

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI 	CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLOGICA DE MINAS GERAIS 
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA ASSOCIAÇÃO AMPLA PPGEI- UFSJ/CEFET MG	

ISABELA OLIVEIRA GUIMARÃES

Orientador: Prof. Dr. Leonidas Chaves de Resende

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos do Nascimento

**AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DA DISTRIBUIÇÃO
SOB A PRESENÇA DE FONTES DISTRIBUÍDAS
UTILIZANDO SIMULAÇÃO MONTE CARLO SEQUENCIAL**

Dissertação submetida ao PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEI, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos de Potência.

Dezembro, 2018

São João del-Rei, MG, Brasil

ISABELA OLIVEIRA GUIMARÃES

**AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DA DISTRIBUIÇÃO
SOB A PRESENÇA DE FONTES DISTRIBUÍDAS
UTILIZANDO SIMULAÇÃO MONTE CARLO SEQUENCIAL**

Dissertação submetida ao PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEL, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos de Potência.

Banca Avaliadora

Orientador: Prof. Dr. Leonidas Chaves de Resende

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos do Nascimento

Prof. Dr. Márcio Matias Afonso

Prof. Dr. Leonardo Willer de Oliveira

Dezembro, 2018

São João del-Rei, MG, Brasil

“Ser homem é ser responsável. É conhecer a humilhação diante de uma miséria que não parecia depender de nós. É orgulhar-se de uma vitória obtida pelos companheiros. É sentir, ao colocar nossa pedra, que contribuímos para a construção do mundo.”

Antoine de Saint-Exupéry

AGRADECIMENTOS

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes”.

Isaac Newton

Reservo este espaço para agradecer a todos os “gigantes” que me carregaram nos ombros para que eu alcançasse objetivos maiores.

A Deus, meu amparo, refúgio e fortaleza.

Aos meus pais Aroldo e Lourdinha, tantas foram as quedas nesses últimos anos, mas as grandes conquistas exigem grandes esforços, que sorte a minha ter vocês como pilar.

À minha irmã Daniela e ao meu cunhado Anderson pelo apoio incondicional. Ao meu sobrinho e afilhado João Eloi, seu brilho iluminou toda a escuridão que existiu.

À minha família, em especial a vovó Santinha, Tia Maria Helena e Dindinha, por todo zelo e cuidado.

Aos meus orientadores, prof. Dr. Luiz Carlos, prof. Dr. Luiz Antônio Manso e prof. Dr. Leonidas Chaves, agradeço a confiança depositada, apoio e atenção.

Ao prof. Dr. Luiz Carlos, que me introduziu ao universo da pesquisa em 2013. Desde então, acompanha meu progresso como pesquisadora, obrigada por todo tempo dedicado

Aos amigos de São Joao del-Rei, em especial Tatiane, Patrícia e Lucas.

Ao Felipe Laure, que venceu seus próprios desafios na pós-graduação e se fez indispensável na conquista do meu.

Ao PPGEL e DEPEL. Em particular Mauricéia cuja companhia e cuidado preencheram as tardes em laboratório, Marco Aurélio e Rodolfo, que me cederam um espaço para estudo no LAIPE.

Aos alunos da UFSJ, que colaboram diariamente na construção e crescimento do meu perfil profissional.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro, tornando possível o desenvolvimento e conclusão desse estudo.

“Para aqueles determinados a voar, não ter asas é apenas um detalhe”.

Oscar Wilde

RESUMO

O desenvolvimento do setor elétrico mundial e os diversos recursos utilizados em seu benefício são temas em constante crescimento, os quais se devem, principalmente, à necessidade de garantir o funcionamento adequado do sistema com o contínuo aumento da demanda. Assim, é necessário que o sistema elétrico de potência (SEP) passe por reestruturações que implicam em investimentos financeiros não previstos pela concessionária de energia, e por isso muitas vezes são postergados.

Para monitorar o serviço prestado pelas concessionárias, as agências reguladoras impõem padrões para os índices de qualidade e confiabilidade. Existe uma diversidade de métodos para avaliação dos índices e, desta forma, quantificar as penalidades aplicadas. No intuito de reforçar o sistema e atender aos padrões especificados, as concessionárias utilizam recursos adicionais como reforços e melhorias. Dentre esses, a implementação de Recursos Energéticos Distribuídos (RED), descentralizando a geração de Energia Elétrica. Nesta dissertação, a abordagem dos RED é voltada para a inserção de geração distribuída (GD), a qual pode provocar melhorias na continuidade do serviço prestado, reduzindo assim os índices de confiabilidade e as multas.

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar os índices de confiabilidade em Sistemas de Distribuição (SD) com a presença de GD. Para tal, utiliza-se a Simulação Monte Carlo Sequencial (SMCS), que é capaz de considerar a natureza estocástica e complexa do problema, decorrentes das incertezas agregadas pela intermitência da GD utilizada e do processo de operação-falha de seus equipamentos. A proposta traz o desenvolvimento de uma ferramenta computacional genérica capaz de avaliar a confiabilidade de qualquer SD. A ferramenta é desenvolvida com auxílio da linguagem C++, na qual são utilizados os benefícios da programação orientada

a objetos (POO), o que torna possível simular o desempenho do sistema em um intervalo de tempo desejável.

ABSTRACT

The development of the global electricity sector and the various resources used for its benefit are continuously growing topics, mainly driven by the need to ensure proper system operation alongside the continuous increase in demand. Therefore, the electrical power system (EPS) must undergo restructuring, which involves financial investments not initially foreseen by the power utility, often leading to delays.

To monitor the service provided by utilities, regulatory agencies impose standard levels for quality and reliability. In current regulations, a variety of methods exist to evaluate system performance and quantify the applied penalties. To reinforce the system and comply with the standards, utilities deploy additional resources such as system reinforcement and improvements. Among these, the implementation of Distributed Energy Resources (DER) aims to decentralize electricity generation. In this dissertation, the approach to DER focuses on the insertion of Distributed Generation (DG), which can improve service continuity, thereby improving reliability indices and financial penalties.

This dissertation aims to evaluate reliability indices in Distribution Systems (DS) with the insertion of DG. To achieve this, a sequential Monte Carlo simulation (SMCS) is used, capable of assessing the stochastic and complex nature of the problem stemming from uncertainties related to the intermittency of distributed sources and the failure/repair process of their equipment. The proposal presents the development of a generic computational tool capable of evaluating the reliability of any DS. Developed using the C++ language, the tool explores the benefits of Object-Oriented Programming (OOP), resulting in software capable of simulating system performance over a desired time interval.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
SUMÁRIO.....	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
ABREVIATURAS.....	x
CAPÍTULO 1 Introdução	1
1.1 Considerações Gerais.....	1
1.2 Revisão de Literatura	3
1.3 Estrutura do Trabalho	10
1.4 Publicações.....	11
CAPÍTULO 2 Confiabilidade em Sistemas de Distribuição	12
2.1 Introdução	12
2.2 Terminologias e Conceitos básicos.....	13
2.3 Topologias Redes de Confiabilidade.....	16
2.3.1 Série e Paralelo	19
2.3.2 Sistemas Complexos	21
2.4 Decomposição de Sistemas.....	25
2.4.1 Sistema IEEE-RBTS Bus 2	26
2.5 Dinâmica dos Dispositivos de Proteção	29
2.6 Índices de Desempenho do Sistema de Distribuição	30
2.7 Métodos de Simulação.....	33
2.7.1 Modelos analíticos	33
2.7.2 Simulação Monte Carlo.....	34
2.8 Considerações do Capítulo	37
CAPÍTULO 3 Modelo de Geração Distribuída (MGD)	38

