe sob o prisma de multidisciplinaridade e dedicação integral ao projeto e, enfoque sobre as necessidades do cliente. Esta abordagem busca alcançar os seguintes objetivos: menor tempo de desenvolvimento do produto, menor custo e aumento da qualidade do produto final (PIMENTEL; AUGUSTO, 2003).

A Figura 2.4 mostra a integração antecipada dos requisitos para o desenvolvimento de produto, processo e organização ao utilizar a abordagem de engenharia simultânea de sistemas em comparação aos métodos tradicionais de desenvolvimento.

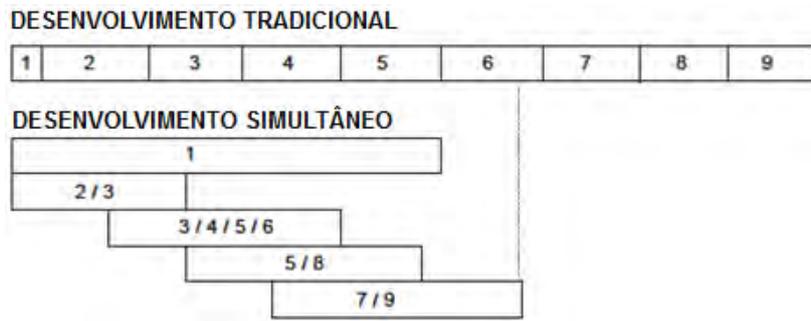


Figura 2.4 - Engenharia Simultânea vs. Engenharia Tradicional
 Fonte: Adaptada de INCOSE (2011).

A norma ISO / IEC 15288 identifica quatro grupos de processos para apoiar a engenharia de sistemas. A Figura 2.5 apresenta tais grupos.

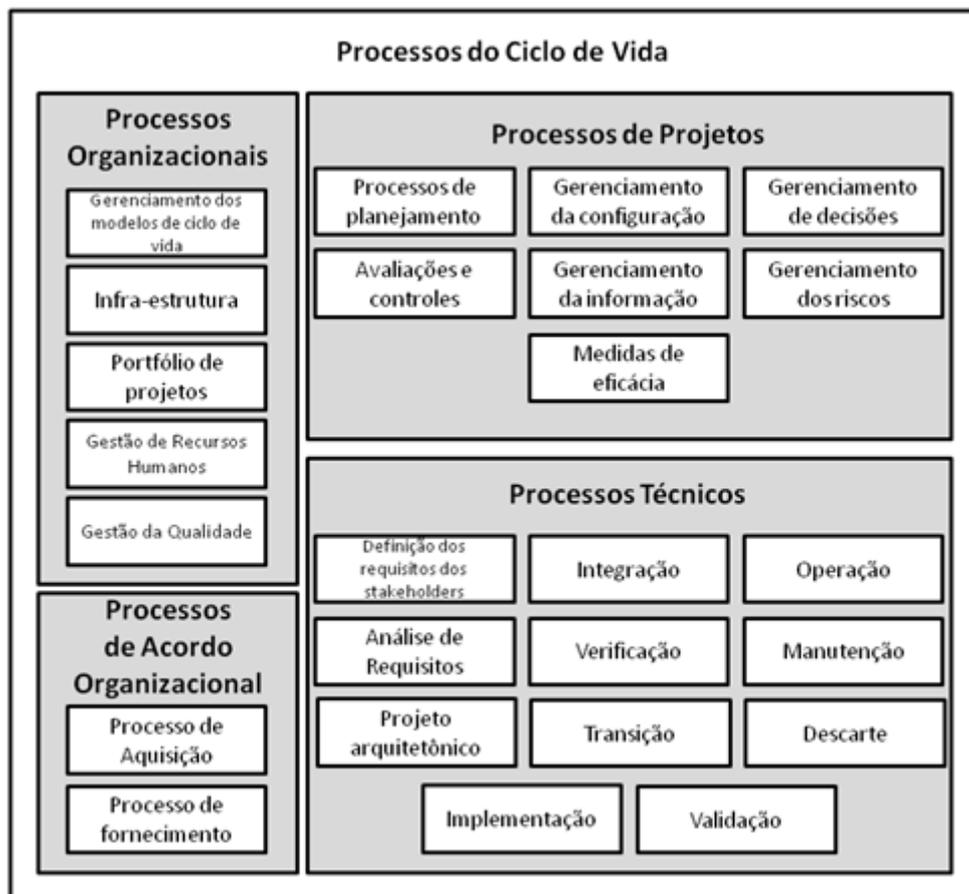


Figura 2.5 – Processos do Ciclo de Vida
 Fonte: Adaptada de ISO/IEC (2008).

Os grupos definidos na Figura 2.5 são:

Os processos técnicos, no qual são inclusos os processos de definição dos requisitos dos stakeholders e sua análise, projeto arquitetônico, implementação, integração, verificação, validação, operação, manutenção e descarte.

Os processos de projeto (gerenciamento do projeto), no qual são inclusos os processos de planejamento, avaliações e controles, gerenciamento de decisões, gerenciamento dos riscos, gerenciamento da configuração e informação e as medidas de eficácia do projeto.

O processo de acordo organizacional, no qual são inclusos os processos de aquisição e processo de fornecimento.

E finalmente, os processos organizacionais, nos quais são inclusos o gerenciamento dos modelos de ciclo de vida, infraestrutura, portfólio de projetos, gestão de recursos humanos e gestão da qualidade. (INCOSE, 2011).

2.4. Gerenciamento da Infraestrutura

Os processos de organização têm como finalidade assegurar a capacidade da organização em adquirir e fornecer produtos ou serviços através dos serviços bases de apoio, manutenção e controle de projetos. Eles fornecem os recursos e a infraestrutura necessária para auxiliar os projetos e garantir a satisfação dos objetivos organizacionais e os acordos estabelecidos (ISO/IEC, 2008).

Conforme Figura 2.6 os processos organizacionais são divididos em 5 categorias, gerenciamento dos modelos de ciclo de vida, infraestrutura,

portfólio de projetos, gestão de recursos humanos e gestão da qualidade. Esta proposta de dissertação analisará somente o gerenciamento da infraestrutura.

O propósito do gerenciamento da infraestrutura é fornecer a infraestrutura e os serviços de apoio necessários à organização no desenvolvimento de projetos ao longo de todo o ciclo de vida do produto.

A Figura 2.6 representa o diagrama de contexto para o processo de gerenciamento da infraestrutura. São definidas as entradas, as atividades, as saídas, bem como os controles e mecanismos para a execução do processo.

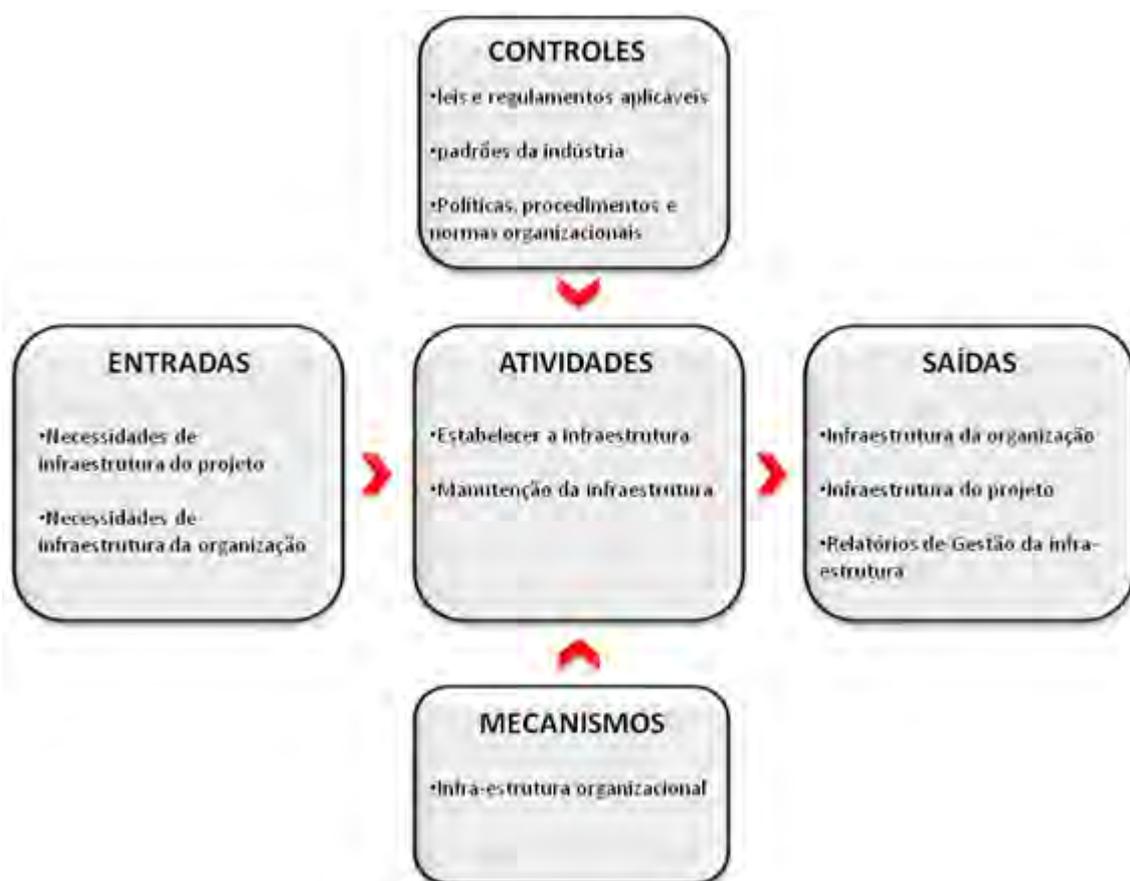


Figura 2.6 – Diagrama de Contexto para o Processo de gestão da infraestrutura.

Fonte: Adaptada de INCOSE (2011).

Esse processo define, fornece e mantém as instalações, as ferramentas, as comunicações e bens de tecnologia da informação necessários para ao desenvolvimento da organização (ISO/IEC, 2008).

As abordagens e tipos mais comuns são definidos abaixo:

- Verificar a possibilidade, de acordo com a estratégia de investimento, se recursos qualificados podem ser “alugados” (dentro da organização ou através de terceirização);
- Estabelecer uma organização da arquitetura de infraestrutura. Uma integração da organização de infraestrutura pode tornar mais eficiente à execução das atividades de rotina;
- Estabelecer o gerenciamento dos recursos de infraestrutura de forma a manter, controlar e melhorar a alocação de recursos para as necessidades de organização no presente e no futuro;
- Atender a fatores físicos e ambientais e de segurança do trabalho;
- Iniciar o planejamento da infraestrutura no início do ciclo de vida de maneira que todos os esforços de desenvolvimento dos sistemas estejam contemplados, tais como, os recursos de infraestrutura, de armazenamento de dados / informação e gerenciamento.

2.4.1. Aspectos de segurança no gerenciamento da infraestrutura

O trabalho com eletricidade exige procedimentos padronizados e treinamento específico e é bastante vulnerável à ocorrência de acidentes, inclusive fatais.

O decreto nº. 93.412, de 14 de outubro de 1986 que institui salário adicional para empregados do setor de energia elétrica, em condições de periculosidade

e dá outras providências apresenta um quadro em que as atividades estão acompanhadas de suas respectivas áreas de risco. A análise cuidadosa desse quadro permite resumir as atividades da seguinte forma:

- a) Atividades de construção, operação e manutenção de redes de linhas aéreas e subterrâneas, usinas, subestações, cabinas de distribuição e áreas afins;
- b) Atividades de inspeção, testes, ensaios, calibração, medição, reparo e treinamento em equipamentos e instalações elétricas.

Duas observações importantíssimas complementam este resumo:

- 1.) Os equipamentos e instalações referidos podem ser de alta ou baixa tensão, mas devem ser integrantes de sistemas elétricos de potência;
- 2.) Os equipamentos e instalações referidos podem estar energizados ou desenergizados, mas com possibilidade de energização acidental ou por falha operacional.

À expressão “sistemas elétricos de potência”, utilizada no Decreto 93.412/86, têm melhor definição na Norma Técnica da ABNT que tem por título esta mesma expressão: NBR 5460 Sistemas Elétricos de Potência - Terminologia.

Dessa Norma, é transcrito na íntegra o item que trata da definição da expressão, acompanhado da nota que é parte integrante do texto:

3.613 Sistema Elétrico (de potência)

3.613.1 Em sentido amplo, é o conjunto de todas as instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

3.613.2 Em sentido restrito, é um conjunto definido de linhas e subestações que assegura a transmissão e/ou a distribuição de energia

elétrica, cujos limites são definidos por meio de critérios apropriados, tais como, localização geográfica, concessionário, tensão, etc..

Relatório de estatísticas de acidentados, elaborado pela Fundação COGE constitui num importante registro histórico do Sistema Elétrico de Potência que é parte integrante do Setor Elétrico Brasileiro (SEB), e numa ferramenta inestimável para a construção de uma perspectiva mais produtiva e eficiente, ao apurar os resultados, avaliá-los e propor medidas preventivas e corretivas ao alcance das mais diversas empresas do setor, para a preservação da vida.

No ano de 2006, o contingente de 101.105 empregados próprios do setor conviveu, no desempenho diário de suas atividades, com riscos de natureza geral e riscos específicos, registrando-se 840 acidentados do trabalho típicos com afastamento, acarretando, entre custos diretos (remuneração do empregado durante o seu afastamento) e indiretos (custo de reparo e reposição de material, custo de assistência ao acidentado e custos complementares – interrupção de fornecimento de energia elétrica, por exemplo), prejuízos de monta para o Setor de Energia Elétrica.

A Figura 2.7 mostra a relação entre o número de acidentados fatais típicos por 100.000 trabalhadores numa comparação entre a situação do Brasil e a do setor elétrico.

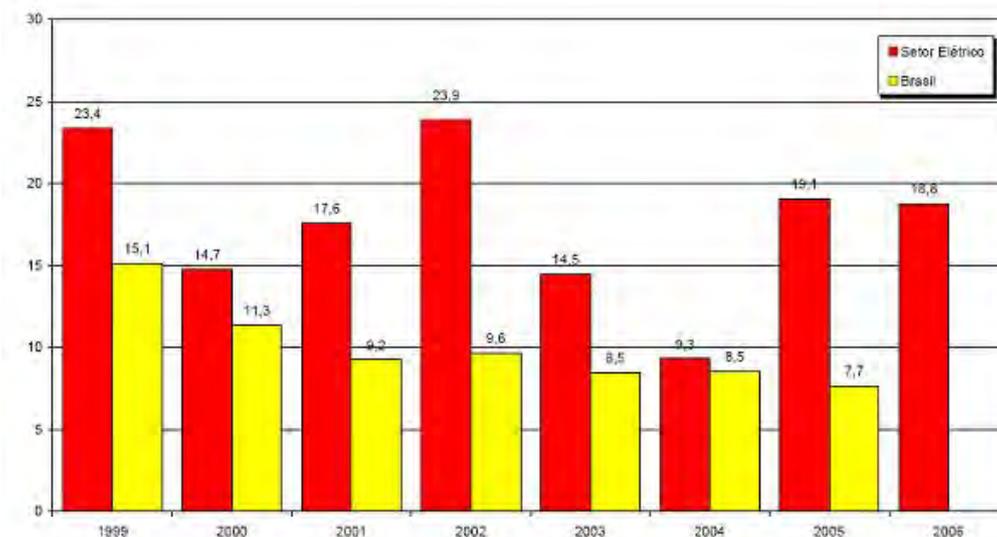


Figura 2.7 - Número de acidentados fatais típicos por 100.000 trabalhadores

Fonte: Adaptada Fundação COGE (2006)

A Figura 2.8 mostra o número de acidentes fatais no período de 1999 a 2006.

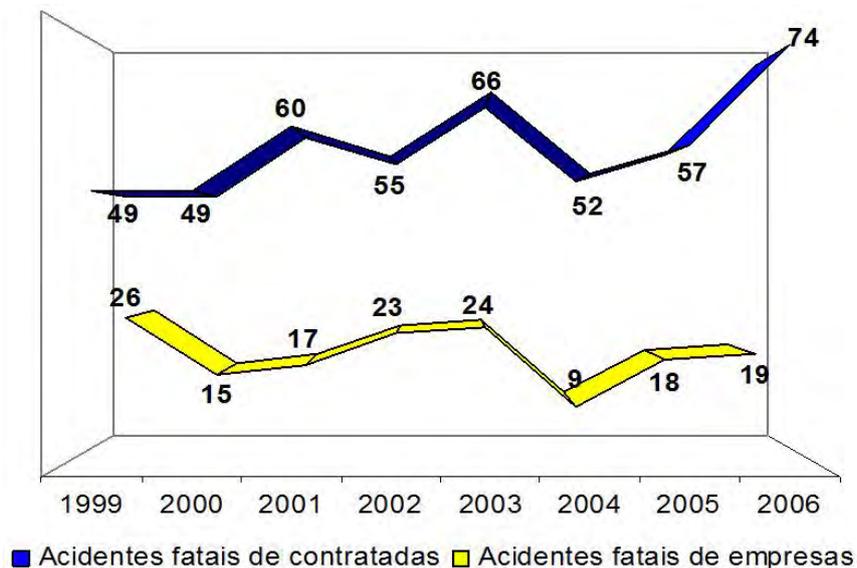


Figura 2.8 - Número de acidentados fatais

Fonte: Adaptada Fundação COGE (2006)

2.4.1.1. Impactos dos acidentes

Segundo, a Fundação COGE (2006), foram perdidas 1.152.144 horas de trabalho em 2006, o equivalente ao total de horas de um ano de trabalho de uma empresa de porte médio do Setor Elétrico Brasileiro, por exemplo.

Os custos dos acidentes no Brasil, considerando os acidentes sem perda de tempo e os acidentes com e sem danos materiais, seriam da ordem de: R\$ 668.387.538,00.

Esse custo total estimado dos acidentes do trabalho representa, por exemplo, o investimento necessário para a construção de 10 PCH's – Pequenas Centrais Hidrelétricas de 30 mega Watts cada, que poderiam atender a uma demanda de cerca de 1.250.000 habitantes.

Esse custo total poderia representar, ainda, o montante aproximado necessário para a construção de 2.460 km de linhas de transmissão, em 230 kV, circuito simples, incluindo: o levantamento topográfico, o projeto de engenharia, materiais e construção (FUNDAÇÃO COGE, 2006).

A seguir é apresentado, na Figura 2.9, o custo total estimado de acidentes do trabalho por ano no setor elétrico brasileiro, neste gráfico que apresenta a série histórica do período de 1999 a 2006 percebe-se a evolução dos números e o valor em milhões de reais que são perdidos em acidentes sem perda de tempo e os acidentes com e sem danos materiais.

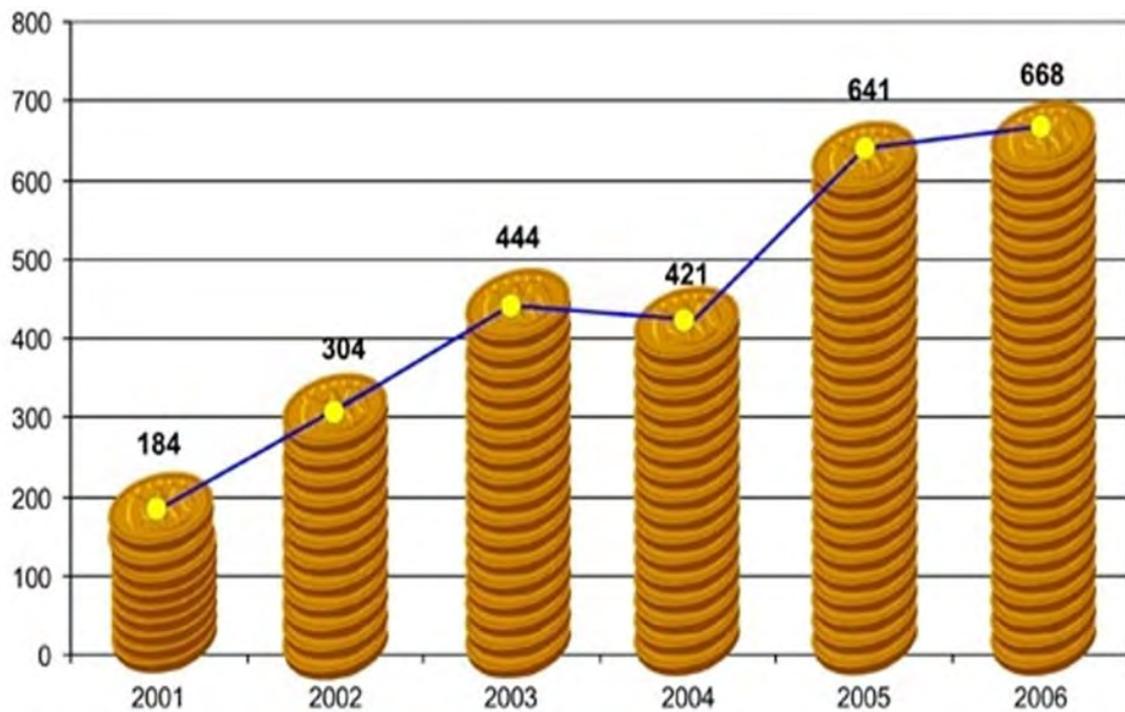


Figura 2.9 - Custo Total Estimado de Acidentes do Trabalho por Ano no Setor Elétrico Brasileiro

Fonte: Fundação COGE (2006)

2.4.1.2. Origens dos acidentes

Os acidentes fatais, nos diversos anos, têm como causas principais: origem elétrica, quedas e veículos. Tais causas podem ser evitadas, especialmente as duas primeiras, que dependem exclusivamente do cumprimento de procedimentos técnicos de trabalho (ex. planejamento passo a passo e supervisão).

Uma das principais causas de acidentes no setor elétrico é a ocorrência de arcos elétricos (FUNDAÇÃO COGE, 2006).

2.4.1.3. Arco Elétrico

O arco elétrico é um fenômeno da eletricidade inerente aos sistemas elétricos, que se caracteriza, principalmente, pela circulação da corrente elétrica através de uma atmosfera gasosa. As atmosferas gasosas são classificadas como isolantes elétricos e se comportam como condutores quando ionizadas. Podem existir de uma forma intensa e controlada como nos casos de solda elétrica e fornos industriais ou com liberação de pequena quantidade de calor como nos casos de interruptores para lâmpadas.

No caso de falhas elétricas ou curto-circuito, o arco elétrico é um fenômeno indesejável que libera uma enorme quantidade de calor. Além da liberação de calor, pode ocorrer a liberação de partículas de metais ionizadas que eventualmente podem conduzir correntes, deslocamento de ar com aparecimento de alta pressão, prejudicial ao sistema auditivo, e raios ultravioletas prejudiciais à visão.

Normalmente os arcos elétricos em painéis aparecem por:

- Perda de pressão dos parafusos de conexão, ocasionado contato inadequado nos componentes do painel.
- Depreciação da isolação.
- Defeito de fabricação de componentes ou equipamento.
- Projeto e instalação inadequada ou mal dimensionada.
- Manutenção inadequada.
- Contatos acidentais ou inadvertidos de ferramentas ou peças.
- Impulso elétrico.

A maioria das causas do aparecimento do arco elétrico é conhecida. Portanto, são possíveis ações preventivas antes do seu aparecimento, sejam administrativas ou preditivas. Essas ações podem e devem iniciar já durante a elaboração do projeto, fazendo parte do controle de qualidade durante todas as demais etapas, tais como: a montagem dos equipamentos e subestações transformadoras, a manutenção preditiva, inclusive dos procedimentos administrativos e operacionais.

A proteção contra queimaduras por arco elétrico deve ser considerada como o último recurso, e não como a proteção principal. Desta forma a prática de segurança deve ser iniciada na elaboração do projeto com o objetivo de prevenção contra aparecimento do arco elétrico.

Relatório de estatísticas de acidentados, elaborado pela Fundação COGE incluindo dados a partir do ano de 2000, referentes a 12 empresas do setor elétrico brasileiro e seis subcontratadas, mostra o número de acidentados por ano com arcos elétricos.

A Figura 2.10 mostra o número de acidentados por ano no período de 2000 a 2006.

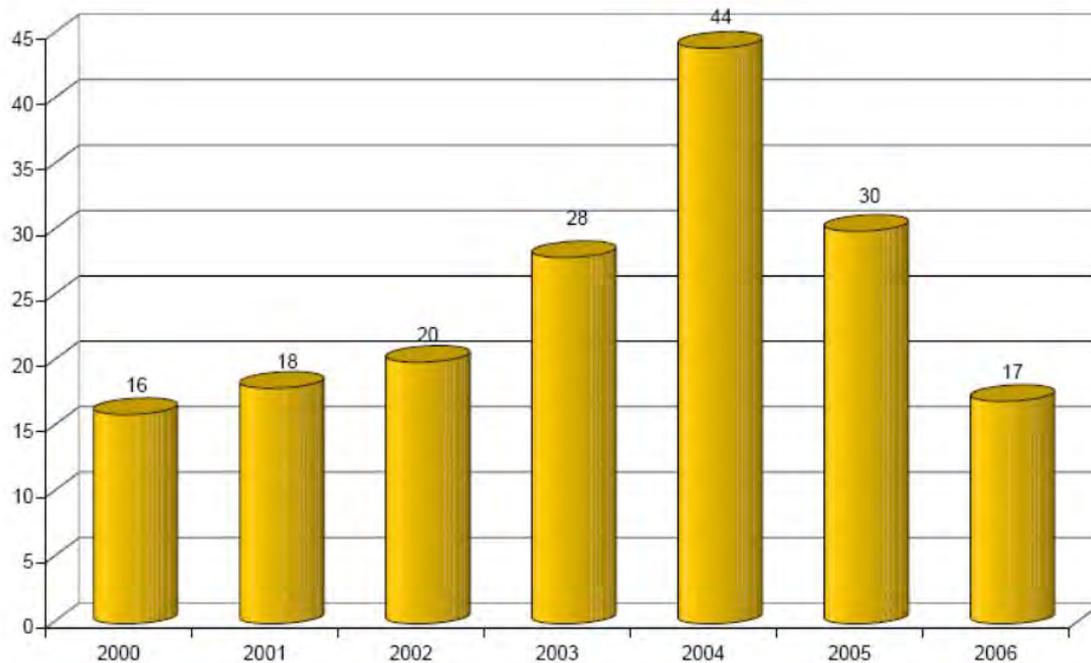


Figura 2.10 - Número de acidentados por ano com Arco elétrico

Fonte: Fundação COGE (2006)

2.5. Confiabilidade

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

2.5.1. Parâmetros da Confiabilidade

Matematicamente, a confiabilidade é definida como a probabilidade de que um componente ou sistema cumpra sua função com sucesso, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas (LAFRAIA, 2001).

Implícito nessa definição está estabelecido um critério bem definido para o fracasso, a partir do qual é possível julgar até que ponto o sistema não está mais funcionando corretamente. Similarmente, o tratamento das condições de operação requer uma compreensão tanto dos carregamentos, tensões e desempenhos para o qual o sistema está sujeito e do ambiente dentro do qual deve operar. Entretanto a variável mais importante com a qual confiabilidade está relacionada é o tempo. Assim, é em termos das taxas de falha que a maioria dos fenômenos de confiabilidade são estudados (LEWIS, 1996).

2.5.1.1. Definições Básicas

A confiabilidade é definida como a probabilidade de que um sistema sobreviva por pelo menos o período de tempo aleatório T . A PDF, $f(t)$ tem o seguinte significado (LEWIS, 1996):

$$f(t)\Delta t = P\{t < T \leq t + \Delta t\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Probabilidade de que a} \\ \text{falha ocorra num período} \\ \text{de tempo entre } t \text{ e } t + \Delta t \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

Considerando um Δt muito pequeno, a CDF tem um novo significado:

$$F(t) = P\{T \leq t\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Probabilidade de que a falha ocorra} \\ \text{num período de tempo menor ou igual } t \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

Assim, definisse a confiabilidade como:

$$R(t) = P\{T > t\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Probabilidade de um sistema} \\ \text{operar sem falha por um tempo } t \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

Uma vez que exista um critério objetivo para definição da falha, considera-se que o estado de falha e o estado de operação adequada são mutuamente excludentes e que uma vez que um sistema que não falhou até o instante $T \leq t$, deva falhar em algum instante $T > t$, a confiabilidade é expressa por:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.4)$$

Ou,

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (2.5)$$

Assim, pelas propriedades da PDF:

$$R(0) = 1 \quad (2.6)$$

$$R(\infty) = 0 \quad (2.7)$$

A relação entre $R(t)$ e $f(t)$ é dada pela equação:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2.8)$$

Como explicitado anteriormente os mecanismos de falhas são obtidos através da análise das taxas de falhas.

A taxa de falhas, representada por $\lambda(t)$, de um componente ou sistema é a frequência com que as falhas ocorrem, num certo intervalo de tempo, medida pelo número de falhas para cada hora de operação ou número de operações do sistema ou componente (LAFRAIA, 2001).

Sendo $\lambda(t)\Delta t$ a probabilidade de que o sistema falhará em um tempo $T < t + \Delta t$, dado que ainda não falhou até o tempo $T = t$, tem-se que $\lambda(t)\Delta t$ é a probabilidade condicional.

$$\lambda(t)\Delta t = P\{T < t + \Delta t | T > t\} \quad (2.9)$$

Através da definição da probabilidade condicional:

$$P\{T < t + \Delta t | T > t\} = \frac{\{P(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\}}{P(T > t)} \quad (2.10)$$

Como o numerador da equação (2.10) é a própria $f(t)$, e o denominador é a $R(t)$, a taxa de falhas instantânea é expressa por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.11)$$

Essa função também é conhecida como função de risco (LAFRAIA, 2001).

Além desses conceitos fundamentais relacionados com a confiabilidade, existem várias siglas comumente usadas que devem ser definidas, o Tempo Médio para Falha (MTTF) e o Tempo Médio entre Falhas (MTBF) (SOUZA, 2005).

- MTTF - Tempo Médio para Falha - O conceito se aplica nas situações em que não são admitidos reparos nos componentes. É aplicável a componentes cuja vida termina na primeira ocorrência de falha.
- MTBF - Tempo Médio Entre Falhas - É definido no contexto da missão, no qual o equipamento falha é reparado e retorna ao serviço. Nesse contexto, MTBF é o tempo esperado entre falhas, durante o qual o componente irá funcionar corretamente.

