



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÁRIO ANDERSON MAGALHÃES DA CUNHA

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE APLICADO A SUBESTAÇÕES DE MÚLTIPLAS
UNIDADES CONSUMIDORAS 11,9 KV - 380/220 V BASEADO NOS MÉTODOS
CADEIA DE MARKOV, ÁRVORE DE FALHAS E DIAGRAMA DE ISHIKAWA**

FORTALEZA

2022

MÁRIO ANDERSON MAGALHÃES DA CUNHA

ESTUDO DE CONFIABILIDADE APLICADO A SUBESTAÇÕES DE MÚLTIPLAS
UNIDADES CONSUMIDORAS 11,9 KV – 380/220 V BASEADO NOS MÉTODOS
CADEIA DE MARKOV, ÁRVORE DE FALHAS E DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Ceará como parte dos
requisitos para a obtenção de Graduação
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado
Sampaio.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C979e Cunha, Maria Anderson Magalhães da.
Estudo de confiabilidade aplicado a subestações de múltiplas unidades consumidoras 11,9 kv - 380/220 v baseado nos métodos cadeia de Markov, árvore de falhas e diagrama de Ishikawa / Maria Anderson Magalhães da Cunha. – 2022.
93 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.
1. Confiabilidade . 2. Cadeia de Markov. 3. Árvore de Falhas. 4. Diagrama de Ishikawa. I. Título.
CDD 621.3
-

MÁRIO ANDERSON MAGALHÃES DA CUNHA

ESTUDO DE CONFIABILIDADE APLICADO A SUBESTAÇÕES DE MÚLTIPLAS
UNIDADES CONSUMIDORAS 11,9 KV – 380/220 V BASEADO NOS MÉTODOS
CADEIA DE MARKOV, ÁRVORE DE FALHAS E DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Ceará como parte dos
requisitos para a obtenção de Graduação
em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lucas Silveira Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Valdery Rodrigues Monte Júnior
Enaut Solar

A Deus,
Aos meus pais Edson e Ana,
À minha noiva Pamela,
À minha irmã Mariana
À minha sobrinha Maria Eduarda,
Ao meu cunhado Marigelbio.
Ao meu tio Nazareno.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos aos quais me deparei no decorrer da minha trajetória. Sem Ele nada disso seria possível.

Aos meus pais, Ana e Edson, por todo o amor, carinho, cuidado e dedicação em minha formação. Jamais teria conseguido sem vocês e é por isso que eu lhes dedico tudo o que eu me tornei.

À minha noiva, Pamela, por todo o amor, cuidado, amizade, parceria, cumplicidade e compreensão, que permitiram o fortalecimento para a realização das diversas conquistas em minha vida.

À minha irmã, Mariana, que participou e contribuiu para a minha formação, onde sempre será um grande exemplo para a minha vida, e sua família, Marigelbio e Maria Eduarda, por todo o amor, incentivo, confiança e apoio incondicional.

Ao meu tio, Nazareno, por estar presente nas principais conquistas alcançadas, com todo o seu apoio, assistência e encorajamento.

Aos meus amigos Wesley Gonçalves, Miguel Casemiro e Lucas Costa, que sempre estiveram presentes na minha trajetória acadêmica, onde evoluímos juntos e cooperamos para o engrandecimento simultâneo de todos.

Ao Valdery Rodrigues, por toda a confiança, ensinamentos e contribuição para a minha evolução profissional e humana, e por ter auxiliado nos meus primeiros passos na vida profissional. Você sempre será uma fonte de inspiração.

À JCA Engenharia e Arquitetura LTDA e todos os amigos que conheci lá, pela oportunidade, formação profissional e pelos bons momentos que passamos.

Ao Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI), que me ofereceu estruturas que contribuíram para a minha evolução acadêmica, além de permitir o contato com grandes pesquisadores e orientadores que colaboraram para a minha formação.

Ao meu orientador do TCC Prof. Dr. Raimundo por todo apoio, paciência e ajuda na elaboração e revisão do meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Lucas por ter aceitado fazer parte da banca e poder contribuir com o meu trabalho e com a minha formação.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento.”

- *Albert Einstein.*

RESUMO

O estudo de confiabilidade de sistemas, além de contribuir para a evolução tecnológica, pode ser utilizado como ferramenta de apoio às áreas de projeto, planejamento e análise de risco das empresas nas tomadas de decisões. Dessa forma, a engenharia de confiabilidade pode contribuir para modernização e evolução tecnológica das instalações, bem como para a melhoria da confiabilidade, segurança, disponibilidade dos sistemas elétricos e qualidade do serviço prestado pela empresa. Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de confiabilidade aplicado à duas subestações de 11,9kV-380/220V de uma unidade consumidora com múltiplas unidades de consumo de um órgão público judiciário do Brasil. Para isso, são explorados conceitos teóricos de probabilidade aplicados na modelagem das falhas dos componentes e elementos analisados com configurações série, paralelo e misto no sistema. Para desenvolvimento do trabalho são utilizados os seguintes métodos de análise de sistemas complexos: Cadeia de Markov, Árvore de Falhas e Diagrama de Ishikawa. Adotou-se o método de Cadeia de Markov para modelagem das equações que descrevem a transição dos estados dos equipamentos, componentes e elementos que compõem a subestação. Para análise das mudanças topológicas das subestações, considerou-se o tempo médio para falhar, as taxas de reparos, o tempo médio para reparar e a disponibilidade como indicadores de confiabilidade, aplicados ao método de Árvore de Falhas, por meio dos *softwares TopEvent FTA e MS Excel*. Por fim, utilizou-se o Diagrama de Ishikawa na avaliação dos processos e procedimentos que se estendem ao gerenciamento, ambiente e itens da subestação (causas) susceptíveis à falhas. A partir da análise dos resultados obtidos neste estudo, constatou-se que as subestações de 11,9kV-380/220V da unidade consumidora com múltiplas unidades de consumo possui 99,92541% de disponibilidade e tempo médio para falhar de 14,7 anos. A partir destes dados conclui-se que o sistema elétrico da subestação possui alta confiabilidade.

Palavras-chave: Confiabilidade, Subestação, Métodos de Análise, Cadeia de Markov, Árvore de Falhas, Diagrama de Ishikawa.

ABSTRACT

The study of system reliability, in addition to contributing to technological evolution, can be used as a support tool for the project, planning and risk analysis areas of companies in decision-making. In this way, reliability engineering can contribute to the modernization and technological evolution of facilities, as well as to the improvement of reliability, safety, availability of electrical systems and quality of service provided by the company. In this sense, this work aims to present a reliability study applied to two 11.9kV-380/220V substations of a consumer unit with multiple consumption units of a public judicial body in Brazil. For this, theoretical concepts of probability applied in the modeling of failures of components and elements analyzed with series, parallel and mixed configurations in the system are explored. For the development of the work, the following methods of analysis of complex systems are used: Markov Chain, Fault Tree and Ishikawa Diagram. The Markov Chain method was adopted for modeling the equations that describe the state transition of the equipment, components and elements that make up the substation. For the analysis of topological changes in substations, the average time to failure, repair rates, average time to repair and availability were considered as reliability indicators, applied to the Fault Tree method, using the software's TopEvent FTA and MS Excel. Finally, the Ishikawa Diagram was used in the evaluation of the processes and procedures that extend to the management, environment and items of the substation (causes) susceptible to failures. From the analysis of the results obtained in this study, it was found that the 11.9kV-380/220V substations of the consumer unit with multiple consumption units have 99.92541% availability and an average time to failure of 14.7 years. From these data it can be concluded that the electrical system of the substation has high reliability

Keywords: Reliability, Substation, Analysis Methods, Markov Chain, Fault Tree, Ishikawa Diagram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Venn para interseção.....	24
Figura 2: Diagrama de Venn para exclusão.....	24
Figura 3: Diagrama de Venn para união.....	25
Figura 4: Diagrama de Venn para complementar.....	25
Figura 5: Diagrama de Venn para diferença.....	26
Figura 6: Diagrama de Venn de eventos independentes.....	26
Figura 7: Diagrama de Venn da união eventos independentes.....	27
Figura 8: Sistema em série.....	30
Figura 9: Sistema em paralelo.....	31
Figura 10: Sistema misto.....	32
Figura 11: Tipos de eventos de uma árvore de falhas.....	34
Figura 12: Portas lógicas mais comuns em árvores de falhas.....	34
Figura 13: Símbolo, tabela verdade e expressão da porta lógica OR.....	35
Figura 14: Símbolo, tabela verdade e expressão da porta lógica AND.....	35
Figura 15: Símbolo, tabela verdade e expressão da porta lógica NOT.....	36
Figura 16: Símbolo, tabela verdade e expressão da porta lógica NOR.....	36
Figura 17: Símbolo, tabela verdade e expressão da porta lógica NOR.....	37
Figura 18: Árvore de falha genérica.....	37
Figura 19: Diagrama de Ishikawa genérico.....	38
Figura 20: Trajeto discreto.....	41
Figura 21: Trajeto contínuo.....	41
Figura 22: Processo $X_t(t)$	42
Figura 23: Transição de estados do processo $X_t(t)$	42
Figura 24: Probabilidades de estado em função do espaço de tempo do processo $X_t(t)$	45
Figura 25: Procedimento utilizado para a análise de falhas.....	54
Figura 26: Árvore de falhas com eventos terminais e intermediários.....	55
Figura 27: Classificação dos eventos de uma árvore de falhas.....	56
Figura 28: Agrupamento de eventos para obtenção dos cortes mínimos.....	57
Figura 29: Interface do software TopEvent FTA.....	60
Figura 30: Árvore de falhas computadorizada.....	60
Figura 31: Configuração do modelo probabilístico de falha.....	61
Figura 32: Indicadores da árvore de falhas computadorizada.....	62
Figura 33: Diagrama Unifilar de Proteção da instalação elétrica com múltiplas unidades consumidoras.....	65
Figura 34: Modelo de confiabilidade dos componentes e elementos.....	66
Figura 35: Modelo de antecipação à falha.....	66
Figura 36: Cadeia de Markov para os componentes e elementos da subestação.....	71
Figura 37: Zonas de falha do sistema.....	75
Figura 38: Zona de falha 01.....	76
Figura 39: Árvore de falhas da Zona 01.....	77
Figura 40: Zona de falha 02.....	78
Figura 41: Árvore de falhas da Zona 02.....	78
Figura 42: Zona de falha 03.....	79
Figura 43: Árvore de falhas da Zona 03.....	80
Figura 44: Zona de falha 04.....	81
Figura 45: Árvore de falhas da Zona 04.....	81

Figura 46: Zona de falha 05.	82
Figura 47: Zona de falha 05.	83
Figura 48: Diagrama de Ishikawa para análise de falha da subestação.	85
Figura 49: Árvore de falhas para falha total do sistema.	86
Figura 50: Árvore de falhas da Subestação 01.	87
Figura 51: Árvore de falhas da Subestação 02.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo da IEEE sobre falhas de transformadores.....	67
Tabela 2: Resumo da IEEE sobre falhas de disjuntores.....	67
Tabela 3: Resumo sobre o MTTF de fusíveis.....	68
Tabela 4: Resumo da IEEE sobre falhas de alimentadores.....	68
Tabela 5: Resumo para falhas de barramentos.....	69
Tabela 6: Resumo dos dados dos componentes e elementos.....	69
Tabela 7: Aplicação do modelo de confiabilidade aos componentes e elementos da subestação.....	70
Tabela 8: Indicadores de confiabilidade da Zona 01.....	77
Tabela 9: Indicadores de confiabilidade da Zona 02.....	79
Tabela 10: Indicadores de confiabilidade da Zona 03.....	82
Tabela 11: Indicadores de confiabilidade da Zona 04... Erro! Indicador não definido.	
Tabela 12: Indicadores de confiabilidade da Zona 05.....	84
Tabela 13: Indicadores de confiabilidade gerais do sistema.....	87
Tabela 14: Indicadores de confiabilidade da Subestação 01.....	88
Tabela 15: Indicadores de confiabilidade da Subestação 02.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Quadro resumo com esquema de funcionamento de sistemas em série e paralelo.	59
Quadro 2: Probabilidades dos eventos do modelo de confiabilidade.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AAF	Análise de Árvore de Falhas
APQP	<i>Advanced Product Quality Planing and Control Plan</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MTTB	<i>Mean Time between failures</i>
MTTF	<i>Mean Time To Fail</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
SE	Subestação
CM	Corte mínimo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. JUSTIFICATIVA.....	18
1.2. MOTIVAÇÃO	19
1.1.1. OBJETIVO GERAL.....	19
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1. INTRODUÇÃO.....	22
2.2. CONCEITO E MÉTODOS APLICÁVEIS AO ESTUDO DE CONFIABILIDADE	22
2.2.1. MODELAGEM PROBABILÍSTICA.....	23
2.2.1.1. TEORIA DAS PROBABILIDADES	23
2.2.1.2. OPERAÇÕES COM EVENTOS ALEATÓRIOS	23
2.2.1.2.1. INTERSEÇÃO	23
2.2.2.2.2. EXCLUSÃO	24
2.2.2.2.3. UNIÃO	24
2.2.2.2.4. COMPLEMENTAR.....	25
2.2.2.2.5. DIFERENÇA.....	25
2.2.2.2.6. INDEPENDÊNCIA DE EVENTOS.....	26
2.2.3. MODELO DE FALHA.....	27
2.2.4. MODELAGEM DAS TOPOLOGIAS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS	29
2.2.4.1. SISTEMA SÉRIE	29
2.2.4.2. SISTEMA PARALELO	31
2.2.4.3. SISTEMA MISTO	32
2.2.5. MÉTODOS DE ANÁLISE DE SISTEMAS COMPLEXOS	33
2.2.5.1. ÁRVORE DE FALHAS.....	33
2.2.5.2. DIAGRAMA DE ISHIKAWA	38
2.2.5.3. MODELO DE MARKOV.....	40
2.2.5.3.1. PROCESSOS ESTOCÁSTICOS	40
2.2.5.3.2. PROCESSOS MARKOVIANOS.....	41
2.2.5.3.3. CADEIA DE MARKOV	42
2.2.6. TAXONOMIA DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	45
2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
3. METODOLOGIA	48
3.1. INTRODUÇÃO.....	48
3.2. SUBESTAÇÃO	48

3.3.	MODELO DE MARKOV PARA ESTUDO DE CONFIABILIDADE DA SUBESTAÇÃO..	51
3.3.1.	EQUACIONAMENTO DOS CONCEITOS PARA O ESTUDO DE CONFIABILIDADE	51
3.3.1.1.	TEMPO MÉDIO PARA FALHAR	51
3.3.1.2.	TAXAS DE REPAROS	52
3.3.1.3.	TEMPO MÉDIO PARA REPARAR	52
3.3.1.4.	DISPONIBILIDADE	52
3.3.1.5.	INDISPONIBILIDADE	52
3.4.	MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHAS	53
3.5.	ÁRVORE DE FALHAS	54
3.5.1.	IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS	55
3.5.2.	CORTES MÍNIMOS.....	56
3.5.3.	PORTAS LÓGICAS.....	58
3.6.	SOFTWARE TOPEVENT FTA.....	59
3.7.	DIAGRAMA DE ISHIKAWA.....	62
3.8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
4.	ESTUDO DE CASO	64
4.1.	INTRODUÇÃO.....	64
4.2.	PLANTA ELÉTRICA COM MÚLTIPLAS UNIDADES CONSUMIDORAS	64
4.3.	MODELO DE MARKOV APLICADO A SUBESTAÇÃO.....	65
4.4.	ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS APLICADA A SUBESTAÇÃO	74
4.5.	DIAGRAMA DE ISHIKAWA APLICADO A SUBESTAÇÃO	84
4.6.	RESULTADOS	86
4.7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	89
5.1.	CONCLUSÃO	89
5.2.	TRABALHOS FUTUROS	91

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade, quando abordada em um contexto genérico, pode ser entendida como a probabilidade de um sistema executar as suas funções de maneira satisfatória, em um determinado intervalo de tempo, de modo a permanecer operante em certas condições (SCAPIN, 2013). Nesse contexto, um sistema é considerado um conjunto integrado de elementos dependentes e inter-relacionados utilizados para cumprir um objetivo pré-definido (*PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE*). Dentro deste contexto, compreende-se que uma subestação, entendida como um conjunto de equipamentos, componentes e elementos com o objetivo de garantir o fluxo de potência em um sistema elétrico, a fim de assegurar o fornecimento de energia aos consumidores, é considerada um sistema e, portanto, pode ser estudado por meio da engenharia da confiabilidade.

Deste modo, adotou três métodos para a realização do estudo de confiabilidade deste trabalho: Modelo de Markov, Árvores de Falhas e Diagrama de Ishikawa. A utilização dos métodos citados está associada ao desejo de se aplicar o estudo sobre três vertentes: a análise sobre o ponto de vista dos componentes (Modelo de Markov), a análise sobre ponto de vista do sistema (Árvores de Falhas), que é composto pelos componentes analisados no Modelo de Markov e, por fim, a análise sobre o ponto de vista da qualidade do processo na execução das funcionalidades do sistema (Diagrama de Ishikawa), de modo a identificar as falhas e propor melhorias.

Em (SCAPIN, 2013) o autor explora diferentes aspectos da análise sistêmica de falhas, que se trata de uma revisão crítica de um estudo com base nas definições e nos dados difundidos na literatura da área de aplicação, como por exemplo os tipos de falhas de componentes, os requisitos das análises qualitativa – quando se trata da identificação das vulnerabilidades do sistema – e quantitativa – quando se trata da estimativa de probabilidades de eventos –, a manutenção baseada em confiabilidade, a construção da Análise de Árvore de Falhas (AAF) computadorizadas, dentre outros.

De acordo com (SCAPIN, 2013), a AAF é uma técnica analítica, amplamente utilizada, que possibilita aferir a confiabilidade e, conseqüentemente, a segurança de um sistema, de modo a permitir o cálculo da probabilidade da ocorrência de eventos indesejados, denominados eventos de topo, em função dos indicadores adotados, e

por meio de operações booleanas, que são operações matemáticas provenientes da álgebra booleana, desenvolvida por George Boole, entre as variáveis do sistema de numeração binário, amplamente utilizado para representar eventos lógicos.

Apesar da AAF ser bastante utilizada, um estudo de confiabilidade não deve ser baseado apenas na análise sistemática, em adição, é necessário compreender os efeitos dos módulos de falha de cada componente e funções dos elementos que compõem um sistema ou subsistema (SCAPIN, 2013). Neste sentido, os autores (ARENTZ, 2001) e (JENS, 2006) exploram metodologias para avaliar os efeitos de falhas nos elementos de subestações, utilizando métodos de cálculo que modelam e avaliam os indicadores de confiabilidade, que impactam diretamente na transição de estados dos elementos.

Um sistema está sujeito à falhas, mesmo após a aplicação da engenharia de confiabilidade para solução dos problemas, porque, na realidade, os eventos no sistema elétrico são imprevisíveis e possuem diversas causas. Nesse contexto, faz-se necessário a aplicação de ferramentas de qualidade, tais como o Diagrama de Ishikawa, para a melhoria contínua do processo analisado. O Diagrama de Ishikawa é uma ferramenta utilizada com o intuito de auxiliar na organização e na identificação das resoluções das falhas, a fim de entender a relação causa e efeito e, por consequência, alcançar tempos de antecipação às falhas favoráveis (SENAI, 2015).

1.1. Justificativa

Quando se trata do fornecimento de energia elétrica, há uma grande necessidade de se ter um sistema confiável e disponível, portanto, torna-se fundamental evitar a ocorrência de falhas. Todavia, tais eventos são imprevisíveis e possuem diversas origens, de modo que a rápida recuperação do fornecimento de energia, quando as falhas não puderem ser evitadas, se torna indispensável.

As falhas que podem ocasionar tais interrupções possibilitam a origem de consequências críticas diversas, de acordo com as características e com a finalidade de desenvolvimento do sistema, pois podem haver impactos sobre a segurança de estados inseguros, prejuízos financeiros e até à vida humana. Sendo assim, torna-se

substancial o estudo de confiabilidade dos sistemas, com o objetivo de mitigar tais impactos, seja na ocorrência ou na antecipação às falhas.

1.2. Motivação

O estudo de confiabilidade desenvolvido neste trabalho tem por motivação analisar os indicadores de confiabilidade das subestações, de forma a conhecer o nível de disponibilidade do fornecimento de energia contínuo para o órgão público em estudo. Vale ressaltar que a indisponibilidade do sistema abordado impacta diretamente no serviço público, por meio dos seguintes pontos:

- a) Interrupção não planejada da prestação do serviço público judiciário (audiências, julgamentos, entre outros), motivada pela falha do sistema de fornecimento de energia elétrica.
- b) Prejuízos financeiros quanto aos equipamentos, componentes, elementos, manutenção corretiva, etc, em decorrência da falha do sistema.
- c) Risco sob os equipamentos responsáveis pela infraestrutura, armazenamento de dados essenciais, informações, dentre outros.

1.1.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados do estudo de confiabilidade de subestações de múltiplas unidades consumidoras, baseado nos métodos de Cadeias de Markov, Análise de Árvore de Falhas e Diagrama de Ishikawa.

1.1.2. Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos para o desenvolvimento do estudo de confiabilidade:

- Levantar os dados da subestação 11,9 kV-380/220 V para aplicar nos métodos de análise utilizados;
- Calcular os indicadores de confiabilidade do sistema;
- Modelar os principais equipamentos, componentes e elementos de uma subestação sob a forma de espaços de estados simplificados para aplicação das Cadeias de Markov;

- Modelar as árvores de falhas da topologia do sistema, a fim de concluir a probabilidade do evento indesejado (falha do sistema);
- Analisar os processos e procedimentos que impactam na integridade do sistema por meio do Diagrama de Ishikawa.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica e apresenta os conceitos e métodos aplicáveis ao estudo de confiabilidade. Inicialmente, é realizada uma revisão sobre a teoria das probabilidades, visto que, a conclusão dos indicadores depende diretamente de relações probabilísticas. Em seguida, é estabelecido o modelo de falha dos componentes utilizados, baseado na distribuição de probabilidade exponencial posteriormente, a modelagem de sistemas é discutida, abordando os sistemas em série, paralelo e misto. Por fim, os métodos de análise utilizados são apresentados, envolvendo os conceitos necessários para o seu desenvolvimento e aplicação.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para a realização do estudo, as definições e características dos equipamentos, dos componentes e elementos abordados no decorrer deste trabalho. Ademais, é realizado o equacionamento dos conceitos de confiabilidade, que permitem concluir a representação matemática do tempo médio para falhar, taxas de reparos, tempo médio para reparar, disponibilidade e indisponibilidade, que compõem a modelagem das Cadeias de Markov. Além disso, é apresentado o *software TopEvent FTA*, responsável pela montagem das árvores de falhas, e a metodologia para a construção do Diagrama de Ishikawa é discutida.

O Capítulo 4 apresenta a topologia da rede elétrica abordada neste trabalho, bem como a aplicação dos métodos de análise de sistemas complexos supramencionados, permitindo o desenvolvimento das Cadeias de Markov dos equipamentos, componentes e elementos e, por consequência, a modelagem das árvores de falhas do sistema no *software TopEvent FTA*, concluindo os indicadores de confiabilidade do evento de topo. Enfim, o Diagrama de Ishikawa para análise das falhas das subestações é desenvolvido.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões, sugestões de melhorias e trabalhos futuros que se relacionam com a linha de estudo explorada neste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Introdução

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico sobre confiabilidade aplicada a sistemas elétricos, bem como os principais conceitos que possibilitam e complementam a análise da confiabilidade de um sistema, como a modelagem probabilística, a modelagem de sistemas e os métodos de análise de sistemas complexos.

2.2. Conceito e métodos aplicáveis ao estudo de confiabilidade

De acordo com a (ABNT, 1994), a confiabilidade de um componente, equipamento, subsistema, sistema ou unidade funcional consiste na capacidade dos mesmos de realizar as suas funções, de forma individual, perante condições especificadas em um determinado período de tempo.