3.1	Introdução	38
3.2	Geração Distribuída (GD)	39
3.3	Impactos da Inserção da GD no Sistema de Distribuição	40
3.4	Modelagem da GD	43
3.5	Fluxo de Potência (FPT)	44
3.6	Análise do Problema	47
3.6.1	Modelo da Fonte no Fluxo	48
3.6.2	Modelo da GD na Análise da Confiabilidade	51
3.7	Considerações do Capítulo	54
CAPÍTULO 4 Metodologia Proposta.....		55
4.1	Introdução	55
4.2	Etapas da Simulação Monte Carlo Sequencial	57
4.3	Representação do Sistema em Árvore	58
4.3.1	Construção da Árvore Normalmente Fechada (NF).....	58
4.4	Construção da Árvore Normalmente Aberta (NA).....	65
4.5	Análise da Falta	67
4.5.1	Análise da Falha com GD	70
4.6	Fluxograma da Ferramenta.....	72
4.7	Considerações do Capítulo	75
CAPÍTULO 5 Resultados		76
5.1	Sistema IEEE RBTS Bus 2	77
5.2	Considerações	86
CAPÍTULO 6 Conclusões.....		87
6.1	Contribuições do Estudo	87
6.2	Propostas Futuras.....	88
REFERÊNCIAS.....		90

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Sistema Radial	17
Figura 2.2-Sistema em Anel	18
Figura 2.3-Sistema Radial com Recurso	18
Figura 2.4- Sistema de Dois Componentes em Série	19
Figura 2.5- Sistema de Dois Componentes em Paralelo.....	20
Figura 2.6- Sistema Complexo	22
Figura 2.7-Subsistemas Equivalentes	23
Figura 2.8- Sistema IEEE- RBTS Bus 2	26
Figura 2.9- Sistema IEEE-RBTS BUS 2 Identificação de Ramais.....	27
Figura 2.10- Sistema IEEE-RBTS BUS 2 Decomposto.....	28
Figura 2.11- Diagrama de um Subsistema a Dois Estados	34
Figura 2.12- Histórico de Falhas	35
Figura 3.1: Sistema exemplo MSP	45
Figura 3.2 Ramais 1 e 2 IEEE-RBTS BUS 2: Análise da GD no Fluxo de Potência	50
Figura 3.3 Ramais 1 e 2 do Sistema RBTS BUS 2: Modelo da GD na Confiabilidade	53
Figura 4.1- Sistema Teste de Distribuição	59
Figura 4.2- Aplicação da lista Auxiliar	61
Figura 4.3 -Lista Auxiliar.....	61
Figura 4.4-Construção da Árvore de Conexões	64
Figura 4.5-Árvore NA	67
Figura 4.6- Identificação de Dispositivos de Proteção.....	68
Figura 4.7-Trecho do SD: Destaque da Chave NA	70
Figura 4.8- Sistema IEEE RBTS Bus 2 Modificado: Decomposto e com GD	72
Figura 4.9- Fluxograma do Algoritmo Proposto	74
Figura 5.1- Posição das Fontes Distribuídas.....	85

ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade
FPT	Fluxo de Potência
GD	Geração Distribuída
MSP	Método Soma de Potência
MTBF	Mean Time Between Failures (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTF	Mean Time to Failure (Tempo Médio para Falha)
MTTR	Mean Time to Repair (Tempo Médio para Reparo)
NA	Normalmente aberto
NF	Normalmente fechado
POO	Programação Orientada a Objetos
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional
r	Duração Média da Falha
RED	Recursos Elétricos Distribuídos
RE-SEB	Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro
SE	Setor Elétrico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SD	Sistema de Distribuição
SMC	Simulação Monte Carlo
SMCS	Simulação Monte Carlo Sequencial
VP	Varredura Progressiva
VPR	Varredura Progressiva Regressiva

VR	Varredura Regressiva
λ	Taxa de Falha (<i>Failure Rate</i>)

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Considerações Gerais

A energia elétrica assume atualmente, papel fundamental no desenvolvimento da sociedade. O setor elétrico (SE), composto por agentes públicos e privados, é responsável por exercer atividades técnicas e regulatórias referentes ao fornecimento de energia. O Sistema Elétrico de Potência (SEP) atua nas funções de gerar, transmitir e distribuir a energia. É no Sistema de Distribuição (SD) que ocorre a conexão entre o transporte de energia e o consumidor. Ao longo dos anos, o SD vem enfrentando mudanças significativas. Essas são atribuídas tanto à elevação de cargas conectadas, quanto à privatização de diversas companhias distribuidoras. Resultante da reestruturação do setor elétrico, a privatização provocou diversas mudanças na estrutura do SD vigente, além de motivar o mercado competitivo entre as companhias. O novo cenário fez com que a qualidade e continuidade do serviço prestado pelas distribuidoras se tornassem requisitos operacionais, sendo regulamentados e fiscalizados. O estado operacional do sistema é capaz de afetar diretamente a economia. Por essa razão, a posse de uma estrutura confiável e continua a nível de suprimento da carga é fator decisivo no mercado de energia. Assim, é necessário avaliar o desempenho do sistema. Isso pode ser feito por meio de ferramentas computacionais, fazendo com que estas sejam de grande importância para o planejamento e operação do SD.

Para garantir o suprimento da carga e se enquadrar na regulamentação proposta pelo órgão, as distribuidoras necessitam, por vezes, utilizar diversos recursos para auxiliar no funcionamento do sistema disponível. Recentemente, devido a razões ambientais e sociais, estudos passaram a abordar o uso de fontes auxiliares de natureza

renovável [IE16], [SNR12], [AAS01], [R02]. A Geração Distribuída (GD) é vista como uma forma de agregar potência ao sistema. Sua inserção proporciona uma redução do total de energia fornecido pela concessionária, caso seja conectada corretamente ao SD. A inserção da GD tende a melhorar o índice de confiabilidade da concessionária, mantendo a continuidade do serviço [BM00], [IN02].

A análise da confiabilidade de SD vem recebendo maior atenção atualmente, e com isso pode ser encontrada em diversos estudos disponíveis. Esses estudos se baseiam em princípios e conceitos que são de grande importância no estudo da confiabilidade, detalhados na referência [ABS91]. Com isso, são propostas novas metodologias para analisar o desempenho do SD. Ressalta-se que nas publicações encontradas, a avaliação da continuidade da energia na distribuição é abordada utilizando um modelo probabilístico do sistema, o qual é baseado em parâmetros estocásticos, tais como taxa de falha e tempo de reparo dos elementos que o compõem. Diversas são as técnicas desenvolvidas para avaliar a confiabilidade, e sua escolha é dependente do cenário em que será aplicada. Em meio aos estudos, comumente são propostas aproximações que se baseiam nos métodos analíticos ou em Simulação Monte Carlo (SMC).