Segundo Lewis (1996) o MTTF é considerado o parâmetro mais utilizado na confiabilidade, sendo apenas o valor ou média de tempo esperado até a falha:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (2.12)$$

2.5.2. Curva da Banheira

Tradicionalmente, as fases da vida de um componente ou sistema são descritos pela curva da banheira (LAFRAIA, 2001).

O comportamento da taxa de falha $\lambda(t)$ pode ser usado como indicador da causa das falhas (LEWIS, 1996).

Embora ela seja apresentada como genérica, a curva da banheira só é válida para componentes individuais (LAFRAIA, 2001).

A curva da banheira mostrada na Figura 2.11 representa graficamente esta relação para sistemas ou componentes sem redundâncias. Nesta curva é possível visualizar que um componente apresenta três períodos.

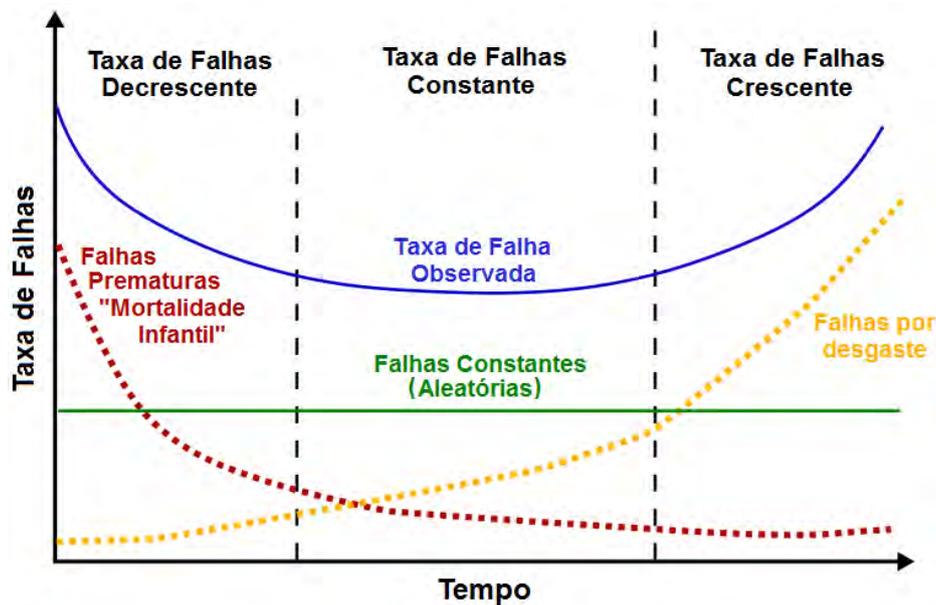


Figura 2.11 - Curva da Banheira

O primeiro intervalo da curva apresenta uma taxa de falha que decresce a partir de $t=0$. Essa região denomina-se de falhas precoces ou, em analogia

com seres humanos, de mortalidade infantil. Sob essa analogia, as mortes nesse período são causadas por defeitos congênitos ou fraquezas (TEIXEIRA, 2008).

O segundo intervalo da curva contém o período de falha aleatória. Nesse intervalo, a taxa de falha é constante. Normalmente, as falhas são de natureza aleatória, pouco podendo ser feito para evitá-las (LAFRAIA, 2001).

O terceiro e último intervalo da curva mostra o período em que a taxa de falha cresce continuamente e fenômenos como desgaste e fadiga passam a ser relevantes.

A curva da banheira é uma representação bastante genérica, já que cada categoria de equipamentos apresenta uma curva característica. Por exemplo, em sistemas eletroeletrônicos a ocorrência de falhas é dominada pelas regiões I e II. Ou seja, o fenômeno de envelhecimento não é relevante. Já em componentes mecânicos, as regiões I e III dominam (SOUZA, 2003).

2.5.3. Distribuições aplicadas à Confiabilidade

Variáveis aleatórias contínuas encontram ampla utilização na análise de confiabilidade para a descrição de tempos de sobrevivência, cargas e capacidades dos sistemas, taxas de reparo, e uma variedade de outros fenômenos. Além disso, um número substancial de distribuições de probabilidade padronizadas é utilizado para modelar o comportamento destas variáveis.

Dependendo do sistema a ser estudado, $f(t)$ é representada por uma distribuição estatística diferente. Lafraia (2001) e Oliveira (2007) descrevem as distribuições mais utilizadas para representar $f(t)$ como sendo as distribuições Normal, Log-normal, Exponencial e Weibull.

2.5.3.1. Distribuição normal

A distribuição normal costuma ser utilizada para equipamentos expostos a elevadas solicitações. A distribuição normal possui taxa de falha fortemente crescente, representando adequadamente sistemas extremamente solicitados. Na realidade não é comum encontrar sistemas com essa característica acentuada, o que nos leva a quase não encontrar sistemas modelados pela distribuição normal. Sistemas modelados pela normal em geral podem receber facilmente especificações de manutenção preventiva ou preditiva, o que faz com que o comportamento do sistema se altere, alterando assim a distribuição que melhor o modela (OLIVEIRA, 2007).

2.5.3.2. Distribuição lognormal

A distribuição lognormal é utilizada para modelar mais sistemas que a distribuição normal. Ela apresenta diferentes comportamentos de taxa de falha, dependendo é claro de seus parâmetros, podendo representar taxas de falha crescentes como a distribuição normal, ou até decrescentes após um trecho crescente.

Costumeiramente a distribuição lognormal é utilizada para representar sistemas mecânicos, nos quais a resistência dos materiais necessita ser modelada.

A distribuição lognormal modela sistemas submetidos à fadiga e ao desgaste, como rolamentos, e sistemas de freio. Esse tipo de sistema mecânico não costuma ser reparado quando falha e sim substituído, o que impossibilita a aplicação de técnicas de reparo preventivo, o procedimento costumeiramente

utilizado é o monitoramento das características de operação até que seja necessário efetuar a substituição (OLIVEIRA, 2007).

2.5.3.3. Distribuição exponencial

A distribuição exponencial tem a capacidade de modelar adequadamente sistemas eletrônicos que não estejam submetidos a determinados tipos de solicitação mecânica. Modela também sistemas mecânicos bem mantidos, ou seja, que recebam atenção inteligente da manutenção, no qual o equipamento mecânico é reparado ou substituído antes que entre no intervalo de tempo associado às falhas por degradação, no qual as taxas de falha são crescentes.

As taxas de falha para a distribuição exponencial são constantes, permitindo assim a modelagem da maior parte dos sistemas encontrados na indústria. Não existe motivo para aplicar manutenções preventivas em itens com distribuição exponencial, pois a chance desse item vir a falhar dado que ele operou até o instante anterior é a mesma que esse possuía no instante anterior, ou seja, a chance de falha não aumenta nem diminui com o tempo.

No caso da distribuição exponencial, a confiabilidade decresce exponencialmente, ou seja, de forma acentuada no início da vida e de modo menos acentuado no final da vida (OLIVEIRA, 2007).

2.5.3.4. Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é extremamente flexível, podendo modelar os sistemas que seguem a distribuição exponencial, visto a exponencial ser um caso particular da distribuição de Weibull.

A distribuição de Weibull consegue modelar sistemas com taxas de falha decrescentes, constantes e crescentes, dependendo do valor do parâmetro de forma β .

Se o parâmetro β for menor que 1 a taxa de falha será decrescente. Permitindo modelar equipamentos na região de mortalidade infantil.

Se o parâmetro β for igual a 1 a taxa de falha será constante. A distribuição terá o comportamento da distribuição exponencial e suas respectivas características.

Se o parâmetro β for maior que 1 a taxa de falha será crescente. Permitindo modelar equipamentos na região de falhas por degradação, como no caso dos equipamentos mecânicos.

A distribuição de Weibull é tão flexível que costuma modelar praticamente todos os sistemas (OLIVEIRA, 2007).

2.6. Manutenibilidade

Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a

manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos. (NBR 5462, 1994).

Sob o ponto de vista matemático, manutenibilidade é a probabilidade do equipamento ser recolocado em condições de operação dentro de um dado período de tempo quando a ação de manutenção é executada de acordo com os procedimentos prescritos (LAFRAIA, 2001).

O termo manutenibilidade pode ser entendido como o tempo necessário para executar um reparo em um equipamento, de modo a restaurá-lo a condições operacionais. O tempo para execução dessa manutenção pode ser considerado uma variável aleatória, em função das variações inerentes ao processo de manutenção, como a habilidade e conhecimento técnico das equipes de manutenção, disponibilidade de peças de reposição, e dificuldade de diagnose da falha. Em sistemas mecânicos, a diagnose da falha tende a ser direta, sendo a maior parte do tempo gasto na execução do reparo. Em contrapartida, em sistemas eletro-eletrônicos a maior parte do tempo pode ser gasta na diagnose. Tendo sido feito o diagnóstico, a execução do reparo pode ser simples e direta (LEWIS, 1996).

Não se deve confundir a manutenibilidade com a manutenção de um item, O termo manutenção pode ser definido como o conjunto das ações destinadas a manter ou recolocar um item num estado no qual pode executar sua função requerida. A manutenibilidade é uma característica de projeto que define a facilidade de manutenção, o tempo de manutenção, os custos e as funções que o item executa (LAFRAIA, 2001).

A manutenibilidade tem como distribuição usual a Log-normal. Quando a representação é dada por essa distribuição, o sistema caracteriza-se pela existência de uma zona de reparos de rápida execução, uma zona densa de reparos executados dentro da normalidade de variação do processo, e uma zona na qual os tempos de reparo podem ser muito mais longos do que os da segunda zona. Em geral, nessa zona encontram-se ocorrências de falhas para

as quais havia indisponibilidade de peças de reposição, ou para as quais houve problemas na execução da diagnose (TEIXEIRA, 2008).

2.6.1. Tipos de Manutenção

Do ponto de vista da confiabilidade, existem três práticas básicas de manutenção: manutenção corretiva, manutenção preventiva, e manutenção preditiva.

2.6.1.1. Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é aquela executada após a ocorrência da falha, sem nenhum tipo de programação ou planejamento. Na grande maioria das vezes, as atividades de manutenção corretiva são as que mais oneram as atividades de manutenção, pois provocam perda de produção e/ou qualidade do produto, aquisição de peças de reposição em caráter de urgência, horas-extras, e muitas vezes um tempo maior de execução do que uma atividade de manutenção preventiva, pois a diagnose tende a ser mais demorada (TEIXEIRA, 2008).

2.6.1.2. Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva caracteriza-se por intervenções regulares em períodos fixos, onde se executam tarefas pré-determinadas. É necessário o

conhecimento dos modos de falha mais frequentes e, principalmente, da periodicidade com que as falhas ocorrem.

2.6.1.3. Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva trata de estimar o estado de funcionamento do sistema, pela medição de parâmetros vitais de operação. Ou seja, a manutenção preditiva é baseada na condição do parâmetro. Pode-se dizer que a preditiva acompanha o desenvolvimento da falha, apontando o melhor momento para a intervenção. Isto significa dilatar conscientemente a utilização de componente, o que se traduz em economia (CARAZAS, 2006).

2.7. Disponibilidade

Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, 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).

Se a confiabilidade é definida como a probabilidade de que o item não falhará e manutenibilidade como a probabilidade de que o item será restaurado com sucesso após a falha, é necessária a definição de uma métrica adicional para a probabilidade de que o componente/sistema esteja em funcionamento em um determinado momento, t (ou seja, não falhou ou foi restaurado após alguma falha). Essa métrica é disponibilidade. A disponibilidade é um critério de desempenho para sistemas reparáveis que contabiliza as propriedades de

confiabilidade e manutenibilidade de um componente ou sistema. Ela é definida como a probabilidade de que o sistema esteja funcionando corretamente quando este é solicitado para uso. Ou seja, a disponibilidade é a probabilidade de que um sistema não falhe ou esteja sofrendo uma ação de manutenção quando este precisa ser usado (Reliasoft, 2007). A Figura 2.12 exemplifica a relação entre a disponibilidade, a confiabilidade e manutenibilidade.

Confiabilidade	Mantenabilidade	Disponibilidade
Constante 	Diminui 	Diminui 
Constante 	Aumenta 	Aumenta 
Aumenta 	Constante 	Aumenta 
Diminui 	Constante 	Diminui 

Figura 2.12 - Relação entre confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade.

Fonte: Adaptada de Reliasoft (2007).

A Disponibilidade $A(t)$ é definida como a probabilidade de o equipamento ou sistema estar operando satisfatoriamente no determinado tempo t . $A(t)$ também é chamada de disponibilidade pontual, por se referir exclusivamente ao instante t . Seu valor é binário: 1, para condição operacional, ou 0, para condição de falha (TEIXEIRA, 2008).

Entretanto, frequentemente é necessária a determinação da disponibilidade ao longo de um intervalo de tempo. Normalmente, ao longo da chamada vida útil operacional. Essa disponibilidade é expressa pela seguinte relação (LEWIS, 1996):

$$A^*(T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (2.13)$$

ou seja, é a média da disponibilidade instantânea no intervalo (0, T).

Além disso, é frequentemente encontrado que depois de certo tempo de efeitos transientes, a disponibilidade média assume um valor independente do tempo. Nestes casos, a chamada disponibilidade assintótica é definida por:

$$A^*(\infty) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (2.14)$$

2.8. Métodos e Técnicas para o Cálculo da Disponibilidade, Confiabilidade e Manutenibilidade

Souza (2005) e Lafraia (2001) descrevem os principais modelos utilizados para caracterizar as propriedades de disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade de componentes e sistemas. Os principais modelos são Análise de Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis-FTA*), Análise de Modos de Falhas e Efeitos (*Failure Modes and Effects Analysis-FMEA*), Diagrama de Dependência (*Dependence Diagram-DD*), Análise de Markov (*Markov Analysis-MA*) e Diagrama de Blocos de Confiabilidade (*Reliability Block Diagram -RBD*) .

2.8.1. Fault Tree Analysis-FTA

A análise de árvore de falhas (FTA) pode ser uma análise do tipo qualitativa ou quantitativa. Na análise qualitativa, o objetivo pode ser determinar as causas básicas de um evento ou a sequência que levou ao evento. Na análise quantitativa, o objetivo é determinar a probabilidade de ocorrência do evento. O objetivo da FTA é a obtenção, através de um diagrama lógico, através de portas lógicas do tipo AND e OR, do conjunto mínimo de falhas que levaram ao evento em estudo. Além disso, é possível obter a probabilidade da ocorrência do evento indesejado (LAFRAIA, 2001).

2.8.2. Failure Modes and Effects Analysis-FMEA

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) é uma forma sistemática do tipo *bottom-up* de identificar os modos de falha de um sistema, um item ou função e determinar os efeitos sobre o nível imediatamente superior. Tipicamente, a FMEA é utilizada para tratar os efeitos de falha decorrentes de falhas individuais, sendo uma ferramenta útil para examinar a integridade do sistema total usando uma abordagem *bottom-up* (SOUZA, 2005).

O FMEA é um método empregado na melhoria de projetos de sistemas, na determinação de pontos vulneráveis no projeto, na concepção de testes, no projeto de linhas de produção e no planejamento da manutenção, no quais a elaboração de rotinas de diagnose e requisitos de manutenção preventiva são benefícios relevantes (CARAZAS, 2006). Apesar de ser inicialmente qualitativo, podem ser incluídas estimativas de cálculo das probabilidades de falha (LEWIS, 1996).

2.8.3. Dependence Diagram - DD

O diagrama de dependência (DD) substitui as portas lógicas da análise FTA por caminhos para mostrar a relação das falhas. Assim como na FTA, o DD mostra os eventos e/ou caminhos que levam o sistema ao fracasso. Assim, caminhos paralelos são equivalentes às portas lógicas do tipo AND e caminhos série são equivalentes às portas lógicas do tipo OR. O DD é essencialmente equivalente à análise FTA e a seleção de um sobre o outro fica de acordo com a preferência pessoal (SOUZA, 2005).

2.8.4. Markov Analysis-MA

A análise de Markov (MA) calcula a probabilidade de o sistema estar em vários estados como uma função do tempo. Um estado no modelo representa o status do sistema em função tanto da árvore de falhas como dos componentes defeituosos e das redundâncias do sistema. A transição de um estado para outro ocorre a uma taxa de transição que reflete as taxas de falha dos componentes e suas redundâncias. Cada transição de estado é um processo aleatório que é representado por uma equação diferencial específica. A probabilidade de alcançar um estado final pode ser definida e calculada por meio de combinações de transições necessárias para chegar a esse estado (SOUZA, 2005).

2.8.5. Reliability Block Diagram -RBD

Um Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD) realiza análises da confiabilidade e disponibilidade em sistemas grandes e complexos utilizando diagramas de blocos para mostrar as relações funcionais do sistema. A estrutura do diagrama de blocos de confiabilidade define a interação lógica das falhas dentro de um sistema que são necessárias para mantê-lo em operação (ITEM, 2007).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um produto é dito complexo quando possuir grande número de interfaces, múltiplos modos de operação e implementações de tecnologias multidisciplinares. Adiciona-se a isso a complexidade dos processos do ciclo de vida (e.g. manufatura), da organização desenvolvedora e das diferentes funções que cada um desempenha (LOUREIRO, 1999).

Segundo Teixeira (2008), o estudo da Engenharia da Confiabilidade teve seu início nos meados da 2ª Guerra Mundial. Em função do desenvolvimento de armamentos de maior complexidade, a indústria bélica passou a necessitar de meios que permitissem estimar a vida ou mesmo a probabilidade de um equipamento operar com sucesso. Depois do final da 2ª Guerra, com o desenvolvimento da energia nuclear, a confiabilidade começou a ser aplicada na redução da probabilidade de falha de sistemas de controle de usinas geradoras dessa energia.

Os diversos fatos que revolucionaram o desenvolvimento social, cultural e tecnológico, despertaram a necessidade de uma estrutura racional para o tratamento quantitativo da engenharia de confiabilidade de sistemas e iniciaram o estabelecimento de engenharia de confiabilidade como uma disciplina científica, a partir de meados dos anos 1950 (ZIO, 2009).

Na década de 70, os conceitos de confiabilidade começaram a ser aplicados no desenvolvimento de projetos estruturais complexos, nos quais uma falha poderia trazer como consequências a perda de vidas, danos ambientais, além de perdas econômicas elevadas (SOUZA, 2003).

Sob o âmbito da integração da abordagem da engenharia simultânea de sistemas, proposta por Loureiro (1999), e suas ferramentas com os conceitos e ferramentas de disponibilidade, a pesquisa bibliográfica realizada encontrou

poucos trabalhos, dentre os quais se destacam o trabalho de Oliveira (2007) e Santos (2007).

Oliveira (2007), cujo principal objetivo foi gerar diretrizes para empresas que desenvolvem produtos que exijam grande esforço de engenharia na otimização de seu processo de decisão, mostrando algumas opções para controlar suas operações, seus programas e projetos no âmbito da confiabilidade, manutenibilidade, disponibilidade e segurança.

Segundo Oliveira (2007), a geração de produtos de sucesso está associada ao cumprimento dos anseios e desejos dos consumidores. Diversos fatores caracterizam esses anseios, sendo que um grupo de fatores possui especial característica. Esse grupo abrange a confiabilidade, a manutenibilidade e a segurança. A gestão desses três fatores implica num olhar profundo em todo ciclo de vida do produto e não somente no projeto, na manufatura, ou na fase de testes funcionais, mantendo assim, profunda atenção às diretrizes da engenharia simultânea.

De acordo com Santos (2007), que em seu estudo trabalhou com materiais rodantes ferroviários, para que índices satisfatórios de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança sejam alcançados, deve-se considerar esses fatores desde a elaboração da especificação técnica do material rodante até a operação da frota, incluindo projeto, fabricação, testes, comissionamento e garantia.

A confiabilidade é um atributo fundamental para a operação segura de qualquer sistema tecnológico moderno (REASON, 1998) apud (ZIO, 2009).

Marcorin e Abackerli (2001) descrevem o domínio da confiabilidade nos produtos como uma forma de conferir à empresa ou organização uma vantagem competitiva em relação aos seus concorrentes, que se traduz, na prática, na melhor alocação de custos de garantia e de suporte, inventário de peças de reposição mais adequadas, menor custo estendido de seus produtos

ao longo do ciclo de vida. Apesar da importância visível das análises de confiabilidade neste contexto, sua aplicação em alguns ambientes industriais tem sido modesta, quando não inexistente, de forma que seus benefícios não têm sido traduzidos como elementos diferenciais de competitividade.

Com o custo e a complexidade cada vez maiores dos muitos sistemas industriais e de defesa, a importância da confiabilidade como um parâmetro de eficiência, o qual deve ser especificado e pelo qual se paga, tornou-se evidente (LAFRAIA, 2001).

Lafraia (2001) descreve os benefícios da aplicação da confiabilidade, por meio da qual é possível.

a) Aumentar os lucros através de:

- Menos paradas não programadas.
- Menores custos de manutenção/operação e apoio.
- Menores perdas por lucro cessante.
- Menores possibilidades de acidentes.

b) Fornecer soluções às necessidades atuais das indústrias como:

- Aumentar a produção de produtos/ unidades mais lucrativas.
- Flexibilidade para utilização de diversos tipos de cargas.
- Responder rapidamente às mudanças nas especificações dos produtos.
- Cumprir com a legislação ambiental, de segurança e higiene ocupacional.

c) Permitir a aplicação de investimentos com base em informações quantitativas:

- Segurança.
 - Continuidade operacional.
 - Meio ambiente.
- d) Eliminação de causas básicas de paradas não programadas de indústrias ou instalações:
- Diminuir os prazos de paradas programadas.
 - Aumentar a manutenibilidade das instalações.
- e) Atuação nas causas básicas dos problemas e não nos sintomas através de:
- Histórico de falhas dos equipamentos.
 - Determinação das causas básicas das falhas.
 - Prevenção de falhas em equipamentos similares.
 - Determinação de fatores críticos para manutenibilidade dos equipamentos.

Rosin et al. (1999) em seu estudo analisaram a disponibilidade de pistas para chegadas e partidas em nove aeroportos dos Estados Unidos. Foram utilizadas três abordagens hierárquicas (pista, configuração e aeroporto), levando em consideração: comprimento de pista, capacidade de visibilidade, condições de visibilidade, geometria da pista, configurações de pista e configuração utilização. Os modelos descritos forneceram os meios para avaliar o impacto de falhas na disponibilidade de equipamentos dos aeroportos.

De acordo com Jens (2006) a confiabilidade e a disponibilidade no fornecimento de energia elétrica é uma necessidade da vida contemporânea. Falhas no fornecimento de energia elétrica devem ser evitadas e, quando isso não for possível, deve-se prever a rápida recuperação do seu fornecimento.

Falhas no fornecimento, além de paralisarem o cotidiano da sociedade, podem levar aplicações críticas quanto à segurança para estados inseguros e acarretar riscos à vida humana, sem contar o prejuízo financeiro gerado tanto para os fornecedores como para os consumidores da energia elétrica. Deve-se, portanto, buscar novas técnicas e métodos para manter uma alta confiabilidade e disponibilidade nos sistemas de potência.

Cunha et al. (2012) propõem que o projeto de submarinos com o foco em confiabilidade significa realizar o desdobramento dos requisitos de confiabilidade com o objetivo de atingir os padrões de desempenho e segurança requeridos.

Ainda de acordo com Cunha et al. (2012), no projeto de submarinos, a confiabilidade deve ser tratada como parâmetro de efetividade, devendo ser “explicitamente” especificada e pela qual se deve prover um nível de investimento adequado. Como parâmetro de efetividade, a confiabilidade deve ser analisada em confronto com outros parâmetros de desempenho.

Diferentemente de um item de baixa complexidade tecnológica, cuja confiabilidade pode ser alocada no projeto de engenharia, sendo possível fazer previsões de MTBF (do inglês: *Mean Time Between Failure*) com razoável precisão, a confiabilidade de um sistema complexo, como o submarino nuclear, é o resultado de uma dinâmica de interações entre sistemas físicos (hardware), lógico (softwares), sistema humano (tripulação) e elementos organizacionais (CUNHA, 2012).

O aspecto fundamental na análise de confiabilidade é a incerteza relacionada com ocorrência de falhas e as suas consequências (ZIO, 2009). Isso significa fazer considerações em projetos de engenharia sobre as possíveis falhas e a segurança, considerando eventos e cenários de natureza probabilística em ambiente no qual se faz uso intensivo e sistemático de ferramentas determinísticas (CUNHA, 2012).

Em seu trabalho Zio (2009) descreve a disponibilidade como atributo que depende de processos inter-relacionados, dentre os quais destaca: degradação dos componentes, falhas e reparos, diagnósticos e manutenção.

O estudo de Nogueira (2010) apresenta a comparação de desempenho operacional de motores de combustão principais de embarcações de suporte a plataformas de petróleo, utilizando dados de desgaste de componentes dos motores obtidos através das análises dos lubrificantes em operação nos motores, e modelagem estatística do comportamento de falhas em função do tempo.

O estudo conclui que o comportamento mecânico dos motores dois-tempos, provavelmente devido a sua maior simplicidade em comparação aos motores quatro-tempos, implica em uma maior previsibilidade de falhas, o que sob o ponto de vista de manutenibilidade, é uma vantagem considerável, visto que em situações práticas, as embarcações estarão menos sujeitas a falhas aleatórias, que podem ocorrer com maior frequência em motores quatro-tempos, permitindo a aplicação de estratégia de manutenção preventiva baseada no tempo.

Além dos aspectos acima citados, deverá ser considerado ainda o impacto dos custos com combustíveis e lubrificantes, visto que é sabido que motores dois-tempos apresentam maiores consumos desses insumos, em comparação aos motores quatro-tempos, o que implica em maior custo operacional.

No estudo de Oliveira et al. (2010) à cerca de confiabilidade de sistemas isolados baseados em energias renováveis os autores apresentam as soluções implementadas no sistema híbrido de geração de energia elétrica da Ilha de Lençóis com a finalidade de melhorar a confiabilidade e robustez desse tipo de sistema. As medidas propostas foram traduzidas em especificações técnicas para os sistemas de geração, conversão, armazenamento e minirredes de distribuição, de forma a minimizar a possibilidade de falhas, uma vez que estas

comunidades se encontram distantes de centros urbanos e sem disponibilidade de mão-de-obra para manutenção emergencial.

Para aumentar a disponibilidade de um equipamento, é necessário, ao mesmo tempo, aumentar a confiabilidade, ou seja, a probabilidade do equipamento operar isento de falha até o tempo t , e aumentar a manutenibilidade, ou seja, a probabilidade do equipamento ser reparado, em caso de falha, até o tempo t (SELLITTO, 2005).

Estudo de Sellitto (2005) destaca ainda que o término da vida útil, sob o ponto de vista de confiabilidade, que ocorre quando o item ingressa no período de mortalidade senil, não deve ser confundido com sua obsolescência do ponto de vista mercadológico ou produtivo. Nessa, o item é substituído por haver desaparecido o valor atribuído à função que desempenha. Naquela, a substituição ocorre por queda na confiabilidade do item em produzir o valor que dele se espera.

Serrano (2010) entende que além de características físicas do projeto, o pessoal e as considerações do fator humano são de primordial importância. Estas considerações incluem a experiência do técnico, formação exigida, nível de qualificações, supervisão necessária, supervisão disponíveis, as técnicas utilizadas, a coordenação física e da força e do número de técnicos, e requisitos da equipe de trabalho. Os projetistas na medida do possível devem minimizar a probabilidade do erro humano ou minimizar as consequências quando esse ocorrer. Como soluções para este problema pode se reduzir o número de tarefas de manutenção, projetar o produto para ser facilmente mantido segundo o ambiente de trabalho e/ou projetar características no produto de maneira a tornar impossível a execução de tarefas de forma incorreta, como por exemplo, na montagem de peças.

Dhillon (1999) destaca a preocupação com a facilidade da prática de manutenção na fase de elaboração do projeto, visando diminuir riscos

potenciais que possam impactar na qualidade dos produtos e facilitando a tarefa do operador.

De acordo com Clive (2007), o erro na manutenção é uma parte integrante das operações de manutenção e, de maneira a mitigar tais erros, deve ser abordado durante o processo de projeto para assegurar que não contribuam para o comprometimento da segurança e eficiência do produto.

Do ponto de vista da produção de uma empresa, o principal objetivo de qualquer tarefa ou operação realizada em seus sistemas e componentes é o de maximizar os lucros e minimizar as perdas da produção. Obviamente, requisitos ambientais, profissionais, de segurança pública, dentre outros, devem ser satisfeitos. Para cumprir tal objetivo, a manutenção deve assegurar que as características de confiabilidade e disponibilidade dos sistemas devam ser mantidas consistentemente de acordo com as exigências planejadas pela produção planejada e diretivas regulamentares a curto e longo prazo, a um custo mínimo de recursos (ZIO, 2009).

A manutenção das linhas de distribuição é um processo importante, já que qualquer interrupção da energia resulta em gastos incomensuráveis. Outro fator importante é que, além dos prejuízos de uma interrupção no fornecimento de energia, e mesmo que se obtenha alta disponibilidade calculada, o prejuízo social que a descontinuidade desse serviço essencial causa é de difícil avaliação. Pode-se observar durante o estudo que o critério de qualidade da manutenção em distribuição de energia elétrica da empresa estudada considera apenas aspectos técnicos para hierarquização dos circuitos e não reconhece a contribuição dos circuitos através da confiabilidade requerida pelos clientes (MARTINS, 2006).

A exigência de clientes tem aumentado, exigindo novas tecnologias, modernização de equipamentos e automação de sistemas produtivos. Um desempenho eficaz dos novos processos produtivos depende de sistemas de produção mais complexos. A indisponibilidade de equipamentos e sistemas

pode afetar a capacidade produtiva, aumentando custos e interferindo na qualidade do produto. Falhas podem acarretar comprometimentos significativos para a imagem institucional das empresas, principalmente se incluírem envolvidos aspectos de segurança pessoal e patrimonial e de meio ambiente. Neste novo contexto produtivo, tem crescido a importância estratégica da função manutenção industrial (WUTTKE, 2008).