A confiabilidade também é definida como a probabilidade de um item permanecer em funcionamento, de acordo com as expectativas do seu usuário, em função do ambiente em que ele se encontra e nas circunstâncias cíclicas estabelecidas (AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2008). Sendo assim, associado ao conceito de confiabilidade, existem dois aspectos principais: disponibilidade e segurança.

A segurança de um sistema está associada a probabilidade em que ele permanece fora do estado inseguro continuamente, por um determinado intervalo de tempo, ou seja, no eventual caso de defeito ou condição anormal, o sistema não deve falhar, assim como a disponibilidade de um sistema está associada a probabilidade em que ele pode operar de forma correta, em conformidade com a execução das suas funções quando solicitadas (JENS, 2006).

Portanto, a seguir são apresentados os principais fundamentos nos estudos de confiabilidade de um sistema sobre os diferentes aspectos teóricos e práticos para análises quantitativas e qualitativas.

2.2.1. Modelagem probabilística

A modelagem probabilística aplicada à confiabilidade, tem por objetivo aferir a probabilidade de um determinado componente em estar disponível para desempenhar suas atribuições em função do seu tempo de operação. Dessa forma, para estimar a disponibilidade de um componente são necessários o entendimento e a compreensão dos conceitos básicos de probabilidade e estatística aplicados à ocorrência de eventos aleatórios (FARIAS; LAURENCEL, 2007).

2.2.1.1. Teoria das probabilidades

A teoria das probabilidades é o ramo da Matemática que busca estudar fenômenos e experimentos aleatórios para analisar as chances de um determinado evento ocorrer baseado em seu espaço amostral, tendo por objetivo modelar matematicamente conceitos em geral, tais como possibilidade, risco, chance, incerteza, entre outros (TEIXEIRA; MORGADO, 2011).

O espaço amostral Ω de um evento aleatório pode ser compreendido como o conjunto dos possíveis resultados da ocorrência deste evento. Deste modo, quando um espaço amostral possui uma quantidade de resultados enumerável, é denominado finito ou infinito enumerável. Em contrapartida, quando não enumerável, o espaço amostral é considerado contínuo (FARIAS; LAURENCEL, 2007).

Em (FARIAS; LAURENCEL, 2007), a definição clássica da probabilidade é:

Seja A um evento de um espaço amostral Ω finito, cujos elementos são igualmente prováveis. Define-se a probabilidade do evento A através da (equação 2.1):

$$Pr(A) = \frac{(\text{número de casos favoráveis})}{(\text{numero de casos possíveis})} \quad (2.1)$$

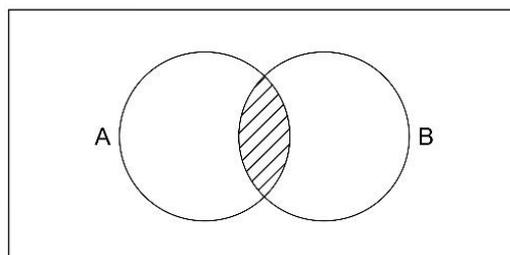
2.2.1.2. Operações com eventos aleatórios

2.2.1.2.1. Interseção

O evento interseção de dois eventos denominados A e B é equivalente à ocorrência concomitante de A e B . A notação matemática oriunda da Teoria das

Probabilidades que representa o evento interseção de A e B é representada por $A \cap B$ e lê-se: A interseção B (FARIAS; LAURENCEL, 2007). Na Figura 1 é mostrada a representação do resultado da interseção de dois eventos.

Figura 1: Diagrama de Venn para interseção.

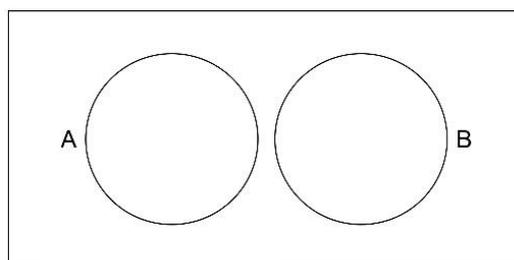


Fonte: O próprio Autor.

2.2.2.2.2. Exclusão

A exclusão de dois eventos A e B acontece quando os mesmos não podem ocorrer concomitantemente, ou seja, a ocorrência de A impossibilita a ocorrência de B e vice-versa. Neste caso, A e B são considerados mutuamente exclusivos e pode-se dizer que não há elementos em comum entre eles, isto é, a interseção entre A e B é o conjunto vazio e é representada por $A \cap B = \emptyset$ (FARIAS; LAURENCEL, 2007). Na Figura 2 é mostrada a representação do resultado da exclusão de dois eventos.

Figura 2: Diagrama de Venn para exclusão.



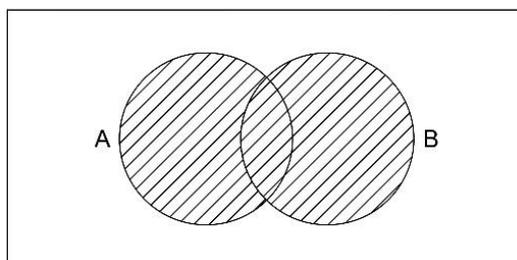
Fonte: O próprio Autor.

2.2.2.2.3. União

A união de dois eventos A e B é o evento que equivale à ocorrência de ao menos um deles, ou seja, o evento A pode ocorrer, mas B pode não ocorrer, assim como, B pode ocorrer e A não ocorrer e ainda A e B podem ocorrer concomitantemente. A

representação do evento união é $A \cup B$ (FARIAS; LAURENCEL, 2007). Na Figura 3 é mostrada a representação do resultado da união de dois eventos.

Figura 3: Diagrama de Venn para união.

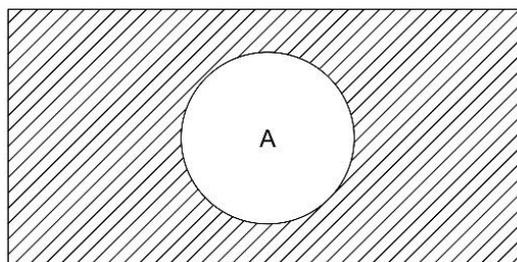


Fonte: O próprio Autor.

2.2.2.2.4. Complementar

O evento complementar de um evento A, representado por \bar{A} , é definido como a negação de A. Deste modo, o complementar do evento A é composto pelos elementos que não pertencem à A. Na Figura 4 é mostrada a representação do complementar de um evento.

Figura 4: Diagrama de Venn para complementar.

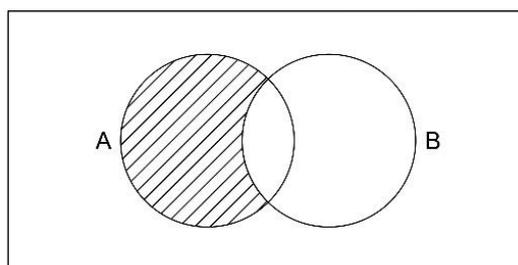


Fonte: O próprio Autor.

2.2.2.2.5. Diferença

A diferença entre dois eventos A e B, denotado por $A - B$, é o evento que contém em seu espaço amostral os elementos pertencentes a A, que não pertencem a B. Este evento pode também ser representado por $A \cap \bar{B}$ (FARIAS; LAURENCEL, 2007). Na Figura 5 é mostrada a representação do resultado da diferença entre dois eventos.

Figura 5: Diagrama de Venn para diferença.



Fonte: O próprio Autor.

2.2.2.2.6. Independência de eventos

Em (FARIAS; LAURENCEL, 2007) dois eventos são considerados independentes quando a ocorrência do evento A não altera o resultado do evento B e vice-versa.

Seja A e B eventos de um espaço amostral Ω , então A e B são independentes se satisfizer a (equação 2.2):

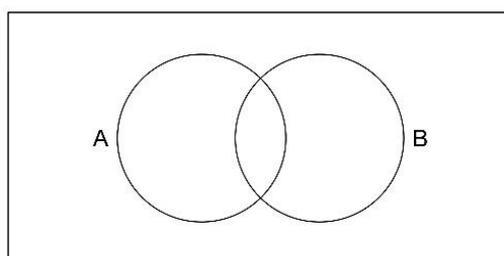
$$Pr(A|B) = Pr(A) \quad (2.2)$$

Consequentemente, a (equação 2.3) é satisfeita:

$$Pr(A|B) = Pr(A) \rightarrow Pr(B|A) = Pr(B) \quad (2.3)$$

O fato de dois eventos serem independentes não anula a possibilidade de os respectivos eventos ocorrerem simultaneamente, sendo assim, é possível representar esse caso por meio do seguinte Diagrama de Venn, demonstrado na Figura 6:

Figura 6: Diagrama de Venn de eventos independentes.



Fonte: O próprio Autor.

A probabilidade dos eventos A e B ocorrerem simultaneamente é representado pela interseção dos eventos, conforme detalhado em 2.2.1.2.1, e representado pela seguinte (equação 2.4):

$$Pr(A \cap B) = Pr(A) \times Pr(B) \quad (2.4)$$

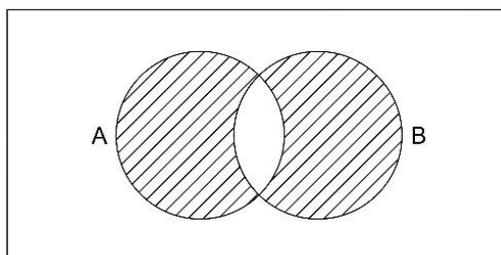
A probabilidade do evento A ou do evento B ocorrerem é representado pelas seguintes operações probabilísticas da (equação 2.5):

$$Pr(A \cup B) = [Pr(A) \cup Pr(B)] - Pr(A \cap B) \quad (2.5)$$

Ademais, é descrito matematicamente através da (equação 2.6) e representado pelos conjuntos mostrados na Figura 7:

$$Pr(A \cup B) = [Pr(A) + Pr(B)] - [Pr(A) \times Pr(B)] \quad (2.6)$$

Figura 7: Diagrama de Venn da união eventos independentes.



Fonte: O próprio Autor.

2.2.3. Modelo de falha

Em (BARROS, 2008) o autor destaca a importância da utilização de um modelo probabilístico para conhecer a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória com o intuito estimar os resultados do seu comportamento em função de um experimento aleatório.

Deste modo, para concluir o estudo presente neste trabalho, com a finalidade de estimar um modelo probabilístico para falha de equipamentos, adotou-se a distribuição exponencial de probabilidade, devido a sua utilização ser amplamente difundida nas aplicações na literatura da engenharia da confiabilidade. Ademais, há uma grande relevância quanto a sua propriedade de “falta de memória”, que permite

modelar de forma ideal os eventos de falhas a serem explorados no decorrer deste trabalho

A “falta de memória” da função de densidade de probabilidade exponencial representa a independência dos estados futuros em relação aos seus estados passados. Um típico exemplo dessa propriedade é a problemática da fila única: a probabilidade de uma pessoa presente em uma fila há 30 minutos esperar mais 10 minutos é a mesma de uma pessoa que está na fila há 1 minuto esperar mais 10 minutos. Essa é uma característica dos componentes modelados no capítulo Estudo de Caso.

A distribuição de probabilidade é uma função matemática que possibilita a sua determinação em relação a ocorrência de eventos. Existem diversos tipos de distribuição, de forma que a escolha do tipo a ser utilizado impacta diretamente na criação de diferentes hipóteses sobre os eventos analisados (BARROS, 2008).

A distribuição de probabilidade exponencial é definida matematicamente pela (equação 2.7):

$$f(t) = y = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

As variáveis aplicáveis à equação podem ser quaisquer, no entanto, devido ao modelo de falha de equipamentos está diretamente relacionado ao tempo, as variáveis utilizadas possuem as seguintes definições:

$f(t)$ – Função densidade de probabilidade (f.d.p);

t – Tempo médio para a falha do equipamento;

λ – Parâmetro de densidade.

Em (ROSS, 2007), conclui-se que a probabilidade de um evento que possui distribuição exponencial ocorrer é determinada pela (equação 2.8):

$$P(y) = \int_{t_0}^{t_1} f(t) dt \quad (2.8)$$

Logo, substituindo a destruição exponencial na (equação 2.8), a probabilidade do evento é determinada pela (equação 2.9):

$$P(y) = \int_{t_0}^{t_1} \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (2.9)$$

Em que t_0 e t_1 representam o intervalo da variável independente da função $f(t)$.

Dado que $f(t)$ é não negativa e que satisfaz a (equação 2.10):

$$P(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 \quad (2.10)$$

Então, a esperança $E(x)$ (valor médio ou média) de uma função $f(t)$ é definida pela (equação 2.11) (MORETTIN; BUSSAB, 2010):

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dt \quad (2.11)$$

Sendo assim, é possível concluir que a esperança $E(x)$ (valor médio ou média) da (equação 2.9), através da (equação 2.12):

$$E(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.12)$$

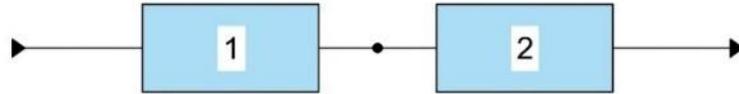
2.2.4. Modelagem das topologias de operação de sistemas

Diante da proposta de analisar a confiabilidade do sistema elétrico posteriormente apresentado, é de extrema importância a compreensão dos conceitos básicos das topologias que serão exploradas, dentre eles os conceitos de sistemas em série, sistemas em paralelo e sistemas mistos.

2.2.4.1. Sistema série

Em (ALEXANDER; SADIKU, 2013), um sistema elétrico é considerado em série se dois ou mais elementos que o compõem compartilhem de um único nó e, conseqüentemente, transportarem a mesma corrente. Na Figura 8 é apresentado um sistema em série.

Figura 8: Sistema em série.



Fonte: O próprio Autor.

Para que o sistema em série representado na Figura 8 opere com sucesso, os elementos 1 e 2 devem ter sucesso em sua operação.

Dado que P_1 e P_2 são as probabilidades dos elementos 1 e 2, respectivamente, operarem com sucesso, a probabilidade de o sistema P_S operar com sucesso é representada pela interseção das probabilidades de os elementos desempenharem suas funções corretamente, determinada pela (equação 2.13)

$$P_S = P_1 \cap P_2 = P_1 \times P_2 \quad (2.13)$$

O sucesso de operação dos elementos e a falha de operação dos mesmos são eventos mutuamente exclusivos, conforme detalhado em 2.2.2.2.2, portanto a probabilidade de falha P_F do sistema é representada pela (equação 2.14):

$$P_F = 1 - P_S = 1 - (P_1 \cap P_2) = 1 - (P_1 \times P_2) \quad (2.14)$$

As probabilidades de falha individuais dos elementos 1 e 2 podem ser descritas, semelhante a probabilidade de falha geral do sistema pela (equação 2.15) e (equação 2.16):

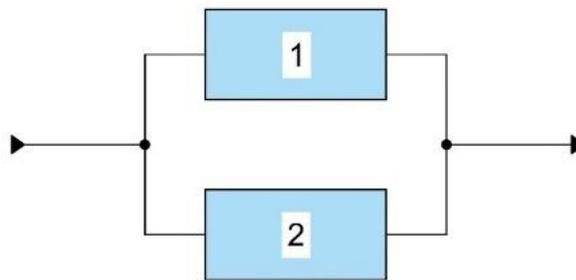
$$P_{F1} = 1 - P_1 \quad (2.15)$$

$$P_{F2} = 1 - P_2 \quad (2.16)$$

2.2.4.2. Sistema paralelo

Em (ALEXANDER; SADIKU, 2013), um sistema elétrico é considerado em paralelo se dois ou mais elementos que o compõem compartilhem de ao menos dois nós e, conseqüentemente, possuírem a mesma tensão. Na Figura 9 é demonstrado um sistema em paralelo.

Figura 9: Sistema em paralelo.



Fonte: O próprio Autor.

Para que o sistema em paralelo representado na Figura 9 opere com sucesso, ao menos o elemento 1 ou o elemento 2 devem ter sucesso em sua operação. Dado que P_1 e P_2 são as probabilidades dos elementos 1 e 2, respectivamente, operarem com sucesso, a probabilidade de o sistema P_S operar com sucesso é representada pela união das probabilidades de os elementos desempenharem suas funções corretamente, determinada pela (equação 2.17)

$$P_S = (P_1 \cup P_2) - (P_1 \cap P_2) = P_1 + P_2 - (P_1 \times P_2) \quad (2.17)$$

O termo $P_1 \cap P_2$ representa a probabilidade de os elementos 1 e 2 operarem com sucesso simultaneamente e é desconsiderado devido a operação dos elementos 1 e 2 serem eventos independentes.

Assim como no sistema em série, o sucesso de operação e a falha dos elementos são eventos mutuamente exclusivos, sendo assim, a (equação 2.18) determina a probabilidade de falha do sistema em paralelo:

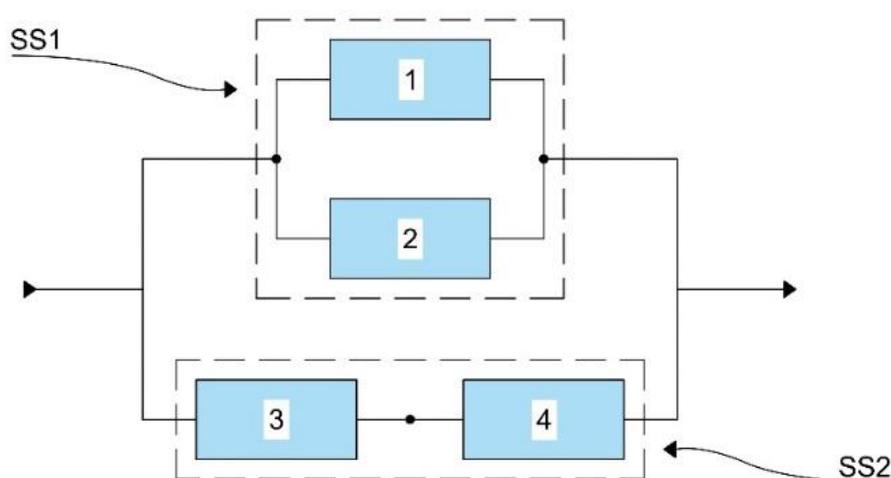
$$P_F = 1 - P_S = 1 - (P_1 \cup P_2) - (P_1 \cap P_2) = 1 - P_1 + P_2 - (P_1 \times P_2) \quad (2.18)$$

As probabilidades de falha dos elementos 1 e 2, respectivamente, são também representadas pela (equação 2.15) e (equação 2.16).

2.2.4.3. Sistema misto

Um sistema elétrico é considerado misto quando em sua topologia há a presença de subsistemas em série e paralelo simultaneamente.

Figura 10: Sistema misto.



Fonte: O próprio Autor.

O subsistema SS1 presente na Figura 10, composto pelos elementos 1 e 2, possui configuração em paralelo, assim como, o subsistema SS2, composto pelos elementos 3 e 4, possui configuração em série. As probabilidades de sucesso de operação dos respectivos subsistemas estão descritas pela (equação 2.13) e (equação 2.17), assim como as probabilidades de falha de operação dos respectivos subsistemas estão descritas pela (equação 2.14) e (equação 2.18).

O cálculo da probabilidade de sucesso de operação do sistema misto segue o mesmo princípio do cálculo de sistemas paralelo, afinal, um sistema misto é um sistema paralelo composto pelos seus subsistemas. Deste modo, aplicando o mesmo princípio de desenvolvimento de conclusão da (equação 2.17), a (equação 2.19) determina o sucesso de operação do sistema misto:

$$P_S = (P_{SS1} \cup P_{SS2}) - (P_{SS1} \cap P_{SS2}) = P_{SS1} + P_{SS2} - (P_{SS1} \times P_{SS2}) \quad (2.19)$$

Em que as probabilidades de sucesso dos subsistemas SS1 e SS2 são determinados pela (equação 2.20) e (equação 2.21), respectivamente:

$$P_{SS1} = (P_1 \cup P_2) - (P_1 \cap P_2) = P_1 + P_2 - (P_1 \times P_2) \quad (2.20)$$

$$P_{SS2} = P_3 \cap P_4 = P_3 \times P_4 \quad (2.21)$$

Dado que P_1 , P_2 , P_3 e P_4 são as respectivas probabilidades de sucesso de operação dos elementos do sistema misto.

2.2.5. Métodos de análise de sistemas complexos

2.2.5.1. Árvore de falhas

A análise de árvore de falhas é a representação de um diagrama de sequência de eventos que permite concluir as possíveis causas de um evento indesejável pré-definido baseado no método dedutivo, ou seja, a causa do evento depende logicamente de suas premissas. Em (LIMA; NAGHETTINI; ESPÓSITO, 2013), o evento indesejável é denominado evento de topo e é a partir dele que a árvore é desenvolvida.

Uma AAF pode ser considerada qualitativa ou quantitativa. Quando qualitativa, tem o objetivo de identificar as vulnerabilidades do sistema ou especificar os tipos de falhas mais sensíveis. Quando quantitativa, o objetivo passa a ser estimar a probabilidade de ocorrência dos eventos, de modo a aferir a confiabilidade do sistema (LIMA; NAGHETTINI; ESPÓSITO, 2013).

O desencadeamento do evento de topo é resultado da ocorrência de outros eventos que o antecedem. Partindo deste princípio, é de extrema importância o conhecimento dos tipos e das características dos eventos da base de uma árvore de falhas. Na Figura 11 são demonstrados os cinco símbolos lógicos dos eventos que são utilizados com maior frequência, bem como os impactos que os mesmos causam na arquitetura da árvore.

Figura 11: Tipos de eventos de uma árvore de falhas.

Símbolo Lógico	Evento	Observações
	Evento intermediário ou evento de topo	-----
	Evento básico	Acontecimento iniciador, falha inicial ou evento que não carece de maior desenvolvimento.
	Evento condicional	Condições específicas ou restrições que se aplicam a qualquer porta lógica.
	Evento exterior	Evento que ocorre habitualmente.
	Evento por desenvolver	Ramo que não é objeto de maior desenvolvimento por não ter importância ou por não haver informação suficiente que o fundamente

Fonte: (BAPTISTA, 2008).

Somente a identificação dos eventos de uma árvore de falhas não é suficiente para a sua construção. Os eventos, quando analisados matematicamente, causam diferentes impacto nos resultados ao se relacionarem de diferentes maneiras. É comum a presença de eventos independentes ou mutuamente exclusivos em árvores de falhas.

A conclusão das probabilidades de ocorrência ou não de tais eventos é possível através do uso dos artifícios matemáticos booleanos aplicado às variáveis binárias, ou seja, variáveis do sistema numérico binário (0 ou 1), comumente utilizadas para representar eventos com dois resultados possíveis, em que por meio de operadores lógicos pode-se obter os seus resultados probabilísticos. Na Figura 12 são mostradas portas lógicas, que funcionam como operadores embasados na matemática booleana, utilizadas na análise de árvore de falhas.

Figura 12: Portas lógicas mais comuns em árvores de falhas.

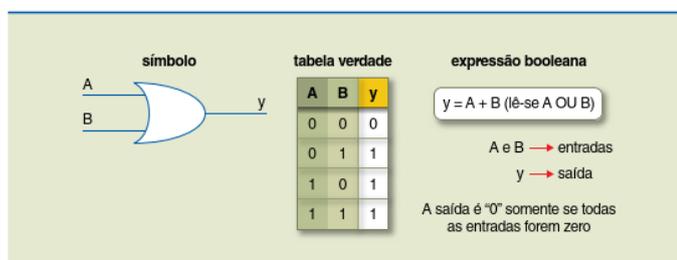
	OR - Executa a soma booleana de duas ou mais variáveis binárias.
	AND - Executa a multiplicação booleana de duas ou mais variáveis binárias.
	NOT - Executa o complemento de uma variável binária.
	NOR - Executa a composição entre a função OR e NOT de duas ou mais variáveis.
	NAND - Executa a composição entre a função AND e NOT de duas ou mais variáveis.