As técnicas analíticas propostas para a avaliação da confiabilidade são diversas [BA92], [WSQ02]. Nos estudos publicados é possível encontrar diversas metodologias, cujo objetivo é minimizar a representação do sistema. A redução na topologia do SD analisado, faz com que o método analítico seja aplicável. Em adição, são propostas novas técnicas e recursos matemáticos para executar e identificar possíveis reduções do sistema. Essas técnicas variam desde a enumeração de estados, conjunto mínimos de cortes mínimos e cadeias de Markov [MH12]. Independente da técnica analítica adotada, sua aplicação se limita ao tamanho do sistema, pois, uma vez que envolve técnicas matemáticas, o grau de dificuldade dos cálculos, juntamente com a representação, será tão maior quanto maior for o sistema. Isso inviabiliza por vezes o uso dessas metodologias.

Existem ainda técnicas cuja abordagem da confiabilidade emprega os métodos baseados na simulação Monte Carlo (SMC) [AS95]. O uso dessa metodologia tornou-se popular por ser capaz de descrever características aleatórias de sistemas, tais como as observadas no SD. Por meio dela, é possível descrever quase todo sistema, sendo empregada em análises onde as técnicas analíticas não são aplicáveis. Sabe-se, porém, que o tempo computacional das técnicas envolvendo SMC é elevado, principalmente em situações em que são adotadas simulações do tipo cronológica e os índices estimados são oriundos de eventos raros. Isso ocorre porque os cálculos envolvidos no processo requerem dados referentes ao estado operativo dos componentes do sistema, cuja amostra é feita sequencialmente em períodos. Dessa forma, os resultados são vinculados às amostragens tomadas durante a execução.

Inserir recursos auxiliares em um SD tem por objetivo promover benefícios tanto à concessionária quanto ao consumidor. A instalação de GD é um exemplo típico, muito utilizado na atualidade, no entanto, o seu emprego adiciona incertezas ao problema, as quais ainda não possuem modelos e metodologias consolidados na literatura. Para que avaliação dos reais impactos dessa inserção no sistema seja executada corretamente, é ideal que a modelagem adotada seja capaz de descrever as incertezas do problema. É proposto, nesta dissertação, um eficiente algoritmo de uma Simulação Monte Carlo Sequencial (SMCS), capaz de avaliar a confiabilidade de SDs reais com a inserção de GD. A proposta faz uso de curvas horárias tanto para carga quanto para as novas fontes, como as utilizadas em [MLR09]. Agregada à SMCS, utiliza-se a Programação Orientada a Objetos (POO), que se trata de uma técnica de programação que auxilia no desempenho computacional da ferramenta [D05].

1.2 Revisão de Literatura

A seguinte pesquisa promove um estudo da confiabilidade em Sistemas Elétricos de Distribuição (SD). Ainda como objetivo, são analisados os possíveis impactos

causados no sistema após a inclusão da Geração Distribuída (GD) na operação. Ressalta-se que, a GD avaliada é de origem renovável e por isso é necessário incorporar nas análises, as particularidades atribuídas a elas quanto à intermitência na potência elétrica disponível. Como sustento para as considerações feitas neste estudo, são tomadas premissas e observações apresentadas em materiais precedentes. Em uma análise da literatura, é possível encontrar uma vasta biblioteca de publicações abordando a confiabilidade em Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Nas referências [ABL84], [ABS98], [ABB94], [ABB99], estão reunidos diversos artigos cuja contribuição é relevante no estudo da confiabilidade em SEP. Por um longo período, o estudo da confiabilidade foi predominante nos setores da geração e transmissão, justificando o elevado número de técnicas desenvolvidas e materiais publicados [SMC91], [MPS93], [GB93]. Em décadas mais recentes, o SD passou a ser objeto de maior atenção dos pesquisadores. Visto que, grande parte da indisponibilidade de energia nos pontos de carga passou a ser identificada e atribuída a falhas ocorridas na distribuição de energia [BA94]. Com isso as diversas técnicas aplicadas antes na geração e transmissão foram adaptadas para que pudessem assim ser utilizadas no SD [ABS91],[ADH79], [BG96], [S00], [SCB02], [CK09].

O objetivo principal do setor elétrico desde sua criação é garantir o equilíbrio entre geração de energia e carga conectada. Contudo, a rápida popularização da energia elétrica, fez com que o crescimento da ofertada ocorresse a passos mais lentos que o da demanda. Historicamente, durante os anos de 1883 a 1930 o setor responsável pela geração aumentou de forma expressiva, marco ocorrido devido à construção das primeiras usinas hidroelétricas do país [C12]. Inicialmente a constituição do setor elétrico brasileiro abrangia empresas de operação vertical, majoritariamente estatais, responsáveis pelas atividades de geração, transmissão, distribuição e comércio. Devido à forte presença do estado, a expansão na geração de energia é submetida a um salto. Por volta da segunda metade da década de 90, deu-se início à privatização das empresas geradoras, marcando a saída do estado como contribuinte majoritário no mercado da energia, afetando no desenvolvimento da geração devido à queda de investimentos. Os segmentos da geração, transmissão e distribuição passam a ser

divididos, marcando o fim da operação vertical do setor, ou desverticalização. O mercado inicialmente monopolizado, passa a ser caracterizado pela livre concorrência, dando início ao período de reestruturação do setor elétrico brasileiro [CC04].

De acordo com o levantamento feito pela ABRADE (Associação Brasileira de Distribuição de Energia) em 2015, as companhias públicas eram responsáveis por 40% da distribuição de energia atual, enquanto as privadas ficavam encarregadas dos 60% restantes [ABRADEE].

Com a possibilidade de concorrência entre as empresas, os consumidores se tornaram mais criteriosos quanto à energia adquirida. Dessa forma passou a ser exigido um maior patamar de qualidade e confiabilidade no suprimento da carga. As primeiras publicações de grande relevância no estudo da confiabilidade em Sistemas de Distribuição foram publicadas na segunda metade do século XX e podem ser vistas em [GMP64], [T64]. Nelas são encontrados os primeiros conceitos utilizados nos cálculos de frequência e duração da falha atribuída ao sistema.

Na avaliação da confiabilidade da distribuição, duas são as técnicas mais utilizadas sendo elas: a enumeração de estados que engloba os métodos analíticos e SMC não-sequencial (SMCNS) e as de representação cronológica onde consta-se a SMCS e suas derivações. A análise da confiabilidade feita a partir dos métodos analíticos é bastante difundida devido à sua fácil implementação e desempenho, porém, esses métodos assim como a SMCNS têm a característica de fornecerem apenas valores médios dos índices. Com a necessidade de obter informações referentes à distribuição de probabilidade de ocorrência dos estados, dado não fornecido pelo método analítico, surgiram novas técnicas com base na SMC. Dentre as novas técnicas, a SMC do tipo cronológica ganhou espaço junto às demais. Ainda que haja elevada demanda computacional agregada ao método, os avanços tecnológicos referentes aos processadores e memória disponível nos computadores atuais, permitiram que ela passasse a ser empregada. Conceitos básicos desenvolvidos para

analisar confiabilidade no SD foram propostos por Billinton durante a década de 90 e podem ser vistos em [BA94], onde utilizando o sistema teste IEEE- RBTS Bus 2 os conceitos e técnicas desenvolvidas foram aplicadas.