Em seus estudos Souza et al. (2012) propuseram mostrar a importância da utilização dos indicadores de desempenho da função manutenção, com o objetivo de avaliar a eficácia das tarefas da função manutenção, e fundamentalmente demonstrar que os indicadores de desempenho não são definidos isoladamente, mas devem ser o resultado de uma cuidadosa análise das interações da função manutenção com a função produção (operações e processos), e evidentemente com outras funções organizacionais.

Fernandes (2003) propõe método para o aumento da disponibilidade das máquinas e redução dos custos de manutenção, e conclui que com alta rotatividade de profissionais, acúmulo e diversidade de atividades e falta de treinamento contínuo, muitas empresas não obtêm sucesso em suas ações e continuam sem a solução ideal para a manutenção.

De acordo com Zio (2009), confiabilidade e segurança são as propriedades sistêmicas que emergem das interações de todos os diversos componentes do sistema, tais como hardware, software, estrutura organizacional e humana. Assim, a experiência acumulada nas últimas décadas em acidentes industriais ocorridos tem mostrado claramente que os fatores organizacionais e humanos têm um papel significativo no risco de falhas dos sistemas e em acidentes, durante todo o ciclo de vida de um sistema.

Em seu estudo, Wuttke (2008) descreve que para trabalhos em confiabilidade e modelagem de falhas, é importante a existência de bancos de dados consistentes, independentemente do software ou ferramenta utilizada para a gestão da manutenção.

4 MÉTODO

A metodologia proposta neste trabalho tem por objetivo analisar a disponibilidade de organização atual e a necessária ao desenvolvimento de produtos espaciais através da integração da metodologia proposta por Oliveira (2007) e da abordagem da engenharia simultânea de sistemas, proposta por Loureiro (1999) e suas ferramentas com os conceitos e ferramentas de disponibilidade.

Oliveira (2007) propõe técnicas e ferramentas para alocação de disponibilidade em cada uma das fases do ciclo de vida do produto, por meio de roteiro planejado de tarefas a ser executadas em cada uma das fases do ciclo de vida, de maneira que a disponibilidade requerida seja atendida.

Loureiro (1999) propõe método de análise estruturada que busca antecipar os requisitos e atributos de produto, processo e organização. O método consiste da análise simultânea do produto, seus processos do ciclo de vida e das organizações que implementam esses processos. O processo de análise é composto da análise de requisitos, funcional e física. Como resultado desses processos, requisitos e atributos são identificados e seus relacionamentos capturados.

Ao integrarmos os dois métodos é possível realizar o processo de gestão, com o quê deve ser feito e onde fazer, por meio de Oliveira (2007) e o processo de engenharia, com o como deve ser feito, por meio de Loureiro (1999).

O método proposto busca calcular e racionalizar o planejamento de recursos organizacionais utilizados para o desenvolvimento de produtos espaciais de modo a garantir a sua disponibilidade de organização dada à demanda proposta. Assim, caso a disponibilidade de organização atual dada à demanda proposta seja efetiva (eficaz e eficiente), ações organizacionais não serão

necessárias, entretanto se a disponibilidade de organização não for efetiva, ações para a garantia de disponibilidade de organização serão necessárias.

A Figura 4.1 mostra o fluxograma proposto para a metodologia.

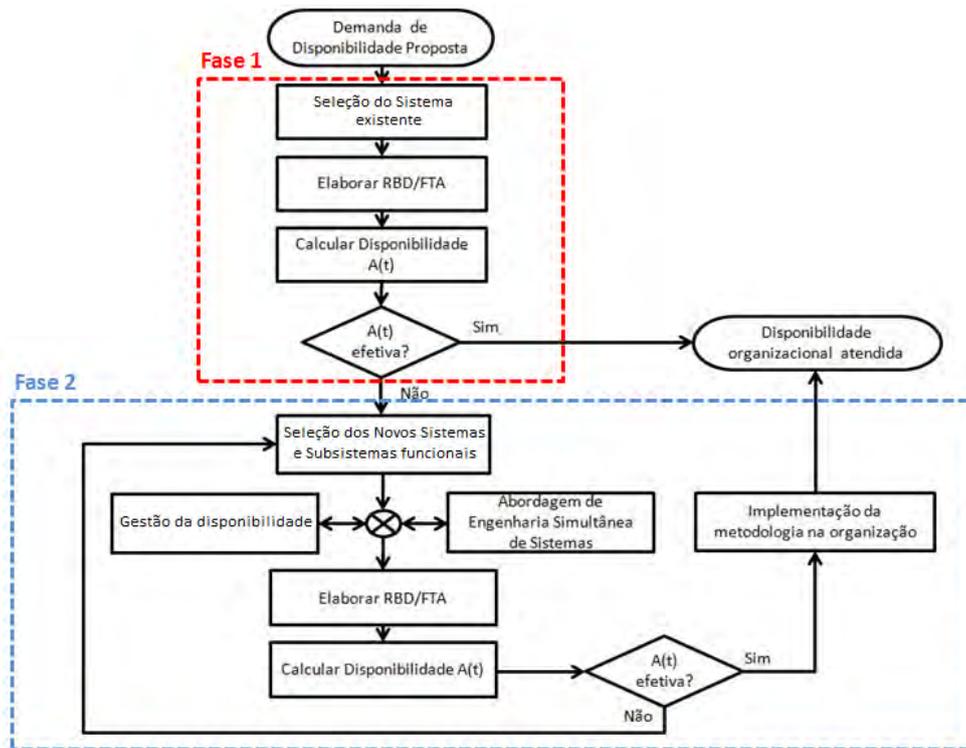


Figura 4.1 - Metodologia proposta

A seguir são explicados cada um dos elementos do fluxograma proposto.

4.1. Demanda de disponibilidade proposta

O produto espacial é um produto complexo (STEVENS et al., 1998). Seu processo de desenvolvimento e seus outros processos do ciclo de vida também

são complexos. Por conseguinte, as organizações que implementam esses processos também o são.

O método se baseia no conceito de que a organização atual funciona com determinada demanda de disponibilidade e que em um período posterior serão demandados dessa organização novos elementos de processos, produtos e organização que poderão exigir o aumento da disponibilidade atual.

4.2. Ciclo de Disponibilidade - Fase 1

4.2.1. Seleção do sistema e subsistemas funcionais

Nesta etapa da metodologia deverão ser capturados os elementos para processo, produto e organização, que participam simultaneamente da nova solicitação de demanda de disponibilidade e deverá ser criada a árvore funcional dos sistemas e subsistemas envolvidos ou realizar sua descrição funcional.

Para a elaboração da árvore funcional de um sistema qualquer, é preciso conhecer a sua lógica de operação (TEIXEIRA, 2008).

4.2.2. Elaborar RBD e/ou FTA

Um conceito importante que não deve ser esquecido quando tratamos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade é que os diagramas de blocos de confiabilidade não necessariamente representam as configurações físicas, elétricas ou funcionais dos componentes, equipamentos ou módulos. Trata-se de uma representação gráfica do inter-relacionamento dos itens do ponto de

vista da confiabilidade global do sistema. Pode também ser interpretado como um diagrama de fluxo, da entrada para a saída do sistema, onde cada elemento do sistema é representado por um bloco (Souza, 2003).

Para isso, avalia-se a confiabilidade de um sistema complexo a partir da confiabilidade de seus componentes. Neste tipo de estudo, os diversos componentes ou diversos modos de falha são agrupados de forma que, a partir das distribuições de probabilidade de falha desses, seja possível obter a confiabilidade do sistema. Esses agrupamentos são representados graficamente por RBD's (CARAZAS, 2006).

Segundo Souza (2003), árvores de falha são normalmente utilizadas para prever a ocorrência de eventos catastróficos, onde uma série de eventos deve ocorrer para que o evento-topo da árvore se concretize. Uma árvore de falha simples assemelha-se a um diagrama de blocos.

Cabe a cada autor definir qual o melhor método de análise para seu sistema em estudo.

4.2.3. Calcular disponibilidade

Na fase de cálculo e análise da disponibilidade, os maiores desafios estão na tratativa que os dados obtidos em campo, por meio de normas ou dados de fabricantes, receberão: devem ser analisados os dados considerados úteis e descartados os dados considerados inúteis, de forma a ser possível gerar uma base de dados sólida e consistente, que tenha representação estatisticamente significativa do componente ou sistema em estudo.

O exemplo abaixo, Figura 4.2, mostra como pode ser realizado o cálculo da disponibilidade de um sistema.

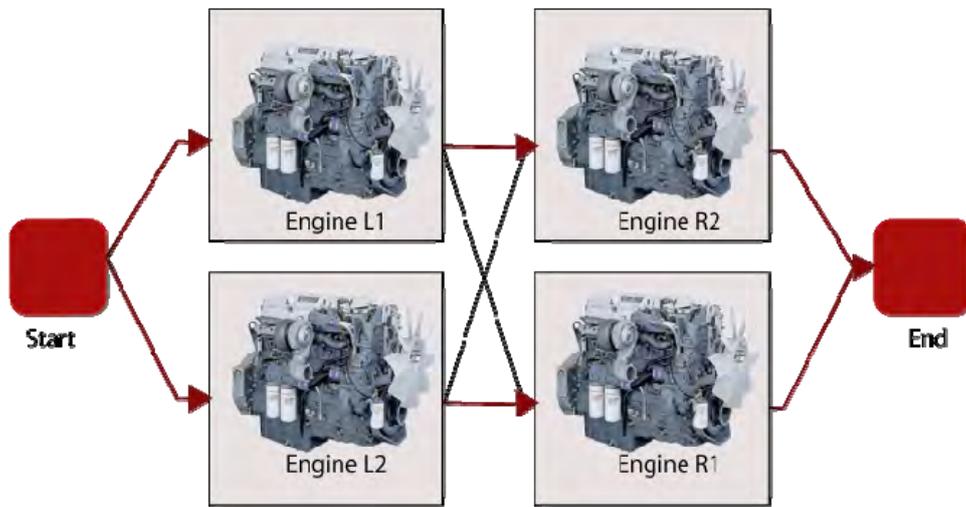


Figura 4.2 - Blocos de Confiabilidade para avião de 4 motores

Fonte: Adaptada de Reliasoft (2011)

Considere um avião com quatro motores, e que o projeto da aeronave é tal que, pelo menos, dois motores são obrigados a funcionar para a aeronave permanecer no ar. Entretanto dois motores do mesmo lado não podem falhar. O projeto de motores da aeronave está em uma configuração k-out-of-n, onde $k = 2$ e $n = 4$.

Os diagramas de blocos de confiabilidade para o exemplo será:

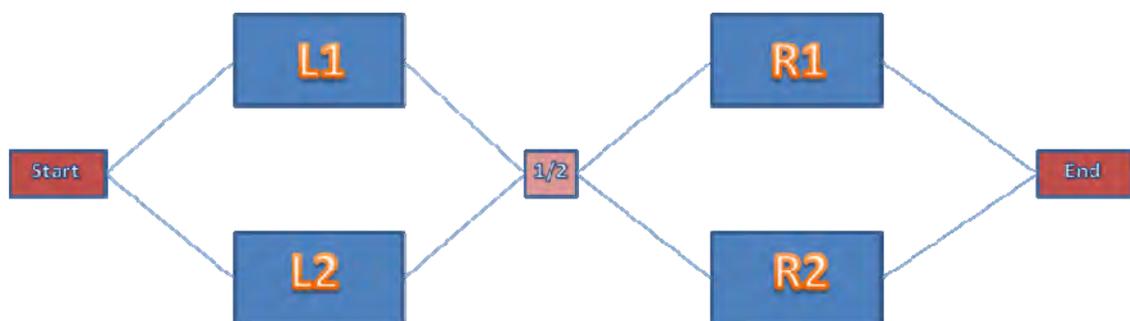


Figura 4.3 - Diagrama de blocos de confiabilidade

A expressão analítica que determina a confiabilidade dessa configuração é dada abaixo:

$$R_s = R_{start} \times (1 - Q_{L1}) \times (1 - Q_{L2}) \times R_{1/2} \times (1 - Q_{R1}) \times (1 - Q_{R2}) \times R_{end}$$

Considerando os blocos Start, 1/2 e End, com confiabilidade igual a 1 tem-se a equação abaixo:

$$R_s = 1 \times [1 - (1 - R_{L1}) \times (1 - R_{L2})] \times 1 \times [1 - (1 - R_{R1}) \times (1 - R_{R2})] \times 1$$

$$R_s = [1 - (1 - R_{L2} - R_{L1} + R_{L1} \times R_{L2})] \times [1 - (1 - R_{R2} - R_{R1} + R_{R1} \times R_{R2})]$$

$$R_s = [1 - 1 + R_{L2} + R_{L1} - R_{L1} \times R_{L2}] \times [1 - 1 + R_{R2} + R_{R1} - R_{R1} \times R_{R2}]$$

$$R_s = [R_{L2} + R_{L1} - R_{L1} \times R_{L2}] \times [R_{R2} + R_{R1} - R_{R1} \times R_{R2}]$$

Assim a confiabilidade do sistema será:

$$R_s = R_{L2} \times R_{R2} + R_{L2} \times R_{R1} - R_{L2} \times R_{R1} \times R_{R2} + R_{L1} \times R_{R2} + R_{L1} \times R_{R1} - R_{L1} \times R_{R1} \times R_{R2} - R_{L1} \times R_{L2} \times R_{R2} - R_{L1} \times R_{L2} \times R_{R1} + R_{L1} \times R_{L2} \times R_{R1} \times R_{R2}$$

Para o exemplo relativamente simples mostrado acima a expressão analítica do cálculo da confiabilidade já é bastante complexa.

Considere-se agora o sistema elétrico da Figura 4.4 no qual a eletricidade é capaz de fluir em ambas as direções. Para que o sistema tenha uma operação bem-sucedida é necessário que pelo menos uma saída (O1, O2 ou O3) funcione.

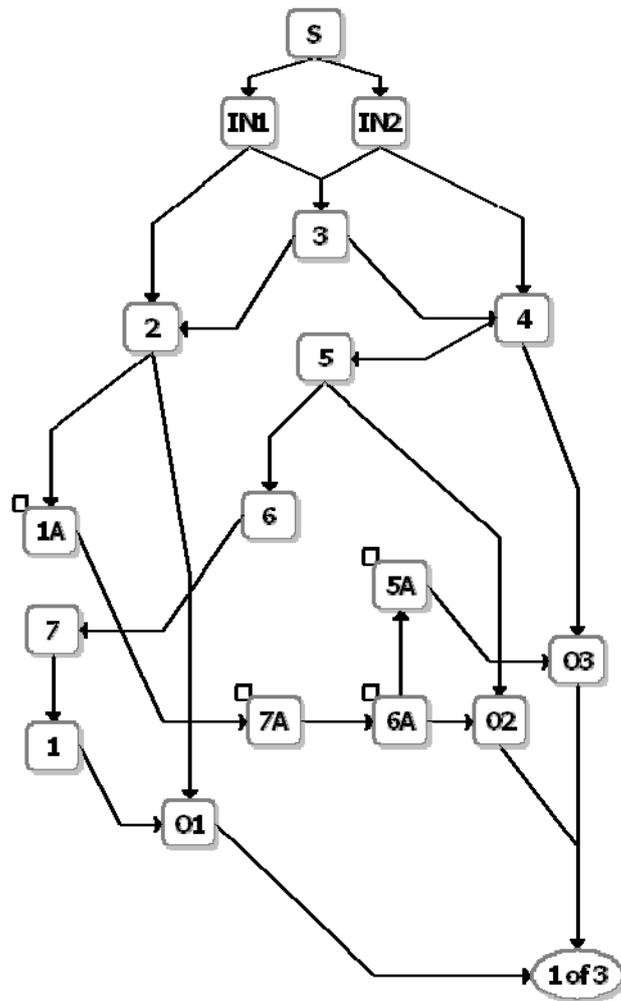


Figura 4.5 - Diagrama de blocos de confiabilidade
 Fonte: Adaptada de Reliasoft (2011)

A expressão analítica para o cálculo da confiabilidade é descrita pelas equações abaixo:

Os possíveis caminhos do sistema são:

$$X1 = (2 \cap 1)$$

$$X2 = (2 \cap 1 \cap 7 \cap 6 \cap O2)$$

$$X3 = (2 \cap 1 \cap 7 \cap 6 \cap 5 \cap O3)$$

$$X_4 = (4 \cap O_3)$$

$$X_5 = (4 \cap 5 \cap O_2)$$

$$X_6 = (4 \cap 5 \cap 6 \cap 7 \cap 1 \cap O_1)$$

Assim a probabilidade do sistema é:

$$P_f = (I_{N1} \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) \cup (I_{N1} \cap 3 \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) \cup (I_{N2} \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) \cup (I_{N2} \cap 3 \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3))$$

Expandindo a fórmula:

$$P_f = (I_{N1} \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) + (I_{N1} \cap 3 \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) + (I_{N2} \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) + (I_{N2} \cap 3 \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) - ((I_{N1} \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) \cap (I_{N1} \cap 3 \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6))) - ((I_{N1} \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) \cap (I_{N2} \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6))) - ((I_{N1} \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) \cap (I_{N2} \cap 3 \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3))) - ((I_{N1} \cap 3 \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) \cap (I_{N2} \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6))) - ((I_{N1} \cap 3 \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) \cap (I_{N2} \cap 3 \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3))) - ((I_{N2} \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) \cap (I_{N2} \cap 3 \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3))) - ((I_{N1} \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) \cap (I_{N1} \cap 3 \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) \cap (I_{N2} \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6))) - ((I_{N1} \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) \cap (I_{N1} \cap 3 \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) \cap (I_{N2} \cap 3 \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3))) - ((I_{N1} \cap 3 \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) \cap (I_{N2} \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) \cap (I_{N2} \cap 3 \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)))$$

A fórmula da confiabilidade é descrita por:

$$R_s = 1 - P_f$$

Substituindo:

$$R_s = 1 - (I_{N1} \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) + (I_{N1} \cap 3 \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) + (I_{N2} \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6)) + (I_{N2} \cap 3 \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) - ((I_{N1} \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) \cap (I_{N1} \cap 3 \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6))) - ((I_{N1} \cap (X_1 \cup X_2 \cup X_3)) \cap (I_{N2} \cap (X_4 \cup X_5 \cup X_6))) - (($$

$$\begin{aligned}
& IN1 \cap (X1 \cup X2 \cup X3) \cap (IN2 \cap 3 \cap (X1 \cup X2 \cup X3)) - ((IN1 \cap 3 \cap (X4 \cup X5 \\
& \cup X6)) \cap (IN2 \cap (X4 \cup X5 \cup X6))) - ((IN1 \cap 3 \cap (X4 \cup X5 \cup X6)) \cap (IN2 \cap 3 \cap \\
& (X1 \cup X2 \cup X3))) - ((IN2 \cap (X4 \cup X5 \cup X6)) \cap (IN2 \cap 3 \cap (X1 \cup X2 \cup X3))) - ((\\
& IN1 \cap (X1 \cup X2 \cup X3) \cap (IN1 \cap 3 \cap (X4 \cup X5 \cup X6)) \cap (IN2 \cap (X4 \cup X5 \cup \\
& X6))) - ((IN1 \cap (X1 \cup X2 \cup X3)) \cap (IN1 \cap 3 \cap (X4 \cup X5 \cup X6)) \cap (IN2 \cap 3 \cap \\
& (X1 \cup X2 \cup X3))) - ((IN1 \cap 3 \cap (X4 \cup X5 \cup X6)) \cap (IN2 \cap (X4 \cup X5 \cup X6)) \cap (\\
& IN2 \cap 3 \cap (X1 \cup X2 \cup X3))) - ((IN1 \cap (X1 \cup X2 \cup X3)) \cap (IN2 \cap (X4 \cup X5 \cup \\
& X6)) \cap (IN2 \cap 3 \cap (X1 \cup X2 \cup X3))) - ((IN1 \cap (X1 \cup X2 \cup X3)) \cap (IN1 \cap 3 \cap \\
& (X4 \cup X5 \cup X6)) \cap (IN2 \cap (X4 \cup X5 \cup X6)) \cap (IN2 \cap 3 \cap (X1 \cup X2 \cup X3)))
\end{aligned}$$

Como os sistemas atuais são cada vez mais complexos, fica demonstrado pelos dois exemplos que é mandatório o uso de software para o cálculo da confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. Nesta dissertação o software de escolha foi o Blocksim 7.0 da Reliasoft.

4.2.4. Efetividade da disponibilidade

A disponibilidade calculada deve atender a demanda inicialmente proposta, o sistema deve ser capaz de atender a demanda de disponibilidade no período desejado pela organização.

Um importante conceito que pode ser adotado nesta metodologia é o da efetividade da disponibilidade, ou seja, não interessa a um sistema ter 99,99% de disponibilidade se durante o período em que realmente for requerido esteja indisponível. Assim a métrica da disponibilidade passa a ser sua efetividade sendo dividida em eficácia e eficiência.

4.3. Ciclo de Disponibilidade - Fase 2

Uma vez que a demanda de disponibilidade proposta à organização não tenha sido atendida, são necessárias ações por parte da organização para o atendimento daquela demanda. Nesta parte da metodologia são utilizadas as técnicas de engenharia simultânea de sistemas combinadas aos conceitos e ferramentas de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade.

4.3.1. Seleção do sistema e subsistemas funcionais

Deverá ser utilizada a árvore funcional dos sistemas e subsistemas. Os elementos para processo, produto e organização, que participam simultaneamente da nova solicitação de demanda de disponibilidade são então submetidos à análise qualitativa e quantitativa para aumento da disponibilidade de seus sistemas e subsistemas.

4.3.2. Engenharia simultânea de sistema integrada à disponibilidade

Neste processo são integradas as metodologias propostas por Loureiro (1999) e Oliveira (2007).

É necessário definir as técnicas de monitoramento ou coleta de dados, as técnicas de análise e os métodos para definição de ações de melhoria em cada fase do ciclo de vida do produto.

4.3.2.1. Levantamento de requisitos

Segundo Oliveira (2007) na fase de levantamento de requisitos diversas fontes de informação sobre os requisitos de disponibilidade precisam ser consultadas. Dentre essas fontes é importante citar:

- As normas obrigatórias pré-existentes;
- Pesquisas de mercado;
- Padrões relevantes;
- Projeção das curvas dos requisitos ao longo do tempo;
- Dados de campo;
- Dados de ensaios;

Como a fase de levantamento de requisitos precede todas as outras etapas no desenvolvimento de um novo produto e além desse fato exige um grupo multidisciplinar é muito importante que todas as ferramentas de gestão de disponibilidade permitam um intercâmbio de informações entre diversos membros de uma equipe. O objetivo nessa fase basicamente se restringe a organização que garanta a geração dos requisitos de disponibilidade demandados que possuam viabilidade técnica e econômica.

4.3.2.2. Projeto preliminar

Segundo Oliveira (2007) na fase de projeto preliminar os objetivos são garantir que as especificações do produto estejam de acordo com os requisitos

levantados na fase anterior. Para isso, o processo que busca pelo atendimento dos requisitos ocorrerá de modo cíclico, onde serão levantadas diversas soluções e verificações serão efetuadas até se chegar a uma solução que demonstre potencial no atendimento aos requisitos de disponibilidade.

Ainda de acordo com Oliveira (2007) como fase de levantamento preliminar de possíveis soluções, o atendimento ou não aos requisitos terá de ser estimado. Isso exige acesso a uma série de fontes de informações qualitativas e/ou quantitativas, como:

- Bibliotecas com dados de vida.
- Dados de campo de equipamentos similares ou de versões anteriores de um mesmo programa.
- Análises de modos e efeitos de falhas (FMEA) de produtos similares.
- Análises de modos, efeitos e criticidade (FMECA) de produtos similares.
- Método de predição dos parâmetros de disponibilidade.

A aplicação e efetividade desses métodos são extensamente discutidas em diversos textos como Jones (1999) e Brown (2003) apud (OLIVEIRA, 2007). Através desses textos é possível selecionar as normas mais adequadas para cada tipo de componente ou até subsistema. Concomitante com a predição de confiabilidade é fundamental avaliar o custo em todo ciclo de vida, uma vez que a confiabilidade afeta nos custos de manutenção e operação.

4.3.2.3. Projeto detalhado

Oliveira (2007) propõe que na fase de projeto detalhado um dos maiores objetivos é o de dimensionar características de componentes e subsistemas. Nesse trabalho, é muito importante possuir uma rica e confiável fonte de informação, nesse caso normalmente as fontes mais comuns são os laboratórios de ensaio.

Com base nesses ensaios é possível dimensionar componentes e subsistemas através de modelos estatísticos para a disponibilidade, nos quais a disponibilidade irá depender de diversos fatores como carga, temperatura e outras características ambientais.

4.3.2.4. Fabricação, montagem e testes de verificação

A fabricação e a montagem podem afetar significativamente os parâmetros de disponibilidade. Nesses processos, é importante se definir qual o impacto de cada tarefa nas características físicas do produto e, por conseguinte o efeito da variação dessas características físicas nos parâmetros de disponibilidade.

Como estudado anteriormente, problemas nessa fase podem acarretar uma alta mortalidade infantil. Caso esses defeitos não sejam detectados com os testes ainda dentro do ambiente da organização, os custos das falhas em campo serão muito mais altos (OLIVEIRA, 2007).

4.3.2.5. Armazenamento e transporte

Oliveira (2007) afirma que apesar de muitas vezes negligenciados os processos de armazenamento e transporte podem ter impacto severo sobre a disponibilidade.

4.3.2.6. Operação e manutenção

Diferentemente das predições e avaliações em ensaios acelerados, as informações provenientes da operação e manutenção são o retrato exato da realidade do produto em campo. Justamente por ser uma informação precisa, essa merece um tratamento especial na captura e organização dos dados. As informações de campo devem ser capturadas, organizadas, analisadas e entregues a diferentes clientes do sistema de informação, como o pessoal de projeto preliminar, projeto detalhado, manufatura e manutenção (OLIVEIRA, 2007).

4.3.3. Alocação de disponibilidade

Uma vez que a alocação de disponibilidade foi definida em cada uma das fases do ciclo de vida do produto e nos processos organizacionais, pode-se elaborar o fluxograma da Figura 4.6 adaptado de Oliveira (2007) para melhor aplicação dos recursos para o incremento da disponibilidade organizacional.

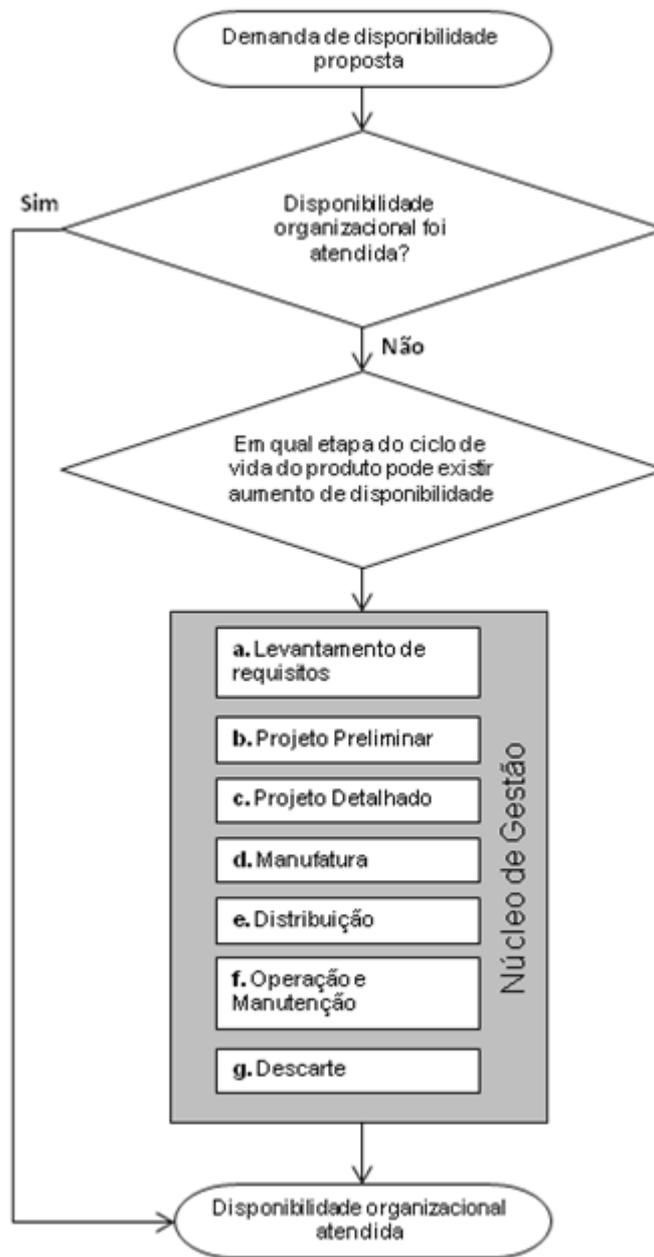


Figura 4.6 - Fluxograma do processo de gestão da disponibilidade

Fonte: Adaptada de Oliveira (2007)

A Tabela 4.1 adaptada de Oliveira (2007) propõe técnicas, ferramentas e o processo de gestão para a alocação de disponibilidade em cada uma das fases do ciclo de vida do produto.

Tabela 4.1 - Disponibilidade ao longo do ciclo de vida

FASE DO CICLO DE VIDA		TAREFAS RELACIONADAS COM DISPONIBILIDADE
1	Conceito	<ul style="list-style-type: none"> • Calcular a disponibilidade previamente alcançada. • Considerar as implicações da disponibilidade no projeto.
2	Definição do sistema e condições de aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • Efetuar análise preliminar da disponibilidade. • Estabelecer a política de disponibilidade. • Identificar as condições de operação e manutenção. • Identificar a influência das restrições de infraestrutura existentes na disponibilidade.
3	Requisitos do sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Especificar requisitos de disponibilidade do sistema. • Definir estrutura funcional do sistema.
4	Divisão dos requisitos dos sistemas	<ul style="list-style-type: none"> • Alocação dos requisitos de disponibilidade do sistema nos subsistemas.
5	Projeto e implementação	<ul style="list-style-type: none"> • Executar ensaios de melhoria de disponibilidade.
6	Instalação	<ul style="list-style-type: none"> • Iniciar treinamentos dos responsáveis pela manutenção. • Efetuar previsões de sobressalentes e ferramentas especiais.
7	Operação e Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Gerenciar estoques de sobressalentes e ferramentas especiais.
8	Monitoramento do desempenho	<ul style="list-style-type: none"> • Analisar o desempenho da disponibilidade.