Fonte: O próprio Autor.

a) Porta lógica OR:

Conforme detalhado na Figura 12, a porta lógica OR é responsável, por meio da teoria da matemática booleana, permitir a soma de duas ou mais variáveis binárias, sendo que, em uma árvore de falhas, tais variáveis binárias são representadas pelos possíveis eventos. Na Figura 13 é apresentada a tabela verdade e a expressão booleana da porta lógica OR. Através da tabela verdade é possível concluir que a saída da porta lógica OR sempre é “1” quando qualquer uma de suas entradas é diferentes de “0” (DIAGO; AMARAL, 2011).

Figura 13: Símbolo, tabela verdade e expressão da porta lógica OR.

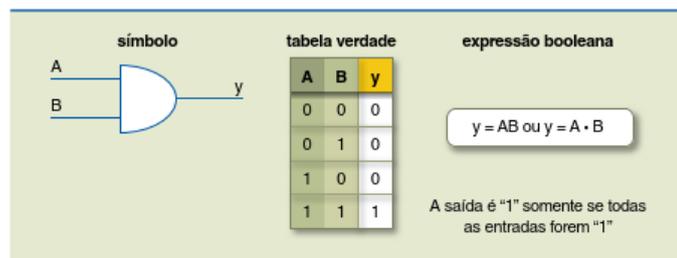


Fonte: (DIAGO; AMARAL, 2011).

b) Porta lógica AND:

A porta lógica AND é responsável por permitir a multiplicação entre variáveis binárias. Na Figura 14 é demonstrada a tabela verdade e a expressão booleana da porta lógica AND. Em sua tabela verdade, percebe-se que, se as suas entradas são diferentes de “1”, a sua saída é “0” (DIAGO; AMARAL, 2011).

Figura 14: Símbolo, tabela verdade e expressão da porta lógica AND.



Fonte: (DIAGO; AMARAL, 2011).

c) Porta lógica NOT:

A porta lógica NOT faz com que a sua saída resulte no complemento da sua entrada, ou seja, se a entrada é “1”, a sua saída é “0”, assim como, se a entrada é “0”, a sua saída é “1”, conforme a tabela verdade presente na Figura 15 (DIAGO; AMARAL, 2011).

Figura 15: Símbolo, tabela verdade e expressão da porta lógica NOT.

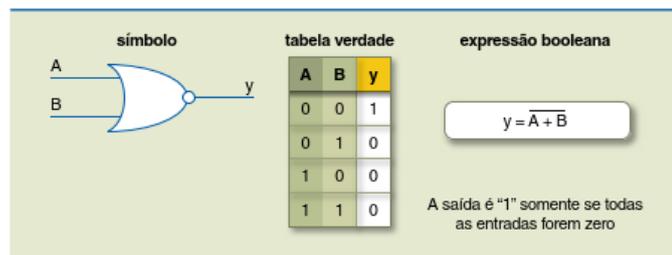


Fonte: (DIAGO; AMARAL, 2011).

d) Porta lógica NOR:

A porta lógica NOR realiza duas operações seguidas em suas entradas. Inicialmente, aplica-se a operação OR em suas entradas e, posteriormente, aplica-se a operação NOT, resultando na tabela verdade demonstrada na Figura 16 (DIAGO; AMARAL, 2011).

Figura 16: Símbolo, tabela verdade e expressão da porta lógica NOR.



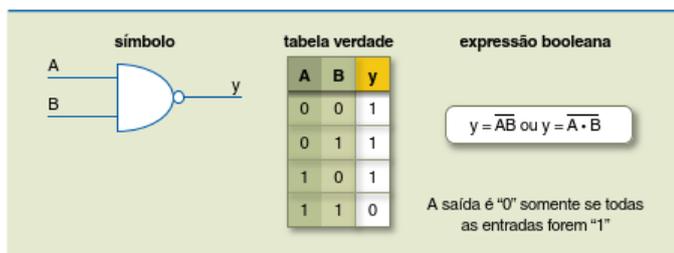
Fonte: (DIAGO; AMARAL, 2011).

e) Porta lógica NAND:

A porta lógica NAND, assim como a NOR, também realiza duas operações seguidas em suas entradas, no entanto, ao invés da aplicação da operação OR, aplica-se a operação AND e, em seguida, a operação NOT. Os resultados da saída da função

NAND em função de suas entradas é demonstrada na Figura 17 (DIAGO; AMARAL, 2011).

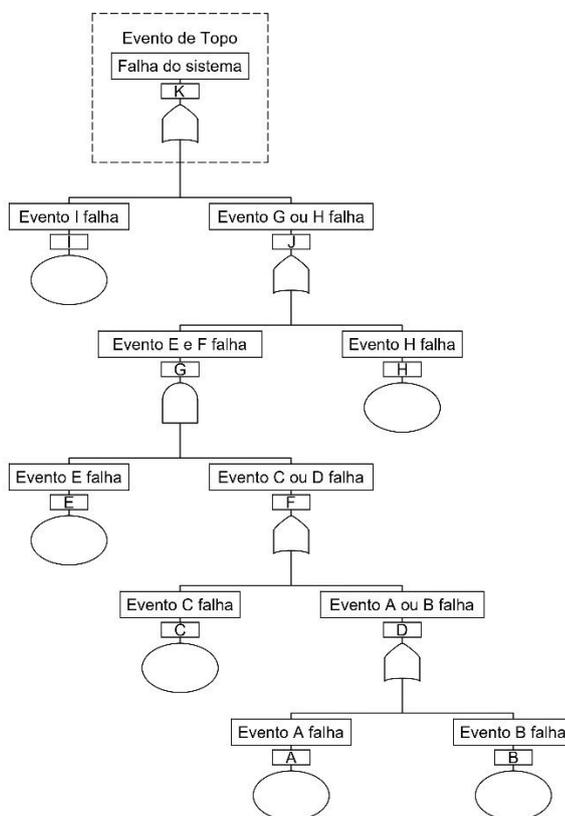
Figura 17: Símbolo, tabela verdade e expressão da porta lógica NOR.



Fonte: (DIAGO; AMARAL, 2011).

Na Figura 18 é mostrada uma árvore de falhas genérica, construída a partir de eventos e de portas lógicas. Conforme pode-se observar na Figura 18, os eventos que representam diferentes falhas relacionam-se entre si por meio de portas OR e AND até a ocorrência do evento de topo, que corresponde a falha do sistema.

Figura 18: Árvore de falha genérica.



Fonte: O próprio Autor.

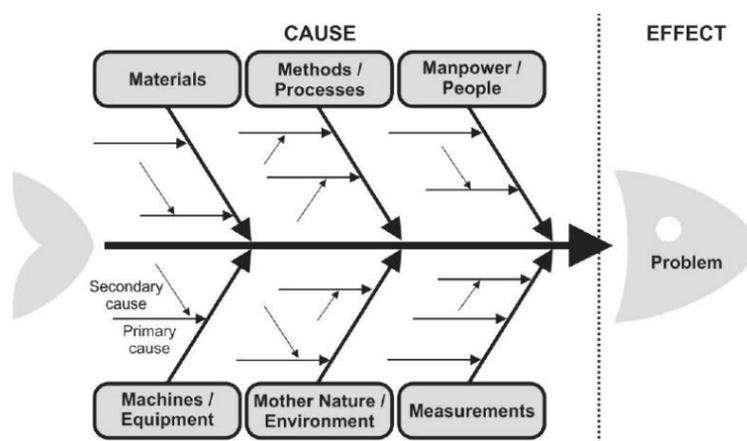
A AAF é um método que pode ser aplicado a diferentes sistemas e níveis de complexidade, permitindo a análise quando já se encontram em operação ou até mesmo ainda em projetos (CABRAL, 2020). Na Figura 18 é evidenciada a importância do método AAF para modelagem, identificação e análise de vulnerabilidades de um sistema. Os resultados podem também ser explorados por meio de análise probabilística, aplicando-se os conceitos de operações com eventos aleatórios, a partir dos quais pode-se obter resultados da indisponibilidade parcial de cada evento e a sua contribuição para a falha do evento de topo.

2.2.5.2. Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito, é uma ferramenta utilizada para relacionar o problema (efeito) com os motivos (causas) que ocasionam a sua ocorrência, com o intuito de erradicá-lo ou melhorar a qualidade do processo (SENAI, 2015).

Em (SENAI, 2015), é definido que um Diagrama de Ishikawa é composto por um conjunto de seis braços, denominado seis M, que tem por objetivo facilitar a busca das causas, não sendo obrigatório o preenchimento de todos os braços para possibilitar a conclusão do efeito das causas. Os seis M que compõem o Diagrama de Ishikawa são: método, mão de obra, matéria-prima, máquina, meio ambiente e medida. Ademais, os seis M são arranjados conforme a representação genérica do Diagrama de Ishikawa da Figura 19:

Figura 19: Diagrama de Ishikawa genérico.



Fonte: (HRISTOSKI, 2017).

Os seis M podem ser classificados da seguinte maneira:

a) Método:

A forma na qual o processo está sendo executado, sendo este um ponto que impacta diretamente o resultado do efeito.

b) Material:

Os materiais, com intuito de culminar num efeito positivo, necessitam atender a determinadas especificações – como manuais, princípios normativos e recomendações dos fabricantes – para assegurar efeitos favoráveis.

c) Mão de obra:

A mão de obra está associada a seleção, treinamento e qualificação dos profissionais que exercem as atividades para garantir o funcionamento do processo ou tarefa.

d) Máquina:

As máquinas representam os equipamentos que são utilizados nos processos produtivos ou auxiliam na execução das diferentes tarefas.

e) Medida:

A medida está associada as ferramentas de qualidades responsáveis por determinar a qualificação e a eficiência dos processos.

f) Meio ambiente

O meio ambiente representa o local que envolve os profissionais de trabalho, e lhes oferecem as condições necessárias, para que eles desempenhem as suas atividades laborais.

Apesar da estrutura supracitada estar no formato original proposto por Kaoru Ishikawa, é possível adaptá-la de acordo a análise desejada, visto que, o modelo proposto nem sempre atende integralmente as diferentes necessidades da

problemática. Por exemplo, é muito comum que em áreas administrativas, diferente dos seis M, o Diagrama de Ishikawa seja voltado aos quatro P: Políticas, Procedimentos, Pessoal e Planta, sendo este adaptado as necessidades da área.

Em (SENAI, 2015) fica claro que o formato de espinha de peixe permite demonstrar de forma clara e objetiva não só as causas principais do problema, como também as secundárias, de maneira a possibilitar uma visão ampla do processo, fortalecer a análise e identificar as soluções, de modo a auxiliar na busca de melhorias.

2.2.5.3. Modelo de Markov

2.2.5.3.1. Processos Estocásticos

Um processo estocástico pode ser compreendido como um conjunto de variáveis aleatórias que são associadas a um parâmetro, podendo ser descritas por distribuições de probabilidade, assumindo diferentes valores aleatórios em um determinado período de tempo (ALVES; DELGADO, 1997).

Para efeito de compreensão, um processo estocástico será qualquer conjunto de variáveis aleatórias $X_t(t)$, com $t \in T$, sendo T um espaço de parâmetros e sendo $K = \{x_0, x_1, x_2, x_3 \dots\}$ o seu espaço de estados.

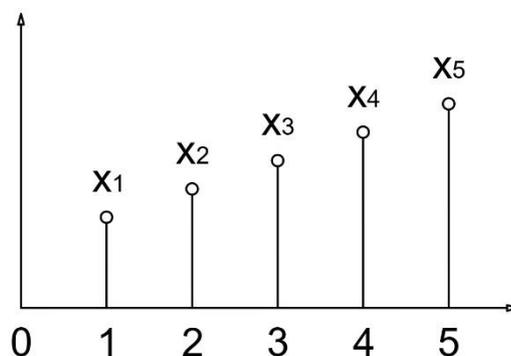
Na maior parte dos casos reais, o espaço de parâmetros é representado pelo tempo, no entanto, nem todos os casos seguem este padrão (HINOJOSA; MILANÉS, 2005). Quando o espaço de parâmetros T é enumerável, o processo estocástico correspondente é considerado a tempo discreto, assim como, se for um intervalo, o processo estocástico é considerado a tempo contínuo.

Além da classificação em função do tempo, um processo estocástico é classificado em função do seu estado. Se X_t assume valores enumeráveis, o processo estocástico tem espaço de estados discreto, caso contrário, o processo tem espaço de estados contínuo.

Se K representa o espaço de estados de um processo estocástico, ou seja, $K = \{x_0, x_1, x_2, x_3 \dots\}$, os trajetos de um processo estocástico podem ser definidos pelas

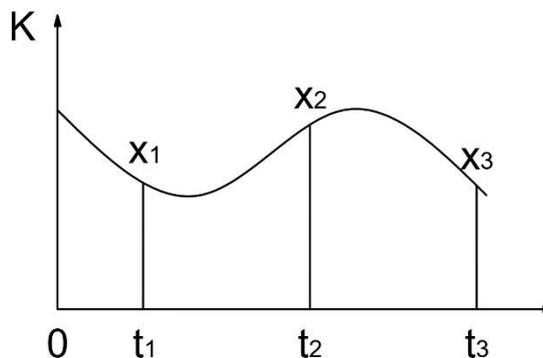
Figuras 20 e 21, em que são mostrados os trajetos discreto e contínuo, respectivamente.

Figura 20: Trajeto discreto.



Fonte: O próprio Autor.

Figura 21: Trajeto contínuo.



Fonte: O próprio Autor.

2.2.5.3.2. Processos markovianos

Em (HINOJOSA; MILANÉS, 2005) um processo estocástico é considerado um processo markoviano caso represente a independência de um evento futuro sobre o seu estado passado, sendo este dependente apenas do seu estado presente. Matematicamente, um processo $X_t(t)$, com espaço de tempo $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{n-1}, t_n \in K$ e um espaço de estados $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$, é considerado markoviano se satisfizer a (equação 2.22):

$$P(X_{t_{n+1}} \leq X_{n+1} | X_{t_n} = x_n, \dots, X_{t_0} = x_0) = P(X_{t_{n+1}} \leq X_{n+1} | X_{t_n} = x_n) \quad (2.22)$$

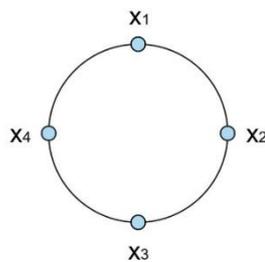
Em outras palavras, para assumir o estado x_{n+1} , o processo $X_t(t)$ não possui dependência dos estados $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ (estados passados), apenas do estado x_n (estado presente). Este fenômeno é nomeado como propriedade de Markov, também conhecido como “perda de memória” (SILVA, 2017).

2.2.5.3.3. Cadeia de Markov

Em (SILVA, 2017) um processo markoviano é considerado uma Cadeia de Markov se os possíveis estados do processo estão definidos em um espaço de estado discreto.

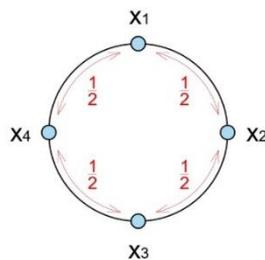
Seja x_1, x_2, x_3 e x_4 o espaço de estados de um processo $X_t(t)$ definido em um espaço de tempo $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$, conforme a Figura 22, assumindo que o primeiro estado do processo sempre será x_1 e que a transição de estados de $X_t(t)$ pode ocorrer apenas para um de seus estados vizinhos, com probabilidade de 50%, conforme a Figura 23, então este processo é considerado uma Cadeia de Markov.

Figura 22: Processo $X_t(t)$.



Fonte: O próprio Autor.

Figura 23: Transição de estados do processo $X_t(t)$.



Fonte: O próprio Autor.

Se o processo inicia no estado x_1 , então a (equação 2.23) determina a primeira iteração de transição de estado do processo:

$$P(X_0 = x_1) = 1 \quad (2.23)$$

Na segunda iteração, a transição de estado deve ser para x_2 ou x_4 com probabilidade de 50%, determinada pela (equação 2.24) ou (equação 2.25):

$$P(X_1 = x_2) = 0,5 \quad (2.24)$$

$$P(X_1 = x_4) = 0,5 \quad (2.25)$$

Na terceira iteração, a transição de estado deve ser para x_1 ou x_3 com probabilidade de 50%, seja $X_1 = x_2$ ou $X_1 = x_4$, determinada pelas (equação 2.26) a (equação 2.29), se:

Se $X_2 = x_2$,

$$P(X_2 = x_1 | X_1 = x_2) = 0,5 \quad (2.26)$$

$$P(X_2 = x_3 | X_1 = x_2) = 0,5 \quad (2.27)$$

Se $X_2 = x_4$,

$$P(X_2 = x_1 | X_1 = x_4) = 0,5 \quad (2.28)$$

$$P(X_2 = x_3 | X_1 = x_4) = 0,5 \quad (2.29)$$

A partir da quarta iteração, vale a mesma análise da terceira iteração, sendo assim, a conclusão do processo é determinada pela (equação 2.30), se $X_{t_{n+1}} = x_{impar}$ for ímpar:

$$P(X_{t_{n+1}} = x_{impar} | X_{t_n} = x_{par}, \dots, X_{t_0} = x_1) = P(X_{t_{n+1}} \leq x_{impar} | X_{t_n} = x_{par}) \quad (2.30)$$

Assim como, é determinada pela (equação 2.31), se $X_{t_{n+1}} = x_{par}$ for ímpar:

$$P(X_{t_{n+1}} = x_{par} | X_{t_n} = x_{impar}, \dots, X_{t_0} = x_1) = P(X_{t_{n+1}} \leq x_{par} | X_{t_n} = x_{impar}) \quad (2.31)$$

Ou seja, $PX_{t_{n+1}}$ depende exclusivamente de X_{t_n} , sendo independente de $X_{t_0}, X_{t_1}, X_{t_2}, X_3, \dots, X_{t_{n-1}}$.

Para melhor representar o desenvolvimento da Cadeia de Markov supracitada, seja M uma matriz $m \times m$ com elementos $P(X_t)_{a \times b}$, tal que, a e $b \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$ e que satisfaça as seguintes condições:

- i) $P(X_t)_{a \times b} \geq 0 \quad \forall a, b \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$
- ii) $\sum_{b=1}^m P(X_t)_{a \times b} = 1 \quad \forall a \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$

Então, M é denominada matriz de transição e os seus elementos são chamados de probabilidade de transição. Sendo assim, a matriz de transição da (equação 2.32) representa o processo das Figuras 22 e 23:

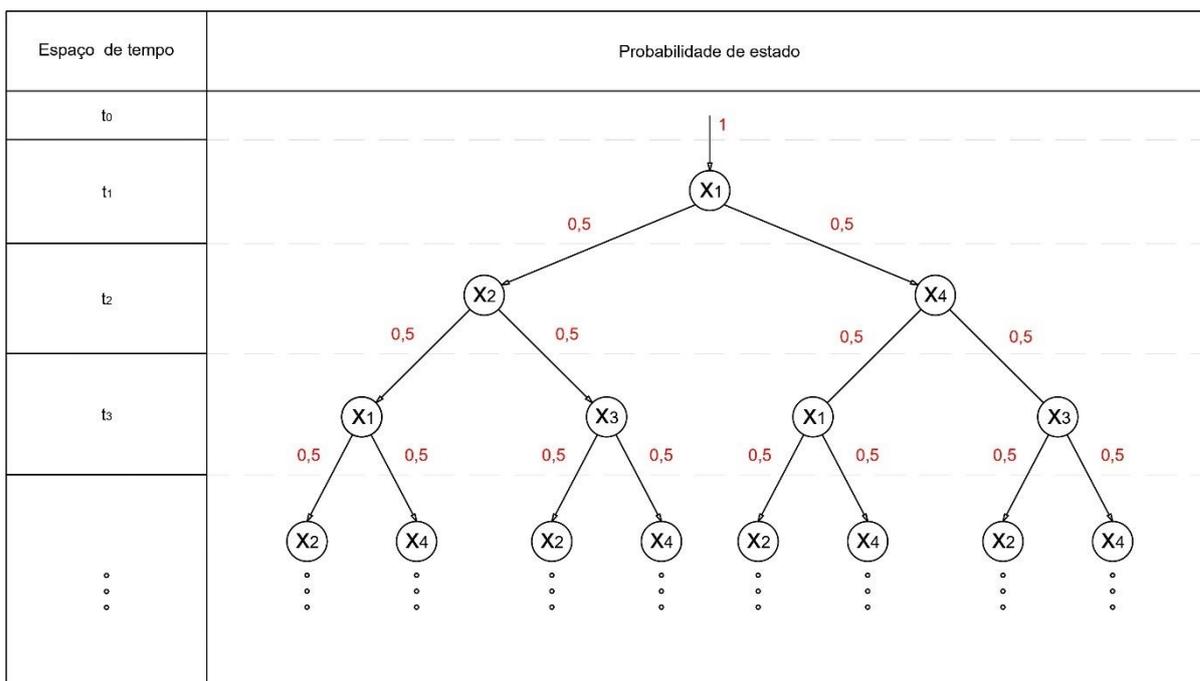
$$M = \begin{bmatrix} 0, \Delta t & 0,5 \cdot \Delta t & 0, \Delta t & 0,5 \cdot \Delta t \\ 0,5 \cdot \Delta t & 0, \Delta t & 0,5 \cdot \Delta t & 0, \Delta t \\ 0, \Delta t & 0,5 \cdot \Delta t & 0, \Delta t & 0,5 \cdot \Delta t \\ 0,5 \cdot \Delta t & 0, \Delta t & 0,5 \cdot \Delta t & 0, \Delta t \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

De modo que a fórmula geral que define a transição do estado atual para o estado seguinte, de acordo com a Cadeia de Markov, pode ser descrito em função do tempo através da seguinte forma matricial da (equação 2.33):

$$\begin{bmatrix} PX_{t_1+\Delta t} \\ PX_{t_2+\Delta t} \\ PX_{t_3+\Delta t} \\ PX_{t_4+\Delta t} \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} PX_{t_0} \\ PX_{t_1} \\ PX_{t_2} \\ PX_{t_3} \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

A (equação 2.34) permite determinar as probabilidades de o sistema encontrar-se em qualquer um dos seus estados em função do tempo. Na Figura 24 é apresentada a Cadeia de Markov do processo $X_t(t)$.

$$P(n \times \Delta t) = M^n \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Figura 24: Probabilidades de estado em função do espaço de tempo do processo $X_t(t)$.

Fonte: O próprio Autor.

2.2.6. Taxonomia da análise de confiabilidade

Em (CABRAL, 2020), é comprovada a importância do estudo de confiabilidade ser realizado e ajustado conforme as necessidades operacionais de uma empresa, com intuito de atendê-las, de modo a garantir um sistema seguro e operante, nesse caso, na análise de um sistema elétrico, é importante o entendimento sobre os conceitos de domínio, critério e fase sob um estudo de confiabilidade (CABRAL, 2020).

A análise de um estudo de confiabilidade aplicada a um sistema elétrico tem por objetivo qualificar se o sistema tem a capacidade de atender a demanda do seu consumidor, oferecendo qualidade, segurança e que o mesmo permaneça dentro dos padrões normativos.

Nos critérios de análise de um estudo de confiabilidade ocorre a avaliação do *trade-off* entre manter um sistema confiável e o seu custo, estimando as despesas e os esforços necessários para efetuar atividades de reparo, sejam elas com equipamentos, mão de obra, projetos, etc. Em (SCAPIN, 2013), o *trade-off* deve levar em conta o tamanho e os parâmetros de produtividade. O tamanho indica o esforço

para garantir a manutenibilidade do sistema e os fatores de produtividade estão relacionados à carga de trabalho demandada para realizar o trabalho. Além disso, (SCAPIN, 2013) lista os seguintes itens como essenciais para analisar o tamanho e os fatores de produtividade de um sistema:

- Quantidade de elementos a serem modelados;
- Requisitos;
- Cenários;
- Estados operacionais;
- Sistemas e componentes de interfaces;
- Sistemas e condições operacionais no nível de atividade e de operação;
- Propriedades dos sistemas e dos componentes;
- Componentes relacionados com seu tipo (hardware, software, data, procedimento operacionais).