Ainda com os diversos recursos disponíveis atualmente que favorecem a implementação de técnicas para solução de problemas complexos e de grande porte, o uso da SMCS considerando aspectos cronológicos do sistema, continua sendo tópico de pouca abordagem ao se tratar da avaliação do SD. Para contornar o problema referente ao tempo de simulação, diversos mecanismos são aplicados no intuito de simplificar a modelagem do sistema ou reduzir o número de estados operacionais analisados. Porém, a análise de um modelo simplificado pode afetar na precisão dos índices estimados. As referências [AM97], [OG99] apresentam um estudo onde a análise da confiabilidade é feita a partir da aplicação de curvas distintas para o tempo de reparo. A aplicação de um modelo de curva não-exponencial para o tempo de reparo afeta o cálculo da confiabilidade. É evidenciado nesses estudos, a importância de inserir um modelo de curva mais realístico ao se tratar do tempo de falha dos componentes do sistema. Em [AM97], os resultados obtidos da SMC são comparados ao de um modelo analítico. Os valores referentes ao tempo de duração das falhas de linhas de transmissão, assumem distribuições log-normal, enquanto as taxas de falha assumem um modelo de distribuição exponencial. A aplicação dessas curvas simplifica os cálculos da confiabilidade. Já no estudo apresentado em [OG99] é proposto manter a taxa de falha de característica exponencial, enquanto o tempo necessário para reparar o componente, poderia assumir seis diferentes casos, combinando diversos tipos de modelo de distribuições normais e log-normais. Partindo dessas possíveis combinações é analisado o impacto no índice de confiabilidade estimado.

Em [SCN07] é aplicado o método de decomposição do sistema. Este, agregado às vantagens da programação orientada a objetos (POO), divide o sistema original em subsistemas menores. Com isso torna-se possível a redução do tempo empregado na avaliação dos índices, garantindo eficiência da ferramenta. Nesse estudo é visto que

o desempenho do sistema é calculado pela implementação da SMCS. Porém o algoritmo proposto abrange a técnica analítica de cortes mínimos. Isso limita a análise da confiabilidade, impedindo a captura de alguns estados que passam a ser desconsiderados devido a aplicação do corte.

Devido ao crescimento de cargas sendo inseridas ao sistema elétrico. O uso de GD se popularizou, sendo implementado ao sistema de distribuição como recurso para suprimento da demanda. A GD é por vezes citada na literatura como geração descentralizada ou ainda geração dispersa, a potência entregue por ela e a área que é capaz de atender pode variar entre os países de acordo com as normas vigentes em cada um deles. O objetivo de sua inserção é, contudo, descentralizar a geração melhorando a confiabilidade do serviço prestado pela distribuidora. Reduzindo dessa forma, as possíveis penalidades recebidas pela descontinuidade no fornecimento de energia. Com isso, se torna necessário desenvolver um estudo detalhado, onde seja apresentado o real impacto desses recursos no sistema. A GD de natureza renovável trata-se de uma fonte intermitente. Sua modelagem requer uma abordagem particular, onde seja considerada a variação de potência ofertada por ela.

Em [FR05] é apresentada uma metodologia analítica no intuito de analisar os impactos da GD em um SD. No estudo proposto, são representadas características comportamentais das fontes renováveis. Nesse contexto são analisados os impactos dados devido à incerteza apresentada por elas quanto a potência disponível ao sistema. Apesar de acrescentar um modelo detalhado da GD, o estudo trabalha com uma visão analítica do problema, limitando assim o alcance quanto a precisão dos resultados obtidos.

Utilizando como base a minimização das perdas, o estudo apresentado em [ZBS06] faz uso da GD como solução de baixo custo para problemas de queda de tensão e sobrecarga do sistema. Neste caso, o autor promove uma abordagem econômica mostrando que a eficiência trazida pela nova fonte, assim como o impacto na confiabilidade do sistema, é atribuída ao local de inserção da fonte e aos seus respectivos níveis de carga.

É abordado em [EHS06] uma forma de analisar o desempenho do SD perante a inserção de GD de acordo com a curva horária do dia. Para a análise do problema, é utilizado um sistema IEEE-30 barras e o proposto algoritmo é desenvolvido em MATLAB. No cenário encontrado, são modeladas as características da GD com a utilização dos métodos de Monte Carlo. O objetivo da proposta é analisar o desempenho da geração principal perante o dimensionamento da GD. Para isso são necessárias informações horárias referentes ao fluxo de potência considerando-se a inserção delas. Dessa forma, agregado à SMC é utilizado, o método de *Newton-Raphson* convencional para cálculo do fluxo de potência onde se busca atender todas as possibilidades de operação.

Em [NSR06] são estimados os impactos causados pela inserção de GD no Sistema. Nesse estudo a fonte distribuída é modelada por meio de um bloco de potência. É aplicado um método analítico para análise do problema de confiabilidade, onde são considerados possíveis cenários de operação para o sistema, sendo eles: operação do sistema ilhado e interligado. Apesar de avaliar o impacto gerado pela GD, este estudo não aborda em suas considerações as condições de intermitência agregadas à GD, sendo esse, um ponto que provoca impacto decisivo na confiabilidade do sistema. Uma vez que a ausência ou presença de carga inserida influi no montante de potência disponível ao consumidor.

Em [DS06] é proposta a avaliação da confiabilidade do SD sob presença de GD. Utiliza-se, portanto, a SMCS em conjunto com o algoritmo de '*Ford-Fulkerson*' para a determinação do fluxo de potência da rede, desenvolvidos na linguagem C++. No contexto apresentado na proposta, a carga modelada é variável, sendo as 52 semanas representadas por um percentual do valor de pico anual para diferentes tipos de consumidores. Já as variações diárias e horárias são dadas pelo percentual do pico semanal e diário respectivamente.

Em [A07] é avaliada a confiabilidade utilizando SMCS no SD e subtransmissão na presença de GD renováveis. Nesse estudo são utilizados diversos modelos no intuito

de representar a intermitência das fontes. O autor, porém, faz a avaliação de um sistema de distribuição integrado à subtransmissão e por isso a ferramenta aplicada na análise de confiabilidade trata-se de uma metodologia desenvolvida para sistemas integrados, não sendo possível avaliar somente à nível da distribuição.

Na referência [BS12], os autores propõem dimensionar a potência de fontes renováveis. O problema modelado nesse contexto constitui-se em otimizar uma função objetivo, onde estão envolvidos parâmetros referentes à confiabilidade e custo. São consideradas ainda, as incertezas das fontes, as quais são modeladas por meio da SMC. Para a minimização da função objetivo envolvida no processo, é aplicado o método enxame de partículas. A presente dissertação, assim como os autores, propõe avaliar o impacto da GD. Contudo, ainda que o dimensionamento das fontes renováveis se mostre um ponto positivo na proposta atual, trata-se de uma variável de pouco controle por parte da concessionária. Com isso, o presente estudo diferentemente da proposta [BS12], propõe avaliar a GD inserida pelo consumidor utilizando valores aproximados de geração, onde a capacidade dessa fonte é variável dependendo das condições de investimento da parte adquirente.

O uso da SMCS na análise da confiabilidade de um SD perante o uso de GD, trata-se ainda de um estudo emergente. Dessa forma a presente dissertação contribui apresentando o desenvolvimento e resultados da aplicação de uma metodologia. A proposta tem o objetivo de avaliar o sistema com o uso de fontes renováveis inseridas pelo consumidor. A utilização da POO feita junto aos recursos da linguagem C++, permite a implementação da SMCS, conferindo à ferramenta um tratamento distinto dos demais encontrados na literatura ao que se refere à modelagem do problema. Dessa maneira a ferramenta é capaz de oferecer resultados detalhados referentes aos índices de confiabilidade, com as respectivas distribuições de probabilidade obtidas por meio da SMCS. Isso confere à concessionária maior capacidade para identificar os pontos mais vulneráveis e otimizar seus esforços visando melhorar o desempenho do sistema. Como consequência, a concessionária reduz sua exposição

a eventuais penalidades. Do ponto de vista do consumidor, as melhorias feitas no SD resultam em um serviço de distribuição mais confiável e seguro.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é estruturado de forma a apresentar o conteúdo em seis capítulos brevemente descritos abaixo.