4.3.4. Abordagem de Engenharia simultânea de sistemas

A metodologia proposta neste trabalho insere no contexto da engenharia simultânea de sistemas, além da integração antecipada e coordenada entre as áreas de conhecimento relevantes ao desenvolvimento de produtos, a organização da equipe sob o prisma de multidisciplinaridade e dedicação integral ao projeto e, enfoque sobre as necessidades do cliente, os aspectos ligados à confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, de maneira a

atender a demandas de disponibilidade impostas a organização de forma efetiva.

Esta metodologia integra o método proposto por Loureiro (1999) aos aspectos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, através da análise simultânea para o produto e organização, a análise de *stakeholder*, análise de requisitos, a análise funcional e a análise de implementação.

A Figura 4.7 ilustra os elementos da abordagem de engenharia simultânea de sistemas. A identificação dos atributos de produto e de organização e de seus relacionamentos é necessária para a identificação de impacto entre os atributos de produto e de organização, e a antecipação dos requisitos dos processos do ciclo de vida para o início do processo de desenvolvimento do produto.

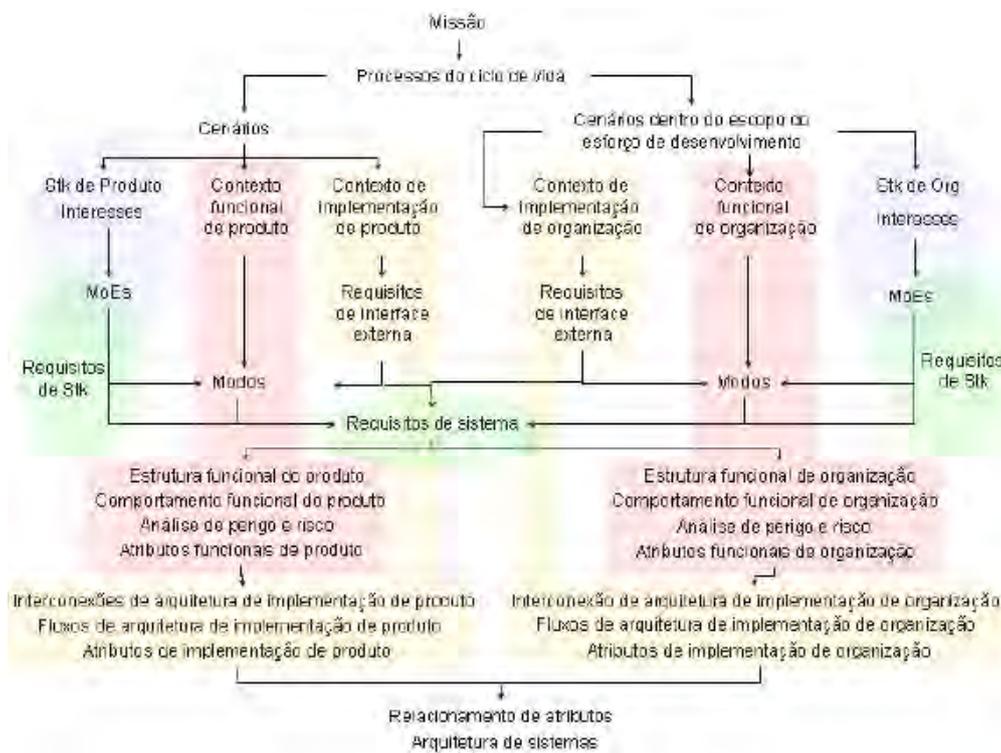


Figura 4.7 - Abordagem de Engenharia de Sistemas

Fonte: Adaptada de Loureiro (2010)

Os elementos de engenharia simultânea de sistemas são descritos abaixo:

4.3.4.1. Análise do ciclo de vida

A análise do ciclo de vida é um processo para desenvolver o sistema incluindo os requisitos, a validação, o treinamento e os *stakeholders*. Neste trabalho são identificados os potenciais processos do ciclo de vida, são eles:

- Desenvolvimento.
- Fabricação.
- Operação.
- Descarte.

4.3.4.2. Escopo do esforço de desenvolvimento

No escopo do esforço de desenvolvimento devem ser especificados quais processos ou cenários que são parte do escopo de desenvolvimento da organização.

A atividade de engenharia de sistemas atravessa todo o ciclo de vida do programa, desde análise de sistemas, definição de requisitos e projeto conceitual até o resultado do programa, através da produção, suporte operacional, planejamento de substituição, e o descarte no fim do programa.

A Figura 4.8 ilustra alguns processos escolhidos, nos quais são analisados elementos para organização, e para o produto.

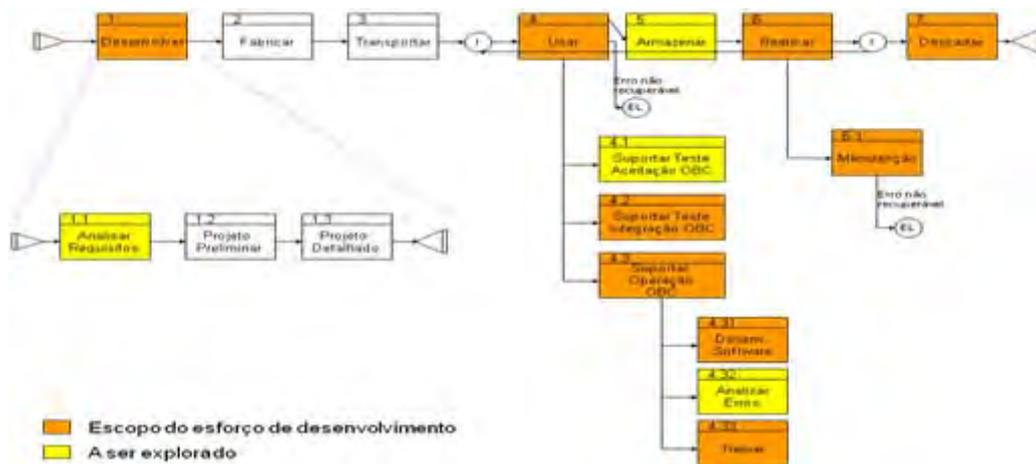


Figura 4.8 - Escopo do Esforço de Desenvolvimento

Na Figura 4.9 são apresentados os processos que serão analisados na organização de desenvolvimento, e os *stakeholders* que interagem com a organização durante o ciclo de vida do produto.

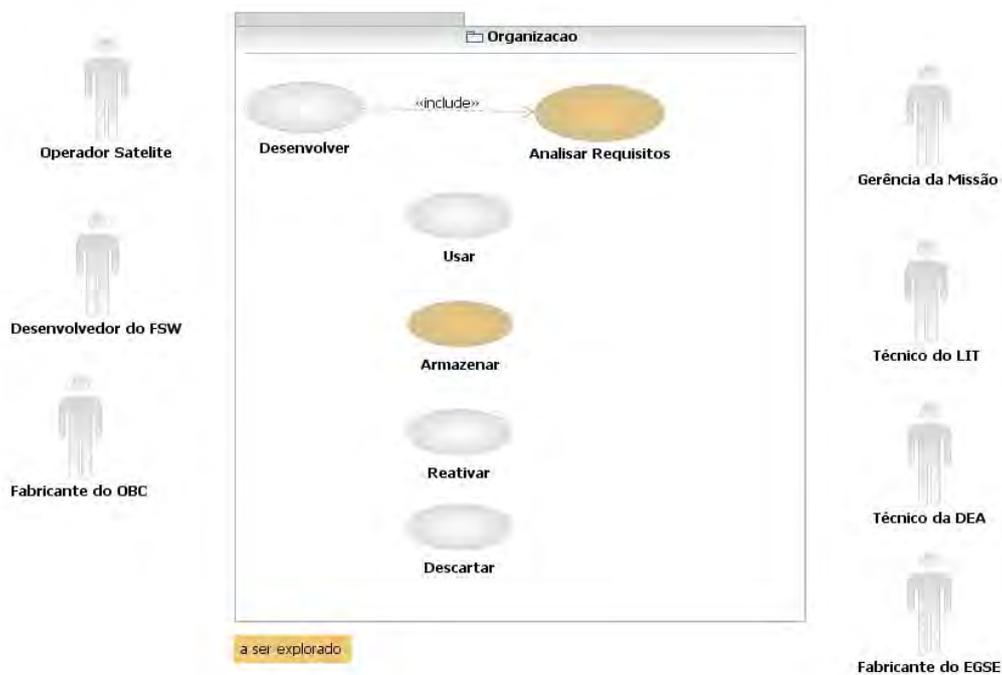


Figura 4.9 - Escopo do Esforço do Desenvolvimento da Organização

Na Tabela 4.2 são listadas as unidades organizacionais que participam do esforço de desenvolvimento, e suas participações no ciclo de vida do produto.

Tabela 4.2 - Unidades Organizacionais

Organização	Participação no ciclo de vida
Gerência do Programa	Órgão financiador e supervisor de todos os processos do ciclo de vida.
Divisão de Eletrônica Aeroespacial (DEA)	Executa o desenvolvimento, testes durante a integração do OBC, operação, armazenagem, reativação e descarte, além de participar, como entidade supervisora, do gerenciamento da fabricação.
Empresa contratada para a fabricação do EGSE	Executa o processo de fabricação.
Empresa contratada para a fabricação do OBC	Participa do processo de teste de aceitação do OBC e da análise de erros.
Laboratório de Integração e Testes (LIT)	Executa o processo de testes durante a integração do OBC junto à DEA.
Centro de Controle de Satélites (CCS)	Pode executar o processo de operação do OBC com o EGSE dentro da malha simulada do satélite, para o treinamento dos operadores.

4.3.4.3. Análise de *stakeholders* e requisitos

Stakeholders incluem quaisquer pessoas ou grupos que tenham interesses ou que tenham alguma necessidade em particular no sistema, eles afetam ou são afetados por um produto durante o seu ciclo de vida.

Requisito é uma declaração que identifica a capacidade, característica ou o fator de qualidade de um sistema de forma a ter valor e utilidade para o usuário ou o cliente (Young, 2004).

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam os interesses dos *stakeholders* para organização e produto, respectivamente.

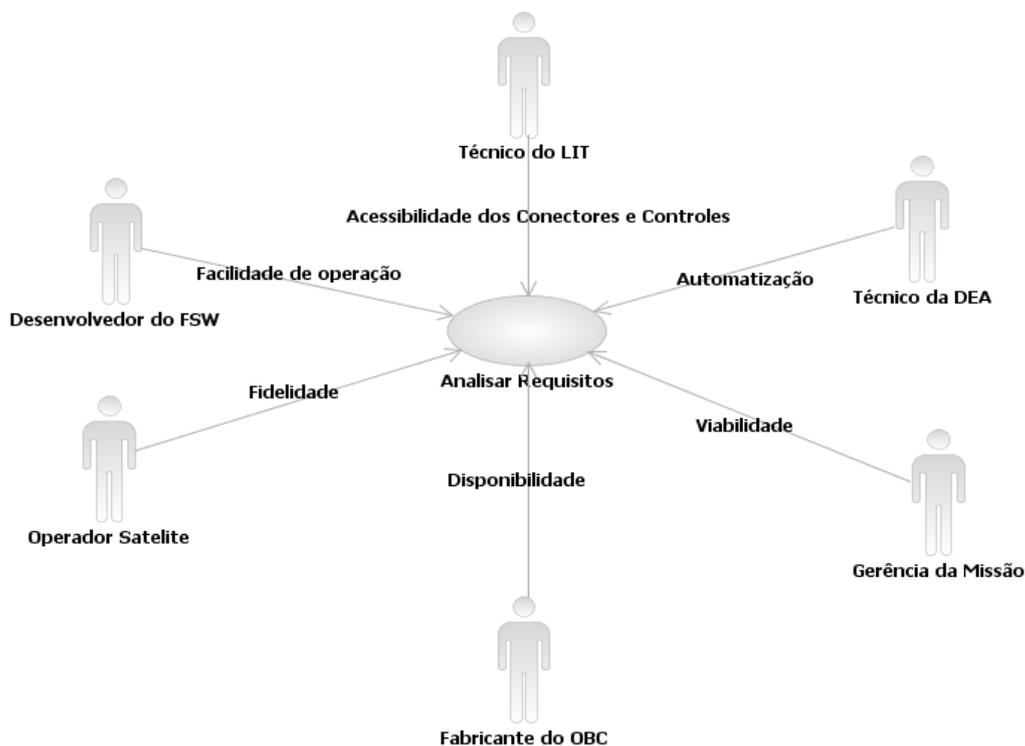


Figura 4.10 - *Stakeholders* e Interesses para o Processo de "Analisar Requisitos" para a organização

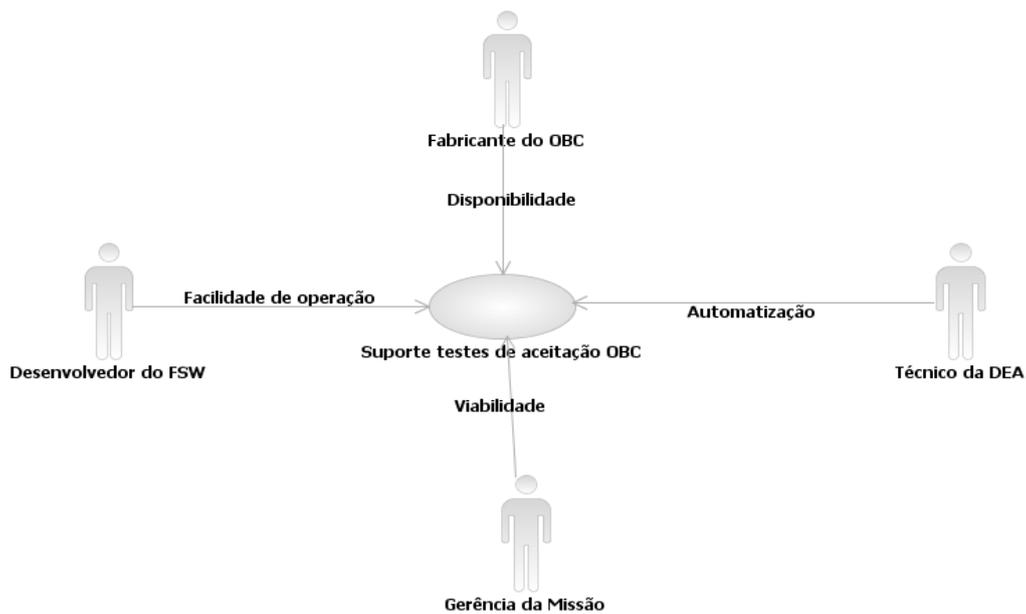


Figura 4.11 - Stakeholders e Interesses para produto

Na Tabela 4.3 são destacadas as “*Measures of Effectiveness*” (MoEs) do sistema. MoEs medem a satisfação dos *stakeholders* como sistema, na qual responde a questão de como será a efetividade ou a eficiência que o sistema deve desempenhar em sua missão. Na Tabela 4.4 são declarados os requisitos de *stakeholders*.

Na Tabela 4.5 os requisitos de sistema estabelecem o que, quão bem e sob que condições o sistema deve cumprir os seus processos do ciclo de vida, satisfazendo os requisitos dos *stakeholders* anteriormente declarados.

O requisito é seguido de seu tipo (se é ‘*Functional*’, ‘*Performance*’ ou ‘*Constraint*’) como será verificado (se por Teste, Análise, Inspeção ou Demonstração) e a quem serão alocados (Produto, Processo ou Organização).

Tabela 4.3 - MoES dos *Stakeholders*

Stakeholder	Interesse	Métricas	Medidas
Operadores do satélite	Fidelidade	Manual de operação	Similaridade com o sistema de operação do satélite
Desenvolvedores do FSW	Facilidade de operação	Esforço para a operação	Tempo para a composição e envio de TCs e acesso a TM
Desenvolvedores do OBC	Disponibilidade	Produto completo	Data de entrega do EGSE
Desenvolvedores do EGSE	Estabilidade dos requisitos	Histórico dos requisitos	Número de modificações nos requisitos
Técnicos da DEA	Automatização	Procedimento de testes	Número de operações por item de teste
Técnicos do LIT	Acessibilidade dos Conectores e Controles	Esforço para a conexão e comando	Tempo para efetuar a conexão e controle
Gerência da missão	Viabilidade	Custo e tempo	Orçamento e cronograma

Tabela 4.4 - Requisitos dos *stakeholders*

Código	Solicitante	Requisito dos <i>stakeholders</i>
EGSE-STK-001	Oper. do Satélite	“Preciso que todas as combinações possíveis de TCs sejam enviadas, e seu resultado averiguado.”
EGSE-STK-002	Desenv. do FSW	“Preciso ter acesso a todas as TMs adquiridas durante as sessões de teste, para posterior análise.”
EGSE-STK-003	Desenv. do FSW	“Quero operar o OBC através deste equipamento para testar o FSW.”
EGSE-STK-004	Desenv. do FSW	“Preciso usar o EGSE para testar novas versões do SW antes de enviá-las ao satélite.”
EGSE-STK-005	Desenv. do FSW	“Preciso de uma interface Windows amigável que me permita operar o OBC através do EGSE (enviar TCs e receber TM).”
EGSE-STK-006	Desenv. do OBC	“Preciso que o EGSE esteja pronto antes do OBC.”
EGSE-STK-007	Desenv. do OBC	“O EGSE deverá fornecer energia para o OBC durante os testes.”

Tabela 4.5 - Requisitos de sistema

Código	Descrição do Requisito	Interesse	Tipo	PPO	Verif
EGSE-SIS-004	O sistema deve receber telecomandos para o OBC em uma interface gráfica, Windows, quando o OBC estiver conectado e operando em um de seus modos, o tempo máximo para receber um telecomando é 2 segundos, conforme descrito no documento XYZ.	Facilidade de operação	C	Prod.	D
EGSE-SIS-005	A organização deve entregar o equipamento antes da data de entrega do OBC, conforme descrito no documento XYZ.	Disponibilidade	C	Org.	I
EGSE-SIS-010	O EGSE deve prover conectores visíveis e que evitem conexões equivocadas, só pode permitir alterações em seus conectores quando o mesmo estiver desligado, o tempo máximo para a conexão do EGSE ao OBC é de no máximo 30 minutos.	Acessibilidade	C	Prod.	I

4.3.4.4. Análise funcional

Figuras 4.12 a 4.16 demonstram a decomposição dos processos através da análise funcional, utilizando análise estruturada, cujo objetivo é identificar o sistema, ambiente, as interfaces lógicas externas e internas, e as funções, analisando os modos de falhas para as funções, exemplo Tabela 4.6, para demonstrar o que o sistema deve fazer.

A Tabela 4.7 constitui a lista de eventos. Uma lista de eventos possui duas colunas, estímulo e resposta. Estímulo é o que um elemento do ambiente faz. Resposta é o que um elemento do sistema faz. As respostas representam assim algumas funções do sistema. A partir dessas funções inicialmente identificadas, outras funções são derivadas.

Os diagramas passaporte ressaltam as interfaces lógicas externas do sistema. Essas interfaces são representadas pelos fluxos entre o sistema e o ambiente. A cada um desses fluxos podem ser associadas funções. A não realização ou a realização parcial ou a realização com desempenho abaixo do esperado dessas funções, constituem-se em falhas que devem ser adicionalmente analisadas, Figura 4.17.

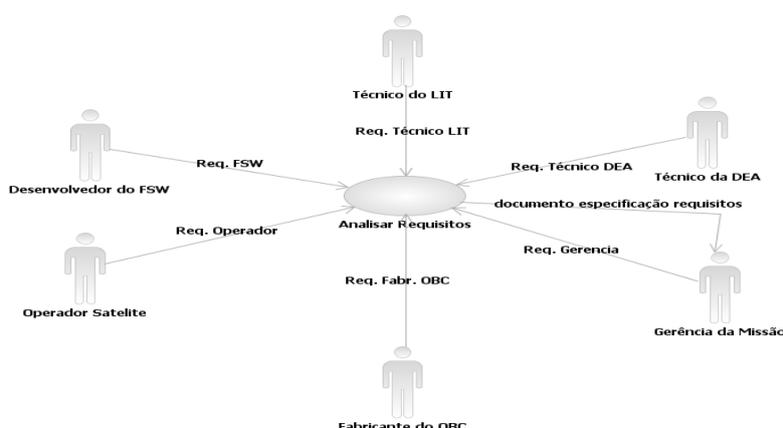


Figura 4.12 - Análise de Contexto

Tabela 4.6 - Lista de eventos

Estímulo	Resposta
Técnico do LIT entrega EGSE	Sistema recebe EGSE
Responsável almoxarifado requisita identificação do EGSE	Sistema gera identificação para o EGSE
Responsável almoxarifado identifica EGSE	Sistema recebe EGSE identificado
Responsável almoxarifado guarda EGSE	Sistema propicia condições ambientais pré-estabelecidas

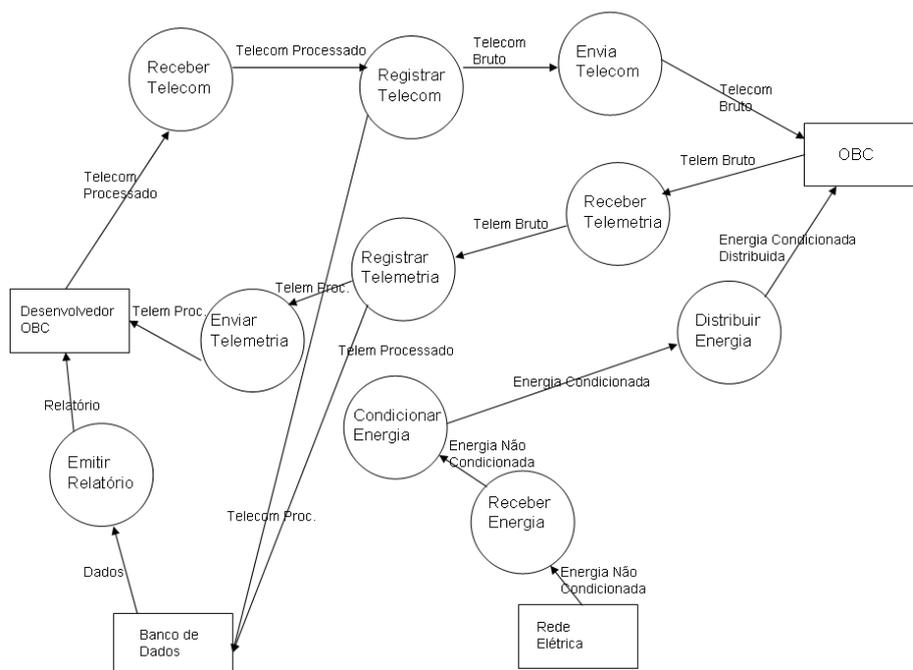


Figura 4.13 - DFD

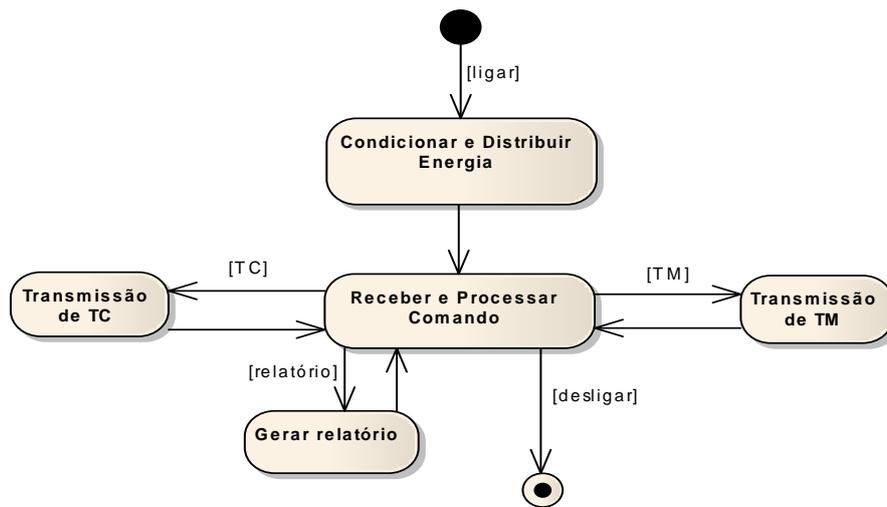


Figura 4.14 - Diagrama de atividades

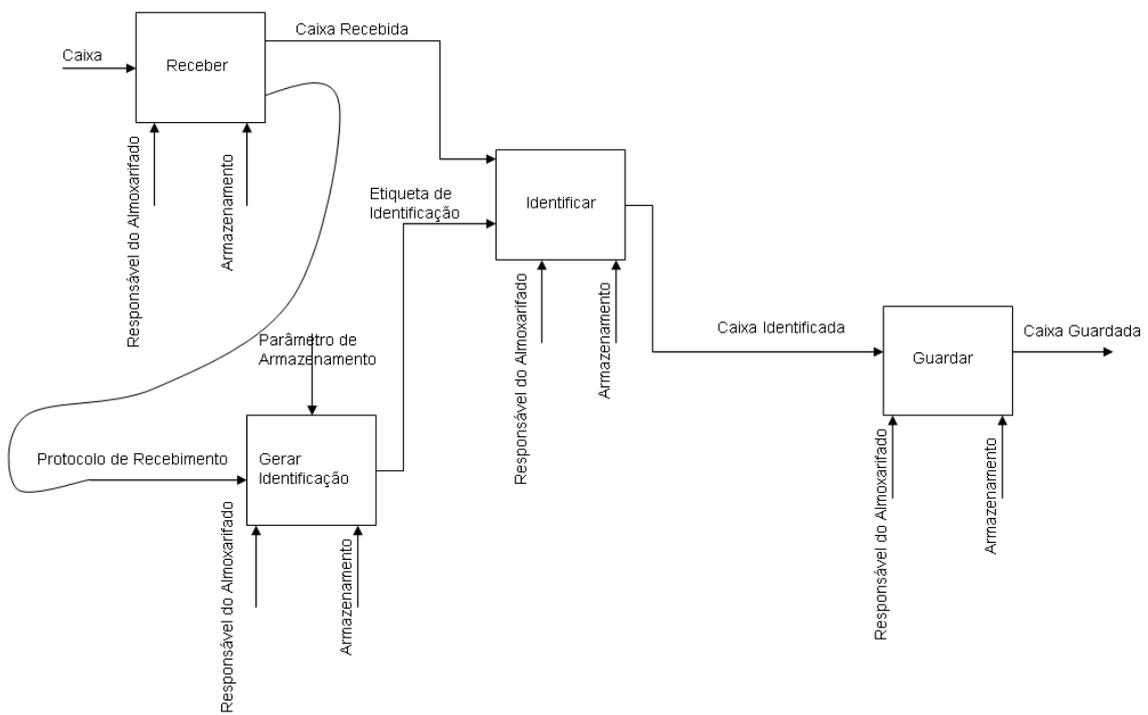


Figura 4.15 - Diagrama IDEF 0



Figura 4.16 - Diagrama de comportamento

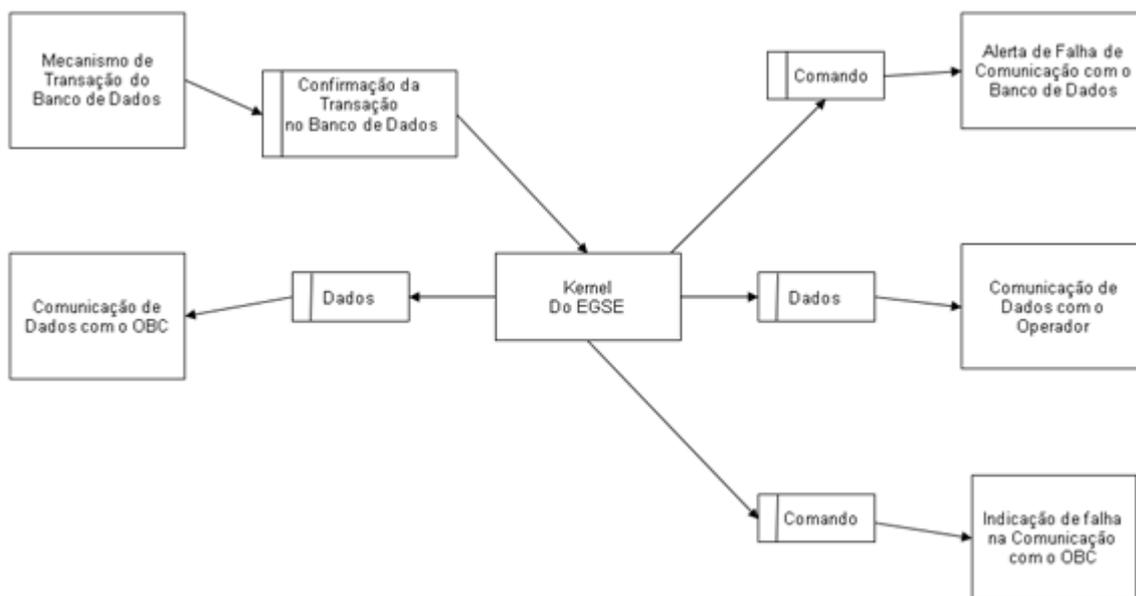


Figura 4.17 - Diagrama passaporte

Tabela 4.7 - FMEA

Circunstância	Tipo	Falha	Perigo	Consequência	Grav.	Causa	Deteção	Prob.	Risco	Funções	Verificação
Pico Rede Elétrica	Circunstancia	Sobretensão Equipamento	Queimar OBC	Perder OBC	5	Pico Rede Elétrica	4	3	15	Estabilização / Prevenção	Inspeção
Comunicação de Dados com o OBC	Passaporte	Ausência de comunicação entre o OBC e EGSE	Perda do Teste	Registro Teste Inconsistente	1	Rompimento dos cabos, queima de conectores, falta de conexão.	5	1	5	Sinalização de conexão ok (leds)	Demonstração
Registrar Telecomando	Não-funcao	Não Registrar Completamente	Falta Informação	Registro Teste Inconsistente	3	Indisponibilidade do BD	3	2	6	Mecanismo de Transação / Proteção	Teste

4.3.4.5. Análise de Arquitetura

Após a análise funcional, a análise da arquitetura tem o objetivo de identificar as interfaces físicas externas por onde fluem o fluxo de energia, material e informação (Figura 4.18), entre os elementos do ambiente e o sistema (Figuras 4.19 e 4.20), os elementos da implementação, e identificar as interfaces físicas internas (Figura 4.21). Esses elementos físicos identificados têm funções alocadas a eles, através da matriz de alocação (Figura 4.22).