Além dos fatores supracitados, outro ponto relevante é a análise de dependências. As dependências podem ocorrer em qualquer nível de um sistema elétrico, visto que, na prática, a intervenção de um elemento pode impactar diretamente em alterações funcionais em outros.

(SCAPIN, 2013) analisa a dependência em três aspectos: uso, complexidade e traceabilidade. O uso relaciona a interferência sobre a arquitetura do sistema em ligar ou desligar um determinado elemento que o compõem. A complexidade é evidenciada no aspecto de que um componente quando acionado nem sempre pode fazer o uso de todas as suas funcionalidades, sendo este ponto relevante para análise de falha e, por fim, a traceabilidade de um sistema permite definir e detectar os modos de falha que podem alterar as características funcionais e encadear na não execução das funcionalidades quando as mesmas forem solicitadas.

De acordo com (CABRAL, 2020), um estudo de confiabilidade tem três fases relevantes: a modelagem, o diagnóstico e o gerenciamento. A modelagem tem por objetivo caracterizar o sistema do estudo, de maneira a representar, especificar e validar seus requisitos funcionais por meio de artifícios matemáticos com a finalidade de concluir seus resultados. O diagnóstico, por sua vez, está associado à conclusão

dos indicadores do estudo, estando diretamente ligado ao gerenciamento, visto que o mesmo se trata das medidas a serem tomadas com base na conclusão. Por fim, o gerenciamento abrange as medidas que devem ser tomadas, em função do diagnóstico a ser realizado.

2.3. Considerações finais

Os estudos supracitados abordaram a definição de confiabilidade aplicada à sistemas elétricos, bem como seus principais aspectos, visando destacar a importância do estudo de probabilidade para análise da confiabilidade de sistemas.

A seguir, o modelo de falha dos elementos explorados neste trabalho foi estabelecido e os conceitos foram expandidos a nível de subsistemas e sistemas, permitindo a tratativa das características dos esquemas em série, paralelo e misto.

Por fim, métodos de análise de sistemas complexos, como Árvore de Falhas, Diagrama de Ishikawa e Modelo de Markov, foram explorados para proporcionar um melhor entendimento das suas aplicações no estudo de confiabilidade apresentados nos próximos capítulos.

3. Metodologia

3.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os componentes de uma subestação, seus modelos de confiabilidade e os equacionamentos probabilísticos de transição de estados por meio do Modelo de Markov do sistema. Ademais, são apresentadas as etapas da montagem e análise de uma Análise de Árvore de Falha (AAF) e o *software TopEvent FTA*, utilizado para gerar os resultados probabilístico da disponibilidade e da contribuição dos eventos parciais para a ocorrência do evento de topo, que culmina na interrupção da operação da subestação. Por fim, são exploradas as problemáticas para desenvolvimento do Diagrama de Ishikawa.

3.2. Subestação

Uma subestação, também denotada por SE, pode ser entendida como um conjunto de equipamentos e elementos – sejam de manobra, medição, proteção, transformação, entre outros – utilizados para garantir o fluxo de potência em um sistema elétrico, de modo a assegurar o suprimento de energia, com qualidade e segurança. (MONTEIRO, 1999).

Qualquer equipamento ou elemento que faça parte de uma subestação está sujeito a deterioração com o passar do tempo ou faltas elétricas, que acaba impedindo os mesmos de desempenharem suas funções de forma ideal (CABRAL, 2020). A deterioração de equipamentos e elementos elétricos é inevitável e ocorre desde a sua inserção no sistema. Deste modo, processos como a manutenção preventiva são de suma importância para preveni-los de eventuais falhas críticas, avaliando as condições físicas ao longo da vida útil dos mesmos. Sem a supervisão necessária, o sistema pode se tornar facilmente inoperante, além de ocasionar possíveis danos físicos aos seus operadores (JUNIOR et al, 2019).

Sendo assim, com o objetivo de realizar a análise de confiabilidade de uma subestação, optou-se por modelar os seguintes elementos e equipamentos: transformador, disjuntor, barramentos, chave seccionadora, chave fusível e alimentadores, por serem os principais componentes de uma subestação e comporem

o diagrama unifilar do projeto elétrico base utilizado para a aplicação do estudo de confiabilidade deste trabalho.

a) Transformador

Os transformadores de força são equipamentos de operação estática que, por meio do fenômeno da indução eletromagnética, permite a transferência de energia de um circuito, denominado primário, para um ou mais circuitos, denominados secundário e terciário, mantendo conservação da potência e da frequência, no entanto, com variação da tensão e da corrente. (SENAI, 2018). Ademais, os transformadores podem se diferenciar em relação a sua isolação: a óleo ou a seco, sendo que, independentemente das possíveis variações, o princípio básico de funcionamento é o mesmo: indução eletromagnética.

b) Disjuntor

Os disjuntores de uma subestação sempre devem estar acompanhados dos seus respectivos relés, sendo estes responsáveis pela detecção das correntes, tensões, potência, etc, de um determinado circuito. Dado que os relés estão ajustados corretamente, os mesmos podem comandar a abertura dos disjuntores, caso seja identificada alguma anormalidade, permitindo a interrupção do fluxo de corrente. A ausência dos relés, caracteriza os disjuntores apenas como chave de manobra, sem qualquer característica de proteção (FILHO, 2013).

A principal função de um disjuntor é interromper correntes consideradas anormais de um circuito durante o menor intervalo de tempo possível, sendo também responsável por interromper correntes operando a plena carga e a vazio, além de energizar os circuitos que operam em condições normais (FILHO, 2013).

c) Barramento

Os barramentos são elementos presentes nos painéis elétricos que permite a passagem do fluxo de corrente das fontes alimentadoras, distribuindo o fluxo para os seus respectivos circuitos. Para a sua aplicação em sistemas elétricos, inicialmente, os barramentos devem ser dimensionados em função da corrente de carga passante

demandada, de modo a suportar mecanicamente as correntes de curto-circuito e termicamente o valor eficaz simétrico das mesmas (FILHO, 2013).

d) Chave seccionadora

A respeito das chaves seccionadoras, de acordo com (ABNT, 2006), uma chave é definida como um dispositivo mecânico que, quando na posição aberta, garante uma distância suficiente de isolamento e, quando na posição fechada, permite a continuidade de um circuito elétrico. A norma também traz a definição de um seccionador, sendo este um dispositivo mecânico com capacidade de abrir e fechar um circuito elétrico, quando se tem a interrupção ou restabelecimento de uma corrente menosprezível, ou no caso de não se obter variação de tensão considerável nos terminais dos seus polos.

A operação das chaves seccionadoras em circuitos com carga ocasiona o desgaste em seus contatos, colocando em risco os seus operadores, portanto, é necessário a constatação de pequenas correntes de magnetização no circuito dos transformadores de potência, para permitir que as chaves seccionadoras sejam operadas. As chaves seccionadoras podem desempenhar diversas e importantes funções, tais como (FILHO, 2013):

- Manobrar circuitos, permitindo a transferência de carga entre barramentos de uma subestação.
- Isolar um equipamento qualquer da subestação, tais como transformadores, disjuntores, etc. para execução de serviços de manutenção ou outra utilidade.
- Propiciar o by-pass de equipamentos, notadamente os disjuntores e religadores da subestação.

e) Chave fusível

A chave fusível, ou seccionador fusível, é um dispositivo de segurança que permite a interrupção do fluxo de corrente elétrica quando a mesma alcançar magnitude superior a corrente nominal a qual a chave foi projetada, impedindo um curto-circuito. A sua principal função é de, acoplado a um seccionador interruptor,

garantir a proteção dos transformadores de potência dessas correntes de alta magnitude, especialmente, devido a sua característica de atuação em intervalos de tempo extremamente pequenos (SENAI, 2018).

f) Alimentadores

Os alimentadores são cabos elétricos de interconexão entre os barramentos dos painéis e os diversos pontos de cargas que possuem baixa resistência elétrica, de maneira a permitir a passagem de corrente ao longo de si, dado que exista uma diferença de potencial entre seus terminais (FILHO, 2013).

3.3. Modelo de Markov para estudo de confiabilidade da subestação

Com o intuito de definir a modelagem de falha dos componentes da subestação, é definido que os seus possíveis estados de transição são três: estado normal, estado crítico e falha. Ademais, é necessário realizar o equacionamento de alguns conceitos que possibilitam o estudo de confiabilidade, como o tempo médio para falhar, as taxas de reparo, o tempo médio para reparar e a disponibilidade.

3.3.1. Equacionamento dos conceitos para o estudo de confiabilidade

Este tópico tem por objetivo apresentar o equacionamento dos conceitos relevantes para o estudo de confiabilidade, explorados no decorrer deste trabalho, como o tempo médio para falhar de um elemento, as taxas de reparos, o tempo médio para reparar e a disponibilidade.

3.3.1.1. Tempo médio para falhar

O tempo médio para falhar (MTTF – *Mean Time To Fail*) de um elemento ou de um sistema representa a sua esperança de falha. Em outras palavras, o MTTF representa o tempo médio do elemento ou sistema operar corretamente até que o mesmo apresente um defeito ou falha.

Como o MTTF representa o tempo médio para falhar e, conforme explorado em 2.2.3, a esperança de uma função densidade de probabilidade representa o valor

médio ou a média de uma função específica, o MTTF é equivalente à esperança da distribuição de probabilidade exponencial, podendo ser calculado pela (equação 3.1):

$$MTTF = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3.1)$$

em que o parâmetro de densidade, para este caso, é determinado pela (equação 3.2):

$$\lambda = \frac{\text{número médio de falhas}}{\text{tempo}} \quad (3.2)$$

3.3.1.2. Taxas de reparos

A taxa de reparo μ representa a média da quantidade de reparos possíveis de um componente por unidade de tempo, deste modo, a (equação 3,3) determina a taxa de reparos:

$$\mu = \frac{\text{número médio de reparos}}{\text{tempo}} \quad (3.3)$$

3.3.1.3. Tempo médio para reparar

Análogo ao MTTF, o tempo médio para reparar (*MTTR – Mean Time To Repair*) um componente representa, em média, o tempo dedicado para realizar o reparo do mesmo, podendo ser calculado pela (equação 3.4):

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (3.4)$$

3.3.1.4. Disponibilidade

A disponibilidade de um elemento ou sistema é definida como a probabilidade dos mesmos se encontrarem em estado operante em determinado intervalo de tempo e pode ser calculada pela (equação 3.5):

$$D = \text{Disponibilidade} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (3.5)$$

3.3.1.5. Indisponibilidade

A partir do equacionamento da disponibilidade, é possível concluir, por consequência, a indisponibilidade de um determinado componente, visto que, como a disponibilidade e a indisponibilidade são eventos mutuamente exclusivos, então a indisponibilidade é definida pela (equação 3.6):

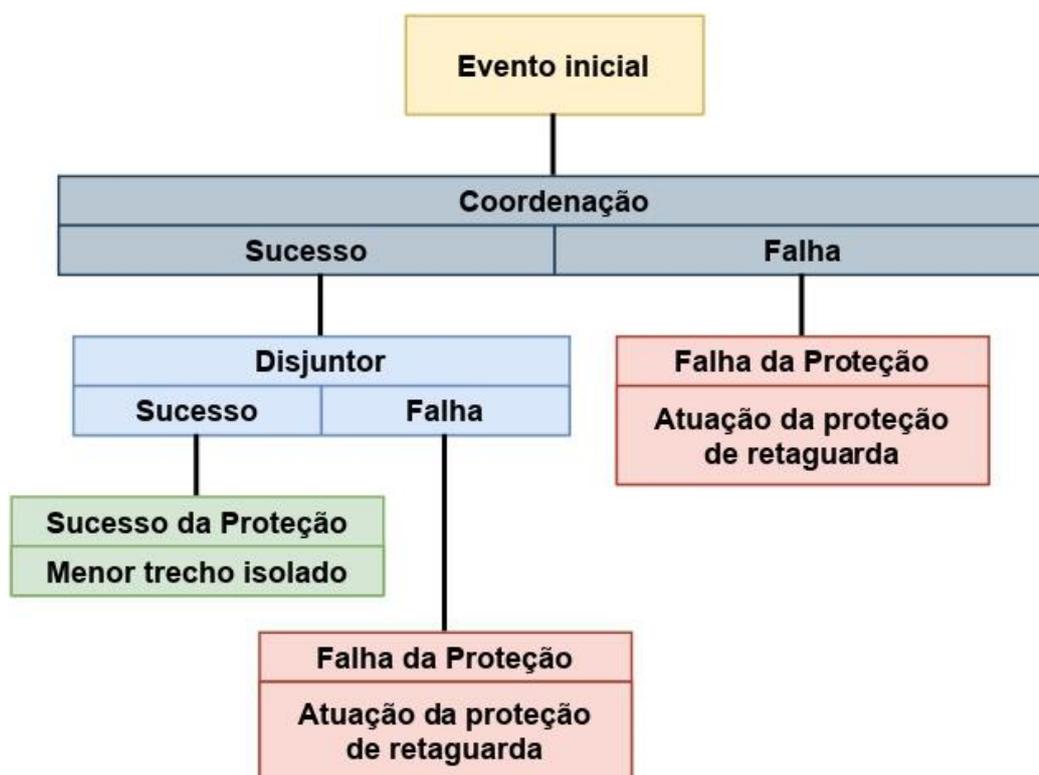
$$Q = \text{Indisponibilidade} = 1 - D = 1 - \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (3.6)$$

3.4. Método de análise de falhas

Na Figura 25 é apresentada a modelagem simplificada de um sistema de proteção baseado no método de análise de falhas aplicado no estudo de caso das subestações. Neste estudo, o método AAF estrutura camadas de falhas dos equipamentos de proteção em diferentes níveis de acordo com a ocorrência dos eventos, o sucesso ou a falha da coordenação das proteções associadas aos disjuntores.

Na possível falha de coordenação da proteção principal, assume-se que o disjuntor da zona de proteção de retaguarda é aberto pela atuação da proteção de retaguarda. No caso do sucesso da coordenação, o modelo AAF mostra o disjuntor mais próximo da falta foi aberto pela proteção principal. O mesmo pode falhar ou obter sucesso em proteger o trecho. No caso do sucesso, o disjuntor interrompe a falta, isolando a menor parte do sistema. No caso da falha, assume-se que a proteção de retaguarda atua eliminando a falta.

Figura 25: Procedimento utilizado para a análise de falhas.



Fonte: O próprio Autor.

3.5. Árvore de Falhas

Com o intuito de desenvolver os procedimentos necessários para a construção de uma árvore de falhas, são citados em (SCAPIN, 2013) os requisitos necessários para a sua confecção. O levantamento dos requisitos requeridos para se efetuar uma análise quantitativa deve conter as seguintes informações (SCAPIN, 2013):

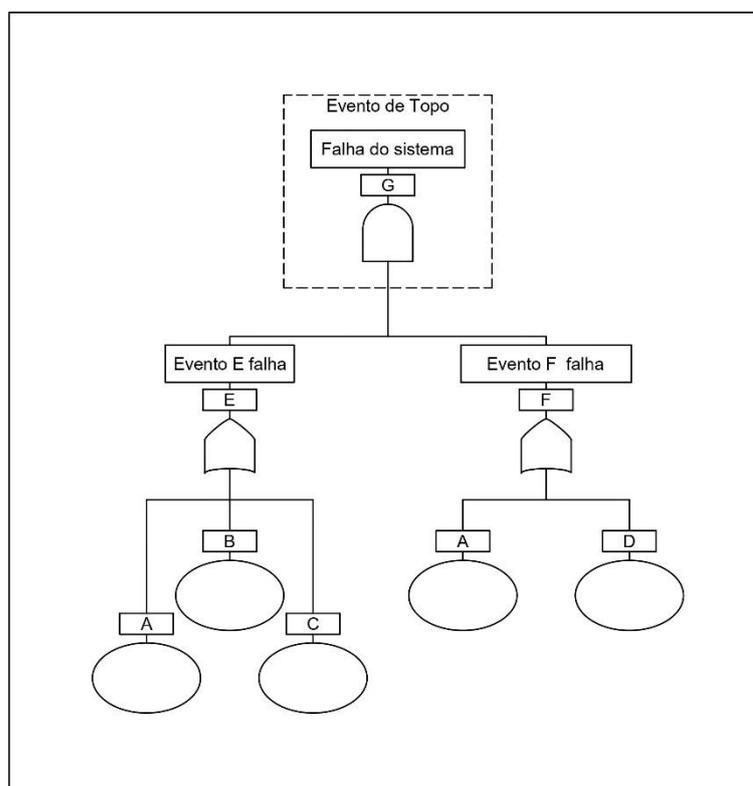
- Análise de Arvore de Falha (AAF);
- Corte mínimo/sistema crítico;
- Levantamento de taxa de falha, MTBF de cada evento terminal;
- Identificação do método de análise, incluindo referências a manuais, etc;
- Considerações relacionadas aos dados, usados na AAF e na análise;
- Escolha do software para construção da AAF;
- Listagem das entradas e saídas do software de AAF.

Ressalta-se que os dois últimos requisitos são necessários apenas para árvores de falhas extremamente complexas construídas por meio de *software*.

3.5.1. Identificação dos eventos

A identificação dos eventos que compõem uma árvore de falhas é um dos passos iniciais para a sua construção. Conforme citado anteriormente, o evento indesejável de interesse é denominado evento de topo, sendo que, o evento de topo, em árvores de falhas que possuem mais de um evento, é consequência da ocorrência de eventos antecedentes, conforme mostrado na Figura 26.

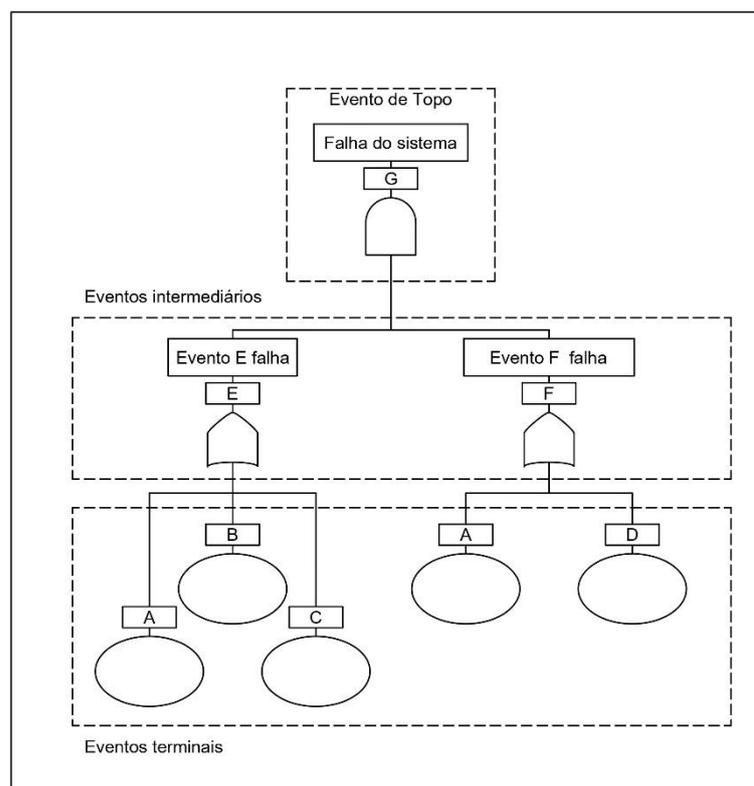
Figura 26: Árvore de falhas com eventos terminais e intermediários.



Fonte: O próprio Autor.

Os eventos antecedentes também possuem denominação. A partir da Figura 26, é possível definir que os eventos A, B, C, e D são considerados eventos básicos. Hierarquicamente, esses eventos são denominados eventos terminais. Os eventos terminais da Figura 26 dão origem aos eventos E e F, que são denominados eventos intermediários, que por sua vez dão origem ao evento de topo G. A Figura 27 representa essa classificação.

Figura 27: Classificação dos eventos de uma árvore de falhas.



Fonte: O próprio Autor.

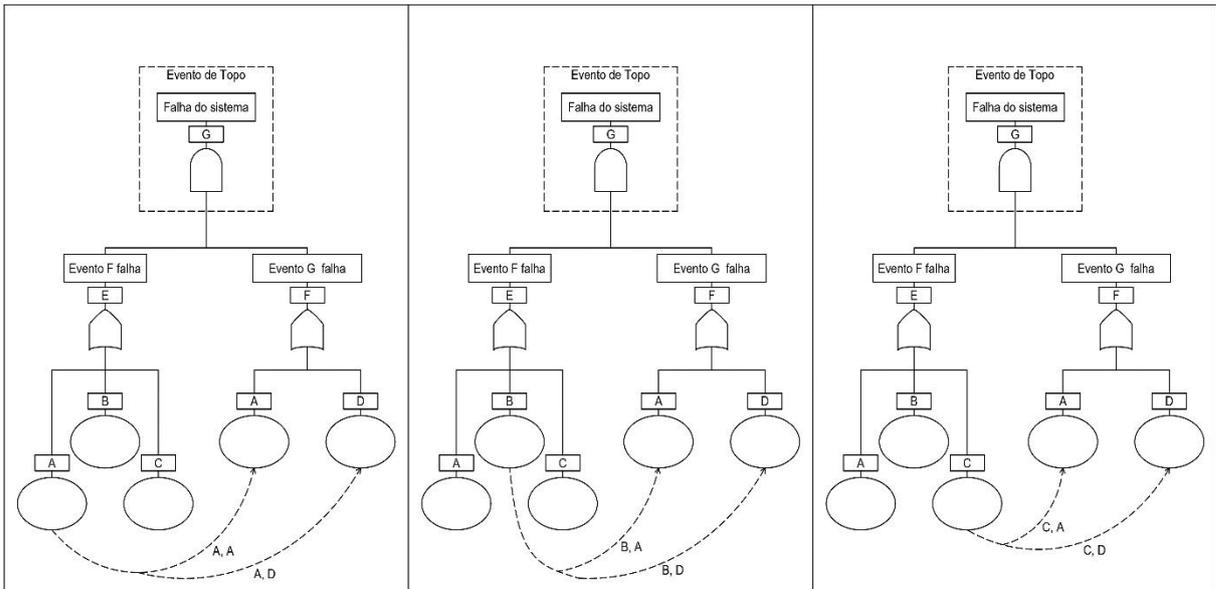
Na árvore de falhas apresentada, se os eventos A ou B ou C ocorrerem, então o evento E ocorre, assim como, se os eventos A ou D ocorrerem, então o evento F ocorre, pois uma porta lógica 'OU' os interliga aos eventos E e F, respectivamente. No caso dos eventos intermediários, como a interligação ao evento de topo G é por meio de uma porta lógica 'E', é preciso que os eventos E e F ocorram para concluir a falha do sistema.

3.5.2. Cortes mínimos

A análise dos eventos e das portas lógicas que compõe uma árvore de falhas é de extrema importância, visto que, permite a identificação dos cortes mínimos presentes em uma AAF. Os cortes mínimos são as combinações de eventos suficientemente necessárias para dar origem ao evento de topo. Quando essas combinações possuem quantidades mínimas de eventos, o corte mínimo é denominado corte mínimo reduzido, sendo possível a existência de mais de um corte mínimo reduzido.

Considerando a árvore de falhas da Figura 26, com a realização dos seguintes passos, é possível concluir a sua relação de cortes mínimos. Inicialmente, é necessário agrupar a ocorrência dos eventos em pares de acordo o procedimento representado na Figura 28.

Figura 28: Agrupamento de eventos para obtenção dos cortes mínimos.



Fonte: O próprio Autor.

Os pares de eventos representados na Figura 28 equivalem aos cortes mínimos da árvore de falha em questão e, portanto, os seus cortes mínimos são:

Corte mínimo 01 = CM01 = (A, A) = A

Corte mínimo 02 = CM02 = (A, D)

Corte mínimo 03 = CM03 = (B, A)

Corte mínimo 04 = CM04 = (B, D)

Corte mínimo 05 = CM05 = (C, A)

Corte mínimo 06 = CM06 = (C, D)

O corte mínimo CM01 é composto unicamente pelo evento A, ou seja, a sua ocorrência é suficiente para a ocorrência do evento de topo e, neste caso, o CM01 é

considerado um corte mínimo reduzido. O CM02 não é considerado um corte mínimo reduzido, pois o mesmo possui um corte mínimo reduzido em seu arranjo, o CM01. Semelhante ao caso do CM02, os cortes mínimos CM03 e CM05 também possuem o corte mínimo CM01 em seus arranjos, portanto, não são reduzidos. Em contrapartida, o CM04 e o CM06 não possuem o evento A em seus arranjos, portanto, são considerados reduzidos. Em resumo os cortes mínimos reduzidos da árvore de falha são: CM01, CM04 e CM06, e os mesmos constituem as possíveis combinações para ocorrência do evento de topo.