Este capítulo apresenta o histórico de desenvolvimento da SMCS e sua aplicação no desempenho de sistemas de distribuição. Além disso, discutiu-se a importância dessa ferramenta para captura de dados de aspectos estocásticos e o espaço que esta vem alcançando dentre as demais já existentes. Ainda, abordou-se introdutoriamente aspectos possíveis para melhoria no desempenho de sistemas de distribuição utilizando fontes alternativas de energia.

No Capítulo 2, são revistos conceitos referentes a confiabilidade em SD. Nesse capítulo, estão reunidas informações que variam desde as possíveis topologias das redes de distribuição até o cálculo da potência em um alimentador. São abordados ainda métodos comuns utilizados para simplificação das redes complexas. As técnicas e conceitos são selecionadas e apresentadas de maneira a integralizar o leitor e são posteriormente empregadas no desenvolvimento do modelo proposto.

O Capítulo 3 apresenta uma abordagem da GD agregada ao sistema. Este é composto de conceitos e condições necessárias para a agregação dessas fontes ao modelo do SD vigente. São apresentadas ainda considerações para adequação e aquisição dessa fonte perante a legislação Brasileira.

No Capítulo 4, é mostrada a lógica estrutural do programa computacional desenvolvido para esta proposta. São apresentadas as principais ferramentas e

recursos utilizados para melhoria de desempenho e eficiência do método adotado. Ainda, são mostradas as considerações e premissas adotadas para modelagem do problema em estudo.

O Capítulo 5 é composto dos resultados obtidos após a aplicação da ferramenta em um SD. Nele são analisados aspectos da confiabilidade do sistema em sua condição original, sem a GD, e após a agregação desse recurso.

Por fim, o Capítulo 6 encerra esta pesquisa sendo composto das conclusões e considerações referentes à esta proposta.

1.4 Publicações

Impacto Da Geração Distribuída Em Sistemas Elétricos De Potência, 68ª Reunião Anual Da SBPC, 2016.

Avaliação do Impacto da Inserção de Geração Distribuída na Confiabilidade de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, SBAI 2017.

Avaliação do Impacto da Inserção de Geração Distribuída nos Índices de Confiabilidade de Sistemas de Distribuição, The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation And Transmission ,Clagtee 2017.

CAPÍTULO 2

Confiabilidade em Sistemas de Distribuição

2.1 Introdução

A reestruturação do setor elétrico Brasileiro iniciada em 1996 com o projeto RE-SEB, garantiu desverticalização das empresas pertencentes ao setor, em sua maioria estatais [CCEE]. Com a divulgação da lei nº 9.074/95, as atividades exercidas por autoprodutores e produtores independentes de energia se tornaram regulamentadas [ANE96]. Essa ação possibilitou a inserção da iniciativa privada no mercado de energia, resultando na competitividade entre as distribuidoras.

O novo cenário, vivenciado pelo mercado de energia, torna a confiabilidade do serviço adquirido um fator decisivo ao se tratar da livre concorrência entre as companhias. Com o aumento da competitividade, se fez necessário fiscalizar as distribuidoras, garantindo que estas trabalhassem com níveis de confiabilidade e segurança mínimos. Por confiabilidade entende-se o fornecimento de energia de qualidade com redução das interrupções identificadas. Assim, surge durante o projeto RE-SEB, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão responsável em fiscalizar e regulamentar a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica no país.

A ANEEL, no ato de fiscalizar a prestação de serviço oferecido pelas concessionárias, desenvolveu documentos normativos, conhecidos por PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional, Módulo 8 [ANE12]- onde são estabelecidos diversos procedimentos a serem cumpridos durante a distribuição de energia. Ainda, são padronizados valores mínimos de desempenho a serem atingidos

pelo sistema em operação. Com a vigência da norma, a ANEEL é capaz de definir níveis de qualidade e confiabilidade mínimos de acordo com um padrão pré-estabelecido e, a partir destes aplicar penalidades devido ao não cumprimento da legislação [ANE12].

No estudo da confiabilidade, diversas técnicas são empregadas para avaliar o desempenho do sistema proposto. A literatura aborda com frequência, dois métodos principais, a enumeração de estados (ou analíticos) e Simulação Monte Carlo (SMC). Os métodos estruturados pelos princípios da SMC, se dividem ainda em não-sequencias e sequenciais (ou cronológicos). A Simulação Monte Carlo Sequencial (SMCS), vem se popularizando ao longo dos anos devido sua capacidade representar aspectos complexos da operação do sistema, sobretudo daqueles com dependência temporal. Com a evolução da capacidade de processamento dos computadores, agregada à variedade de ferramentas e técnicas de programação disponíveis, se torna viável a implementação desta metodologia [OG99].

No presente capítulo são apresentados conceitos importantes utilizados no estudo da confiabilidade. Tais conceitos são abordados com o intuito de contextualizar e facilitar no entendimento da metodologia proposta.

2.2 Terminologias e Conceitos básicos

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é constituído de diversos componentes tais como: chaves, transformadores e disjuntores. Todo componente a ele agregado está susceptível a episódios de operação incorreta, que resulta no desempenho inadequado do sistema. O estado em que o sistema é identificado como falhado, pode ser restaurado pelo reparo do componente em falha ou pela atuação de um componente do tipo manobra. Dado isso, é assumido que cada componente do SEP

é capaz de transitar entre os estados operativos identificados, cuja definição e cálculo são apresentados a seguir [RR92].

- **Taxa de transição:** determinada pelo número de vezes em que o componente transita de um estado para outro, dividido pelo tempo total de permanência neste estado;
- **Taxa de falha (λ):** razão entre o número de vezes em que dado componente falha e o tempo de permanência no estado operativo, sendo avaliada pela aplicação da expressão (2.1) a um determinado intervalo (histórico) de tempo;

$$\lambda = \frac{\text{número de vezes que o componente transitou da operação para falha}}{\text{tempo de permanência na operação}} \quad (2.1)$$

- **Taxa de reparo (μ):** tem definição análoga à taxa de falha, fornecendo, via expressão (2.2), a razão com que um determinado componente é reparado.

$$\mu = \frac{\text{número de vezes que o componente transitou da falha para operação}}{\text{tempo de permanência na falha}} \quad (2.2)$$

Na existência da falha, são definidas duas formas gerais em que é possível reestabelecer a energia.

- **Tempo de reparo:** representa o tempo médio de duração para que seja efetuado o reparo ou a substituição do equipamento danificado;
- **Tempo de chaveamento:** representa o tempo decorrido entre a ocorrência da falha, a atuação de um dispositivo capaz de isolar o defeito e a recolocação dos demais componentes não danificados em operação.