É o momento no qual a função toma forma, levando em conta as interfaces e as restrições físicas do projeto.

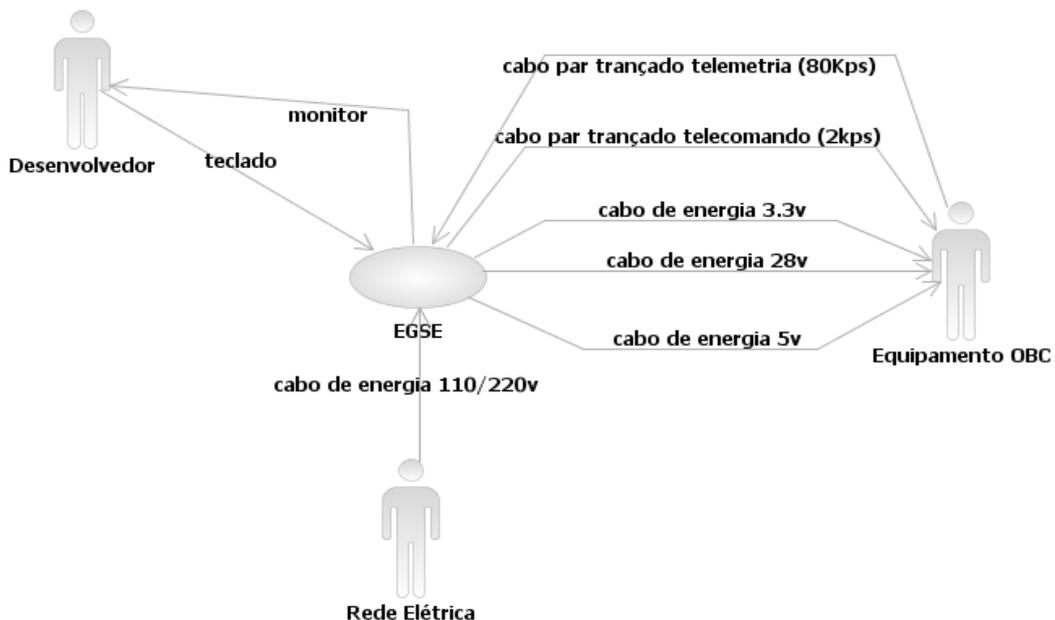


Figura 4.18 - Análise de contexto físico para produto

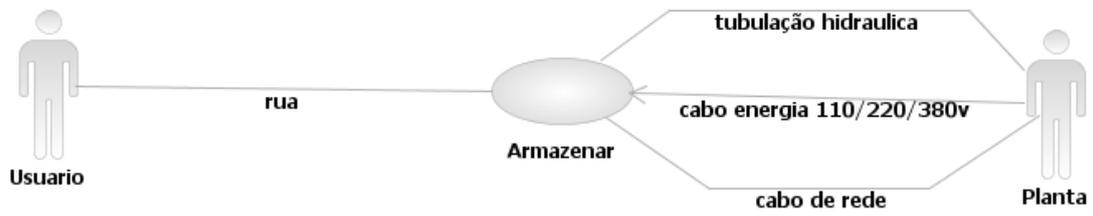


Figura 4.19 - Análise de contexto físico para organização

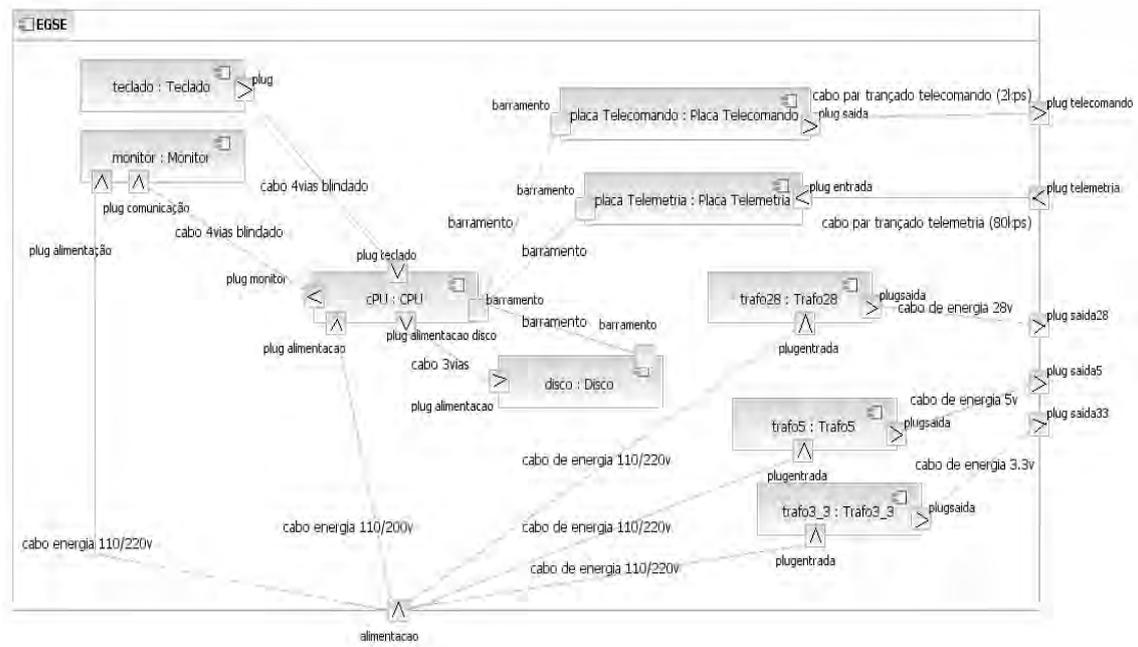


Figura 4.20 - Análise da arquitetura interna de produto

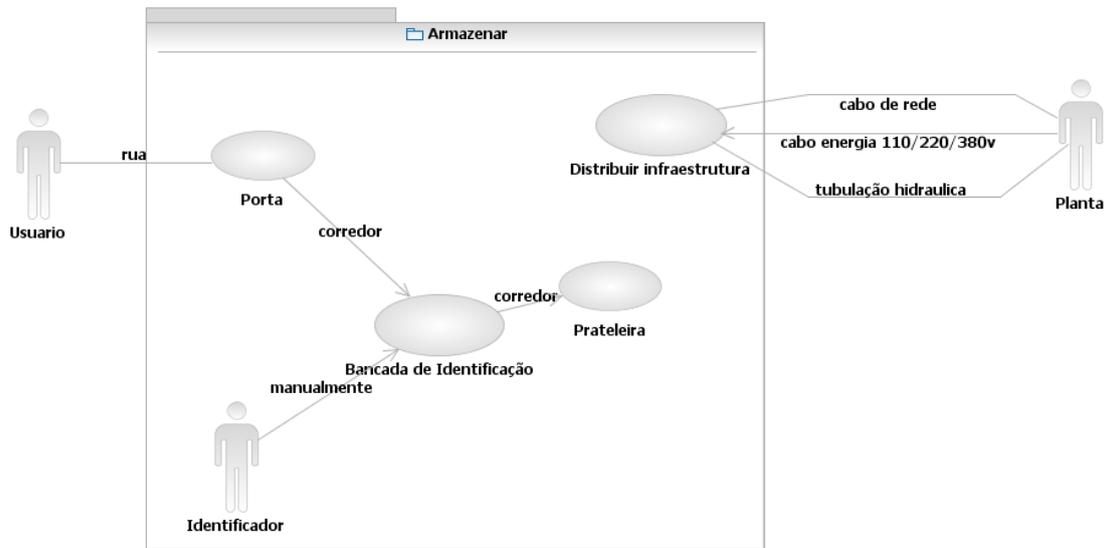


Figura 4.21 - Análise da arquitetura interna da organização

		Subsistemas								
		Monitor	Teclado	Disco	CPU	Placa Telemetria	Placa Telecomando	Trafo 28	Trafo 5	Trafo 3.3
Funções	Prover Recebimento de Telecomando	■					■			
	Registrar Telecomando			■	■					
	Prover envio de Telecomando		■				■			
	Prover envio de Telemetria		■			■				
	Registrar Telemetria			■	■					
	Prover recebimento de Telemetria	■				■				
	Prover Relatorio	■		■	■					
	Receber Energia	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Prover Energia Condicionada							■	■	■
	Distribuir Energia Condicionada							■	■	■

Figura 4.22 - Matriz de alocação funcional de subsistemas

5 APLICAÇÃO DO MÉTODO

Com o crescimento da demanda de satélites conforme Figura 1.4, somado ao fato de o INPE ampliar sua área edificada em 10.000 m² até o ano de 2017 com a construção dos Prédios CCST, NOVO SATÉLITE, CEA II e CTE II, a disponibilidade de energia elétrica do INPE se tornou um fator crítico para a organização e o desenvolvimento de suas aplicações, integrações e testes de produtos espaciais.

A energia elétrica é matéria prima essencial para o desenvolvimento das atividades do INPE, e, para tanto, esse possui uma complexa rede interna de distribuição de energia que alimenta os diversos prédios da instituição. Para melhor quantificar o tamanho dessa infraestrutura, é possível citar o consumo energético das unidades do INPE, o conjunto de suas instalações espalhadas por todo território nacional tem um consumo médio mensal de energia elétrica aproximado de 2.000.000 kWh, equivalente ao de um município com aproximadamente 36 mil habitantes, valores expressivos no mercado de energia elétrica.

O sistema de distribuição de energia conta com uma subestação principal, que recebe tensão na classe 13.800 volts e distribui através de 11 subestações “abaixadoras” para as tensões de 440V, 220V e 127V, localizadas estrategicamente próximas aos grandes consumidores.

A unidade do INPE em São José dos Campos até o ano de 2010, contava com uma subestação de entrada de média tensão antiga, que após mais de 40 anos de utilização, recebendo ampliações não previstas, instalada em uma edificação aparentemente adaptada, possuía vícios e defeitos de lay-out que comprometiam aspectos operacionais e de segurança. Não atendendo a recente legislação e solicitações da NR-10, norma regulamentadora que trata

especificamente do assunto, não seria capaz de atender a demanda de disponibilidade proposta.

Dotada de equipamentos eletromecânicos de ultrapassada tecnologia, com acionamento manual, sem um sistema supervisor que permite avaliações de defeitos em caso de pane, alvo de constantes verificações da concessionária Bandeirante Energia e consequentes não conformidades, impossibilitada de expansões, ficou definida a necessidade de modernização dos sistemas de energia que suportavam as atividades do INPE.

Tornou-se objetivo prioritário para a administração do instituto, tendo em vista a ocorrência de diversas falhas no fornecimento de energia.

O fornecimento de energia elétrica ao instituto estava baseado em um sistema cujas eventuais falhas, flutuações e limitações, submetiam as divisões e laboratórios a custos com a perda de dados brutos, queima de equipamentos, queima de discos com sistemas críticos, corrupção de dados, entre outras anomalias.

São reconhecidamente frequentes as quedas de energia que ocorrem na área do INPE de São José dos Campos, sobretudo no período de chuvas e a infraestrutura da subestação antiga não era capaz de alcançar os níveis de disponibilidade requeridos (maiores que 99,9%), para o adequado atendimento aos sistemas críticos que operam no INPE e as aplicações às quais estão associados.

Como por exemplo, pode-se destacar que os sistemas de armazenamento de dados em bibliotecas de fitas robotizadas são essencialmente críticos e sensíveis e necessitam comprovadamente de uma infraestrutura de energia confiável e de alta disponibilidade. Uma vez instalados, não devem mais ser desligados a não ser em manutenções cuidadosamente programadas e não podem ser movidos do local. Os custos de realinhamento dos sistemas devido à realocação são proibitivos.

A mesma qualidade de energia é exigida pelos sistemas de recepção e ingestão de dados de satélites, para que se minimize a ocorrência de perdas desses dados por quedas de energia. Tais perdas são irreversíveis e não raro afetam de forma significativa o potencial ou a capacidade das divisões de possuírem seus acervos consistentes, com o mínimo de "gaps" nas séries de dados. Sabe-se serem inevitáveis os prejuízos que tais "gaps" podem causar no andamento, no valor, ou nos resultados de projetos envolvendo análises de séries históricas de dados/imagens. Além disso, especial menção deve ser feita para os casos de vigilância ambiental e monitoramento e previsão do tempo à curto prazo, onde justamente nas épocas de eventos meteorológicos mais severos (quando são muito mais altas as probabilidades de falhas da energia) é fundamental a ininterrupta e sequencial disponibilização de dados e imagens.

A perda de dados ou falha e/ou interrupção do processamento nessas ocasiões podem levar ao colapso todo um conjunto de esforços orientados para a mitigação e melhor compreensão dos ditos eventos.

5.1. Aspectos de segurança

Outro fator a ser considerado para a disponibilidade de organização é a segurança operacional das instalações, uma vez que dada a falha, atividades de manutenibilidade sejam requeridas é necessário que essas devam ser executadas no menor tempo possível e com segurança para a equipe de manutenção.

Considerado o disposto na norma regulamentadora 10 (NR-10) do Ministério do Trabalho e Emprego, que trata da Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, em seu item 10.1 estabelece os seus objetivos e campos de aplicação que serão aqui descritos.

O item 10.1.1 estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade.

O item 10.1.2 descreve que a NR-10 se aplica às fases de geração, transmissão, distribuição e consumo, incluindo as etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades, observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos órgãos competentes e, na ausência ou omissão destas, as normas internacionais cabíveis.

O item 10.2.8 Medidas de Proteção Coletiva possui a seguinte redação em seus subitens:

- 10.2.8.1 Em todos os serviços executados em instalações elétricas devem ser previstas e adotadas, prioritariamente, medidas de proteção coletiva aplicáveis, mediante procedimentos, às atividades a serem desenvolvidas, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores.
- 10.2.8.2 As medidas de proteção coletiva compreendem, prioritariamente, a desenergização elétrica conforme estabelece esta NR e, na sua impossibilidade, o emprego de tensão de segurança.
- 10.2.8.2.1 Na impossibilidade de implementação do estabelecido no subitem 10.2.8.2., devem ser utilizadas outras medidas de proteção coletiva, tais como: isolamento das partes vivas, obstáculos, barreiras, sinalização, sistema de seccionamento automático de alimentação, bloqueio do religamento automático.

A subestação antiga do INPE atendia com as devidas limitações impostas por seu tempo de atividade, aos itens descritos acima, não contemplando em sua

totalidade os requisitos técnicos e de segurança exigidos pela NR-10 e pelas normas técnicas vigentes tais como a ABNT NBR 14039 - Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV.

As Figuras 5.1 a 5.3 mostram as características físicas da subestação antiga do INPE.



Figura 5.1 - Cubículo de entrada de energia da subestação antiga



Figura 5.2 - Relés de proteção da subestação antiga



Figura 5.3 - Cubículos das seccionadoras da subestação antiga

Assim, ações para o atendimento da demanda de disponibilidade de energia do INPE ficaram comprovadas.

A responsabilidade de desenvolver o projeto elétrico para uma nova subestação de energia para o INPE ficou a cargo deste autor que está lotado no Serviço de Engenharia e Manutenção (SEM) do INPE.

5.2. Ciclo de disponibilidade Fase 1 - Avaliação da disponibilidade da subestação antiga

Conforme metodologia proposta, inicialmente será calculada a disponibilidade da subestação antiga, para a verificação do atendimento da disponibilidade requerida pela organização.

5.2.1. Diagrama unifilar da subestação antiga

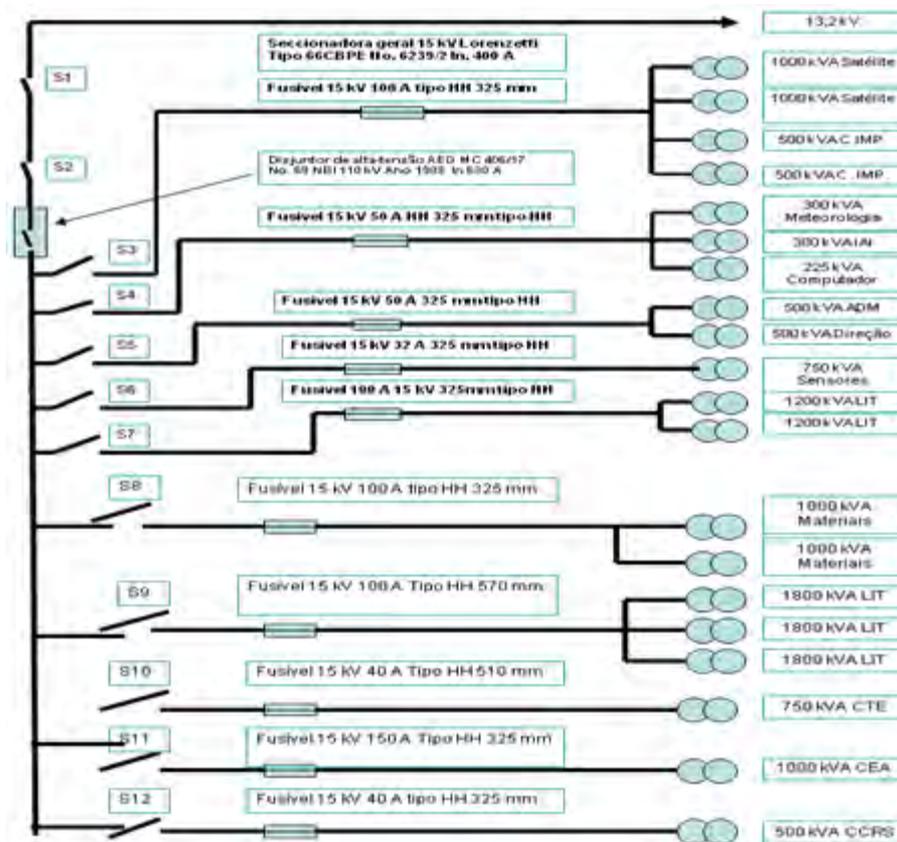


Figura 5.4 - Diagrama unifilar da subestação antiga

Através do diagrama unifilar foi concebido o diagrama de blocos de confiabilidade da subestação antiga para a simulação.

5.2.2. Diagrama de blocos de confiabilidade da subestação antiga

Conforme mencionado anteriormente a configuração de blocos de confiabilidade não representa necessariamente a configuração física de um sistema.

Para a subestação antiga, apesar de cada seccionadora de alimentação dos prédios estar configurada fisicamente em paralelo, sob o ponto de vista da confiabilidade o sistema está configurado em série. Tal configuração pode ser explicada devido ao fato de um simples problema em um fusível de média tensão em qualquer um dos cubículos que a compõem, interromper todo o sistema, uma vez que por questão de segurança das equipes de manutenção é necessário o desligamento total da subestação.

A Figura 5.5 mostra os riscos às equipes de manutenção, caso ocorra qualquer tipo de falha em determinado cubículo.



Figura 5.5 - Cubículo das seccionadoras da subestação antiga

Devido à falta de dados de falhas para a subestação antiga, foram adotados valores para as taxas de falhas obtidos na norma IEEE-493 e no estudo de Graziano (2006).

Para as distribuições de confiabilidade foi adotada a distribuição exponencial, devido as suas taxas de falhas constantes e modelagem de sistemas complexos não redundantes, permitindo assim a modelagem da maior parte dos sistemas encontrados na indústria.

Para a determinação dos tempos de manutenção foram adotados tempos de manutenção de acordo com complexidade da tarefa, estoque de sobressalentes e dificuldade de se encontrar peças de reposição para equipamentos obsoletos de idade avançada, bem como o tempo médio no estado de reparo obtidos através da norma IEEE-493.

A distribuição de escolha foi a lognormal capaz de modelar adequadamente o tempo médio para a manutenção de componentes.

Assim, o diagrama de blocos de confiabilidade da subestação antiga é mostrado na Figura 5.6.

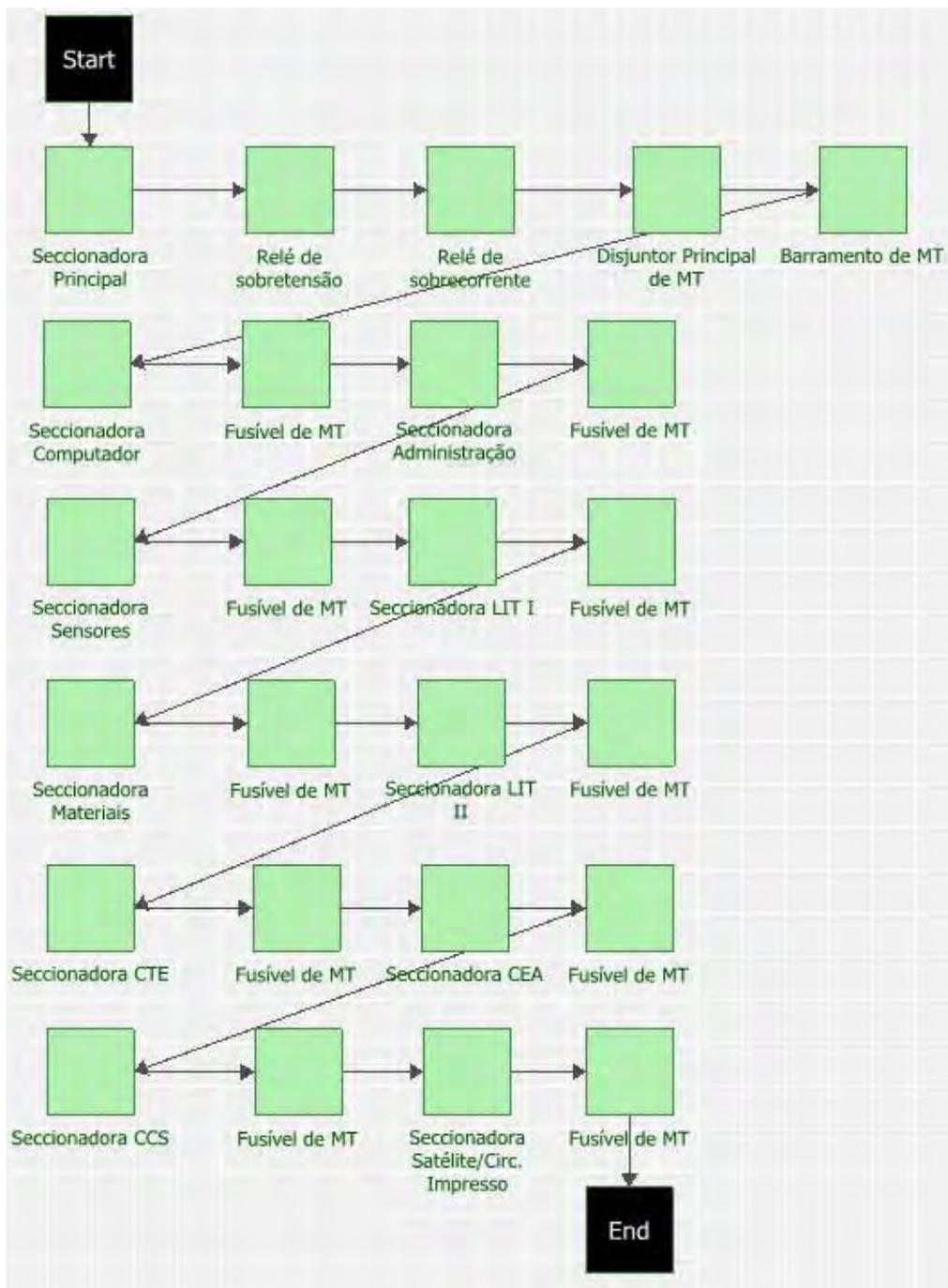


Figura 5.6 - Diagrama de blocos de confiabilidade da subestação antiga

Após a elaboração dos diagramas foi realizada a simulação para um horizonte de 5 anos com o objetivo de avaliar a disponibilidade da subestação antiga do

INPE e verificar seu atendimento a necessidade de disponibilidade que viria a ser imposta pela organização.

As simulações dos blocos de confiabilidade resultaram em uma disponibilidade média de 99,2899%.

A Tabela 5.1 contem os dados completos obtidos durante a simulação:

Tabela 5.1 - Resultados para a subestação antiga

Visão Geral do Sistema	
Geral	
Disponibilidade Média:	0,992899
Disponibilidade Pontual em 43800:	0,989
Quantidade Esperada de Falhas:	35,576
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	5,963202
TMAPF (h):	1263,62111
Tempo Disponível/Indisponível do Sistema	
Tempo Disponível (h):	43488,9861
Tempo Indisponível Total (h):	311,013892
Eventos com Parada do Sistema	
Número de Falhas:	35,576
Total de Eventos:	35,576

Pelos dados obtidos verificou-se que a subestação antiga não seria capaz de atender a demanda de disponibilidade requisitada pelo INPE para o desenvolvimento de suas atividades.

Tais informações podem ser visualizadas graficamente nas Figuras 5.7 a 5.12.

A Figura 5.7 mostra o gráfico da disponibilidade pontual da subestação antiga.

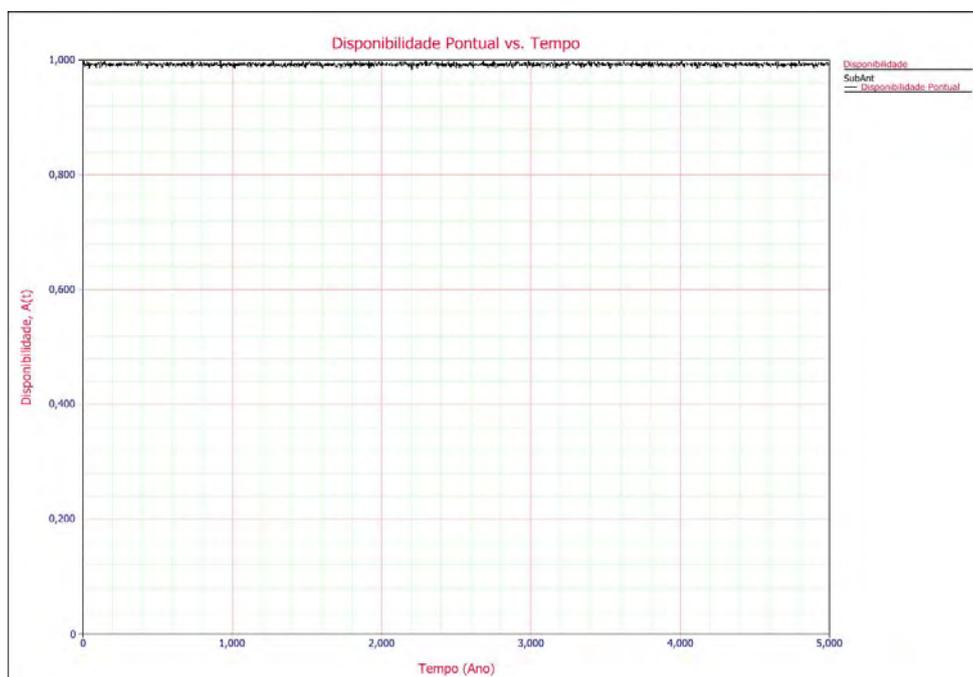


Figura 5.7 - Disponibilidade pontual da subestação antiga

A Figura 5.8 mostra o gráfico da disponibilidade média da subestação antiga.

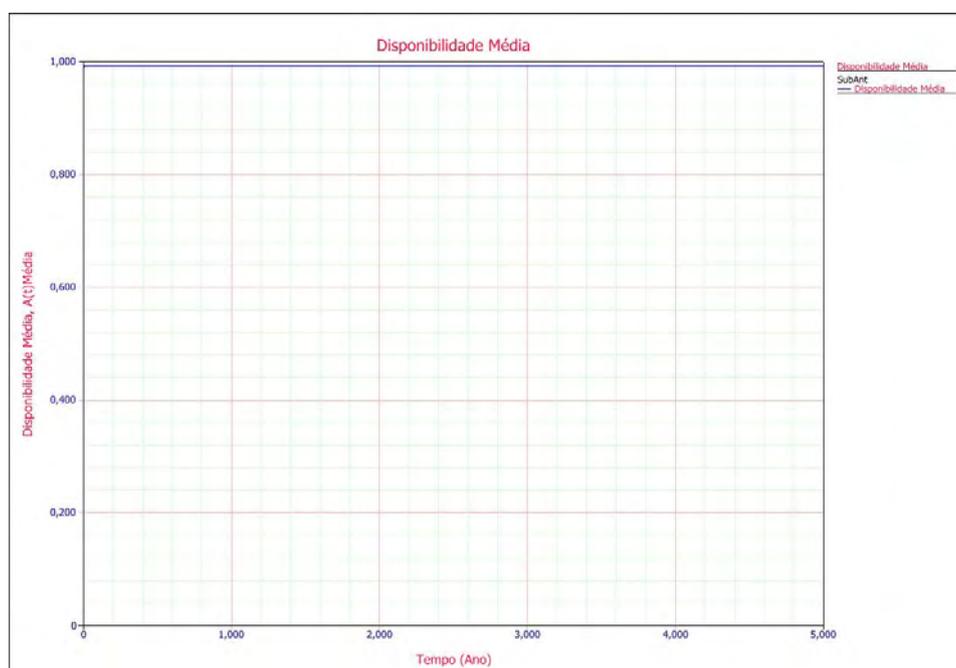


Figura 5.8 - Disponibilidade média da subestação antiga

A Figura 5.9 apresenta os tempos de disponibilidade e indisponibilidade da subestação antiga no horizonte de simulação.