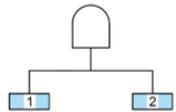
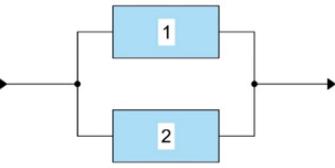
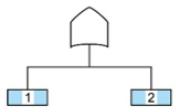
3.5.3. Portas lógicas

As portas lógicas são responsáveis por estabelecer a ligação entre eventos por meio das suas conexões causais. Uma porta lógica é capaz de receber diversos eventos em sua entrada e permitir a saída de um único evento, em que este é o resultado da aplicação de operações com álgebra booleana sobre as entradas.

Apesar da existência de diversas portas lógicas, a construção da árvore de falhas de sistemas em série, em paralelo e sistemas mistos, necessita apenas das portas lógicas OR e AND. Essa necessidade fica clara em 2.2.4, em que as probabilidades de sucesso de operação e de falha de operação destes circuitos são descritas. As Figuras 13 e 14 demonstram as operações booleanas das portas OR e AND, respectivamente.

Como as portas OR e AND executam a soma e a multiplicação entre eventos, respectivamente, e que, conforme detalhado em 2.2.4.2 e 2.2.4.3, para o sucesso de operação dos sistemas em série e paralelo é necessário que apenas um dos componentes funcionem e que os dois componentes funcionem, respectivamente, é possível representar os eventos de falha dos sistemas por meio do seguinte esquema e tabela verdade. No Quadro 1 é apresentado o resumo do esquema de operação de sistemas em série e paralelo.

Quadro 1: Quadro resumo com esquema de funcionamento de sistemas em série e paralelo.

Sistema		Sucesso de Operação	Operação	Tabela Verdade		
Série			1 E 2	0	0	0
				0	1	0
				1	0	0
				1	1	1
Paralelo			1 OU 2	0	0	0
				0	1	1
				1	0	1
				1	1	1

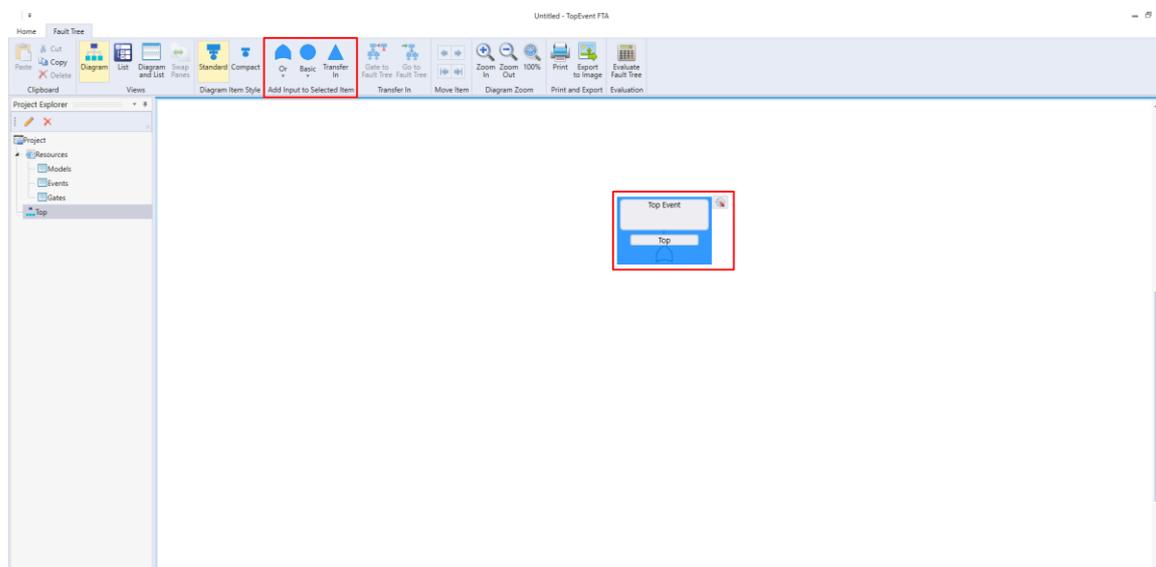
Fonte: O próprio Autor.

3.6. Software TopEvent FTA

Este tópico tem por objetivo apresentar o *software TopEvent FTA* (Evento Topo da Análise de Árvore de Falha – AAF), que é utilizado para representação e montagem das árvores de falhas exploradas neste trabalho. O *TopEvent FTA* é um software que permite análises quantitativas e qualitativas de árvores de falhas diversos, por meio da aplicação do método dos cortes mínimos e do Método de Decisão Binária (BDD), que assim como os cortes mínimos, permite a simplificação da estrutura de árvores de falhas, no entanto, com a utilização de operações binárias.

Inicialmente, o *software* possui a interface demonstrada na Figura 29. Nela é possível observar a presença de recursos explorados nos tópicos anteriores, como por exemplo a presença do evento de topo, dos eventos intermediários e básicos, além das portas lógicas utilizadas para montagem das árvores de falhas.

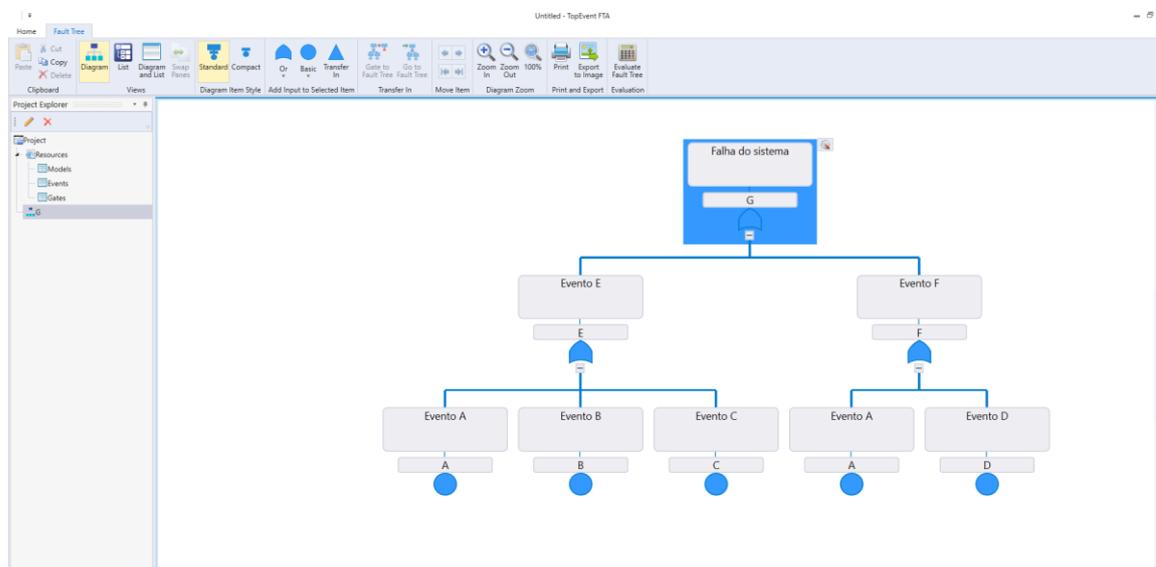
Figura 29: Interface do software TopEvent FTA.



Fonte: Software TopEvent FTA.

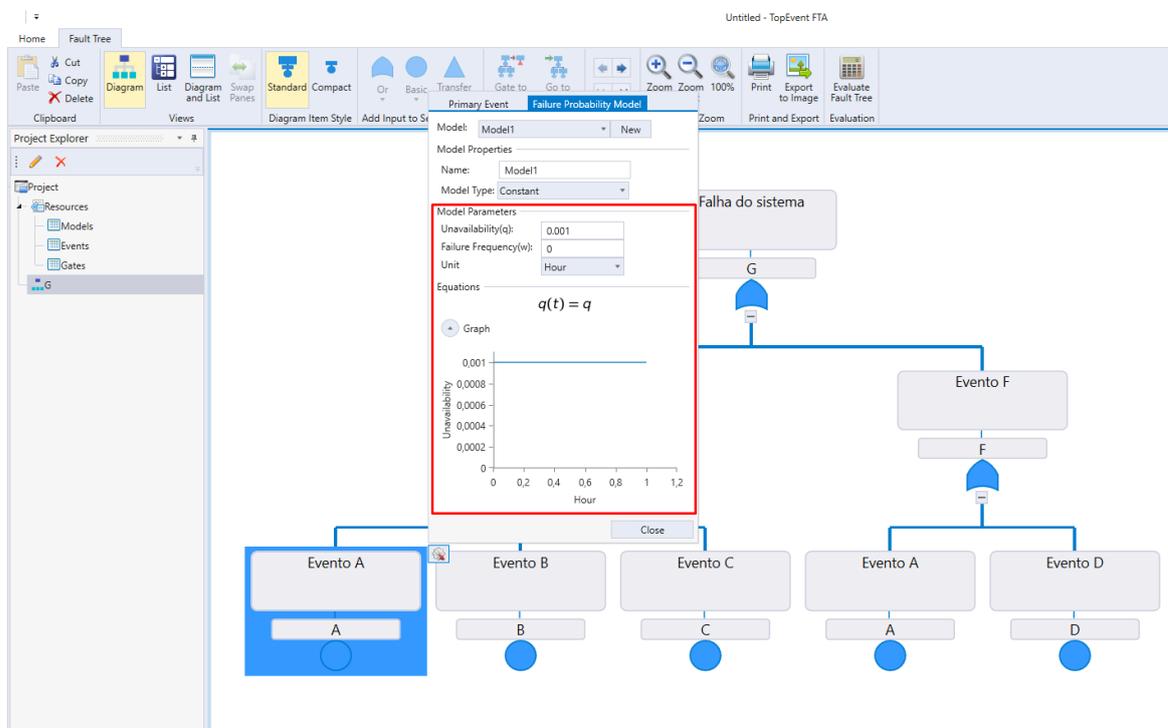
Na Figura 30 é mostrado a montagem da árvore de falhas representada na Figura 26. Em seguida, na Figura 31, é demonstrado a tela de customização do modelo probabilístico de falha, nele é possível observar as características relevantes para a conclusão do estudo probabilístico, tais como: a indisponibilidade do sistema, calculada pela (equação 2.39), o tempo médio para falhar, além da a equação e do gráfico da indisponibilidade de um evento em função do tempo.

Figura 30: Árvore de falhas computadorizada.



Fonte: Software TopEvent FTA.

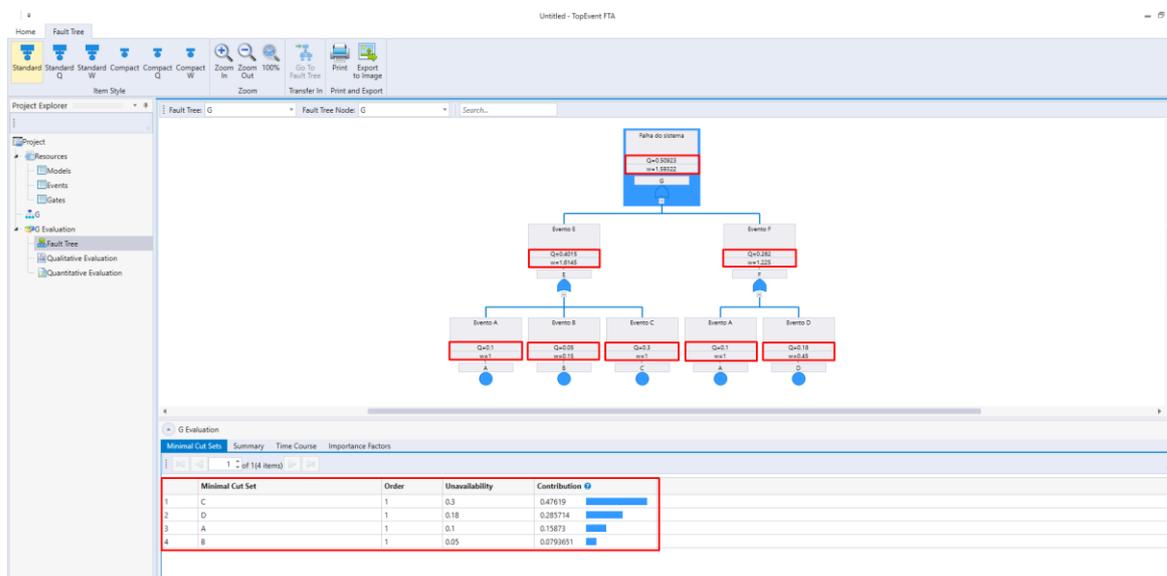
Figura 31: Configuração do modelo probabilístico de falha.



Fonte: Software TopEvent FTA.

Com o preenchimento das informações dos respectivos eventos, é possível avaliar a árvore de falhas. Para efeito de exemplo, os campos que definem o modelo probabilístico de falhas foram preenchidos com valores quaisquer, resultando na árvore com os dados descritos na Figura 32. Nela é possível observar o resumo da análise probabilística, em que a indisponibilidade (Q) e o tempo médio para falhar (w) do evento de topo são calculados. Além disso, na parte inferior da imagem, é demonstrado a análise qualitativa da árvore em questão, onde encontra-se a indisponibilidade e a contribuição de cada evento para resultar na ocorrência do evento de topo.

Figura 32: Indicadores da árvore de falhas computadorizada.



Fonte: Software TopEvent FTA.

3.7. Diagrama de Ishikawa

A utilização do Diagrama de Ishikawa no estudo de confiabilidade, conforme detalhado em 2.2.5.2, tem a finalidade de permitir a identificação de forma mais clara e objetiva dos fatores que culminam em falhas no sistema. Nesse sentido, este tópico tem o objetivo de elaborar a metodologia para a construção do Diagrama de Ishikawa explorado neste trabalho.

Inicialmente, faz-se necessário identificar o efeito da problemática. O efeito é a consequência das causas e se encontra na cabeça do peixe. Com a sua definição, o objetivo passa a se reunir a maior quantidade de informação possível, com o intuito de construir o diagrama direcionado ao efeito em pauta.

Um ponto relevante para a construção da espinha de peixe é a definição das categorias que a compõem. Como explicado em 2.2.5.2, um Diagrama de Ishikawa não necessariamente deve ser composto pelos seis M originais, portanto, é de extrema importância definir categorias que possuam um conjunto de causas que contribuem para o efeito indesejado, como a baixa confiabilidade da subestação.

Com as categorias definidas, é necessária a realização de um *brainstorming*, ou seja, levantar as diferentes problemáticas relacionadas às categorias

anteriormente definidas, que impactam na confiabilidade de uma subestação. Esse passo envolve a análise sobre os equipamentos, elementos e componentes, bem como o ambiente que a mesma está inserida, manutenções, inspeções, entre outras causas.

Por fim, com junção dos pontos supracitados e com a montagem do Diagrama de Ishikawa, a análise pode ser realizada. Vale ressaltar que, a complexidade do diagrama é proporcional a quantidade de categorias e das problemáticas levantadas no *brainstorming*, visto que as causas podem ser definidas em diferentes níveis, dependendo da análise que se queira realizar.

3.8. Considerações finais

Neste capítulo, apresentou-se o desenvolvimento dos métodos de análise aplicáveis ao estudo de confiabilidade das subestações apresentadas no Capítulo 4. Inicialmente, diante dos diversos equipamentos e elementos que uma subestação possui, definiu-se que o estudo iria abranger os transformadores, os disjuntores, os barramentos, as chaves seccionadoras, as chaves fusíveis e os alimentadores.

Em seguida, a partir do Modelo de Markov, desenvolveu-se a modelagem matemática de conceitos relacionados a confiabilidade, os quais são de extrema importância para a conclusão do estudo, contribuindo também para a construção dos modelos probabilísticos de falha dos equipamentos e elementos supramencionados.

Ademais, explorou-se o *software TopEvent FTA* utilizado para a análise computadorizada das árvores de falha exploradas neste trabalho, permitindo a conclusão dos indicadores de confiabilidade, por meio de análises quantitativas e qualitativas. Por fim, os requisitos para a construção do Diagrama de Ishikawa foram explorados, de forma a buscar adaptá-lo às necessidades de um estudo de confiabilidade.

4. Estudo de Caso

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas as subestações do estudo de confiabilidade e a aplicação dos três métodos de análises: Modelo de Markov, Análise de Árvore de Falhas e Diagrama de Ishikawa, com a finalidade de apresentar os resultados que concluem o estudo.

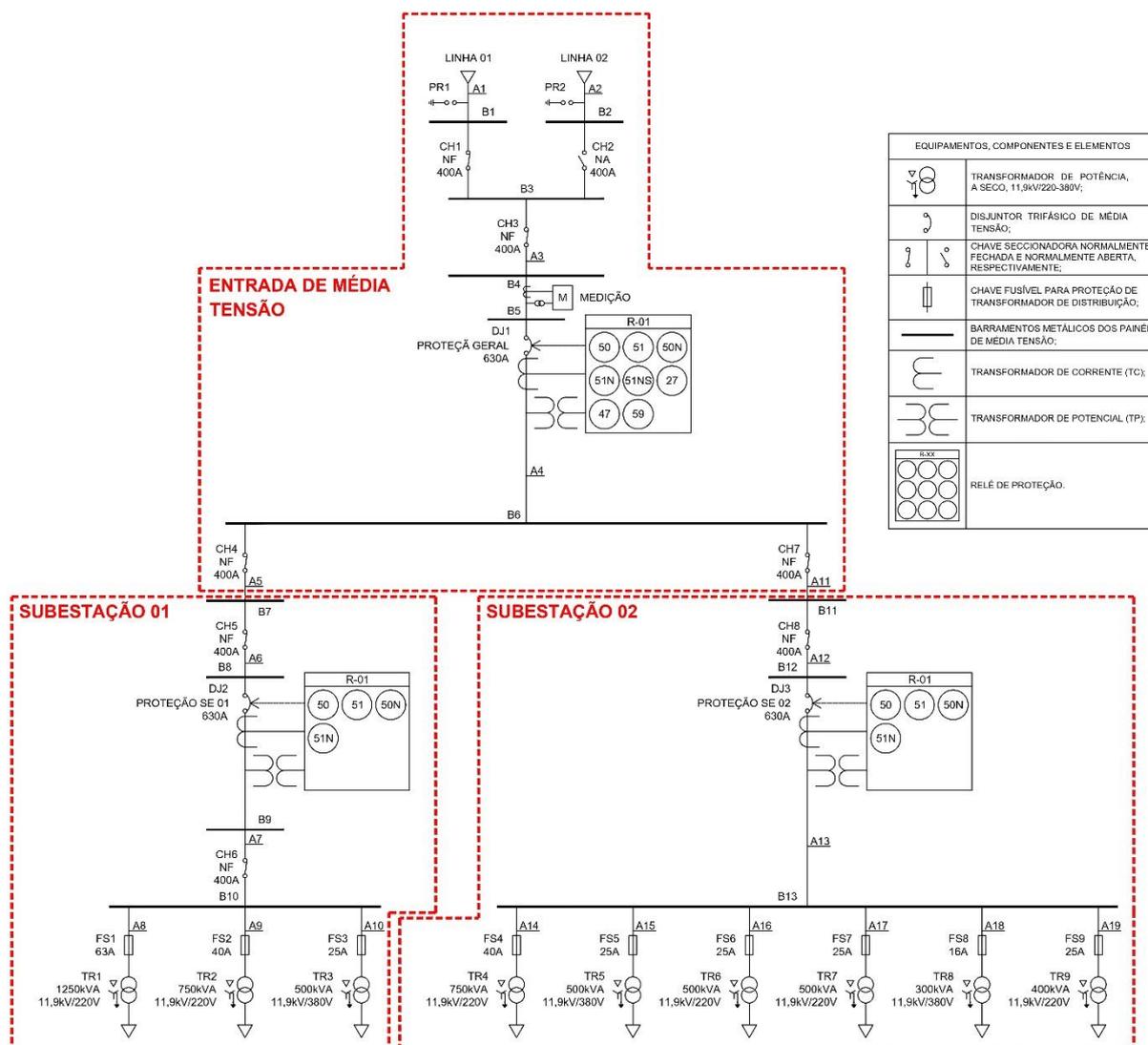
4.2. Planta Elétrica com Múltiplas Unidades Consumidoras

O estudo de caso de análise de confiabilidade apresentado neste trabalho é aplicado a instalação elétrica de um órgão público judiciário com múltiplas unidades consumidoras. Conforme apresentado Figura 33, Diagrama Unifilar de Proteção, a instalação elétrica da planta em estudo contempla:

- Uma entrada de média tensão em 11,9 kV composta de dois vãos de entrada de linha de média tensão, Linha 01 e Linha 02, barramentos B1 a B6, medição direta e proteção geral por meio do relé de sobrecorrente multifunção R-01 associado ao disjuntor DJ1. Na topologia apresentada, no ramal de entrada, a chave CH1 da linha 01 está fechada e a chave 02 da linha 02 está aberta, indicando que na condição normal de operação a planta é suprida pela linha 01. Na condição de uma contingência na linha 01 da rede elétrica da concessionária, o suprimento da planta pode ser transferido para a linha 02, por meio da abertura da chave 01 e fechamento da chave 02.
- Duas subestações. A subestação 01 possui três transformadores tipo distribuição de 750 kVA cada, totalizando 2.500 kVA de potência, enquanto a subestação 02 possui seis transformadores tipo distribuição de 750 kVA cada, totalizando 2.450 kVA. As proteções dos barramentos B10 e B13 das subestações são protegidos por relé de sobrecorrente multifunção associado ao disjuntor de barra e os transformadores 11,9 kV-380/220 V por chaves fusíveis.

- Total de 5.065 kW de potência instalada e 3.775 kVA de demanda. A subestação 1 supre 2.532 kW de potência de carga instalada, com demanda de 1.906 kVA, enquanto a subestação 2 supre 2.533 kW de potência de carga instalada, com demanda de 1.869 kVA.

Figura 33: Diagrama Unifilar de Proteção da instalação elétrica com múltiplas unidades consumidoras.



Fonte: O próprio Autor.

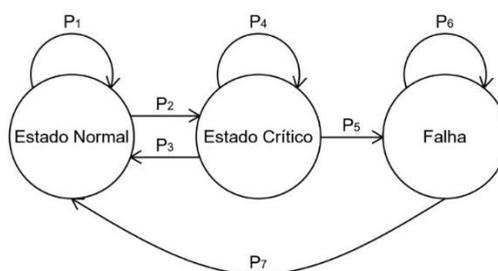
4.3. Modelo de Markov aplicado a subestação

A transição de estados dos componentes e elementos presentes nas subestações da Figura 33 é considerada um processo markoviano, ou seja, os seus estados futuros dependem apenas dos estados presentes dos mesmos, sendo assim, o objetivo deste tópico é representar este processo por meio da Cadeia de Markov,

de modo a definir o modelo de disponibilidade dos componentes e elementos em questão.

A fim de buscar uma análise mais precisa para o sistema, assume-se que são realizadas manutenções preventivas com o intuito de reduzir a deterioração e, conseqüentemente, reduzir a probabilidade dos seus equipamentos falharem, sendo assim, na Figura 34 é apresentado o modelo de confiabilidade utilizado.

Figura 34: Modelo de confiabilidade dos componentes e elementos.



Fonte: O próprio Autor.

Para este modelo, a probabilidade P_3 representa a transição do estado crítico para o estado normal de um equipamento, por meio da manutenção preventiva, já a probabilidade P_7 representa a transição do estado de falha para o estado normal, por meio da manutenção corretiva. A antecipação à falha proveniente da manutenção preventiva pode ser entendida por meio da Figura 35.