Alguns conceitos são inerentes ao estudo da confiabilidade de um SD [RR92]. Portanto, seguem os principais termos utilizados nesse estudo:

- **Ponto de Carga:** ponto do sistema onde são conectados os consumidores;
- **Ramo:** refere-se ao conjunto de componentes em série, delimitados por meio de barras de entrada e saída. A configuração em série implica que a falha de um componente resulta na falha do ramo;
- **Caminho:** conjunto sequencial de componentes ou ramos, que possibilitam a ligação entre a fonte e a carga do sistema;
- **Caminho Mínimo:** um caminho é considerado mínimo se cada um de seus componentes ou nós, só for percorrido uma vez;
- **Caminhos Normalmente Fechado (CNF):** define-se por caminho CNF, aquele onde todos os seus componentes encontram-se ativos. São utilizados na identificação de falhas que geram corte de carga do sistema.
- **Caminhos Normalmente Aberto (CNA):** define-se por caminho CNA, aquele onde pelo menos um componente encontra-se inativo. Este componente em geral está passível à mudança de estado, tal como os disjuntores e as chaves. A análise de um CNA é utilizada no reestabelecimento de energia, onde verificam-se as possíveis formas de reparar o ponto atingido.
- **Conjunto de Corte:** Um conjunto de corte refere-se à um conjunto de componentes em que a falha simultânea provoca a falha do sistema. Representa ainda a situação em que todos os caminhos entre a fonte e a carga são abertos após a identificação de uma contingência. Essa situação pode ser vista como uma representação em série.
- **Conjunto Mínimo de Corte:** refere-se à condição do sistema onde um conjunto de componentes se encontram inoperantes, inviabilizando a operação do sistema. A energia pode ser reestabelecida reparando apenas um dos componentes falhados, situação que pode ser representada por um sistema

em paralelo. A classificação (grau) dos cortes depende de como a energia é restaurada no ponto de carga:

- **Cortes de primeira ordem:** quando a falha de um único componente provoca a falha do sistema;
- **Cortes de segunda ordem:** situação em que dois componentes se encontram fora de operação, impossibilitando a operação do sistema, porém basta que um componente seja restaurado para que a operação seja retomada;

É comum durante as análises considerar apenas os cortes de primeira e segunda ordem, pois, estes são mais influentes quanto ao resultado dos índices. Contudo existem os cortes de ordem superior que são desencadeados devido a falha simultânea de equipamentos. A consideração destes, embora pequena, pode alterar os resultados dos índices de confiabilidade.

- **Modo de falha:** ocorre quando a falha simultânea de um conjunto de componentes, em um dado intervalo de tempo, provoca a interrupção dos caminhos entre a fonte e os pontos de carga;
- **Esquema equivalente de confiabilidade:** trata-se da representação de uma sequência de conjuntos mínimos de corte conectados em série, onde cada componente do conjunto é conectado em paralelo.

2.3 Topologias Redes de Confiabilidade

Uma rede de confiabilidade pode ser representada por diversas topologias. As redes de distribuição são projetadas em configurações definidas como radiais, fechada em anel e radiais com recurso ou misto. Em geral essas topologias contam com elementos

conectados em série, paralelo, sistemas malhados ou ainda pela combinação destas representações. A topologia empregue no SD influencia diretamente em seu desempenho, ou seja, nos índices de confiabilidade. Sabe-se que o cálculo dos índices para um sistema composto de componentes conectados em série e/ou paralelo, é relativamente mais simples. Dessa forma, é comum a aplicação de simplificações para agrupar um sistema nessa representação [CLSM03], [BO02].

- Sistemas Radiais

Os sistemas identificados como radiais, são caracterizados por possuírem apenas um caminho a ser percorrido entre fonte e carga Figura 2.1. Qualquer elemento em falta provoca a interrupção do ponto de carga posterior à proteção.

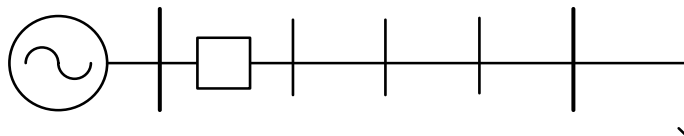


Figura 2.1 Sistema Radial

- Sistemas em Anel

Nessa topologia encontram-se mais caminhos a serem percorridos no intuito de manter o fornecimento da energia, representado pela Figura 2.2. A falha de um componente do sistema pode ser isolada da operação pela atuação de um dispositivo de proteção. A presença de caminhos alternativos entre a fonte e a carga permite que a alimentação seja mantida, não havendo interrupção do sistema.

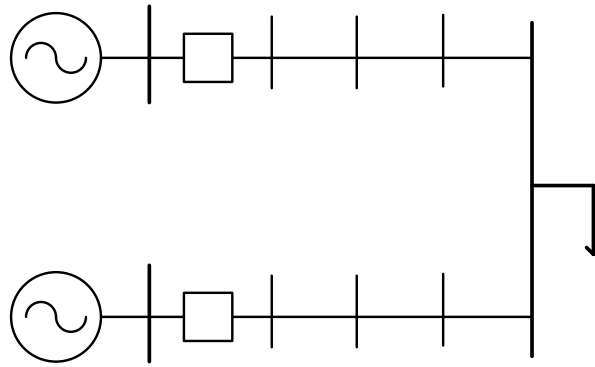


Figura 2.2-Sistema em Anel

- Sistemas radiais com recurso

Os sistemas radiais com recurso, como mostra a Figura 2.3 são considerados uma situação intermediária envolvendo as duas topologias anteriormente citadas. Nessa configuração, observa-se apenas um caminho entre a fonte e o ponto de carga, contudo o defeito de um componente pode ser isolado, garantindo que o suprimento seja mantido aos pontos remanescentes. Essa ação ocorre devido a presença de um dispositivo normalmente aberto (NA). Apesar desta configuração possuir apenas um caminho entre a fonte de alimentação e os pontos de carga, é possível isolar o defeito de um componente. Atendendo dessa forma os pontos de carga remanescentes por meio de um caminho alternativo, que é dado pelo fechamento de chaves NA.

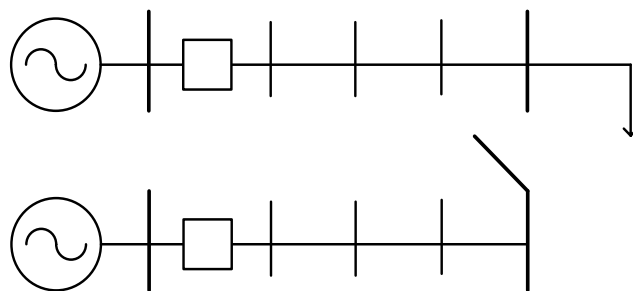


Figura 2.3-Sistema Radial com Recurso

2.3.1 Série e Paralelo

Um sistema composto por dois componentes, do ponto de vista de confiabilidade, é considerado um sistema série se para que haja suprimento da carga os dois componentes necessitam estar operando, representado pela Figura 2.4. Um sistema em paralelo por sua vez, é capaz de operar com apenas um desses dois componentes ativos, podendo ser visto na Figura 2.5. Define-se λ_A e λ_B sendo as taxas de falha dos componentes do sistema, e r_A e r_B os respectivos tempos médio de reparo. A partir de tais considerações é possível representar os modelos série e paralelo e suas respectivas equações referentes ao modelo equivalente [RR92].

A Figura 2.4 representa um modelo de sistema série composto por dois componentes (A e B).