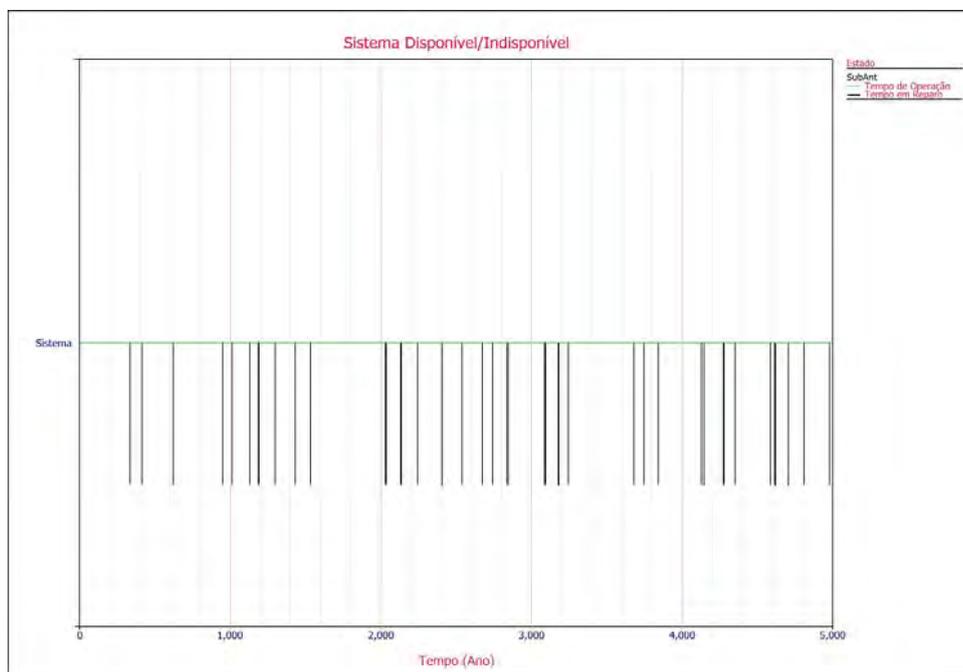


Figura 5.9 - Tempos de disponibilidade e indisponibilidade da subestação antiga

A Figura 5.10 apresenta o número esperado de falhas no sistema.

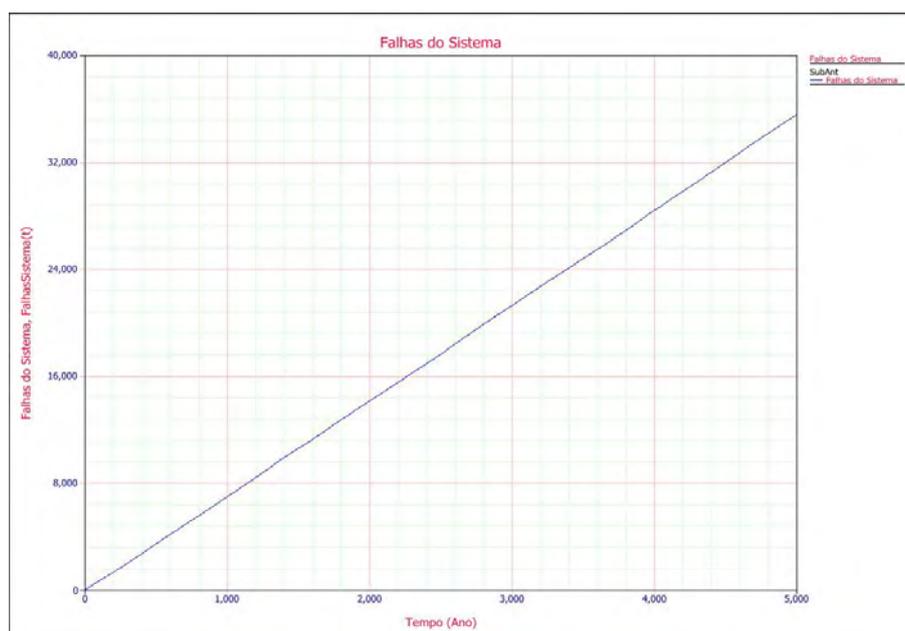


Figura 5.10 - Número de falhas subestação antiga

A Figura 5.11 apresenta a probabilidade de falhas para os blocos de confiabilidade que compõe o sistema da subestação antiga.



Figura 5.11 - Probabilidade de falhas dos blocos da subestação antiga

A Figura 5.12 apresenta as falhas esperadas pelos blocos de confiabilidade de acordo com as taxas de falhas obtidas. Este resultado tem importância significativa na análise, uma vez que fornece o bloco do sistema sujeito ao maior número de falhas, permitindo assim ações que mitiguem o tempo de indisponibilidade do sistema em sua eventual falha.

5.4. Abordagem de engenharia simultânea de sistemas

Serão descritos neste subitem os processos de engenharia simultânea de sistemas utilizados para a elaboração do projeto da nova subestação de energia para o INPE, serão descritas cada uma das fases do ciclo de vida da subestação nova e em qual de suas fases são necessárias intervenções para garantir o atendimento da demanda de disponibilidade proposta.

5.4.1. Processos do Ciclo de Vida

O INPE como organização participará das etapas do processo de ciclo de vida mostradas na Figura 5.13.

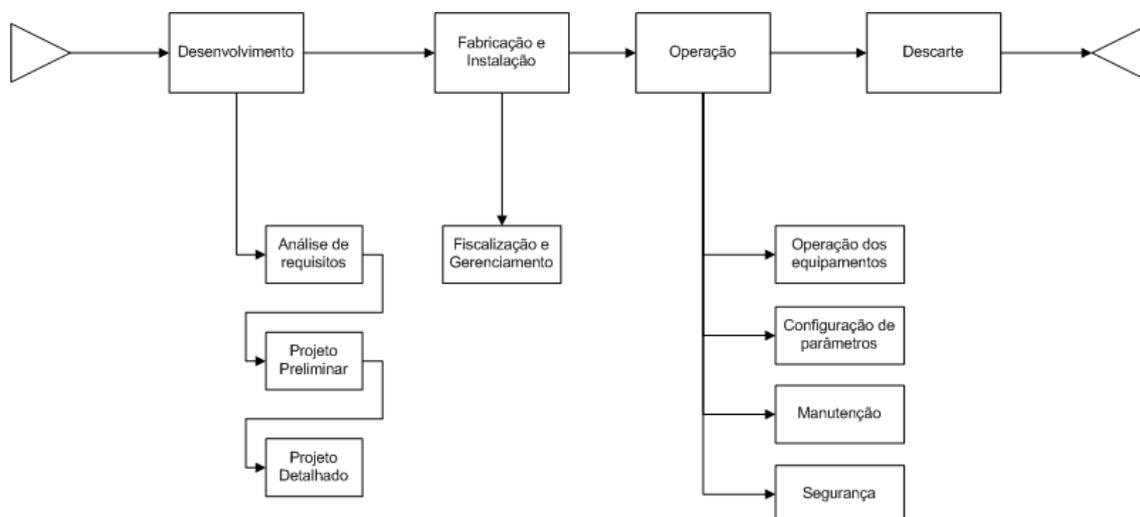


Figura 5.13 - Processos do ciclo de vida

5.4.2. Escopo do esforço de desenvolvimento

Na Figura 5.14 são apresentados os processos que serão analisados na organização de desenvolvimento, e os *stakeholders* que interagem com a organização durante o ciclo de vida do produto.

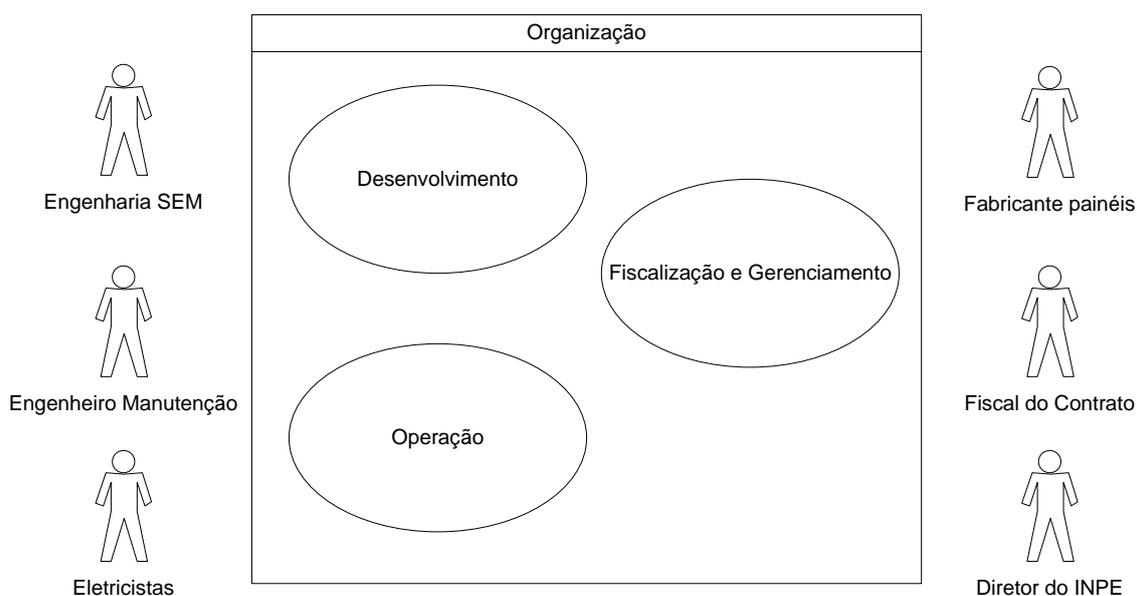


Figura 5.14 - Escopo do esforço de desenvolvimento da organização

Na Tabela 5.2 são listadas as unidades organizacionais que participam do esforço de desenvolvimento, e suas participações no ciclo de vida do produto.

Tabela 5.2 - Unidades Organizacionais

Organização	Participação no ciclo de vida
Engenharia SEM	Executa o desenvolvimento do projeto preliminar, projeto detalhado, fiscalização e gerenciamento do contrato e fiscalização e gerenciamento da operação.
Engenheiro de Manutenção	Gerencia a equipe de manutenção, a operação e a manutenibilidade da subestação.
Eletricistas	Executa a operação e a manutenibilidade da subestação.
Fabricante dos painéis	Executa a fabricação dos painéis e participa do processo montagem, instalação e testes de aceitação da subestação. Além do treinamento de operação
Fiscal do contrato	Executa a fiscalização e o gerenciamento do contrato.
Diretor do INPE	Responsável pelo contrato bem como pelas questões legais envolvidas no processo licitatório da subestação.

5.4.3. Análise de *stakeholders* e requisitos

A seguir são apresentados nas Figuras 5.15 a 5.17 alguns dos *stakeholders* e seus requisitos para o escopo de desenvolvimento da organização.

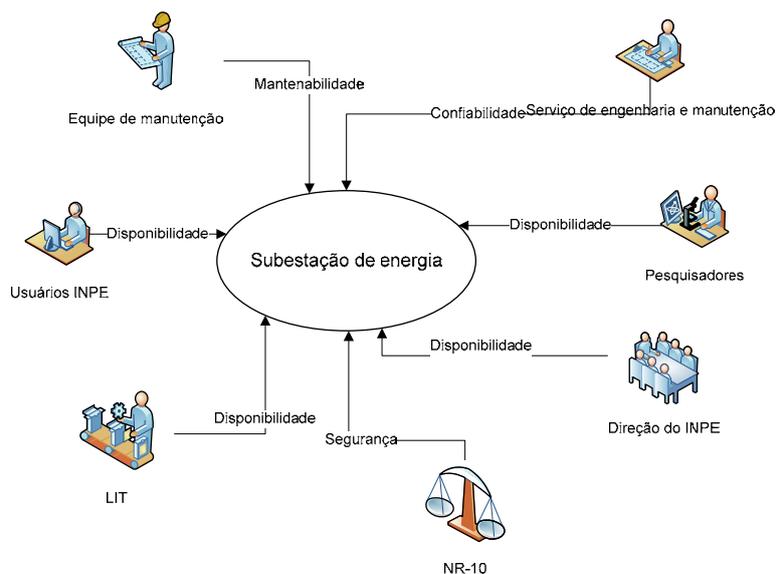


Figura 5.15 - *Stakeholders* e interesses para a subestação de energia

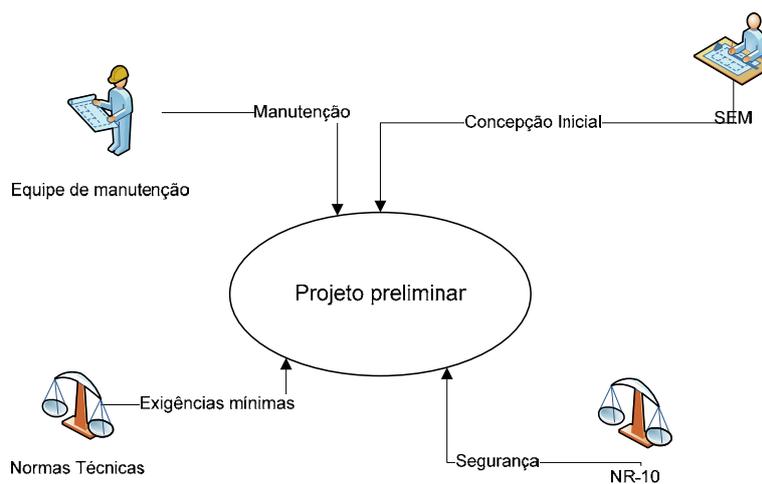


Figura 5.16 - *Stakeholders* e interesses para projeto preliminar da subestação

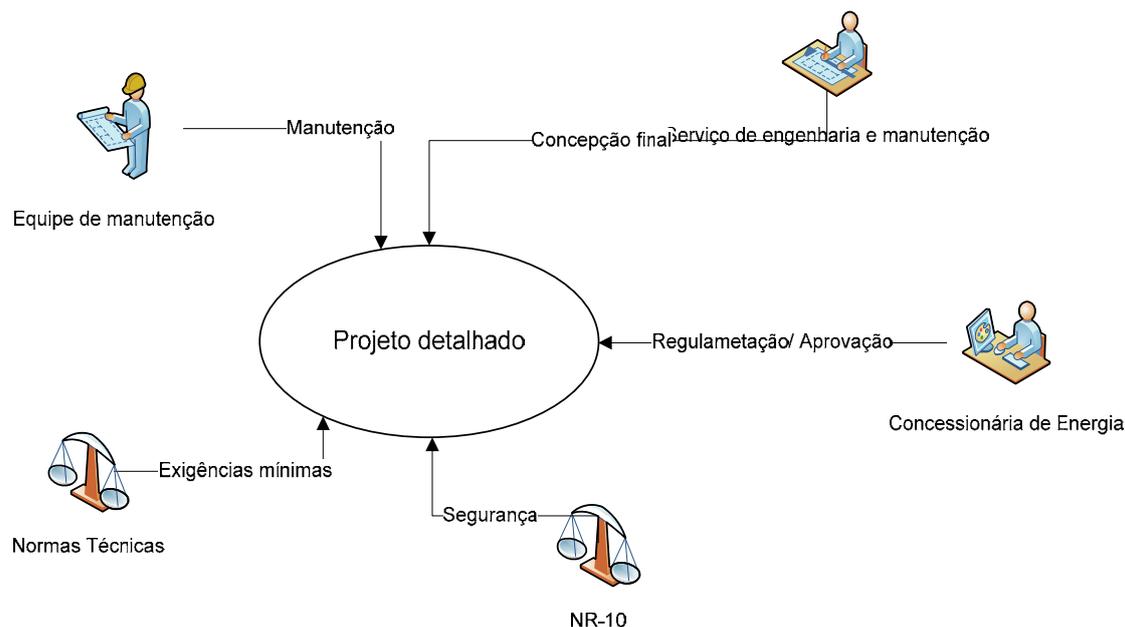


Figura 5.17 - Stakeholders e interesses para projeto detalhado da subestação

Na Tabela 5.3 são destacadas as “*Measures of Effectiveness*” (MoEs) do sistema. Na Tabela 5.4 são declarados os requisitos de *stakeholders*.

Na Tabela 5.5 os requisitos de sistema estabelecem o que, quão bem e sob que condições o sistema deve cumprir os seus processos do ciclo de vida, satisfazendo os requisitos dos *stakeholders* anteriormente declarados.

O requisito é seguido de seu tipo (se é ‘*Functional*’, ‘*Performance*’ ou ‘*Constraint*’) como será verificado (se por Teste, Análise, Inspeção ou Demonstração) e a quem serão alocados (Produto, Processo ou Organização).

Tabela 5.3 - MoES dos *Stakeholders* para Projeto detalhado

Stakeholder	Interesse	Métricas	Medidas
Serviço de Engenharia e Manutenção	Concepção Final	Projeto Executivo completo	Contratação do processo licitatório
Equipe de Manutenção	Manutenção	Esforço para a operação	Tempo para a operação e manutenção
Concessionária de Energia	Regulamentação/Aprovação	Subestação aprovada	Inspeção na subestação
Normas Técnicas	Exigências mínimas	Atendimento dos requisitos	Número de requisitos atendidos
NR-10	Segurança	Procedimento de testes	Segurança nas operações da subestação

Tabela 5.4 - Requisitos dos stakeholders para Projeto detalhado

Código	Solicitante	Requisito do stakeholder
SUB-STK-001	Serviço de Engenharia e Manutenção	“Preciso de uma subestação que atenda as demandas de disponibilidade.”
SUB-STK-002	Equipe de Manutenção	“Preciso de uma subestação na qual a manutenção ocorra rapidamente e sem riscos aos operadores.”
SUB-STK-003	Concessionária de Energia	“Para a aprovação de sua subestação serão necessários à apresentação dos seguintes documentos.”
SUB-STK-004	Normas Técnicas	“Esta Norma estabelece um sistema para o projeto e execução de instalações elétricas de média tensão, com tensão nominal de 1,0 kV a 36,2 kV, à frequência industrial, de modo a garantir segurança e continuidade de serviço.”
SUB-STK-005	NR-10	“Esta Norma Regulamentadora – NR estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade.”

Tabela 5.5 - Requisitos de sistema

Código	Descrição do Requisito	Interesse	Tipo	PPO	Verif
EGSE-SIS-001	O sistema deve estar operante em 99,9% do tempo disponível	Disponibilidade	C	Prod.	T
EGSE-SIS-002	O sistema deve ter a capacidade de intercambiar equipamentos entre os diversos cubículos.	Mantenabilidade	P	Prod.	D
EGSE-SIS-003	A equipe de manutenção deve substituir os disjuntores de média tensão em um tempo inferior a 5 minutos.	Disponibilidade	C	Org.	D

5.4.4. Análise funcional

Figuras 5.18 a 5.23 apresentam a decomposição dos processos através da análise funcional. A tabela 5.6 constitui a lista de eventos de algumas funções do sistema.

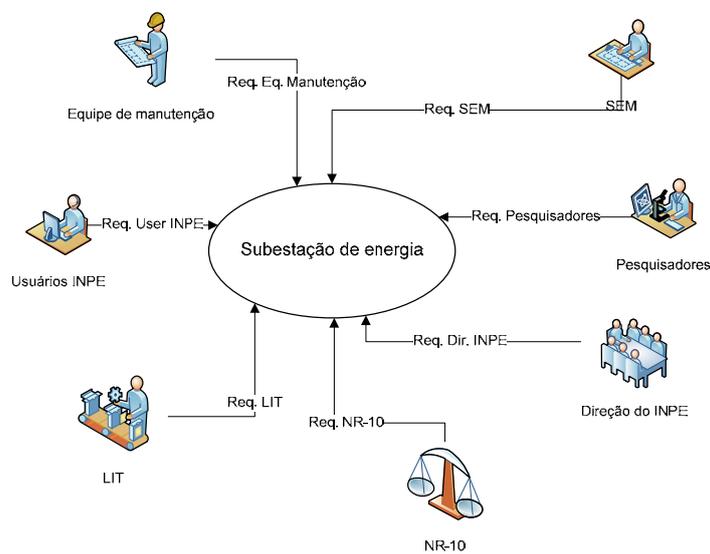


Figura 5.18 - Análise de contexto

Tabela 5.6 - Lista de eventos

Estímulo	Resposta
Técnico da manutenção realiza ação de manutenção	Sistema recebe manutenção
Engenharia do INPE configura os parâmetros do sistema	Sistema recebe os parâmetros de configuração
Queda de energia na concessionária	Sistema recebe a queda de energia da concessionária

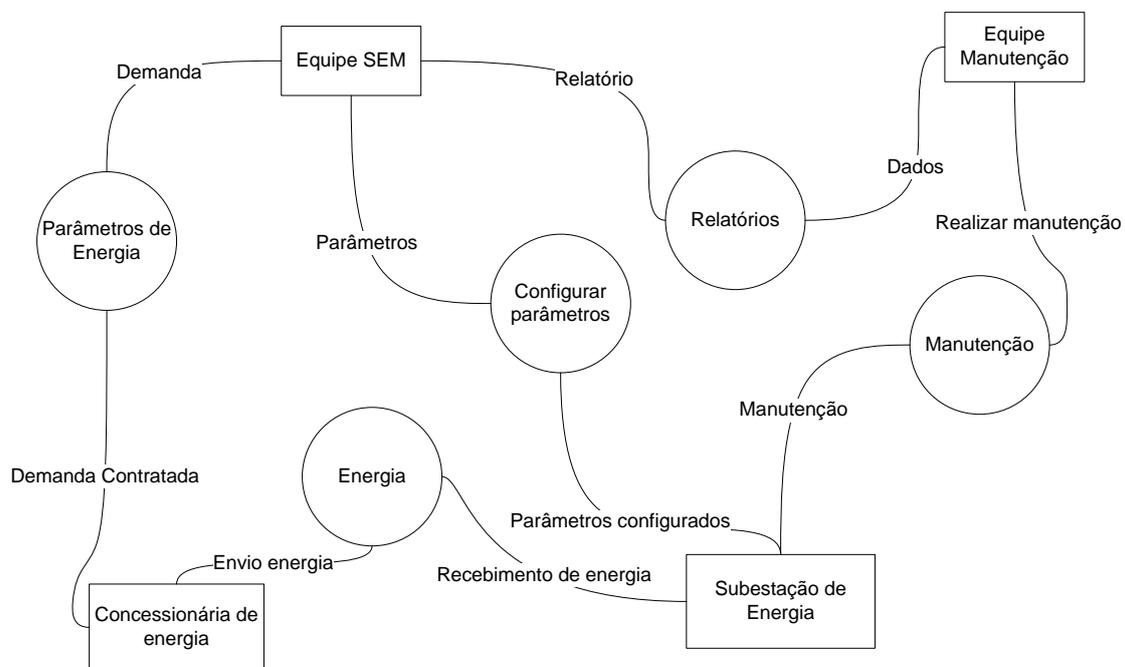


Figura 5.19 - DFD

Tabela 5.7 - FMEA

Componente	Falha Funcional	Modo de Falha	Efeitos
Seccionadora	Curto-circuito ou descontinuidade na chave de contatos auxiliares	Desajuste dos contatos auxiliares ou quebra da haste	Falha na sinalização
	Curto-circuito	Perda de isolamento na porcelana	Danificação do sistema
	Fuga de corrente no neutro	Aterramento deficiente	Choque Elétrico
	Arco elétrico	Desajuste dos contatos primários	Desgaste da chave por arco elétrico
Disjuntor	Curto-circuito	Falha interna	Explosão
	Curto-circuito	Falha interna	Explosão da câmara e coluna
	Curto-circuito ou descontinuidade na chave de contatos auxiliares	Desajuste da chave de contatos auxiliares	Atuação indevida ou recusa da proteção
	Recusa de operação do disjuntor	Desajuste no mecanismo de acionamento	Perda do disjuntor parcial ou total e desligamento da barra
Relé de proteção	Não detecção de falha no sistema	Atuação indevida devido a erro de graduação de ajuste	Desligamentos de cargas superiores àqueles estabelecidos em estudo; Correntes de curtos-circuitos por tempo excessivo ao estabelecido.
	Emissão de ordem de desligamento sem ocorrência de falha no sistema	Defeito no relé de proteção provocado por falhas de graduação ou implantação de ajustes	Desligamento de cargas desnecessário

5.5. Análise de Arquitetura

A análise de arquitetura será feita com a incorporação de componentes e subsistemas que aumentem a disponibilidade da subestação nova.

A arquitetura funcional da subestação nova é apresentada no Apêndice A, através do diagrama trifilar.

O processo de escolha da topologia elétrica para o aumento de disponibilidade partiu do princípio de que seriam necessários elementos que não somente do ponto de vista físico, mas também sob a ótica da confiabilidade estivessem na configuração paralela.

Através da análise da Figura 5.12, é possível observar que a maior probabilidade de falhas para o sistema está alocada no disjuntor principal e no relé de sobretensão, necessitando de medidas de aumento de confiabilidade para esses equipamentos.

Assim, equipamentos com tecnologia moderna de funcionamento foram adotados para a concepção da subestação nova.

5.5.1. Materiais construtivos para a subestação nova

5.5.1.1. Painéis de Média Tensão

As normas técnicas internacionais e brasileiras para equipamentos elétricos prescrevem que os equipamentos devem ser dimensionados e construídos para suportar os esforços mecânicos e térmicos em casos de curto-circuito.

No caso de painel elétrico de média tensão, denominados Conjunto de Manobra e Controle, mais conhecidos na prática como painéis de média tensão, CCM (centro de controle de motores) de média tensão, tanto a norma ABNT - NBR 6979, quanto a IEC 298, prescrevem o tipo de ensaio de arco elétrico criado pelas falhas internas, e que o resultado dos ensaios serão considerado satisfatório quando, nas condições normais de operação do equipamento:

- As portas, tampas etc. não se abrirem.
- Partes ou componentes internos não forem arremessados.
- O arco não provocar perfurações no invólucro.
- Os indicadores verticais colocados externamente não se inflamarem.
- Os indicadores horizontais colocados externamente não se inflamarem.
- Todas as conexões a Terra permanecerem eficazes.

Os materiais e sistemas construtivos que atendem as características técnicas descritas acima são os cubículos “*Metal-Clad*” e os painéis do tipo CCM extraível.

5.5.1.2. Cubículos Metal-Clad

Metal-clad é o termo usado para designar os Conjuntos de Manobra e Controle blindados de distribuição média tensão.

Conjuntos de Manobra e Controle blindados de distribuição média tensão chamados de cubículos devem, quando todas as portas e tampas estiverem

fechadas, dar proteção contra o contato de pessoas em partes energizadas de no mínimo IP 3X. Um equipamento com IP 3X oferece proteção contra objetos sólidos de 2,5 mm de diâmetro protegendo contra o acesso com ferramentas em geral. Adicionalmente eles devem ter proteção contra gotas de água como condensação no teto. A construção do cubículo também deve ser feita de modo a impedir a entrada de animais.

Como a abertura das portas ou tampas dá acesso direto aos circuitos principais que podem estar energizados, deverá existir um sistema de abertura das portas ou tampas que exija ferramentas apropriadas e, dessa forma, evite que possam ser abertas com outros objetos como moedas e similares. Alternativamente, pode-se ter em vez de um sistema de abertura desse gênero, a utilização de intertravamento que impeça a abertura, ao menos que o circuito esteja desligado.

Os disjuntores devem ser do tipo gaveta extraível, distinguindo-se claramente as posições “em serviço”, “em prova” e “fora de serviço”. Seu acionamento deve ser do tipo motor-mola. Cada interruptor deve ter duas bobinas de abertura independentes.

Com os disjuntores sendo do tipo gaveta extraível, partes energizadas do cubículo ficam expostas ao se retirar o equipamento. Assim, para o aumento da segurança, o cubículo deverá ter um sistema, que com a retirada do disjuntor um sistema mecânico tipo guilhotina, cubra os contatos evitando curto-circuito e contatos indesejáveis do operador com partes energizadas. O sistema mecânico também deverá permitir que com a recolocação do disjuntor no cubículo os contatos automaticamente sejam liberados permitindo a conexão. Quando fechadas as guilhotinas deverão oferecer nível de proteção IP 3X e deverão estar devidamente identificadas para evitar enganos.

5.5.1.3. Dados mínimos de projeto

As informações mínimas para um projeto de cubículo são:

- Tensão.
- Corrente.
- Frequência.
- Corrente de curto-circuito presumido (monofásico, trifásico ou com a terra).
- Esquema de aterramento.

A corrente de curto-circuito é um dado muito importante, pois ele vai influenciar nos esforços mecânicos, no aquecimento dos equipamentos e na capacidade disruptiva do disjuntor.

5.5.1.4. Exigências técnicas e aspectos construtivos e operacionais

Os cubículos tipo “*Metal-Clad*” tem as seguintes exigências:

- a) As instalações devem ser montadas no seu lugar com um mínimo de trabalho.
- b) Deve-se evitar o uso de seccionadoras para impedir manobras indevidas.
- c) Os disjuntores devem ser intercambiáveis para permitir revisões periódicas.

- d) Deve haver intertravamentos para um funcionamento seguro de forma a evitar manobras indevidas.
- e) Deve haver comprovação de tensão, poder disruptivo, estado dinâmico e térmico e aquecimento do cubículo.
- f) Deve haver revestimento dos cubículos com chapas para evitar a extensão de um arco para outro cubículo.
- g) Deve haver isolamento das partes de baixa tensão com resina sintética ou por divisões com o objetivo de tornar difícil a ocorrência de curto-circuito interno.
- h) Deve haver um mecanismo de cobertura automática dos contatos da parte fixa do cubículo por dispositivos metálicos aterrados que são acionados com a saída do disjuntor.
- i) Separação das diferentes partes do cubículo de tal forma a ter compartimentos para:
- Cada chave de seccionamento e disjuntor do circuito principal.
 - Os componentes de um lado da chave do circuito principal ex: o circuito de alimentação.
 - Os componentes conectados do outro lado do circuito principal ex: barramentos.
- j) Os transformadores de potencial devem formar um circuito em paralelo com a saída para que em caso de alguma revisão a tensão possa ser retirada sem ser preciso desligar a saída principal.

5.5.2. Disjuntores

Graziano (2006) descreve o disjuntor como um dispositivo com capacidade de realizar manobras em circuitos elétricos mesmo em condições anormais de tensão ou corrente.

Sua principal função é a interrupção de correntes de falta de 20 a 50 vezes acima de sua capacidade nominal em regime normal de operação, tão rapidamente quanto possível, aproximadamente 33 ms, de forma a mitigar possíveis danos aos equipamentos pelos curtos-circuitos, exigências que impõe requisitos mandatórios de confiabilidade do equipamento em sua fase de projeto.

Além das correntes de falta, o disjuntor deve ser capaz de interromper correntes normais de carga, correntes de magnetização de transformadores e reatores e as correntes capacitivas de bancos de capacitores e linhas em vazio.