Figura 35: Modelo de antecipação à falha.



T - Tempo de antecipação à falhas

Fonte: O próprio Autor.

Com o intuito de definir os parâmetros necessários para o estudo de confiabilidade, nas tabelas a seguir é apresentada uma coletânea de pesquisas com dados sobre confiabilidade de componentes em redes de distribuição elétrica, dispostas em (BOLLEN, 1993). A respeito dos transformadores, adotou-se os dados apresentados na Tabela 1, em que (BOLLEN, 1993) resumiu os resultados de uma pesquisa que estudou um total de 1982 falhas do equipamento em 30 empresas em nove indústrias localizadas nos Estados Unidos e no Canadá, realizada pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE, 1974). Através dos dados é possível concluir os valores de MTTF e MTTR dos transformadores de potência.

Tabela 1: Resumo da IEEE sobre falhas de transformadores.

	ETTF (years)	c.i.	average actual down time (hours)		estimated restore time (hours)	
			industry	plant	repair	replace
Liquid filled						
All voltages	240	[190,325]	529	219	378	73.4
600 - 15,000 V						
All sizes	340	[250,500]	174	49	382	74.3
300 - 750 kVA	270	[170,750]	61	10.7	49	3.7
751 - 2,499 kVA	400	[260,870]	217	64	297	39.7
2,500 kVA and above	310	[200,700]	216	60	618	150
Above 15,000 V	77	[55,130]	1076	1260	367	71.5
Dry type						
0 - 15,000 V	275	[190,500]	153	28	67	39.9
Rectifier						
above 600 Volt	34	[23,60]	380	80	300	20.0

Fonte: (BOLLEN, 1993).

O estudo supracitado contemplou também a análise sob os disjuntores e chaves seccionadoras. Na Tabela 2 são apresentados os resultados, em que é possível observar os valores de MTTF e MTTR para estes equipamentos (BOLLEN, 1993).

Tabela 2: Resumo da IEEE sobre falhas de disjuntores.

	ETTF (years)	c.i.	average actual down time (hours)		estimated restore time (hours)	
			industry	plant	repair	restore
Fixed type						
All voltages	194	[140,310]	5.8	4.0	31.7	4.5
Below 600 Volt	225	[160,375]	4.7	4.0	6.0	2.0
Above 600 Volt	57	[30,500]	10.6	3.8	44.5	12.0
Metalclad, drawout						
All voltages	330	[260,425]	129	7.6	54.2	3.9
Below 600 Volts	370	[280,560]	147	4.0	47.2	2.9
Above 600 Volts	280	[210,430]	109	168	62.4	5.2
Disconnect switches						
Enclosed	160	[130,220]	3.6	2.8	50.1	13.7
Open	350	[170,∞]				

Fonte: (BOLLEN, 1993).

(BOLLEN, 1993) também resume os dados de pesquisas que abrangem as chaves fusíveis de proteção. Na Tabela 3, é mostrado o seu MTTF, de acordo com (WHITING, 1989). Ademais, em (SALLAM; DESOUKY; DESOUKY, 1990) é estimado que o MTTR para chaves fusíveis é de 1,1 horas.

Tabela 3: Resumo sobre o MTTF de fusíveis.

Section	Reference	ETTF	Remarks
5.1.1	IEEE, 1977	5500	<1000V
		10000	>1000V indoor
		12000	>1000V outdoor
5.2.1	IEEE, 1974	500	
5.2.2	van Amelsfoort et al., 1986	4000	
5.3.1	Dialynas and Papadopoulos, 1989	250	fuse cutout
5.3.2	Whiting, 1989	500	fused switch
5.3.3	Sallam et al., 1990	430	
5.3.4	Volkman et al., 1991	220	rural feeder
		270	urban feeder

Fonte: (BOLLEN, 1993).

(BOLLEN, 1993) demonstra também o resumo dos dados de falhas retirados do livro (*IEEE GOLD BOOK*; 1991), conforme mostrado na Tabela 4, em que é possível observar os dados de MTTF e MTTR para cabos alimentadores.

Tabela 4: Resumo da IEEE sobre falhas de alimentadores.

Type of cable	ETTF (years)	average repair time (hours)	median repair time (hours)
Above ground and aerial			
0 - 600 Volt	216	457.0	10.5
600 - 15,000 Volt			
All	21.6	40.4	6.9
In trays above ground	33.0	8.9	8.0
In conduit above ground	6.2	140.0	47.5
Aerial cable	2.1	31.6	5.3
Below ground and direct burial			
0 - 600 Volt	78.6	15.0	24.0
600 - 15,000 Volt			
All	49.4	95.5	35.0
In duct or conduit	49.7	96.8	35.0
Above 15,000 Volt	90.7	16.0	16.0
thermoplastic 600 - 15,000 Volt	78.8	44.5	10.0
thermosetting 600 - 15,000 Volt	34.3	168.0	10.0
paper insulated lead covered 600 V - 15 kV	33.4	48.9	26.8
other type of insulation 600 - 15,000 Volt	16.6	16.1	28.5

Fonte: (BOLLEN, 1993).

(BOLLEN, 1993), demonstra o resumo dos dados de tempo para falhas de barramentos, bem como o tempo para repará-los, baseados em (ALLAN, 1980). A Tabela 5 resume os referidos dados.

Tabela 5: Resumo para falhas de barramentos.

	ETTF	repair time	time to	duration of
	(yr)	(h)	maintenance	
	(yr)	(h)	(yr)	(h)
11 kV	220	120	2	8
3.3. kV	220	48	2	8
415 V	220	24	2	4

Fonte: (BOLLEN, 1993).

Sendo assim, na Tabela 6 é apresentado o resumo dos dados dos indicadores de confiabilidade dos componentes e elementos, com base nos valores apresentados nas Tabelas 1 a 5, que são utilizados nesse trabalho.

Tabela 6: Resumo dos dados dos componentes e elementos.

Componente/Elemento	MTTF (anos)	MTR (horas)	λ (o/anos)	Disponibilidade	Indisponibilidade
Transformador	275	67	0,004	99,99722%	0,00278%
Disjuntor	330	54,2	0,003	99,99813%	0,00187%
Chave fusível	500	1,1	0,002	99,99997%	0,00003%
Chave seccionadora	160	50,1	0,006	99,99643%	0,00357%
Alimentador	49,4	95,5	0,020	99,97794%	0,02206%
Barramento	220	120	0,005	99,99377%	0,00623%

Fonte: O próprio Autor.

Em função dos dados da Tabela 6 e do modelo de confiabilidade geral, no Quadro 2 é demonstrado o resumo das probabilidades dos eventos do modelo de confiabilidade dos componentes e elementos supracitados, em que as probabilidades são definidas de acordo com os estados de transições propostos.

Quadro 2: Probabilidades dos eventos do modelo de confiabilidade.

Estado	Detalhes	Probabilidade dos Eventos
P ₁	Equipamento/elemento em estado normal	$1 - P_2$
P ₂	Antecipação à falha do equipamento/elemento	$\frac{1}{MTTF - T}$
P ₃	Manutenção preventiva no equipamento/elemento	$\frac{1}{MTTR}$
P ₄	Equipamento/elemento em estado crítico	$1 - P_3 - P_5$
P ₅	Falha do equipamento/elemento	$\frac{1}{T}$
P ₆	Equipamento/elemento permanecer em falha	$1 - P_7$
P ₇	Manutenção corretiva no equipamento/elemento	$\frac{1}{MTTR}$

Fonte: O próprio Autor.

Para realizar os cálculos das probabilidades dos estados, assume-se que o tempo de antecipação à falha dos componentes e elementos em questão é de 24 horas. Deste modo, na Tabela 7 é mostrado o resultado da aplicação do modelo de confiabilidade, utilizando os valores MTTF e MTTR demonstrados no Quadro 2.

Tabela 7: Aplicação do modelo de confiabilidade aos componentes e elementos da subestação.

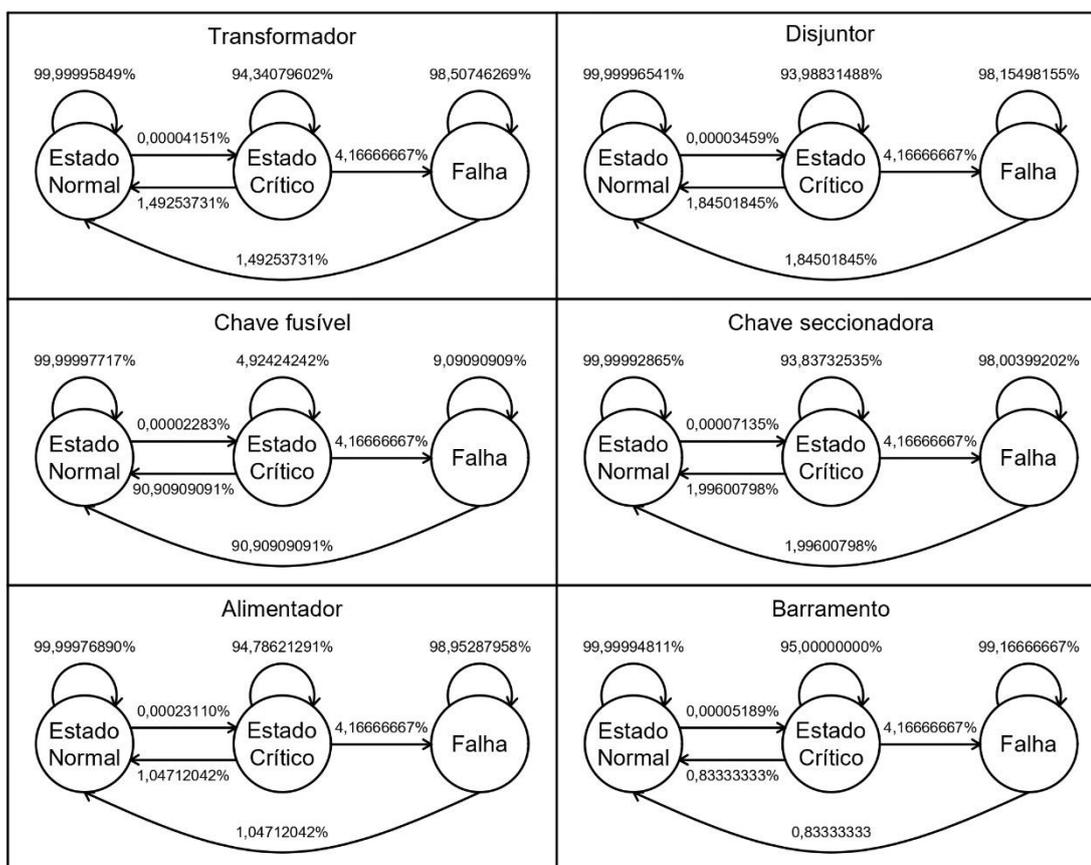
Componente/elementos	Probabilidade dos estados						
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
Transformador	99,99995849%	0,00004151%	1,49253731%	94,34079602%	4,16666667%	98,50746269%	1,49253731%
Disjuntor	99,99996541%	0,00003459%	1,84501845%	93,98831488%	4,16666667%	98,15498155%	1,84501845%
Chave fusível	99,99997717%	0,00002283%	90,90909091%	4,92424242%	4,16666667%	9,09090909%	90,90909091%
Chave seccionadora	99,99992865%	0,00007135%	1,99600798%	93,83732535%	4,16666667%	98,00399202%	1,99600798%
Alimentador	99,99976890%	0,00023110%	1,04712042%	94,78621291%	4,16666667%	98,95287958%	1,04712042%
Barramento	99,99994811%	0,00005189%	0,83333333%	95,00000000%	4,16666667%	99,16666667%	0,83333333%

Nota: MTTF convertido para horas.

Fonte: O próprio Autor.

Com a discriminação dos estados e a conclusão das probabilidades de transição dos mesmos, é possível desenvolver a Cadeia de Markov que representa cada um dos componentes e elementos supracitados. A Figura 36 mostra a Cadeia de Markov dos componentes e elementos supracitados.

Figura 36: Cadeia de Markov para os componentes e elementos da subestação.



Fonte: O próprio Autor.

Com base nas Cadeias de Markov da Figura 36, é possível definir a transição de estados do sistema na forma matricial, conforme detalhado em 2.2.5.3.3, pela (equação 4.1) assumindo que, inicialmente, os componentes e elementos estejam no estado normal de funcionamento.

Transformador:

$$\begin{bmatrix} P_{X1+\Delta t} \\ P_{X2+\Delta t} \\ P_{X3+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 99,99995849\% \cdot \Delta t & 1,49253731\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00004151\% \cdot \Delta t & 94,34079602\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 98,50746269\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

A (equação 4.2) determina a matriz de transição do transformador.

$$M_t = \begin{bmatrix} 99,99995849\% \cdot \Delta t & 1,49253731\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00004151\% \cdot \Delta t & 94,34079602\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 98,50746269\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

A fórmula geral que define a transição do estado atual para o estado seguinte do transformador pode ser descrita em função do tempo através da forma matricial da (equação 4.3):

$$P(n \times \Delta t) = M_t^n \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Disjuntor:

$$\begin{bmatrix} P_{X1+\Delta t} \\ P_{X2+\Delta t} \\ P_{X3+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 99,99996541\% \cdot \Delta t & 1,84501845\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00003459\% \cdot \Delta t & 93,98831488\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 98,15498155\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

A (equação 4.5) determina a matriz de transição do disjuntor.

$$M_d = \begin{bmatrix} 99,99996541\% \cdot \Delta t & 1,84501845\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00003459\% \cdot \Delta t & 93,98831488\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 98,15498155\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

A fórmula geral que define a transição do estado atual para o estado seguinte do disjuntor pode ser descrita em função do tempo através da forma matricial da (equação 4.6):

$$P(n \times \Delta t) = M_d^n \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Chave fusível:

$$\begin{bmatrix} P_{X1+\Delta t} \\ P_{X2+\Delta t} \\ P_{X3+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 99,99997717\% \cdot \Delta t & 90,90909091\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00002283\% \cdot \Delta t & 4,92424242\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 9,09090909\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

A (equação 4.8) determina a matriz de transição da chave fusível.

$$M_{cf} = \begin{bmatrix} 99,99997717\% \cdot \Delta t & 90,90909091\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00002283\% \cdot \Delta t & 4,92424242\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 9,09090909\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

A fórmula geral que define a transição do estado atual para o estado seguinte da chave fusível pode ser descrita em função do tempo através da forma matricial da (equação 4.9):

$$P(n \times \Delta t) = M_{cf}^n \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Chave seccionadora:

$$\begin{bmatrix} P_{X1+\Delta t} \\ P_{X2+\Delta t} \\ P_{X3+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 99,99992865\% \cdot \Delta t & 1,99600798\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00007135\% \cdot \Delta t & 93,83732535\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 98,00399202\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

A (equação 4.11) determina a matriz de transição da chave seccionadora.

$$M_{cs} = \begin{bmatrix} 99,99992865\% \cdot \Delta t & 0,00007135\% \cdot \Delta t & 0 \\ 93,83732535\% \cdot \Delta t & 1,99600798\% \cdot \Delta t & 4,16666667\% \cdot \Delta t \\ 98,00399202\% \cdot \Delta t & 1,99600798\% \cdot \Delta t & 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

A fórmula geral que define a transição do estado atual para o estado seguinte da chave seccionadora pode ser descrita em função do tempo através da forma matricial da (equação 4.12):

$$P(n \times \Delta t) = M_{cs}^n \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Alimentador:

$$\begin{bmatrix} P_{X1+\Delta t} \\ P_{X2+\Delta t} \\ P_{X3+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 99,99976890\% \cdot \Delta t & 1,04712042\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00023110\% \cdot \Delta t & 94,78621291\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 98,95287958\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

A (equação 4.14) determina a matriz de transição do alimentador.

$$M_a = \begin{bmatrix} 99,99976890\% \cdot \Delta t & 1,04712042\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00023110\% \cdot \Delta t & 94,78621291\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 98,95287958\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

A fórmula geral que define a transição do estado atual para o estado seguinte do alimentador pode ser descrita em função do tempo através da forma matricial da (equação 4.15):

$$P(n \times \Delta t) = M_a^n \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Barramento:

$$\begin{bmatrix} P_{X1+\Delta t} \\ P_{X2+\Delta t} \\ P_{X3+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 99,99994811\% \cdot \Delta t & 0,83333333\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00005189\% \cdot \Delta t & 95,00000000\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 99,16666667\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

A (equação 4.17) determina a matriz de transição do barramento.

$$M_b = \begin{bmatrix} 99,99994811\% \cdot \Delta t & 0,83333333\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0,00005189\% \cdot \Delta t & 95,00000000\% \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 4,16666667\% \cdot \Delta t & 99,16666667\% \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

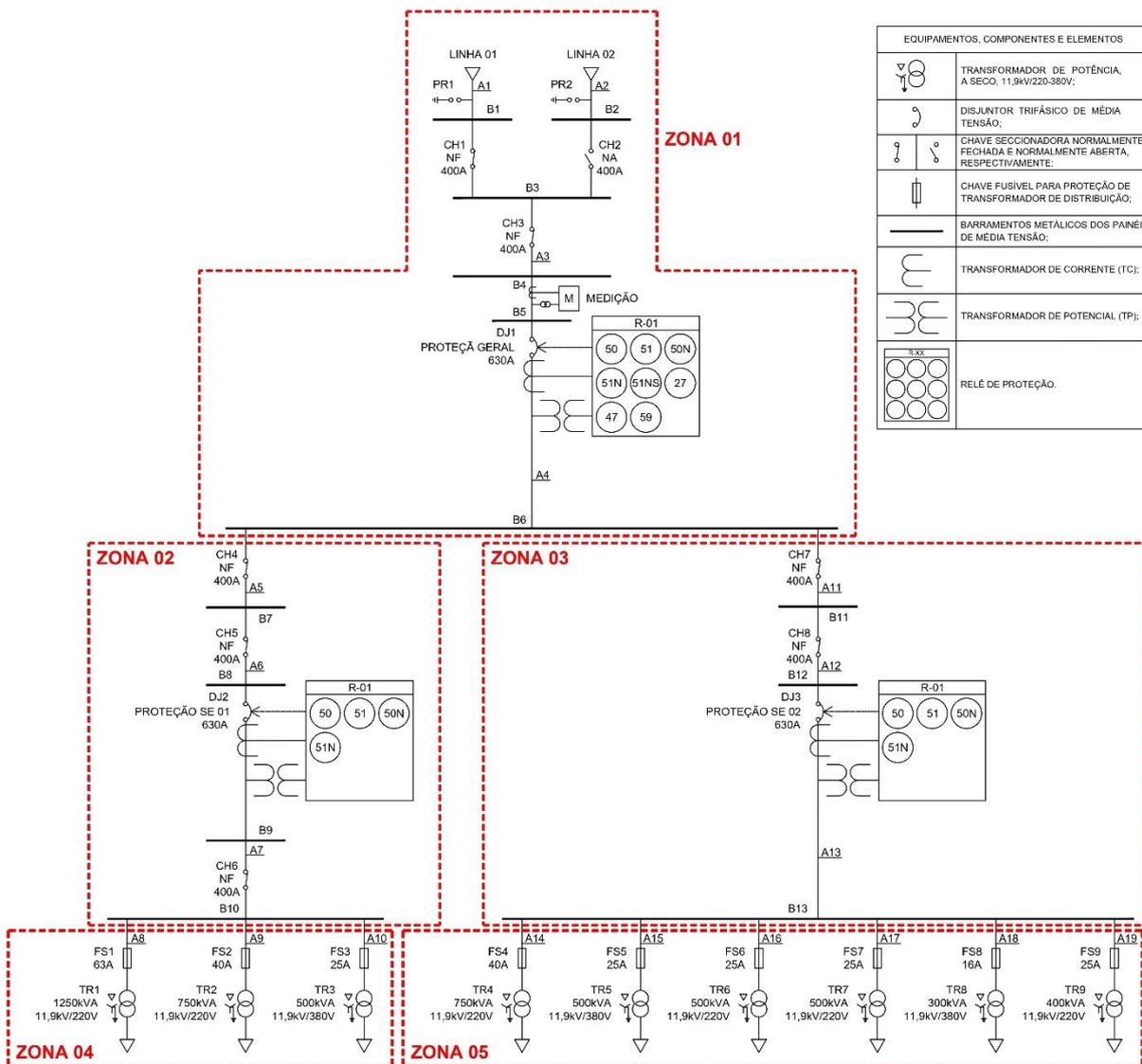
A fórmula geral que define a transição do estado atual para o estado seguinte do barramento pode ser descrita em função do tempo através da forma matricial da (equação 4.18), concluindo, portanto, a modelagem por meio método de Markov de todos os componentes da subestação:

$$P(n \times \Delta t) = M_b^n \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

4.4. Análise de Árvore de Falhas aplicada a subestação

Com o intuito de concluir a confiabilidade da topologia demonstrada na Figura 33, o diagrama unifilar está segregado em cinco zonas: Zona 01, Zona 02, Zona 03, Zona 04 e Zona 05. Cada zona é composta por um conjunto de eventos que culminam na falha total do sistema ou na falha individual das subestações. Na Figura 37 é demonstrada a segregação das cinco zonas supracitadas.

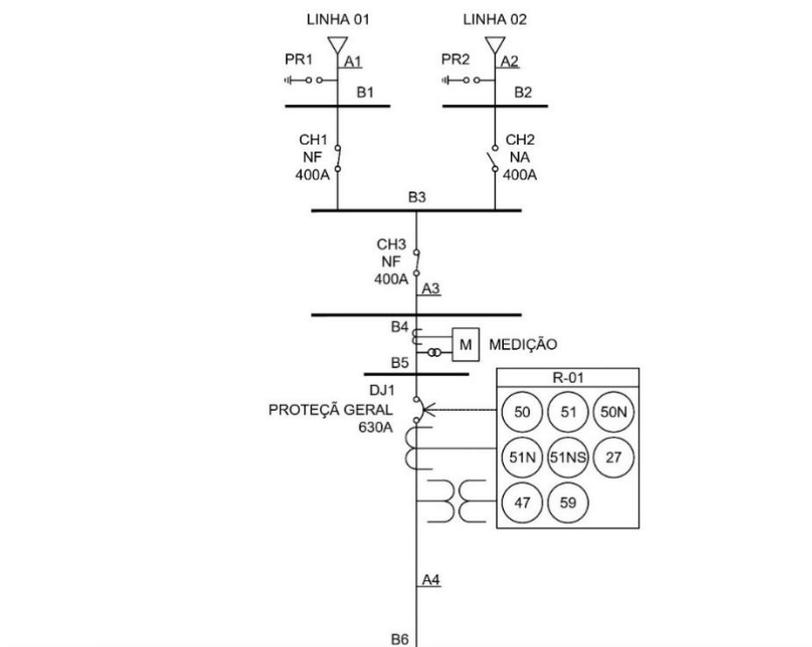
Figura 37: Zonas de falha do sistema.