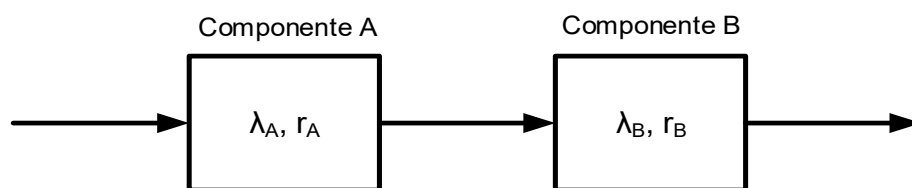


Figura 2.4 - Sistema de Dois Componentes em Série

A taxa de falha (λ_s), assim como o tempo médio de reparo (r_s), equivalentes ao sistema da Figura 2.4, podem ser calculados por meio das Equações (2.3) e (2.4):

$$\lambda_s = \lambda_A + \lambda_B \quad (2.3)$$

$$r_s = \frac{\lambda_A r_A + \lambda_B r_B}{\lambda_A + \lambda_B} \quad (2.4)$$

Seja um sistema série composto por n elementos conectados. Observando a Equação (2.3) é possível concluir que a ocorrência de falhas de um sistema, dada por λ_s , pode

ser calculada pelo somatório das taxas de falha dos elementos que o compõe. Dessa forma, o cálculo passa a ser feito pela Equação (2.5). Considerando ainda os n componentes, a Equação (2.4) pode ser representada pela Equação (2.6).

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (2.5)$$

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{\lambda_s} \quad (2.6)$$

A indisponibilidade de energia em um sistema (U_s) composto de componentes em série é calculada ao aplicar a Equação (2.7), que utiliza conceitos referentes a frequência e duração.

$$U_s = \lambda_s r_s \quad (2.7)$$

Um sistema em paralelo a dois componentes, por sua vez, pode ser representado pela Figura 2.5.

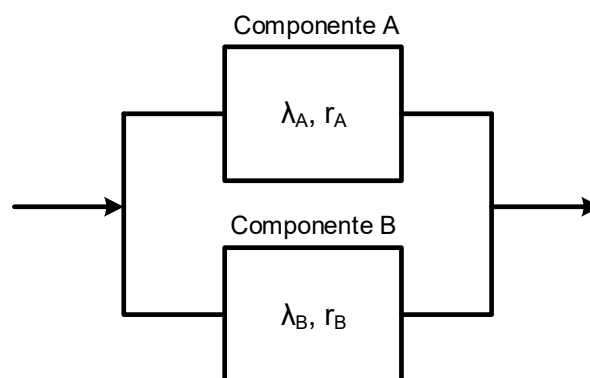


Figura 2.5- Sistema de Dois Componentes em Paralelo

A taxa de falha e o tempo médio de reparo equivalentes para o sistema paralelo (λ_p e r_p respectivamente) da Figura 2.5 são calculados pela aplicação das Equações (2.8) e (2.9).

$$\lambda_p = \lambda_A \lambda_B (r_A + r_B) \quad (2.8)$$

$$r_p = \frac{r_A r_B}{r_A + r_B} \quad (2.9)$$

A indisponibilidade desse sistema (U_p) por sua vez é descrita pela Equação (2.10). Na referência [RR92] são encontradas maiores informações de como proceder em situações em que a rede paralela composta de n elementos.

$$U_p = \lambda_p r_p \quad (2.10)$$

2.3.2 Sistemas Complexos

Os SD são em geral sistemas complexos. Por essa razão devem ser analisados de forma distinta, pois não podem ser reduzidos a simples modelos série e paralelo. Para analisar esse tipo de problema, são utilizados os seguintes métodos:

- Aplicação da tabela booleana de verdades (ou diagramas lógicos):

Nesse método são listadas todas as possíveis combinações de estados (operação/falha) do sistema. Contudo um dos problemas encontrados é o fato do número de combinações crescer exponencialmente com o número de componentes.

- Método da probabilidade condicionada (ou decomposição):

Seleciona-se um componente que recebe o nome de ‘chave’. Este irá separar o sistema em subsistemas não complexos. Esse método, contudo, não é muito adequado para implementação computacional. O cálculo da probabilidade é dado pela Equação (2.11).

$$P_s = P_s(X_s)P(X_s)P_s(X_f)P(X_f) \quad (2.11)$$

Onde, P_s representa a probabilidade de ocorrência (ou sucesso) de um evento. A variável $P_s(X_s)$ representa a probabilidade de sucesso quando o componente selecionado (**X**) está operando (‘ok’). $P(X_s)$, por sua vez, é a probabilidade desse componente se encontrar no estado de sucesso. Em contrapartida, $P_s(X_f)$ é a probabilidade de sucesso do evento, caso o componente não esteja funcionando (‘não está ok’). E a probabilidade do insucesso desse componente é representada por $P(X_f)$.

Seja o modelo complexo representado pela Figura :

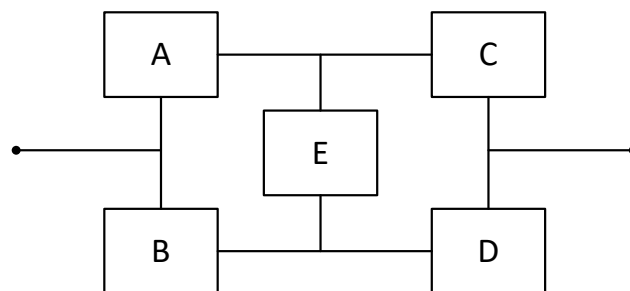


Figura 2.6- Sistema Complexo

Aplica-se o método da probabilidade condicionada para simplificação do sistema complexo. Assumindo que o componente **E** como componente

‘chave’, ou elemento ‘X’. Ou seja, o elemento responsável por definir o ponto de subdivisão do sistema. Ao definir o ponto chave do sistema, aplica-se a Equação (2.8) que define a probabilidade do sistema. Assim, obtém-se os subsistemas apresentados na Figura(a) e (b). A solução para o sistema simplificado, pode ser encontrada aplicando as equações pela aplicação das Equações (2.8) a (2.10) (série e paralelo).

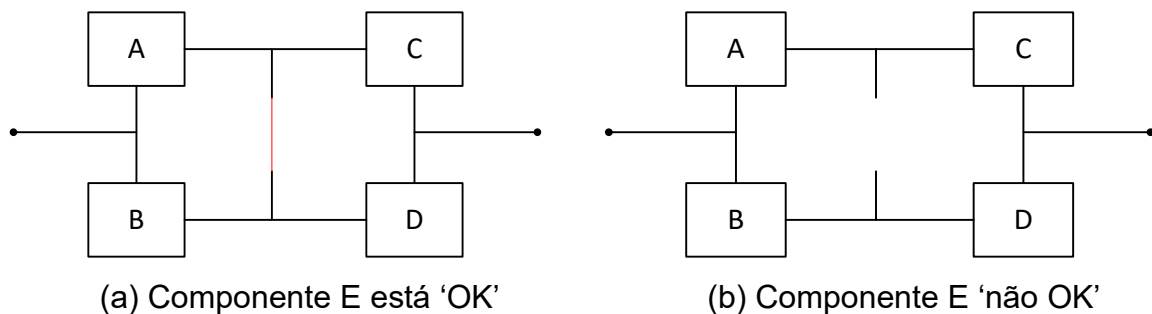


Figura 2.7-Subsistemas Equivalentes

- Análise do conjunto de corte e ligação (cut & tie set):

Bastante utilizado e de fácil implementação computacional. A denominação “tie-set” é atribuída ao caminho composto por componentes que garantem a operação do sistema. Enquanto “cut-set” é atribuído ao conjunto componentes que quando removidos do sistema impedem sua operação. A simplificação de um sistema complexo utilizando essa metodologia, utiliza de conjuntos cut & tie set mínimos, garantindo que o componente não seja percorrido mais de uma vez. A aplicação desse método na análise de confiabilidade pode ser melhor observada no estudo proposto em [WSQ02].