Além disso, realiza a abertura do circuito do consumidor no caso de ocorrerem faltas como: Sobrecargas (função ANSI 50 – sobrecorrente instantânea), Curto-circuito (Função ANSI 51 – sobrecorrente temporizada), Subtensão (Função ANSI 27- subtensão), Inversão de fase ou defasagem angular (Função ANSI 47-sequência de fase), Sobretensão (Função ANSI 59-sobretensão), entre outras, já que para todas as concessionárias essas são as funções mínimas de proteção, sendo que esse conjunto de relés pode ser ampliado dependendo da aplicação. Os disjuntores apresentam tecnologias diferentes para a extinção do arco. São elas: Óleo mineral isolante, Vácuo e SF6.

O disjuntor da subestação antiga cuja tecnologia de extinção do arco era através de óleo mineral. Segundo Graziano (2006), o óleo mineral isolante é um derivado do petróleo, formado por uma mistura de hidrocarbonetos e

quando novo é transparente (tem cor amarela pálida). Para aplicações em equipamentos elétricos, são empregados dois tipos de óleo mineral isolante: naftênico e parafínico. Sua grande limitação técnica é o processo de oxidação por que passa o óleo, que podem ser aceleradas pela presença de compostos metálicos, oxigênio, alto teor de água e calor excessivo. Essa oxidação diminui a capacidade de corte do disjuntor, fazendo-o, portanto, perder a função elétrica ao longo do tempo. Por isso, esta tecnologia, apesar de mais barata, tem sido substituída por Vácuo ou SF6, que apresentam índices de deterioração da capacidade de corte próximos à zero. Entretanto, por se tratar de equipamento desenvolvido a mais de cinquenta anos, tem a preferência das equipes de manutenção, por já ser de domínio público todos os problemas possíveis de se ocorrer. Contudo, esta longevidade trás consigo uma desvantagem, acessórios obsoletos. As bobinas de atuação deste tipo de disjuntor, além dos motores de carregamento de molas, apresentam muitos problemas de funcionamento, acarretando ao disjuntor, uma redução grande nos seus índices de confiabilidade.

Para este projeto da subestação nova a tecnologia adotada foi a de vácuo, devido a sua confiabilidade e baixa manutenibilidade. Uma qualidade uniforme do vácuo, material de contato apropriado, assim como um sistema de contato bem dimensionado, garante um comportamento de corte seguro em toda faixa de corrente.

O vapor metálico gerado numa câmara de vácuo no processo de abertura tem uma tensão de manutenção tão baixa que a energia ali liberada não desgasta o material de contato, que simplesmente se recombina com a superfície após a extinção do arco.

O disjuntor a vácuo demonstra uma particularidade que é única neste tipo de aparelhos devido à ação de corte, melhorando-se a pressão interna na câmara a vácuo. Isto significa um vácuo perfeito mesmo no fim da vida útil mecânica de

uma câmara. Estas propriedades contribuem para que a capacidade de corte mantenha-se constante durante sua vida útil total.

5.5.3. Relés Digitais

Uma vez que a subestação antiga usava relés eletromecânicos de tecnologia obsoleta, seriam necessários novos relés capazes de atender à complexidade de funções presentes na nova subestação.

Em esquemas tradicionais de proteção estão envolvidos relés de sobrecorrente, relés de sobretensão, que conectados juntamente formam um esquema de proteção completo, entretanto isso demanda altos custos de comissionamento e de tempo.

Os relés digitais, no entanto, apresentam uma integração de múltiplas funções num só relé, ocupando menor espaço nos painéis e tornando a interligação de equipamentos mais simplificada. Do ponto de vista da operação da subestação como um todo, as novas possibilidades de aquisições de sinais, registro de eventos e oscilografias, permitem a correta identificação do tipo de falta e da sua origem e localização, acelerando a implantação de medidas que possam viabilizar um rápido restabelecimento do sistema (Souto e Fonseca, 2007).

Ainda, no que diz respeito à substituição dos relés eletromecânicos, os relés digitais se sobressaem nos seguintes quesitos: economia, confiabilidade e flexibilidade.

O compartilhamento de dados permite a integração de variadas funções de proteção num só relé, necessitando somente algum componente externo para o completo funcionamento de um esquema de proteção. Isto implica numa redução significativa de custos na engenharia, testes e comissionamento das subestações.

Pereira (2010) cita algumas vantagens com relação à confiabilidade dos relés digitais:

- Recursos de auto-monitoramento e auto-teste implicando numa manutenção reduzida.
- As características de funcionamento não mudam com a temperatura, tensão de alimentação ou envelhecimento do equipamento, diferentemente dos relés eletromecânicos.
- Alta precisão de medidas devido à filtragem digital e algoritmos de medição otimizados.

Com relação à flexibilidade, os relés digitais apresentam os seguintes desempenhos:

- Possibilidade de atualização constante de versões, ou seja, mudanças no projeto implicam na maioria das vezes em modificações no software.
- Flexibilidade funcional: capacidade de realizar outras funções tais como medições, controle e supervisão.
- Compatibilidade com a tecnologia digital introduzida nas subestações.
- Capacidade de proteção adaptativa: parâmetros de operação podem ser mudados automaticamente com as condições do sistema elétrico, e outros processamentos de dados podem ser incluídos facilmente sem prejudicar as funções de proteção, tais como localização de faltas, registro de eventos, medições de demanda, estimação de temperatura, etc.
- Capacidade de comunicação: os relés digitais possuem saídas para conexão a meios de comunicação em rede, que são preferencialmente utilizadas em grandes distâncias devido à imunidade a interferência eletromagnética.
- Equipamentos não requerem ajustes individuais, e não há a necessidade de calibração presente nos relés eletromecânicos.

- As interfaces nos painéis locais ou traseiros permitem recursos como ajuste e aferição local.

5.6. Avaliação da disponibilidade da subestação nova

Adotados os procedimentos utilizados na integração da engenharia simultânea de sistemas à disponibilidade foram obtidos.

5.6.1. Diagrama trifilar da subestação nova

Devido ao tamanho do diagrama trifilar este será apresentado no Apêndice A desta dissertação.

5.6.2. Diagrama de blocos de confiabilidade da subestação nova

Para manter a coerência e eventuais erros na adoção das distribuições adotadas para a simulação da subestação antiga, serão adotados os mesmos procedimentos para a simulação da subestação nova.

De forma análoga a subestação antiga, foi adotada para a subestação nova valores para as taxas de falhas obtidos na norma IEEE-493 e no estudo de Graziano (2006).

Para as distribuições de confiabilidade foi adotada a distribuição exponencial, devido as suas taxas de falhas constantes e modelagem de sistemas

complexos não redundantes, permitindo assim a modelagem da maior parte dos sistemas encontrados na indústria.

Para a determinação dos tempos de manutenção foram adotados tempos de manutenção de acordo com complexidade da tarefa, estoque de sobressalentes e dificuldade de se encontrar peças de reposição para equipamentos obsoletos de idade avançada, bem como o tempo médio no estado de reparo obtidos através da norma IEEE-493.

A distribuição de escolha foi a lognormal capaz de modelar adequadamente o tempo médio para a manutenção de componentes.

Assim, o diagrama de blocos de confiabilidade da subestação nova é mostrado na Figura 5.20 abaixo:

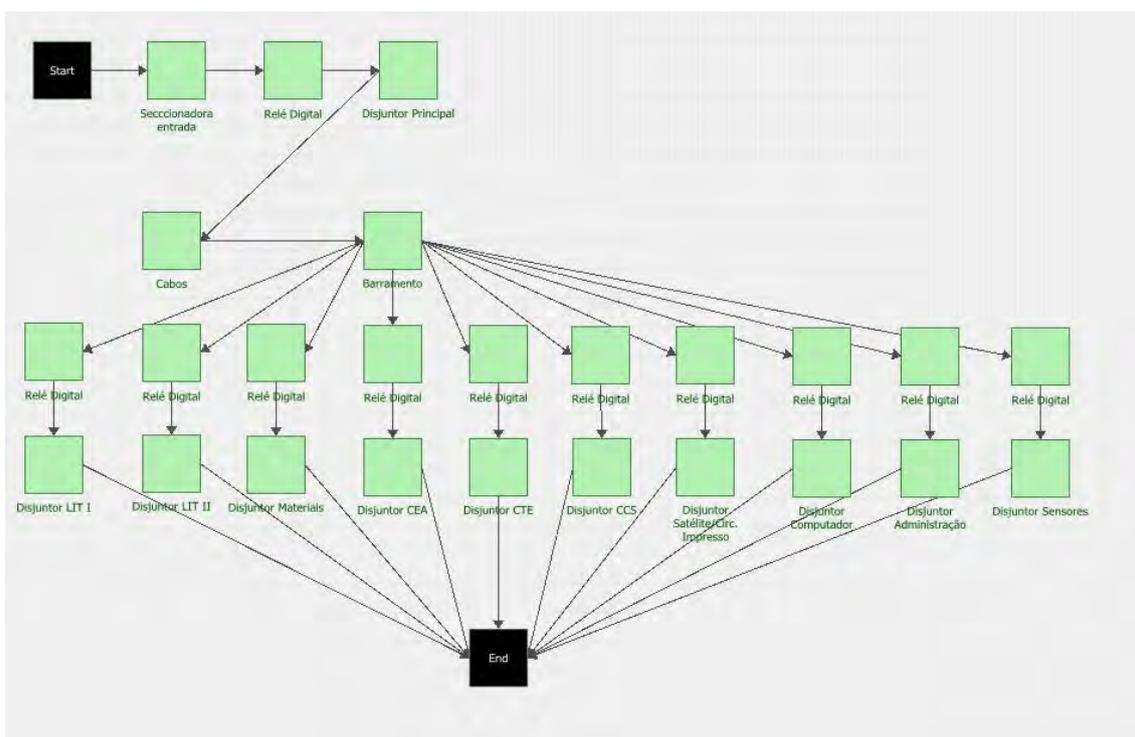


Figura 5.20 - Diagrama de blocos de confiabilidade da subestação nova

Após a elaboração dos diagramas foi realizada a simulação para um horizonte de 5 anos com o objetivo de avaliar a disponibilidade da subestação nova do

INPE e verificar seu atendimento a necessidade de disponibilidade imposta pela organização.

As simulações dos blocos de confiabilidade resultaram em uma disponibilidade média de 99,9712%.

A tabela 5.8 contém os dados completos obtidos durante a simulação:

Tabela 5.8 - Resultados para a subestação nova

Visão Geral do Sistema	
Geral	
Disponibilidade Média:	0,999712
Disponibilidade Pontual 43800:	0,999695
Quantidade Esperada de Falhas:	2,297
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	1,524833
TMAPF (h):	18942,2423
Tempo Disponível/Indisponível do Sistema	
Tempo Disponível (h):	43787,3892
Tempo Indisponível Total (h):	12,610774
Eventos com Parada do Sistema	
Número de Falhas:	2,297
Total de Eventos:	2,297

Pelos dados obtidos verificou-se que a subestação nova seria capaz de atender a demanda de disponibilidade requisitada pelo INPE para o desenvolvimento de suas atividades.

Tais informações podem ser visualizadas graficamente nas Figuras 5.21 a 5.26 abaixo.

A Figura 5.21 mostra o gráfico da disponibilidade pontual da subestação nova

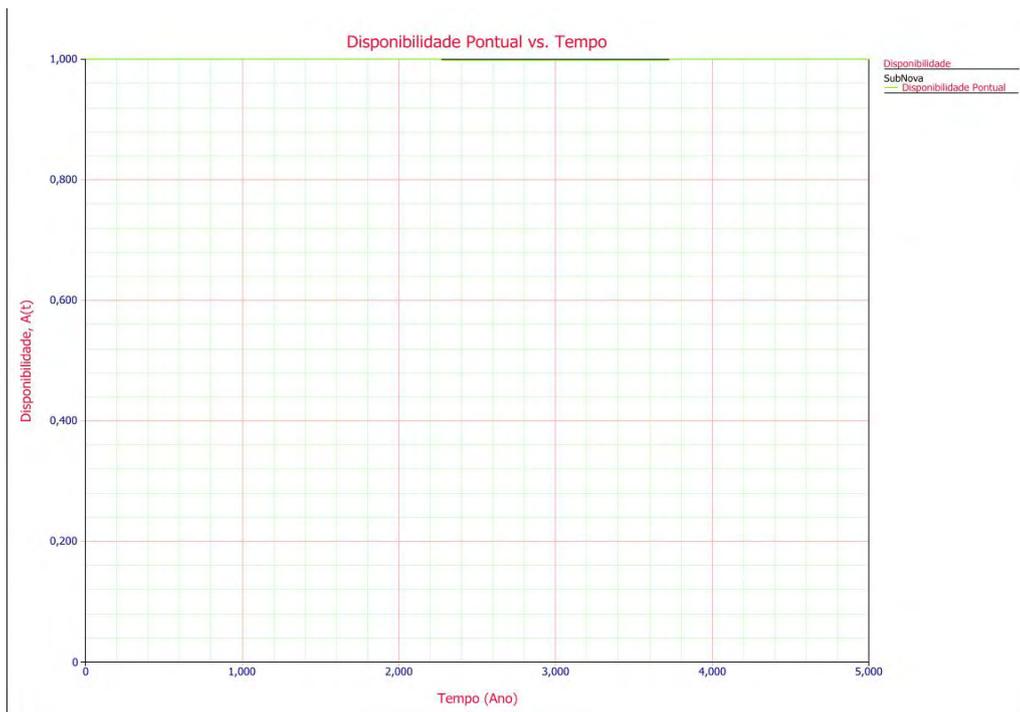


Figura 5.21 - Disponibilidade pontual da subestação nova

A Figura 5.22 mostra o gráfico da disponibilidade média da subestação antiga

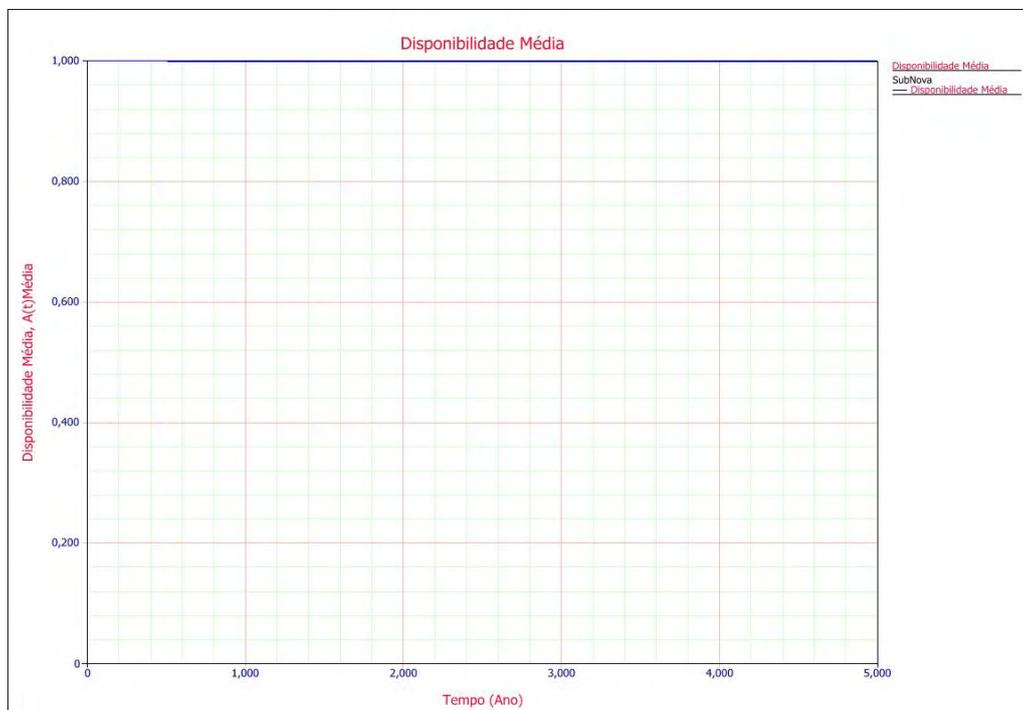


Figura 5.22 - Disponibilidade média da subestação nova

A Figura 5.23 apresenta os tempos de disponibilidade e indisponibilidade da subestação nova no horizonte de simulação.

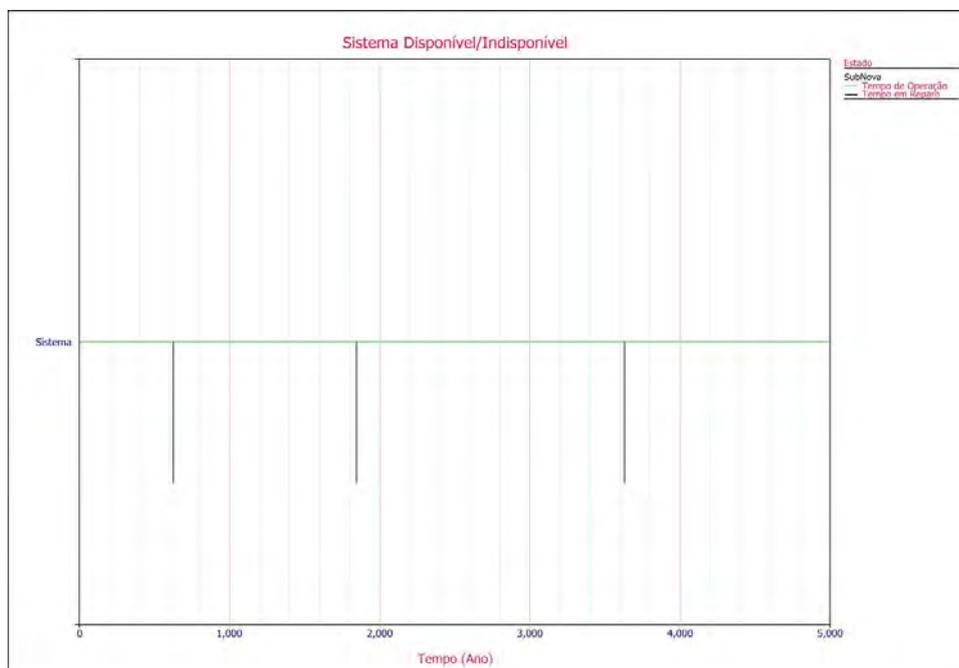


Figura 5.23 - Tempos de disponibilidade e indisponibilidade da subestação antiga

A Figura 5.24 apresenta o número esperado de falhas no sistema.

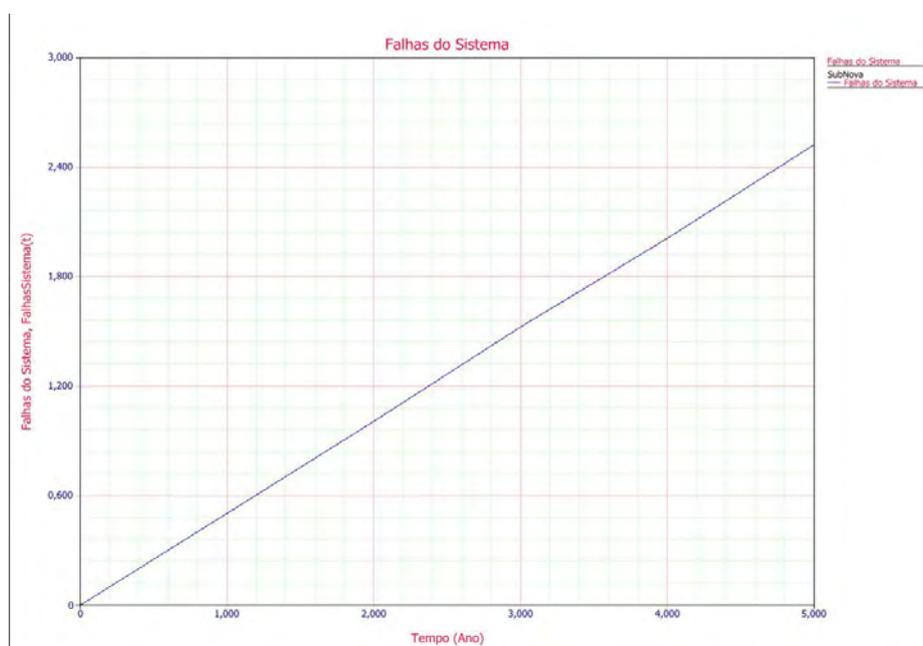


Figura 5.24 - Número de falhas subestação nova

A Figura 5.25 apresenta a probabilidade de falhas para os blocos de confiabilidade que compõe o sistema da subestação nova.

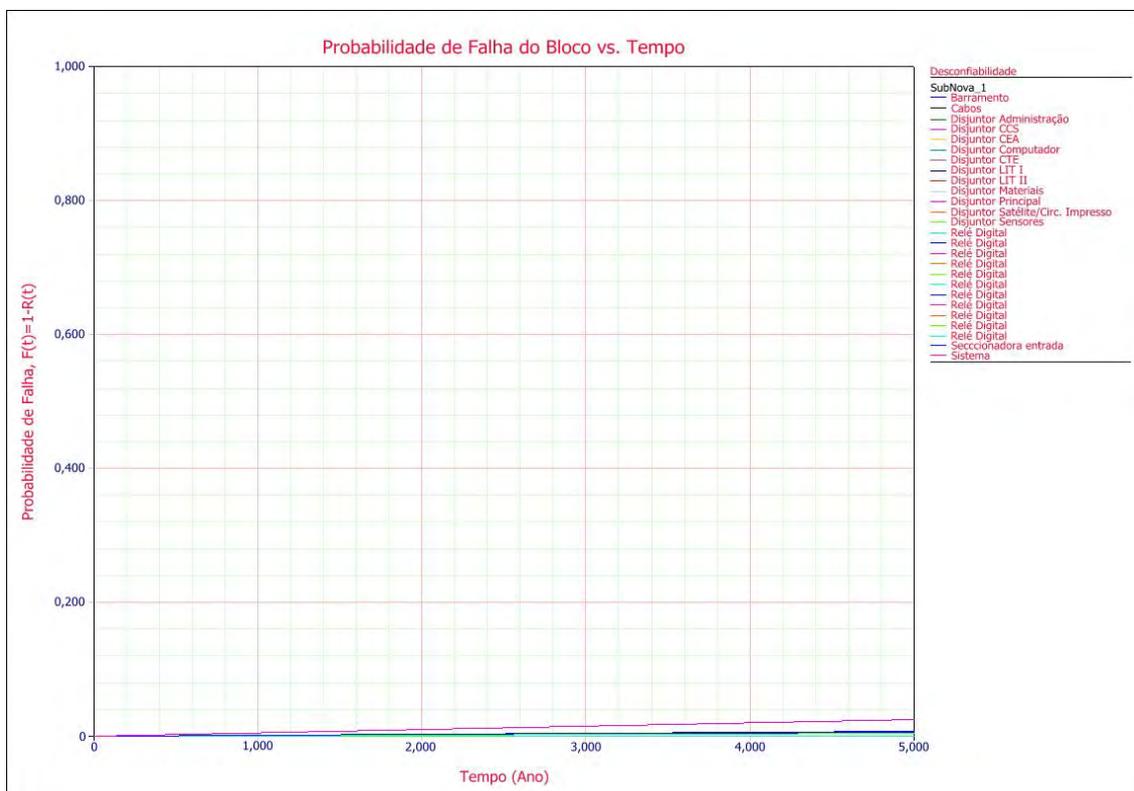


Figura 5.25 - Probabilidade de falhas dos blocos da subestação nova

A Figura 5.26 apresenta as falhas esperadas pelos blocos de confiabilidade de acordo com as taxas de falhas obtidas, esse resultado tem importância significativa na análise, uma vez que fornece o bloco do sistema sujeito ao maior número de falhas, permitindo assim ações que mitiguem o tempo de indisponibilidade do sistema em sua eventual falha.

Tabela 5.9 - Atendimento das fases do ciclo de vida da subestação as tarefas relacionadas com disponibilidade

FASE DO CICLO DE VIDA		TAREFAS RELACIONADAS COM DISPONIBILIDADE	TAREFAS ATENDIDAS
1	Conceito	<ul style="list-style-type: none"> • Calcular a disponibilidade previamente alcançada; 	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo realizado para a subestação antiga 99,2899% de disponibilidade;
		<ul style="list-style-type: none"> • Considerar as implicações da disponibilidade no projeto; 	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliadas as implicações de disponibilidade;
2	Definição do sistema e condições de aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • Efetuar análise preliminar da disponibilidade; • Estabelecer a política de disponibilidade; • Identificar as condições de operação e manutenção; • Identificar a influência das restrições de infraestrutura existentes na disponibilidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizada a simulação com a nova configuração proposta, aumento da disponibilidade para 99,9712%; • A nova subestação de energia deveria possuir disponibilidade maior que 99,9%; • Identificados usando a abordagem de engenharia simultânea de sistemas; • Identificados os aspectos de confiabilidade, manutenibilidade e segurança que afetavam a disponibilidade;
3	Requisitos do sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Especificar requisitos de disponibilidade do sistema; 	<ul style="list-style-type: none"> • Especificados conforme item 5.4;
		<ul style="list-style-type: none"> • Definir estrutura funcional do sistema; 	<ul style="list-style-type: none"> • Definidos conforme item 5.4;
4	Divisão dos requisitos dos sistemas	<ul style="list-style-type: none"> • Alocação dos requisitos de disponibilidade do sistema nos subsistemas; 	<ul style="list-style-type: none"> • Alocados os requisitos de disponibilidade para os equipamentos conforme item 5.5.1
5	Projeto e implementação	<ul style="list-style-type: none"> • Executar ensaios de melhoria de disponibilidade; 	<ul style="list-style-type: none"> • Definidos os equipamentos e materiais necessários, para garantia de disponibilidade conforme item 5.5;

Tabela 5.9 - (conclusão)

FASE DO CICLO DE VIDA		TAREFAS RELACIONADAS COM DISPONIBILIDADE	TAREFAS ATENDIDAS
6	Instalação	<ul style="list-style-type: none"> Iniciar treinamentos dos responsáveis pela manutenção 	<ul style="list-style-type: none"> Durante o comissionamento a equipe de manutenção recebeu treinamento prático e teórico de 16 horas;
		<ul style="list-style-type: none"> Efetuar previsões de sobressalentes e ferramentas especiais; 	<ul style="list-style-type: none"> Fornecidos pela contratada a listagem do estoque de sobressalentes bem como as ferramentas especiais para retirado dos disjuntores dos cubículos;
7	Operação e Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> Gerenciar estoques de sobressalentes e ferramentas especiais; 	<ul style="list-style-type: none"> Os estoques de sobressalentes e ferramentas especiais encontram-se disponíveis, uma vez que a subestação nova conta com 4 cubículos reserva;
8	Monitoramento do desempenho	<ul style="list-style-type: none"> Analisar o desempenho da disponibilidade; 	<ul style="list-style-type: none"> O desempenho da subestação nova é considerado acima das expectativas, uma vez que após 2 anos de sua inauguração, ainda não ocorreram quedas de energia no INPE devido a falhas em seus equipamentos e componentes.

6 DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta as contribuições deste trabalho comparado com outros da literatura.

6.1. A engenharia simultânea de sistemas

A metodologia utilizada neste trabalho para a abordagem de engenharia de sistemas é a da tese desenvolvida por Loureiro (1999). A aplicação desta abordagem em diversos exemplos é ilustrada em diversos trabalhos: (LOUREIRO et al., 2010a; 2010b; 2010c; 2010d; 2010e). Para melhor elucidação, Loureiro et al. (2010a) utilizou uma abordagem de engenharia de sistemas para o processo de desenvolvimento de um equipamento de suporte elétrico (EGSE) para um computador de bordo (OBC) de um satélite. Apesar de considerar diversos aspectos da organização no desenvolvimento dos produtos, os trabalhos realizados não se propuseram a analisar disponibilidade de infraestrutura organizacional. Como avanços deste trabalho na comparação aos realizados, foram utilizados as mesmas técnicas, entretanto o enfoque do desenvolvimento foi o sistema de energia elétrica, que faz parte do sistema de infraestrutura organizacional para o desenvolvimento de produtos espaciais do INPE.

Este trabalho ao integrar as técnicas de engenharia de simultânea de sistemas aos conceitos e ferramentas de disponibilidade amplia os procedimentos adotados em Oliveira (2007) que propõe a gestão da disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade nas diversas etapas dos processos de ciclo de vida do produto, o trabalho ainda utiliza-se da metodologia FRACAS (*Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System*) para a implantação da

gestão de confiabilidade em um programa de retificadores e carregadores de baterias industriais, por ser um produto de alta complexidade e com extenso histórico de manutenção. O presente trabalho difere do de Oliveira (2007) ao utilizar não somente as técnicas de disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade para a gestão e aplicação em determinado programa organizacional, mas ao propor a sua integração com os conceitos de engenharia de sistemas desde as etapas de concepção até o descarte final.

Como grande contribuição deste trabalho em relação aos da literatura existente pode-se citar que a metodologia proposta insere no contexto da engenharia simultânea de sistemas, além da integração antecipada e coordenada entre as áreas de conhecimento relevantes ao desenvolvimento de produtos, a organização da equipe sob o prisma de multidisciplinaridade e dedicação integral ao projeto e, enfoque sobre as necessidades do cliente, os aspectos ligados à confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, de maneira a atender a demandas de disponibilidade impostas a organização de forma efetiva.

6.2. Disponibilidade

Muitos trabalhos foram desenvolvidos para a avaliação de disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade em diversos tipos de equipamentos.

Graziano (2006) apresenta as principais causas de desligamento de cubículos classe 15kV, restringindo-se aos cubículos conhecidos como cabines primárias, que fazem a interface entre a rede das concessionárias de energia e os consumidores primários. Verificou quais são as taxas de falha presumidas para os componentes individuais como: chaves seccionadoras e seus acessórios, disjuntores e suas bobinas, relés de proteção de sobrecorrente,

transformadores de corrente e de potencial, componentes de serviços auxiliares, etc. Em sua avaliação do que considerou um modelo otimizado de subestação obteve aumento da confiabilidade de 67,78%, com disjuntor PVO e relé de tensão analógico para 99,13% ao adotar seu modelo otimizado com disjuntor a SF6 e relé de proteção multifunção. A forma utilizada para apurar a taxa de falhas das cabines foi a de somatória simples de todas as taxas de falhas dos componentes presentes nas cabines. Esta forma de cálculo foi utilizada, pois considerou que uma falha em qualquer um dos componentes é de igual consequência para o conjunto, ou seja, qualquer falha, mesmo com extensões diferentes, leva ao mesmo resultado: interrupção do serviço da cabine primária, mesmo não levando ao desligamento, interrompe o sistema de medição, ou o sistema de proteção.