Fonte: O próprio Autor.

a) Zona 01:

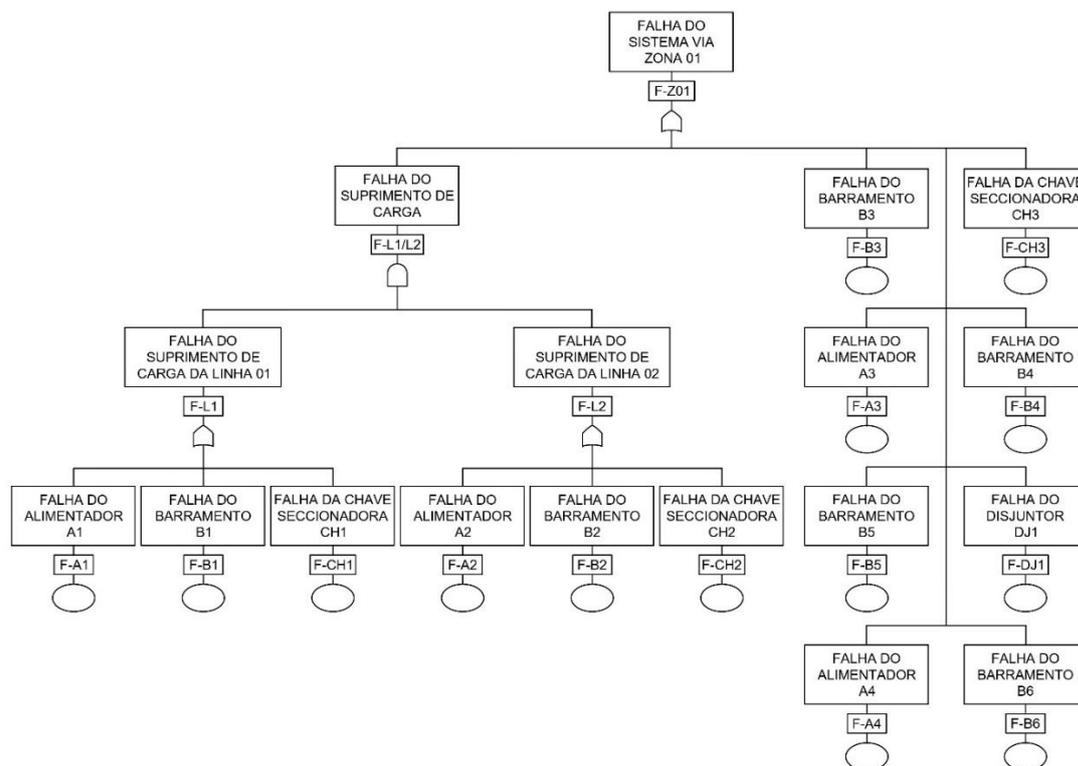
Figura 38: Zona de falha 01.



Fonte: O próprio Autor.

A Zona 01 é composta pelos alimentadores do ramal de entrada, barramentos, chaves seccionadoras e disjuntor de média tensão de proteção geral. A falha de qualquer componente, exceto os que estão presentes no ramal de entrada, visto que os mesmos possuem redundância, resulta na falha total do sistema, sendo assim, a árvore de falha da Zona 01 é mostrada na Figura 39, em que sua modelagem foi desenvolvida com base nos parâmetros de confiabilidade desenvolvidos em 4.2.

Figura 39: Árvore de falhas da Zona 01.



Fonte: O próprio Autor.

A modelagem da árvore de falhas da Figura 39 no *software TopEvent FTA*, utilizando os dados de confiabilidade demonstrados na Tabela 7, permite concluir que a Zona 01 possui a indisponibilidade, a confiabilidade e o MTTF mostrados na Tabela 8.

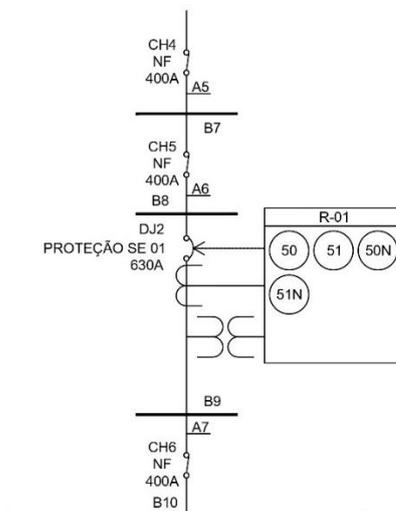
Tabela 8: Indicadores de confiabilidade da Zona 01.

Zona 01 (Entrada de Média Tensão)			Falha do sistema via Zona 01		
Corte mínimo	Indisponibilidade	Contribuição evento de topo	Indisponibilidade	MTTF (anos)	Disponibilidade
F-A3	0,02206%	29,61470%	0,07449%	14,7	99,92551%
F-A4	0,02206%	29,61470%			
F-B3	0,00623%	8,36352%			
F-B4	0,00623%	8,36352%			
F-B5	0,00623%	8,36352%			
F-B6	0,00623%	8,36352%			
F-CH3	0,00357%	4,79258%			
F-DJ1	0,00187%	2,51040%			
F-A1.F-A2	4,86644E-06%	0,00653%			
F-A1.F-B2	1,37434E-06%	0,00184%			
F-A2.F-B1	1,37434E-06%	0,00184%			
F-A1.F-CH2	7,87554E-07%	0,00106%			
F-A2.F-CH1	7,87554E-07%	0,00106%			
F-B1.F-B2	3,88129E-07%	0,00052%			
F-B1.F-CH2	2,22411E-07%	0,00030%			
F-B2.F-CH1	2,22411E-07%	0,00030%			
F-CH1.F-CH2	1,27449E-07%	0,00017%			

Fonte: O próprio Autor.

b) Zona 02

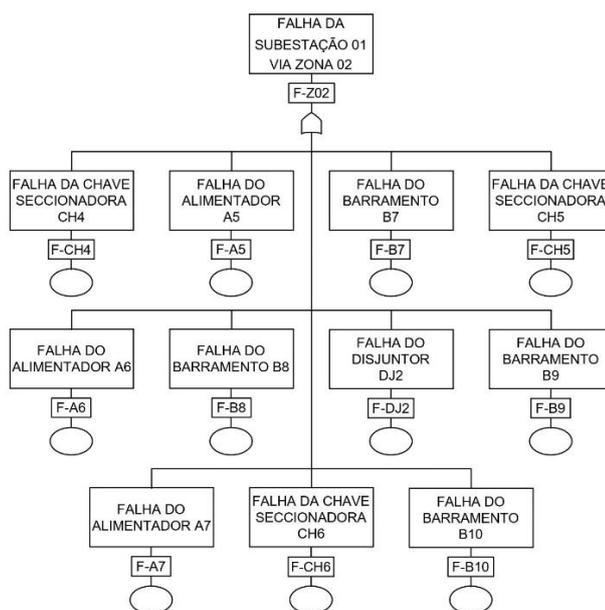
Figura 40: Zona de falha 02.



Fonte: O próprio Autor.

A Zona 02 é composta pelo disjuntor de proteção da Subestação 01, além dos barramentos, chaves seccionadoras e disjuntor de média tensão que a compõem. A falha de qualquer componente resulta na falha total da Subestação 01, sendo assim, a árvore de falha da Zona 02 é mostrada na Figura 41.

Figura 41: Árvore de falhas da Zona 02.



Fonte: O próprio Autor.

A modelagem da árvore de falhas da Figura 41 no *software TopEvent FTA*, utilizando os dados de confiabilidade demonstrado na Tabela 7, permite concluir que a Zona 02 possui a indisponibilidade, a disponibilidade e o MTTF mostrados na Tabela 9.

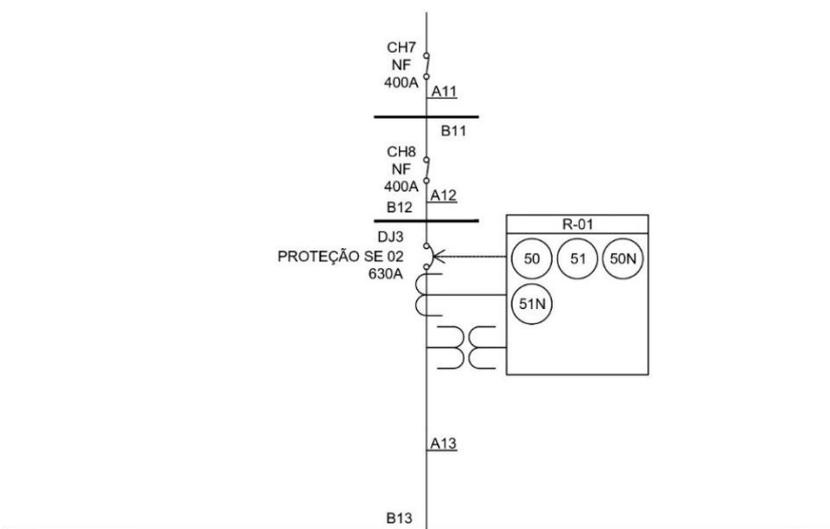
Tabela 9: Indicadores de confiabilidade da Zona 02.

Zona 02 (Proteção Subestação 01)			Falha do sistema via Zona 02		
Corte mínimo	Indisponibilidade	Contribuição evento de topo	Indisponibilidade	MTTF (anos)	Disponibilidade
F-A5	0,02206%	21,27700%	0,10368%	9,9	99,89632%
F-A6	0,02206%	21,27700%			
F-A7	0,02206%	21,27700%			
F-B7	0,00623%	6,00887%			
F-B8	0,00623%	6,00887%			
F-B9	0,00623%	6,00887%			
F-B10	0,00623%	6,00887%			
F-CH4	0,00357%	3,44329%			
F-CH5	0,00357%	3,44329%			
F-CH6	0,00357%	3,44329%			
F-DJ2	0,00187%	1,80363%			

Fonte: O próprio Autor.

c) Zona 03:

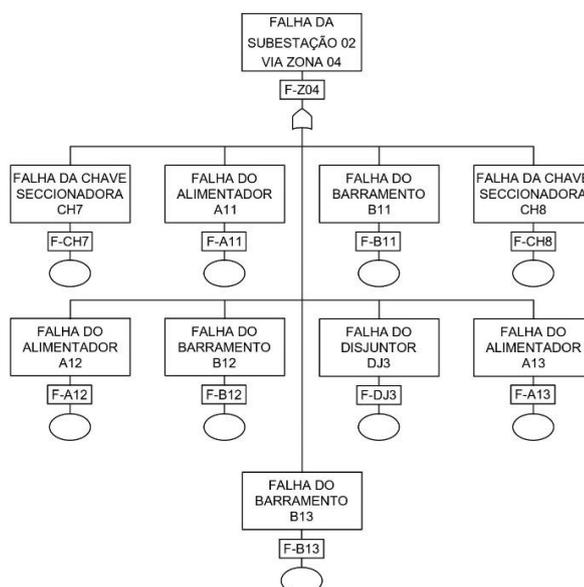
Figura 42: Zona de falha 03.



Fonte: O próprio Autor.

A Zona 03 é composta pelo disjuntor de proteção da Subestação 02, além dos barramentos, chaves seccionadoras e disjuntor de média tensão que a compõem. A falha de qualquer componente resulta na falha total da Subestação 02, sendo assim, a árvore de falha da Zona 03 é mostrada na Figura 43.

Figura 43: Árvore de falhas da Zona 03.



Fonte: O próprio Autor.

A modelagem da árvore de falhas da Figura 43 no *software TopEvent FTA*, utilizando os dados de confiabilidade demonstrados na Tabela 7, permite concluir que a Zona 03 possui a indisponibilidade, a disponibilidade e o MTTF mostrados na Tabela 11.

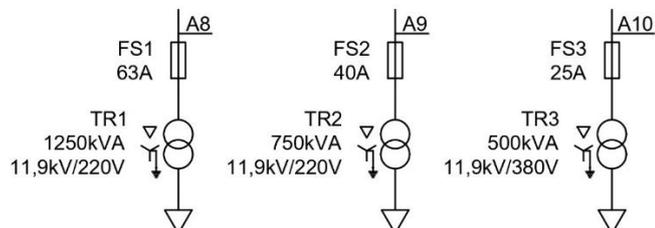
Tabela 10: Indicadores de confiabilidade da Zona 03.

Zona 03 (Proteção Subestação 02)			Falha do sistema via Zona 03		
Corte mínimo	Indisponibilidade	Contribuição evento de topo	Indisponibilidade	MTTF (anos)	Disponibilidade
F-A11	0,02206%	23,49810%	0,09388%	11,1	99,90612%
F-A12	0,02206%	23,49810%			
F-A13	0,02206%	23,49810%			
F-B11	0,00623%	6,63613%			
F-B12	0,00623%	6,63613%			
F-B13	0,00623%	6,63613%			
F-CH7	0,00357%	3,80273%			
F-CH8	0,00357%	3,80273%			
F-DJ3	0,00187%	1,99190%			

Fonte: O próprio Autor.

d) Zona 04:

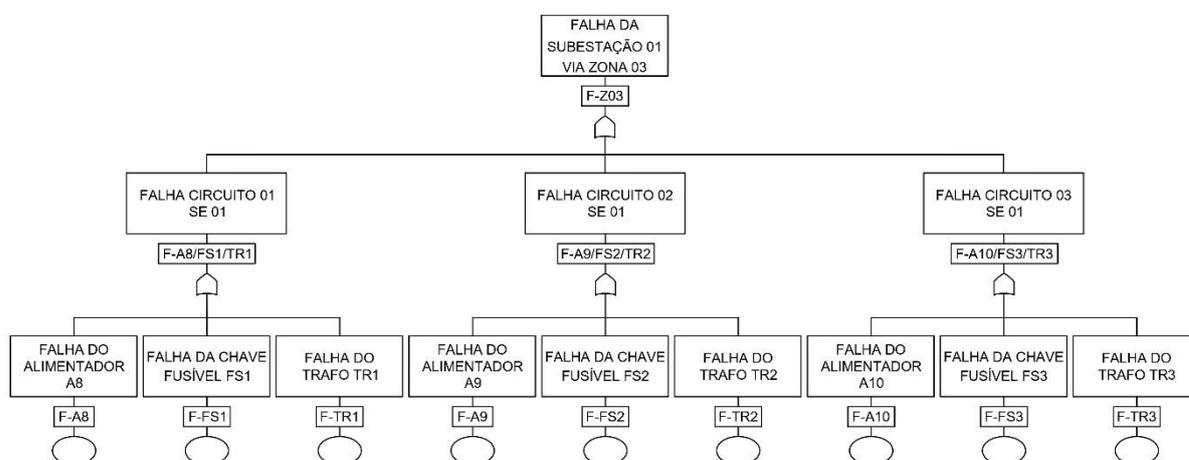
Figura 44: Zona de falha 04.



Fonte: O próprio Autor.

A Zona 04 é composta pelas chaves fusíveis, alimentadores do primário e transformadores da Subestação 01. A falha total da Subestação 01 ocorre com a combinação das falhas dos componentes mostradas na Figura 45.

Figura 45: Árvore de falhas da Zona 04.



Fonte: O próprio Autor.

A modelagem da árvore de falhas da Figura 45 no *software TopEvent FTA*, utilizando os dados de confiabilidade demonstrados na Tabela 7, permite concluir que a Zona 04 possui a indisponibilidade, a disponibilidade e o MTTF mostrados na Tabela 11.

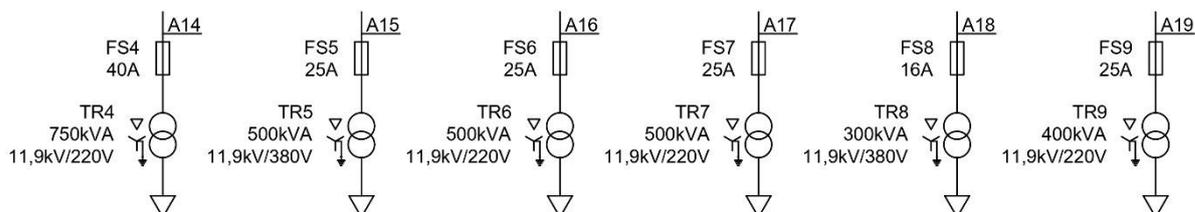
Tabela 11: Indicadores de confiabilidade da Zona 04.

Zona 04 (Transformação Subestação 01)			Falha do sistema via Zona 04		
Corte mínimo	Indisponibilidade	Contribuição evento de topo	Indisponibilidade	MTTF (anos)	Disponibilidade
F-A8.F-A9.F-A10	1,07354E-09%	69,78940%	1,53825E-09%	208.245.240,4	99,99999%
F-A8.F-A9.F-TR3	1,35287E-10%	8,79485%			
F-A8.F-A10.F-TR2	1,35287E-10%	8,79485%			
F-A9.F-A10.F-TR1	1,35287E-10%	8,79485%			
F-A8.F-TR2.F-TR3	1,70489E-11%	1,10833%			
F-A9.F-TR1.F-TR3	1,70489E-11%	1,10833%			
F-A10.F-TR1.F-TR2	1,70489E-11%	1,10833%			
F-TR1.F-TR2.F-TR3	2,14850E-12%	0,13967%			
F-A8.F-A9.F-FS3	1,45993E-12%	0,09491%			
F-A8.F-A10.F-FS2	1,45993E-12%	0,09491%			
F-A9.F-A10.F-FS1	1,45993E-12%	0,09491%			
F-A8.F-FS2.F-TR3	1,83980E-13%	0,01196%			
F-A9.F-FS1.F-TR3	1,83980E-13%	0,01196%			
F-A10.F-FS1.F-TR2	1,83980E-13%	0,01196%			
F-A10.F-FS2.F-TR1	1,83980E-13%	0,01196%			
F-A8.F-FS3.F-TR2	1,83980E-13%	0,01196%			
F-A9.F-FS3.F-TR1	1,83980E-13%	0,01196%			
F-FS1.F-TR2.F-TR3	2,31850E-14%	0,00151%			
F-FS2.F-TR1.F-TR3	2,31850E-14%	0,00151%			
F-FS3.F-TR1.F-TR2	2,31850E-14%	0,00151%			
F-A8.F-FS2.F-FS3	1,98540E-15%	1,29069E-04%			
F-A9.F-FS1.F-FS3	1,98540E-15%	1,29069E-04%			
F-A10.F-FS1.F-FS2	1,98540E-15%	1,29069E-04%			
F-FS1.F-FS2.F-TR3	2,50200E-16%	1,62652E-05%			
F-FS1.F-FS3.F-TR2	2,50200E-16%	1,62652E-05%			
F-FS2.F-FS3.F-TR1	2,50200E-16%	1,62652E-05%			
F-FS1.F-FS2.F-FS3	2,70000E-18%	1,75524E-07%			

Fonte: O próprio Autor.

e) Zona 05

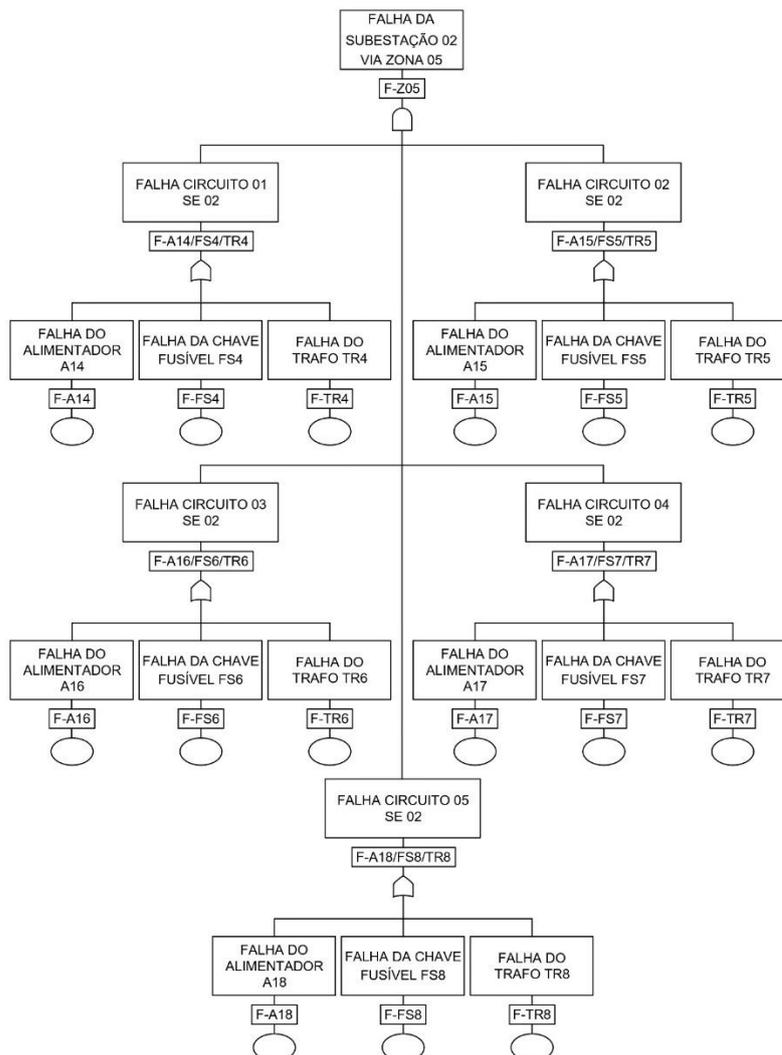
Figura 46: Zona de falha 05.



Fonte: O próprio Autor.

A Zona 05 é composta pelas chaves fusíveis, alimentadores do primário e transformadores da subestação 02. A falha total da subestação 02 ocorre com a combinação das falhas dos componentes mostradas na Figura 47.

Figura 47: Zona de falha 05.



Fonte: O próprio Autor.

A modelagem da árvore de falhas da Figura 47 no *software TopEvent FTA*, utilizando os dados de confiabilidade e MTTF estabelecidos na Tabela 7 resulta em uma árvore de falhas com 243 cortes mínimos. A Tabela 12 mostra os 40 primeiros cortes, que possuem maior contribuição e probabilidade de ocorrência para resultar na ocorrência do evento de topo, a confiabilidade e o MTTF da Zona 05 a partir da análise realizada no *software*, em função de todos os cortes mínimos.

Tabela 12: Indicadores de confiabilidade da Zona 05.

Zona 05 (Transformação Subestação 02)					
Corte mínimo	Indisponibilidade	Contribuição evento de topo	Falha do sistema via Zona 05		
			Indisponibilidade	MTTF (anos)	Disponibilidade
F-A14.F-A15.F-A16.F-A17.F-A18	5,22429E-17%	54,90964%			
F-A14.F-A15.F-A16.F-A17.F-TR9	6,58365E-18%	6,91971%			
F-A14.F-A15.F-A16.F-A18.F-TR7	6,58365E-18%	6,91971%			
F-A14.F-A15.F-A17.F-A18.F-TR6	6,58365E-18%	6,91971%			
F-A14.F-A16.F-A17.F-A18.F-TR5	6,58365E-18%	6,91971%			
F-A15.F-A16.F-A17.F-A18.F-TR4	6,58365E-18%	6,91971%			
F-A14.F-A15.F-A16.F-TR7.F-TR9	8,29671E-19%	0,87202%			
F-A14.F-A15.F-A17.F-TR6.F-TR9	8,29671E-19%	0,87202%			
F-A14.F-A15.F-A18.F-TR6.F-TR7	8,29671E-19%	0,87202%			
F-A14.F-A16.F-A17.F-TR5.F-TR9	8,29671E-19%	0,87202%			
F-A14.F-A16.F-A18.F-TR5.F-TR7	8,29671E-19%	0,87202%			
F-A14.F-A16.F-A17.F-TR5.F-TR6	8,29671E-19%	0,87202%			
F-A15.F-A16.F-A17.F-TR4.F-TR9	8,29671E-19%	0,87202%			
F-A15.F-A16.F-A18.F-TR4.F-TR7	8,29671E-19%	0,87202%			
F-A15.F-A17.F-A18.F-TR4.F-TR6	8,29671E-19%	0,87202%			
F-A16.F-A17.F-A18.F-TR4.F-TR5	8,29671E-19%	0,87202%			
F-A14.F-A15.F-TR6.F-TR7.F-TR9	1,04555E-19%	0,10989%			
F-A17.F-A18.F-TR4.F-TR5.F-TR6	1,04555E-19%	0,10989%			
F-A14.F-A16.F-TR5.F-TR7.F-TR9	1,04555E-19%	0,10989%			
F-A14.F-A17.F-TR5.F-TR6.F-TR9	1,04555E-19%	0,10989%			
F-A14.F-A18.F-TR5.F-TR6.F-TR7	1,04555E-19%	0,10989%			
F-A15.F-A16.F-TR4.F-TR7.F-TR9	1,04555E-19%	0,10989%			
F-A15.F-A17.F-TR4.F-TR6.F-TR9	1,04555E-19%	0,10989%			
F-A15.F-A18.F-TR4.F-TR6.F-TR7	1,04555E-19%	0,10989%			
F-A16.F-A17.F-TR4.F-TR5.F-TR9	1,04555E-19%	0,10989%			
F-A16.F-A18.F-TR4.F-TR5.F-TR7	1,04555E-19%	0,10989%			
F-A14.F-A15.F-A16.F-A17.F-S8	7,10466E-20%	0,07467%			
F-A14.F-A15.F-A16.F-A18.F-FS7	7,10466E-20%	0,07467%			
F-A14.F-A15.F-A17.F-A18.F-FS6	7,10466E-20%	0,07467%			
F-A14.F-A16.F-A17.F-A18.F-FS5	7,10466E-20%	0,07467%			
F-A15.F-A16.F-A17.F-A18.F-FS4	7,10466E-20%	0,07467%			
F-A17.F-TR4.F-TR5.F-TR6.F-TR9	1,31761E-20%	0,01385%			
F-A18.F-TR4.F-TR5.F-TR6.F-TR7	1,31761E-20%	0,01385%			
F-A14.F-TR5.F-TR6.F-TR7.F-TR9	1,31761E-20%	0,01385%			
F-A15.F-TR4.F-TR6.F-TR7.F-TR9	1,31761E-20%	0,01385%			
F-A16.F-TR4.F-TR5.F-TR7.F-TR9	1,31761E-20%	0,01385%			
F-A14.F-A15.F-A16.F-FS7.F-TR9	8,95328E-21%	0,00941%			
F-A14.F-A15.F-A16.F-S8.F-TR7	8,95328E-21%	0,00941%			
F-A14.F-A15.F-A17.F-FS6.F-TR9	8,95328E-21%	0,00941%			
F-A14.F-A15.F-A18.F-FS6.F-TR7	8,95328E-21%	0,00941%			

Fonte: O próprio Autor.