Tal estrutura de cálculo é semelhante à utilizada neste trabalho para o cálculo da disponibilidade da cabine primária da subestação antiga na medida em que qualquer falha em determinado equipamento causava a interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Ao utilizar as técnicas de engenharia simultânea de sistemas para o projeto da subestação nova, foi possível mitigar o problema da alocação de equipamentos em série, pois apesar dos equipamentos da cabine primária ainda estarem na configuração série sob o ponto de vista da confiabilidade, os cubículos de distribuição foram alocados em paralelo, com relés digitais de proteção impedindo que eventuais falhas desliguem o sistema como um todo.

Teixeira (2008) estudou a análise de disponibilidade em máquinas operatrizes, e realizou simulações visando a melhora da confiabilidade e manutenibilidade, a simulação realizada com os dados em que a confiabilidade e a manutenibilidade dos sistemas foram melhorados, tornou o tempo indisponível esperado por posição de máquina de 2 a 3 dias menor que nas simulações originais.

Na presente dissertação, quando calculados os tempos de indisponibilidade da subestação antiga do INPE para um horizonte de 5 anos obteve-se o valor aproximado de 311 horas de indisponibilidade do sistema e um total aproximado de 35 falhas nos equipamentos. Ao realizar as simulações para a subestação nova, o total de horas de indisponibilidade foi reduzido consideravelmente para um período menor que 13 horas de falta de energia.

Ressalta-se que essas simulações contemplam apenas as falhas ocorridas dentro das subestações, não estando incluídas falhas provenientes de eventos externos (tais como acidentes automobilísticos, nos quais o automóvel derruba o poste e interrompe o fornecimento de energia) ou da rede da concessionária de energia.

Jens (2006) propõe um modelo para o monitoramento e avaliação de um sistema de distribuição de energia utilizando a técnica de manutenção com base nas condições de uso aplicada aos transformadores de potência e distribuição. Com os resultados obtidos foi possível verificar a grande redução na quantidade de interrupções sofridas pelos consumidores, observada pelos índices de frequência de interrupção SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) e CAIFI (*Consumer Average Interruption Frequency Index*). Já para os índices que expressam a disponibilidade do sistema de distribuição SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*), CAIDI (*Consumer Average Interruption Duration Index*) e ASUI (*Average Service Unavailability Index*) foram possíveis observar redução ainda maior com a indisponibilidade caindo para cerca da metade dos valores originais. Ao se somar os resultados obtidos por Jens (2006) aos obtidos neste trabalho pode-se obter aumento consideravelmente maior na disponibilidade do fornecimento de energia. O INPE para o atendimento a longo prazo de suas demandas poderá em futuro próximo usar esta integração para planejar a sua migração para sistema de distribuição em 138 kV.

Da mesma forma que neste trabalho, Teixeira (2008) constatou a complexidade na obtenção de dados de campo para a modelagem adequada das taxas de falhas dos equipamentos e de seus processos de manutenibilidade.

Os dados de taxas de falhas utilizados nesta dissertação foram obtidos na literatura através da norma IEEE-493 e no estudo elaborado por Graziano (2006), tal fato pode ser explicado pela dificuldade em ser obter os dados reais de campo, apesar da equipe terceirizada de manutenção do INPE contar com software de manutenção para o armazenamento de dados das manutenções realizadas em campo, este não é capaz de formar um banco de dados válidos para a utilização na modelagem da confiabilidade e manutenibilidade dos sistemas.

Com a falta de dados de campo para a correta modelagem das distribuições de confiabilidade, foi adotada a distribuição exponencial para a modelagem dos equipamentos instalados e a serem instalados, devido as suas taxas de falhas constantes e modelagem de sistemas complexos não redundantes, permitindo assim a modelagem da maior parte dos sistemas encontrados na indústria. E, para a determinação dos tempos das tarefas de manutenção foram adotados tempos de acordo com complexidade da tarefa, estoque de sobressalentes e dificuldade de se encontrar peças de reposição para equipamentos obsoletos de idade avançada, bem como o tempo médio no estado de reparo obtidos através da norma IEEE-493.

Ainda que na adoção de tais distribuições tenha-se imputado um erro nas simulações, o resultado final não fica comprometido, pois foram usadas as mesmas distribuições para a modelagem de confiabilidade e manutenibilidade tanto para a subestação antiga quanto para a subestação nova.

Aspecto importante a ser ressaltado é que após 2 anos de funcionamento a subestação nova ainda não apresentou nenhuma falha em seus subsistemas, equipamentos e componentes, gerando maior ganho de disponibilidade quando comparada as simulações realizadas.

Santos et al (2010) em seus estudos sobre a análise de confiabilidade e disponibilidade de sistemas elétricos de potência, apresentam uma metodologia para avaliar o desempenho de um sistema elétrico, no qual um indicador de especial interesse é a energia não fornecida ao sistema (ENS), que pode ser calculada como o produto da indisponibilidade e da potência conectada ao sistema.

Uma vez conhecido o valor do MWh (R\$ / MWh), a partir do produto da energia não fornecida ao sistema (ENS) e do valor do MWh é possível determinar o custo da energia não suprida aos consumidores e, portanto, avaliar qual das medidas corretivas, possíveis para reduzir a indisponibilidade do sistema, apresenta o melhor custo-benefício.

Ao se calcular esta metodologia para o estudo de caso desta dissertação obtêm-se os seguintes valores: para a subestação antiga o custo da energia não fornecida para o horizonte de simulação de 5 anos foi de R\$ 65.723,63 e para a subestação nova este custo foi de R\$ 2.745,99, uma considerável redução. Entretanto, este cálculo permite que a concessionária estipule seus prejuízos ao não fornecer a energia ao INPE.

Sugere-se então novo cálculo como forma de avaliar os “lucros cessantes” à sociedade devido às interrupções no fornecimento de energia elétrica ao INPE. Para cálculo de maneira simples, é possível utilizar o custo médio da hora homem trabalho no Instituto ($C_{m(h/h)}$) e multiplicarmos pelo período de indisponibilidade (U) e número de servidores ($n_{serv.}$).

O custo médio de horas trabalhadas para os servidores é de R\$ 35,00 (considerando uma média salarial de R\$ 7.000,00, sem os encargos sociais), e o número de servidores do INPE é de aproximadamente 1000, para este cálculo não serão levados em consideração funcionários terceirizados, bolsistas e/ou estudantes de pós-graduação).

Assim, para a subestação antiga o “lucro cessante” à sociedade ao realizar o produto $C_{m(h/h)} \times U \times n_{serv.}$ são obtidos valores na ordem de R\$ 10.885.000,00 ao longo dos 5 anos com as falhas internas no fornecimento de energia elétrica

Ao realizar o mesmo cálculo para a subestação nova o “lucro cessante” à sociedade diminui de forma considerável para R\$ 455.000,00.

Levando-se em conta o exposto anteriormente acerca da operação da subestação nova, que desde sua inauguração ainda não apresentou nenhuma falha em seus subsistemas, equipamentos e componentes, e seus custos de aquisição foram de R\$ 1.920.000,00, é possível afirmar que o retorno financeiro do investimento já ocorreu em apenas 2 anos de funcionamento e operação.

7 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentados os objetivos atendidos, as contribuições e as sugestões de trabalhos futuros.

7.1. Objetivos atendidos

A metodologia proposta nesta dissertação para a disponibilidade de organização para o desenvolvimento de produtos espaciais mostrou-se adequada, uma vez que calculou e racionalizou o planejamento de recursos organizacionais utilizados para o desenvolvimento de produtos espaciais de modo a garantir a sua disponibilidade de organização dada à demanda proposta.

A metodologia proposta analisou a disponibilidade da organização atual e a necessária ao desenvolvimento de produtos espaciais através da integração da abordagem da engenharia simultânea de sistemas, proposta por Loureiro (1999) e suas ferramentas com os conceitos e ferramentas de disponibilidade, permitindo ao INPE antecipar-se aos novos cenários de desenvolvimento de seus produtos.

A presente dissertação também permitiu avaliar que o INPE atualmente não possui nenhum método de planejamento para a análise de sua disponibilidade de organização, face aos novos desafios que serão impostos a esta disponibilidade nos próximos anos. A metodologia proposta nesse trabalho surge como forma de antecipar-se a este novo cenário e garantir a disponibilidade de organização dada à demanda proposta.

7.2. Contribuições

Esta dissertação tem como principal contribuição o acréscimo de disponibilidade na unidade regional do INPE de São José dos Campos, para o atendimento das demandas de disponibilidade de organização impostas por seus diversos programas.

Através dos conceitos e ferramentas aqui descritos foi elaborado Projeto Básico para a Contratação de empresa de engenharia para realização das obras da Subestação de Energia Principal do INPE em São José dos Campos – São Paulo.

O processo de contratação ocorreu por meio da concorrência pública na qual foram especificados todos os requisitos necessários para o aumento de disponibilidade, bem como todos os requisitos de segurança para a operação e manutenção da subestação de energia principal do INPE.

A metodologia proposta também permite a avaliação de disponibilidade de novos processos organizacionais e também pode ser usada para o desenvolvimento de novos produtos.

7.3. Sugestões para Trabalhos Futuros

Esta dissertação constatou a complexidade da aquisição de dados de campo confiáveis para o desenvolvimento e cálculo de taxas de falhas e distribuições de confiabilidade, que muitas vezes são adquiridos de maneira não precisa.

Assim, como sugestões para trabalhos futuros:

- Elaboração de um banco de dados confiável para a definição dos parâmetros estatísticos a serem utilizados nas distribuições de confiabilidade e manutenibilidade.
- Aplicar os conceitos de manutenção centrada na confiabilidade para organizações de desenvolvimento de produtos espaciais, incluindo montagem, integração e testes.
- Aplicação da metodologia para o aumento de disponibilidade em produtos.
- Aplicação da metodologia em recursos humanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) -. **NBR 5462, confiabilidade e manutenibilidade** - Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB). **Programa Nacional de Atividade Espaciais 2005-2014**: PNAE. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, AEB, 2005.

CARAZAS, F. J. G. **Análise de disponibilidade de turbinas a gás em usinas termelétricas a ciclo combinado**. 2006. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - EPUSP, São Paulo, 2006.

CLIVE, N. Maintainability design principles for aircraft maintenance error avoidance. **Communications in Dependability and Quality Management** , v.10, n.4, p. 31-40, Dec. 2007.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. **Space engineering**: system engineering general requirements. Noordwijk: ESA, 2009. (ECSS-E-ST10C).

DHILLON, B.S. **Engineering maintainability**. Houston: Gulf Publishing Company, 1999.

FUNDAÇÃO COGE. **Relatório de estatísticas de acidentes no setor elétrico brasileiro**. Disponível em www.funcoge.org. Website consultado no dia 15 de junho de 2012.

GALINA, S. V. R.; SANTOS, A. C. D. Ambiente para auxílio ao trabalho cooperativo na engenharia simultânea. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 18.,1998, Niterói. **Anais eletrônicos...** ABEPRO, 1998. p. 1 CD-ROM. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/publicacoes/index.asp?pchave=galina&ano=1998&x=16&y=8>. Acesso em: 10 jun 2011.

GRAZIANO. N. **Análise de confiabilidade e melhoria da taxa de falhas para cubículos classe 15 kV**. 2006. 90 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

HUANG, G. Q. **Design for X: concurrent engineering imperatives**. London: Chapman Hall, 1996.

INCOSE (Org.). **System engineering handbook**. San Diego: Incose, 2011. 374 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.
Recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems. New York: IEEE, 1997.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES (INPE.LIT). **Programas Espaciais**. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://www.lit.inpe.br/programas_espaciais>. Acesso em: 10 jun. 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Plano diretor 2011-2015**. São José dos Campos: Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=2579>. Acesso em: 10 jan. 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION . **Systems and software engineering - system life cycle processes**. Genebra, Suíça: ISO, 2008. (ISO/IEC 15288).

ITEM SOFTWARE INC. **Reliability Block Diagram (RBD)**. Disponível em: <www.reliabilityeducation.com/rbd.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2011.

LAFRAIA, J R B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro, Brasil: Qualitymark:Petrobras, 2001. 388p. ISBN 85-7303-294-4.

LEWIS, E. E. **Introduction to reliability engineering**. 2. ed. EUA: John Wiley and Sons Inc, 1996. 435p.

LOUREIRO, G. **A systems engineering and concurrent engineering framework for the integrated development of complex products**. Doctoral Thesis (Manufacturing Engineering) -Loughborough University, England, 1999.

LOUREIRO, G.; LEANEY, P. G. A systems and concurrent engineering framework for the integrated development of space products. **Acta Astronautica**, p. 945-961, 2003.

LOUREIRO, G. et al. Systems concurrent engineering of a turbogenerator. In: ISPE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCURRENT ENGINEERING, 17, Cracóvia, 2010. **Proceedings...** Cracóvia: Springer-Verlag, 2010a.

LOUREIRO, G. et al. Systems concurrent engineering of a turbogenerator. In: ISPE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCURRENT ENGINEERING, 17, Cracóvia, 2010. **Proceedings...** Cracóvia: Springer-Verlag, 2010b.

LOUREIRO, G. et al. Systems concurrent engineering of an electric bike. In: ISPE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCURRENT ENGINEERING, 17, Cracóvia, 2010. **Proceedings...** Cracóvia: Springer-Verlag, 2010c.

LOUREIRO, G. et al. Systems concurrent engineering for the conception of a hybrid vehicle. In: ISPE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCURRENT ENGINEERING, 17, Cracóvia, 2010. **Proceedings...** Cracóvia: Springer-Verlag, 2010d.

LOUREIRO, G. et al. Systems concurrent engineering to develop a green car. In: ISPE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCURRENT ENGINEERING, 17, Cracóvia, 2010. **Proceedings...** Cracóvia: Springer-Verlag, 2010e.

MARTINS, J. C.; SELLITO, M. A. Análise da estratégia de manutenção de uma concessionária de energia elétrica com base em estudos de confiabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP), 26., 2006, Fortaleza. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEPRO, 2006.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **NASA systems engineering handbook**. Washington, D.C., 2007.

OLIVEIRA, S. M. **A gestão de programas de desenvolvimento: aplicação de confiabilidade, manutenibilidade e segurança**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-19072007-171348/>>.

PEREIRA, P. **Introdução à proteção digital**. Belo Horizonte. UFMG, 2010. Material de Aula. Disponível em: <http://www.cpdee.ufmg.br/~clever/10especializa/ProtecaoSEP/Unid07-IntrProtDig.pdf>. Acesso em 15 set 2012

PIMENTEL, C. L.; AUGUSTO, O. B. Engenharia simultânea e sua aplicação a indústria naval. Em: CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL, TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERIA PORTUARIA (COPINAVAL 2003), 18., 2003, Havana. **Anais...** Havana, 2003. CD ROM.

RELIASOFT. **Availability**. Disponível em: <http://www.weibull.com/SystemRelWeb/availability.htm>>. Acesso em: 10 jun. 2011.

RELIASOFT. **Design for reliability**: overview of the process and applicable techniques. Disponível em: <<http://www.reliasoft.com/newsletter/v8i2/reliability.htm>>. Acesso em: 10 jun. 2011.

JENS, R. D. **Modelo de monitoramento e avaliação da confiabilidade e disponibilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica com base nas condições de uso de transformadores**. 2006. Dissertação (Mestrado em Sistemas Digitais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-25052006-174620/>>.

ROSIN, A.; HECHT, M.; HANDALE, J. Analysis of airport runway availability. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1999, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, 1999. 10.1109/RAMS.

SANTOS, A. F. **Gerenciamento da confiabilidade em projetos de material rodante ferroviário**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-10012008-103534/>>.

SANTOS, R. C; BASSETO, B. A.; CUGNASCA, J. R.; ALMEIDA Jr., J. R.; CAMARGO Jr., J. B. **Um método baseado em árvore de falhas e simulação de Monte Carlo para a análise de confiabilidade/disponibilidade de sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Induscon, 2010. Disponível em:

<<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/Induscon%202010/fscommand/web/docs/T0930.pdf> >

SOHLENIUS, G. Concurrent engineering. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 41, n. 2, p. 645-655, 1992.

SOUZA, G. F. M. **Análise de confiabilidade aplicada ao projeto de sistemas mecânicos..** São Paulo: EPUSP, 2003. 210p. Apostila de Curso

SOUZA, J. B.; SACOMANO, J. B.; KYRILLOS, S. L.; MILREU, F. J. S. Indicadores de desempenho da função manutenção: um enfoque em aciarias brasileiras. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Ano 7, n. 3, p. 75-89, jul-set/2012.

SOUZA, M. L. O.; Carvalho, T. R. **The fault avoidance and the fault tolerance approaches for increasing the reliability of aerospace and automotive systems**, 2005. doi:10.4271/2005-01-4157. SAE Technical Paper.

SOUZA, P. N., **Introdução à tecnologia de satélites.** São José dos Campos: INPE, 2008. Material de Aula.

SELLITTO, M. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Produção**, v.15, n.1, p. 44-59, 2005.

SERRANO, A. A manutenibilidade no projeto de aeronaves: aportes à segurança de aviação. **Conexão SIPAER**, v. 2, n. 1, nov. 2010.

STEVENS, R. et al. **Systems engineering: coping with complexity.** London: Prentice Hall Europe, 1998. ISBN: 0-13-095085-8.

TEIXEIRA, B. S. **Análise de disponibilidade em máquinas operatrizes: uma aplicação a máquinas têxteis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Paulo: EPUSP, 2008. 126 p.

YOUNG, R. R. **The requirements engineering handbook.** Norwood, MA, EUA: Artech House, 2004.

WINNER, R. I. et al. **The role of concurrent engineering in weapon systems**

acquisition. Alexandria: Institute for Defense Analysis, IDA, 1988. (Report R-338).

WUTTKE, R. A.; SELLITTO, M. A. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. **Revista Produção Online.** v.8 n.4 Dez.2008 Disponível em:
<http://producaoonline.org.br/index.php/rpo/article/viewFile/134/218>.

ZIO, E. Reliability engineering: old problems and new challenges. **Reliability Engineering and System Safety.** v. 94, n. 2, p. 125-141, 2009.

APÊNDICE A - DIAGRAMA TRIFILAR DA SUBESTAÇÃO NOVA

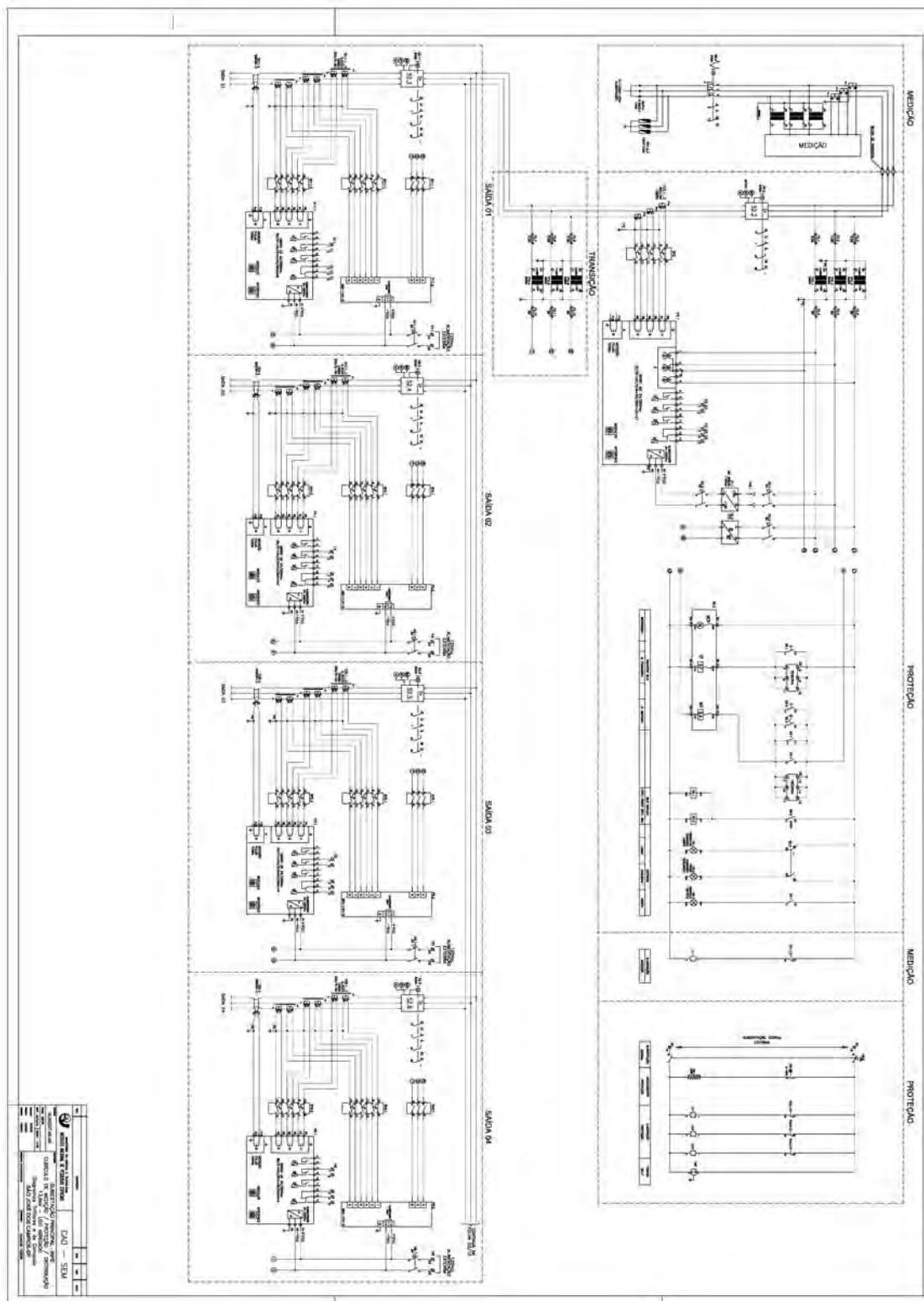


Figura A.1 - Diagrama trifilar da subestação nova (entrada, medição e cubículos)

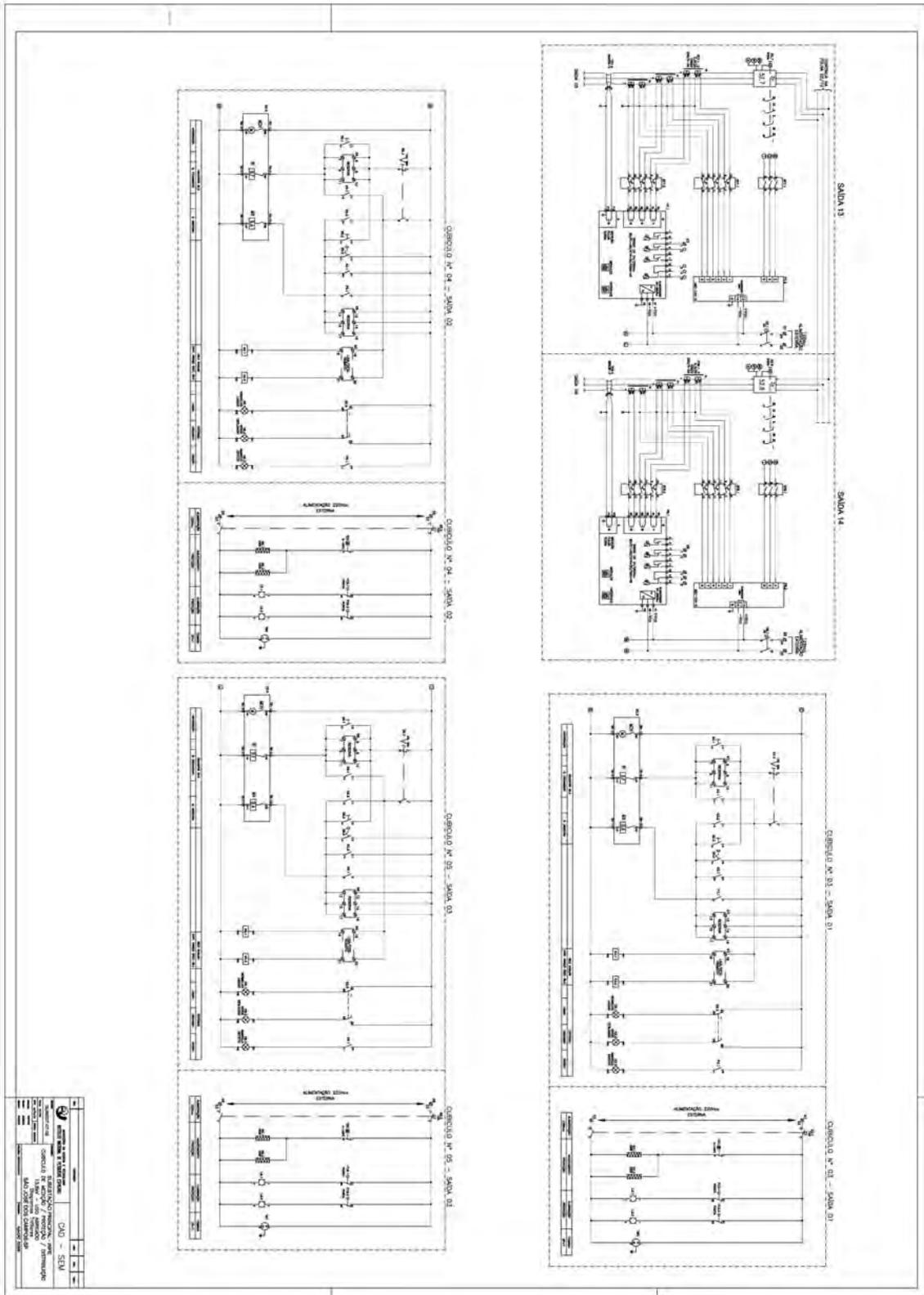


Figura A.3 - Diagrama trifilar da subestação nova (cubículos)

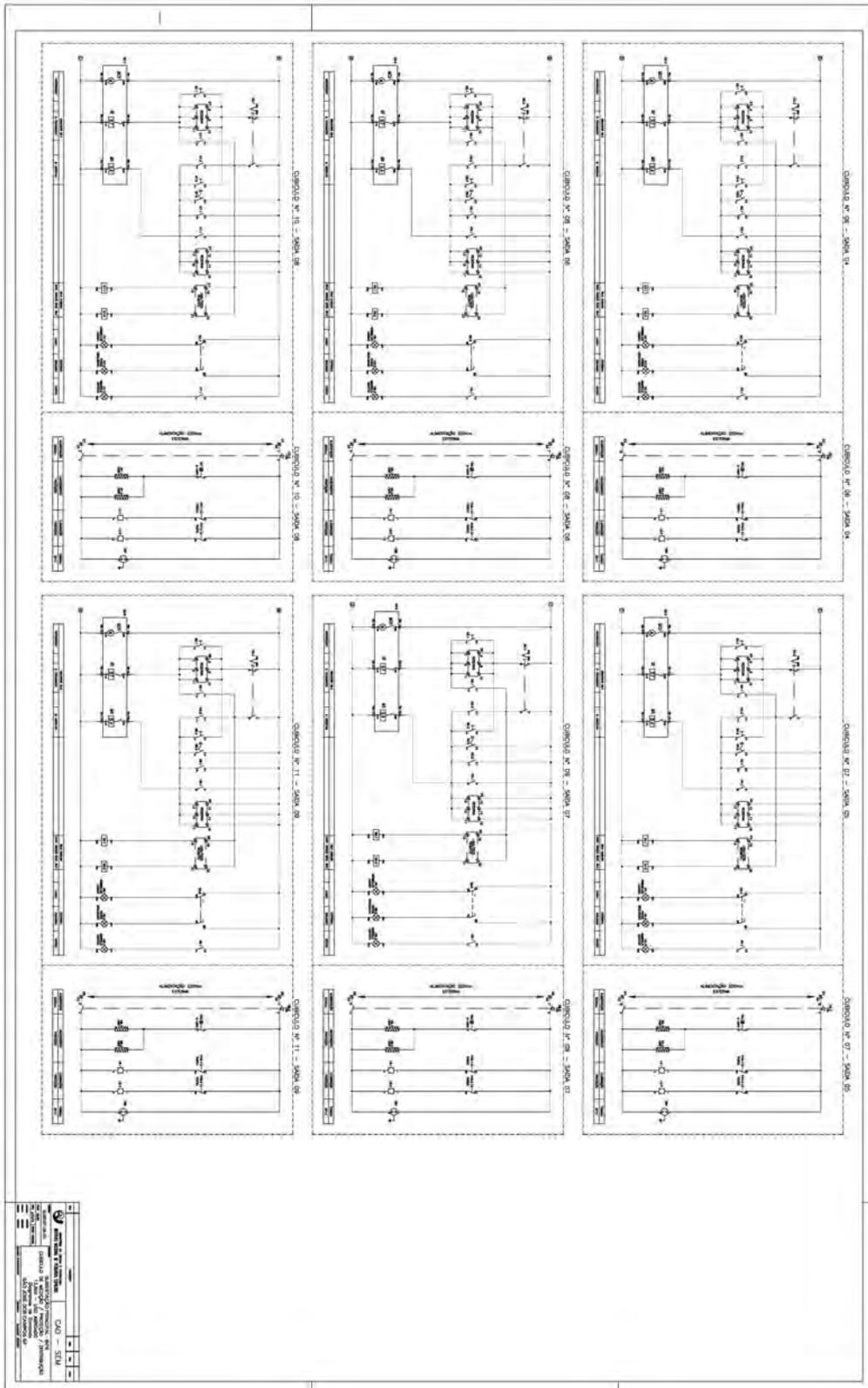


Figura A.4 - Diagrama trifilar da subestação nova

APÊNDICE B - FOTOS DA SUBESTAÇÃO NOVA



Figura B.1 - Entrada de energia



Figura B.2 - Fachada frontal da subestação



Figura B.3 - Fachada Posterior da subestação



Figura B.4 - Cubículos de distribuição