4.5. Diagrama de Ishikawa aplicado a subestação

Com base na abordagem realizada em 2.2.5.2, na Figura 48 é demonstrado o Diagrama de Ishikawa baseado na problemática da falha dos equipamentos, componentes e elementos da subestação que pode culminar na falha do sistema, conforme demonstrado em 4.4, deste modo, abordou-se os seis M de um Diagrama de Ishikawa convencional: método, mão de obra, material, medida, meio ambiente e máquina.

O método aborda o gerenciamento dos processos e procedimentos realizados para mitigar as falhas do sistema, nesse caso, não basta apenas concluir o projeto de uma subestação, é necessário também garantir os meios para que a sua qualidade seja mantida.

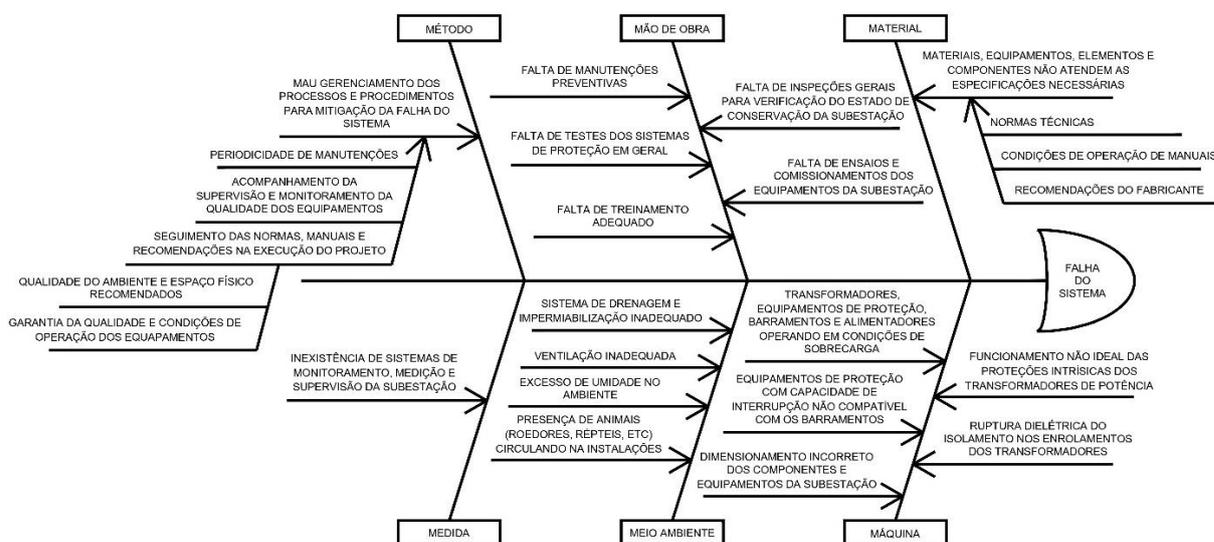
A mão de obra realiza a abordagem sobre algumas das atividades necessárias que garantem a manutenibilidade de uma subestação e, conseqüentemente, a constância de operação do sistema, por meio de processos de aferição da qualidade da subestação em geral.

O material diz respeito a garantia de que os componentes e elementos da subestação operem sob condições ideais de operação, conforme as recomendações de normas e especificações dos fabricantes, estando diretamente relacionado com a medida, visto que, é necessária a supervisão e o controle dos equipamentos para permitir que os mesmos operem sempre em tais condições recomendadas.

O meio ambiente relaciona algumas das características do meio em que os equipamentos estão presentes que podem afetar diretamente na falha dos mesmos, ocasionando sobreaquecimento e curtos-circuitos, podendo culminar na falha dos equipamentos e, conseqüentemente, do sistema.

Por fim, a máquina correlaciona algumas condições em que os equipamentos, componentes e elementos da subestação podem se encontrar, de forma a resultar diretamente na falha do sistema. Tais condições podem ser consequência do envelhecimento da subestação, deterioração, dimensionamento incorreto ou de qualquer outro evento relacionado com os outros cinco M supracitados.

Figura 48: Diagrama de Ishikawa para análise de falha da subestação.



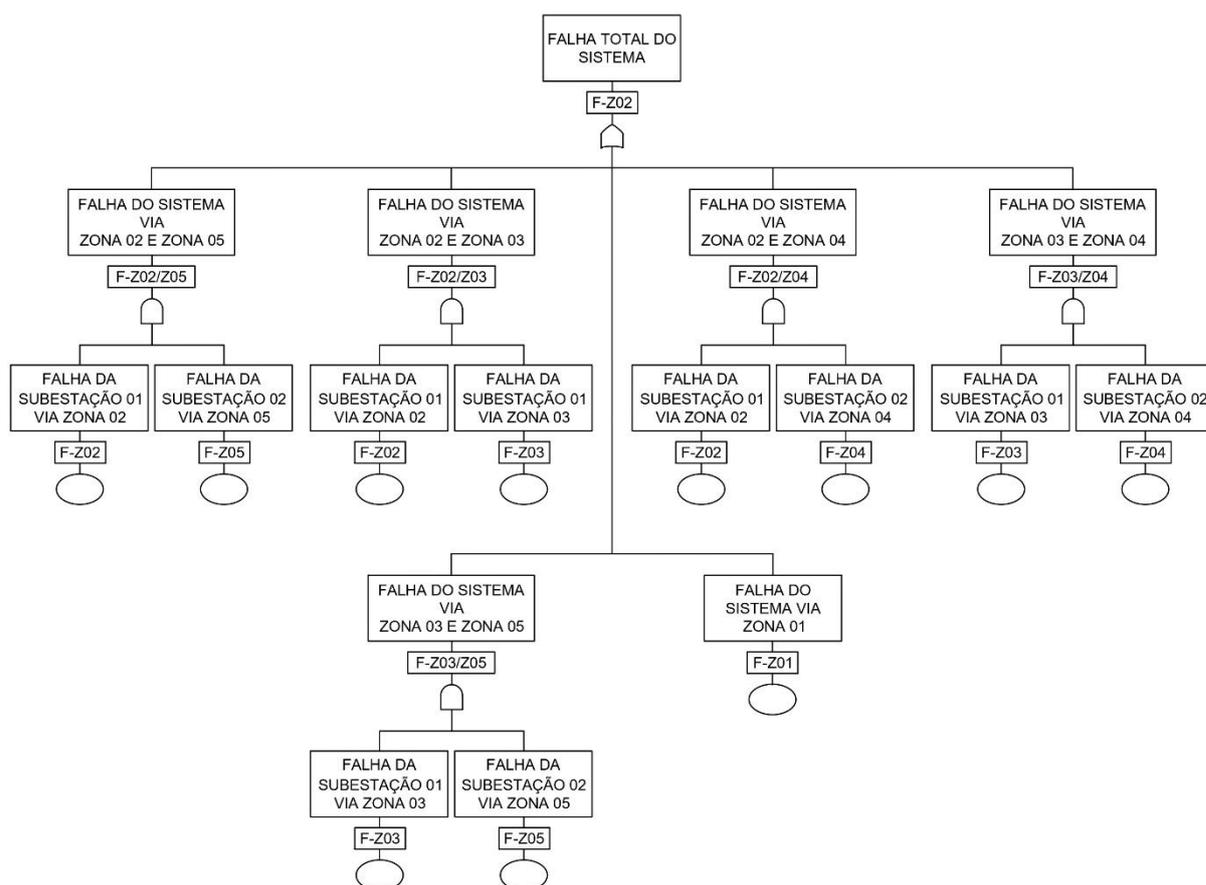
Fonte: O próprio Autor.

4.6. Resultados

Conforme visto no decorrer desse capítulo, os equipamentos, componentes e elementos da subestação, bem como as zonas aos quais os mesmos compõem, dispõem de uma baixa indisponibilidade, resultando em uma alta confiabilidade do sistema como um todo.

Com a conclusão dos dados de confiabilidade das cinco zonas, é possível definir o MTF, a indisponibilidade e a disponibilidade do sistema, relacionando as zonas entre si, em que o evento de topo é a falha total do sistema, conforme mostra a árvore de falhas da Figura 49, concluindo a confiabilidade geral do sistema.

Figura 49: Árvore de falhas para falha total do sistema.



Fonte: O próprio Autor.

A modelagem da árvore de falhas da Figura 49 no *software TopEvent FTA*, utilizando os dados de confiabilidade e MTF das cinco zonas de falhas, permite obter o nível de confiabilidade geral do sistema, conforme pode ser observado nos dados

apresentados na Tabela 13. A partir dos dados apresentados na Tabela 13, conclui-se que o sistema geral da planta elétrica das subestações do projeto abordado neste trabalho possui elevada disponibilidade, 99,92541%, e tempo médio para falhar de 14,7 anos.

Tabela 13: Indicadores de confiabilidade gerais do sistema.

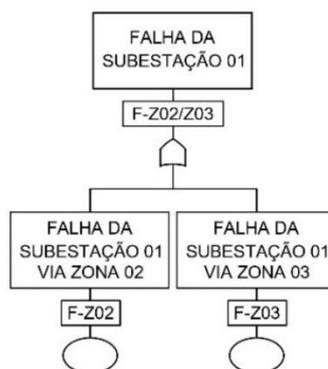
Sistema Geral			Falha do sistema		
Corte mínimo	Indisponibilidade	Contribuição evento de topo	Indisponibilidade	MTTF (anos)	Disponibilidade
F-Z01	0,07449%	99,86950%	0,07459%	14,7	99,92541%
F-Z02.F-Z04	9,73348E-05%	0,13050%			
F-Z02.F-Z03	1,59486E-12%	2,13824E-09%			
F-Z03.F-Z04	1,44411E-12%	1,93613E-09%			
F-Z02.F-Z05	9,86448E-20%	1,32254E-16%			
F-Z03.F-Z05	1,46354E-27%	1,96218E-24%			

Fonte: O próprio Autor.

A respeito da Entrada de Média Tensão, a análise qualitativa e quantitativa da sua modelagem, a partir da árvore de falhas, resultou em disponibilidade de 99,92551%, além de prevê o seu tempo médio para falhar como 14,7 anos, sendo esta a zona mais crítica entre todas, pois, conforme citado em 4.4, a falha de qualquer componente desta zona, exceto os que compõem o ramal de entrada, visto que o mesmo possui redundância, resulta na falha total do sistema.

A análise sob a Subestação 01, segregadas nas Zonas 02 e 04, resultou em uma disponibilidade de 99,89632% e um tempo médio para falhar de 9,9 anos, conforme a modelagem das Zonas 02 e 04, mostradas nas Figuras 67 e 68, em que é possível observar a árvore de falhas e os dados de confiabilidade da Subestação 01.

Figura 50: Árvore de falhas da Subestação 01.



Fonte: O próprio Autor.

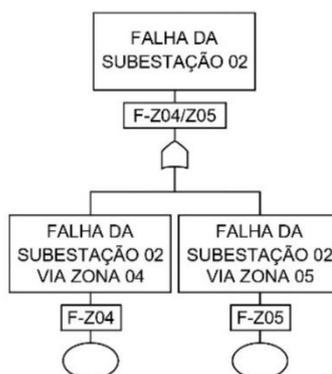
Tabela 14: Indicadores de confiabilidade da Subestação 01.

Subestação 01					
Corte mínimo	Indisponibilidade	Contribuição evento de topo	Falha da Subestação 01		
F-Z02	0,10368%	99,99999%	Indisponibilidade	MTTF (anos)	Disponibilidade
F-Z03	1,53825E-09%	1,48365E-06%	0,10368%	9,9	99,89632%

Fonte: O próprio Autor.

A análise sob a Subestação 02, dividida entre as Zonas 04 e 05, resultou em uma disponibilidade de 99,90612%, além de um tempo médio para falhar de 11,1 anos, conforme a modelagem das Zonas 04 e 05, mostradas nas Figuras 69 e 70, em que é possível observar a árvore de falhas e os dados de confiabilidade da Subestação 02.

Figura 51: Árvore de falhas da Subestação 02.



Fonte: O próprio Autor.

Tabela 15: Indicadores de confiabilidade da Subestação 02.

Subestação 02					
Corte mínimo	Indisponibilidade	Contribuição evento de topo	Falha da Subestação 02		
F-Z04	0,09388%	99,99999%	Indisponibilidade	MTTF (anos)	Disponibilidade
F-Z05	9,51435E-17%	1,01346E-13%	0,09388%	11,1	99,90612%

Fonte: O próprio Autor.

Ademais, a análise da confiabilidade do sistema pode ser feita a nível de componentes, elementos e equipamentos, por meio das Cadeias de Markov que foi desenvolvida em 4.3. O desenvolvimento das equações que descrevem a transição do estado permite prevê o estado futuro dos transformadores, disjuntores, chaves fusíveis, chaves seccionadoras, alimentadores e barramentos, em que tal análise está

diretamente interligada com a análise da árvore de falhas, visto que a falha das zonas dependem intimamente da falha individual dos mesmos.

Por fim, diante da possível falha dos componentes, elementos e equipamentos, com as probabilidades e tempos de falha definidos anteriormente, o desenvolvimento do Diagrama de Ishikawa da Figura 6 permite a realização de uma análise qualitativa, para concluir as causas que podem resultar no efeito de falha do sistema. O levantamento do método, mão de obra, material, medida, meio ambiente e máquina é de extrema importância, visto que o entendimento dos processos e procedimentos que podem resultar na indisponibilidade da subestação deve ser realizado para a realização de práticas de preservação, com o intuito de não permitir panes precoce, tomando como referência os dados obtidos por meio da análise de confiabilidade do sistema.

4.7. Considerações finais

Este capítulo apresentou as subestações 11,9kV/380-220V que fazem parte de um projeto de múltiplas unidades consumidoras de um órgão público judiciário do Brasil, em que foram calculados os índices de confiabilidade do sistema, sob a análise de cinco zonas definidas em 4.4, que compõem a entrada de média tensão e as duas subestações previstas no projeto.

O estudo contemplou os transformadores, disjuntores, chaves fusíveis, chaves seccionadoras, alimentadores e barramentos, e as zonas que os mesmos compõem, sob a visão das Cadeias de Markov, das árvores de falhas e do Diagrama de Ishikawa, permitindo concluir indicadores de confiabilidade do sistema e a identificação dos processos e procedimentos que podem acarretar na sua falha.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

5.1. Conclusão

Este trabalho se propôs a realizar um estudo de confiabilidade de subestações 11,9kV-380/220V, integrantes de um projeto de múltiplas unidades consumidoras de um órgão público judiciário do Brasil. Nesse sentido, buscou-se analisar a topologia

do sistema de fornecimento de energia, composto pela entrada de média tensão e duas subestações, concluindo os indicadores de confiabilidade abordados no decorrer dos capítulos.

Concluiu-se, embasado nos indicadores de confiabilidade estudados: tempo médio para falhar (MTTF), taxas de reparos, tempo médio para reparar (MTTR), disponibilidade e indisponibilidade, a forma de espaço de estados simplificados dos equipamentos, componentes e elementos, e definiu-se a probabilidade de transição entre estados, em que se permitiu a conclusão das suas Cadeias de Markov e, conseqüentemente, as suas equações de probabilidade de estados futuros.

A análise contemplou ainda as modelagens das árvores de falhas do sistema, por meio do *software TopEvent FTA*, e calculou-se, através do *software MS Excel*, em função dos dados levantados dos componentes da subestação, o tempo médio para falhar, a disponibilidade e, por consequência, a indisponibilidade das zonas as quais a topologia do sistema foi segregada.

Constatou-se ainda a necessidade da aplicação de ferramentas de qualidade, tais como o Diagrama de Ishikawa, para detecção das falhas no processo, de modo a descobrir a relação de causas e efeitos que as geraram, em que relacionou-se os seis M propostos por Kaoru Ishikawa: método, mão de obra, material, medida, meio ambiente e máquina, para entender os processos e procedimentos que culminam na falha do sistema, com o intuito de obter-se uma rápida recuperação do fornecimento de energia nos casos de falha ou buscar melhorias para evitar as causas levantadas.

Concluiu-se, portanto, através da aplicação dos métodos de análise supramencionados, resultados positivos quanto a confiabilidade do sistema estudado. De acordo com os cálculos realizados, o sistema apresentou 99,92541% de disponibilidade e tempo médio para falhar previsto de aproximadamente 14,7 anos. Ademais, as subestações 01 e 02, mencionadas no capítulo Estudo de Caso, apresentam 99,89632% e 99,90612% de disponibilidade, respectivamente, e 9,9 e 11,1 anos de tempo médio para falhar, respectivamente, gerando resultados satisfatórios quanto a sua operacionalização.

5.2. Trabalhos Futuros

Visando melhorias do presente trabalho, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Propor mudanças na topologia, equipamentos, componentes e elementos, a fim de melhorar os resultados dos indicadores de confiabilidade das topologias apresentadas;
- Buscar dados dos indicadores de confiabilidade (MTTF, taxas de reparos e MTTR) dos equipamentos e componentes analisados neste trabalho sob a realidade do sistema elétrico brasileiro;
- Replicar o estudo de confiabilidade à uma planta industrial, relacionando o custo de parada *versus* análise de investimentos;
- Aplicar o Diagrama de Pareto para realizar a comparação entre os dados obtidos;
- Desenvolver o estudo de confiabilidade com outros tipos de modelos de falhas, tais como: modelos reparáveis, modelos irreparáveis e distribuição de Weibull;
- Integrar o projeto a um sistema de supervisão e aquisição de dados para análise dos resultados práticos.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 894 p.

ALLAN, R.N.; DE OLIVEIRA, M.F.; KOZLOWSKI, A.; WILLIAMS G.T.. **Evaluation the Reliability of Electrical Auxiliary Systems in Multi-Unit Generation Stations**. New York: IEEE, 1980. 71 p.

ALVES, Rui; DELGADO, Catarina. **Processos Estocástico**. Porto: [s. n.], 1997. 19 p.

ARENTZ, Davi Sixel. **Confiabilidade Nodal em Sistemas de Potência**. Orientador: Prof. Dr. Marcus Theodor Schilling. 2001. 288 p. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada e Automação) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR-5462. **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, ABNT, 1994. 37p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR-IEC-62271-102. **Equipamentos de Alta-Tensão Parte 102: Seccionadores e Chaves de Aterramento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2006. 85p.

AUTOMATIVE INDUSTRY ACTION GROUP (Michigan). **Advanced Product Quality Planning and Control Plan**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 1995. 130 p.

BAPTISTA, M.L.P. **Abordagens de riscos em barragens de aterro**. 2008. 570 f. Dissertação (Doutorado) - Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.

BARROS, Angela Alves de Araújo. **Distribuições Exponencializadas e Estentidas: Uma Abordagem Clássica e Bayesiana**. Orientador: Prof. Dr. Eufrázio de Souza Santos. 2008. 85 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Estatística e Computacional) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

BOLLEN, M. H. J. **Literature Search for Reliability Data of Components in Electric Distribution Networks**. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1993. 152 p.

CABRAL, Eduardo Almeida. **Estudo de Confiabilidade Aplicado à Análise de Alternativas de Projeto de Subestação Industrial 69-13,8kV Baseado no Modelo de Markov e Análise de Falha**. Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio. 2020. 81 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

DIAGO, Ronaldo; AMARAL, Valder Moreira. **Eletrônica Digital**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011. 91 p. v. 4.

FARIAS, Ana Maria Lima de; LAURENCEL, Luiz da Costa. **Probabilidade**. Niterói: [s. n.], 2007. 117 p.

FILHO, João Mamede. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 1215 p.

HINOJOSA, Adrian; MILANÉS, Aniura. **Uma Introdução aos Processos Estocásticos com Aplicações**. Belo Horizonte: [s. n.], 2011. 125 p.

HRISTOSKI, Ilija; KOSTOSKAI, Olivera; KOTEVSKI, Zoran; DIMOVSKI, Tome. **Causality of Factors Reducing Competitiveness of e-Commerce Firms**. 2017. 21 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE. **IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable and Commercial Power Systems (IEEE Gold Book)**. New York: IEEE, 1991. 383 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE. **Report on Reliability Survey of Industrial Plants, Part I: Reliability of Industrial Plants**. New York: IEEE, 1974. 235 p.

JENS, Rodrigo Dias. **Modelo de Monitoramento e Avaliação da Confiabilidade e Disponibilidade de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Base nas Condições de Uso de Transformadores**. Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio

Cugnasca. 2006. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

JUNIOR, P. S. P.; SALGE, G. S.; DAVI, M. J. B. B.; MARTINS, C. M.; PEREIRA, P. S.; LOURENÇO, G. E. **Automatização de Ensaios em Equipamentos de Subestações Através de uma Ferramenta Multifuncional Capaz de Realizar Testes em Níveis Primário e Secundário**. Foz do Iguaçu: [s. n.], 2019. 10 p.

LIMA, Fernando Neves; NAGHETTINI, Mauro; ESPÓSITO, Terezinha. **Aplicação do Método da Árvore de Falhas (FTA) para Avaliação da Probabilidade de Falha das Comportas do Vertedouro de uma Barragem**. Bento Gonçalves, 2013. 8 p.

MONTEIRO, Paulo Roberto Duailibe. **Subestações: Tipos, Equipamentos e Proteção**. Maracanã: [s. n.], 1999. 85 p.

MORRETIN, Pedro Alberto; BUSSAB, Wilton de Oliveira. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 77 p.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, INC (Newtown Square, Pennsylvania, USA). **A Guide to the Project Management Body of Knowledge**. 5. ed. Newtown Square: Project Management Institute, 2013. 616 p.

ROSS, Sheldon M. **Introduction to Probability Models**. 9. ed. Berkeley: Elsevier, 2007. 801 p.

SALLAM, A.A; DESOUKY, M.; DESOUKY, H.. **Evaluation of Optimal-Reliability Indices for Electrical Distribution Systems**. New York: IEEE, 1990. 264 p.

SCAPIN, Carlos Alberto. **Análise Sistemática de Falhas**. 2. ed. Nova Lima: Falconi, 2013. 290 p.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (Brasília). **Ferramentas da Qualidade**. 1. ed. Brasília: SENAI/DN, 2015. 122 p.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (Brasília). **Instalações de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)**. 1. ed. Brasília: SENAI/DN, 2018. 118 p.

SILVA, Larissa Miguez da. **Cadeias de Markov e Aplicações**. Orientador: Prof. Dr. Adriano de Oliveira Caminha. 2017. 91 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Matemática) - Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2017.

TEIXEIRA, Ralph Costa; MORGADO, Augusto César. **Introdução à Teoria da Probabilidade**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2011. 36 p.