- Árvore de Falhas:

A solução de um sistema complexo pelo diagrama em árvore de falhas (FTA- *Fault Tree Analysis*), trata-se de uma representação gráfica de fácil análise.

Onde o intuito é a determinação da probabilidade de ocorrência um dado evento. Para tal determinação, são utilizados dados de ocorrências individuais dos componentes do problema. Cada evento individual é analisado como causa o efeito, dado isso pondera-se as probabilidades de influência de cada componente na falha do sistema [HA95].

- Matrizes de conexão (ou transmissão).

Esse método consiste em criar uma matriz para o sistema analisado. Essa matriz representa por meio das linhas e colunas, os pontos de conexão dos componentes. E ainda, os elementos que a compõem representam os componentes encontrados entre os nós de ligação. A referência [DM99] mostra a redução de um sistema complexo aplicando o método da matriz de conexão.

- Caminhos Mínimos de corte

Trata-se de uma técnica utilizada para identificar os modos de falha do sistema [BA92]. Por inspeção, torna-se impraticável e complexo determinar os cortes mínimos de um sistema. Quanto maior o sistema, mais complexo se torna essa identificação. Assim, é necessário aplicar os seguintes passos: (i) determinar os caminhos mínimos entre as fontes e os pontos do sistema, em um caminho nenhum nó pode ser percorrido duas vezes; (ii) a partir dos caminhos mínimos, construir a matriz de Incidência do sistema, essa é composta dos elementos contidos no caminho; (iii) aplicar a lógica booleana na matriz incidência e encontrar a rede equivalente.

Considerando a Figura , tem-se:

Caminhos mínimos: AB, BD, AED, BEC;

	Componente presente no Caminho				
Caminho	A	B	C	D	E
1	1	0	1	0	0
2	0	1	0	1	0
3	1	0	0	1	1
4	0	1	1	0	1

Os cortes de primeira ordem são aqueles cujo componente está presente em todos os caminhos, nesse caso não existe.

Os cortes de segunda ordem são obtidos somando (soma booleana) os pares de colunas, como esse exemplo: AB e CD;

Os cortes de terceira ordem por sua vez são obtidos pela combinação de três colunas, para o exemplo dado: ABC, ABD, ABE, ACD, ADE, BCD, BCE, CDE. Uma vez que AB e CD já são considerados cortes de segunda ordem, os cortes que contém essa combinação são eliminados.

Não existem cortes superiores para esse sistema.

2.4 Decomposição de Sistemas

A decomposição de sistemas é um método utilizado para reduzir o tamanho do sistema a ser analisado computacionalmente, sendo aplicado como recurso para minimização da memória e tempo computacional. O método se destaca especialmente em situações em que o sistema a ser avaliado é de grande porte. A decomposição tem o objetivo de subdividir o sistema principal em subsistemas de menor porte, mantendo as características de operação do sistema original.

2.4.1 Sistema IEEE-RBTS Bus 2

A Figura 2.8 representa o sistema IEEE- RBTS [ABS91]. Utilizado para execução de simulações em um SD, este trata-se de um sistema padrão cujo estudo da confiabilidade pode ser facilmente encontrado na literatura. Por se tratar de uma análise simples, este é adotado como exemplo ilustrativo de metodologia de decomposição.

Para aplicar decomposição em um dado sistema, é necessário identificar os alimentadores principais presentes. Esse passo pode ser dificultado de acordo com a topologia do SD em análise. Para o SD da Figura 2.8, claramente é possível identificar os quatro alimentadores principais.

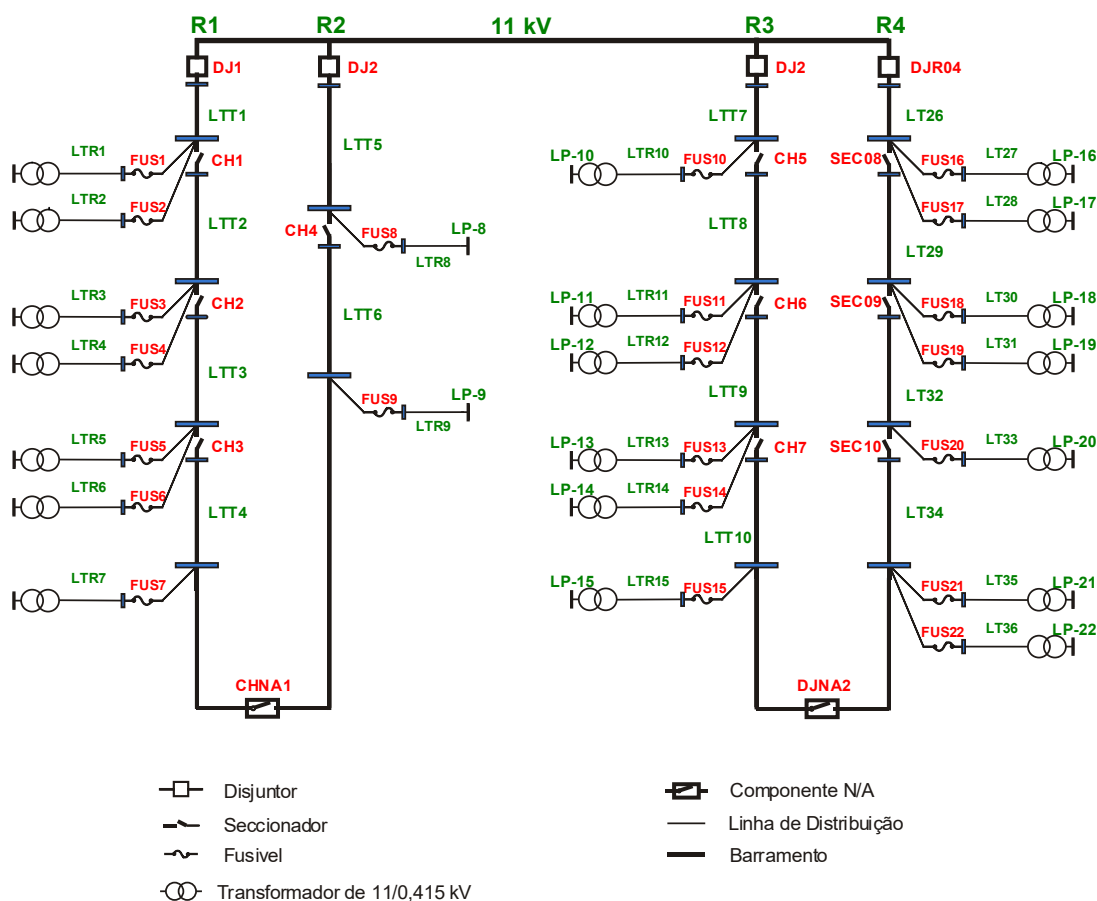


Figura 2.8- Sistema IEEE- RBTS Bus 2

De acordo com a metodologia proposta em [N05], cada alimentador deverá ser separado completamente dos demais, passando a funcionar como um circuito independente. Cada Ramal destacado na Figura 2.9 representa um subsistema. As chaves Normalmente Abertas (NAs) que interligam os ramos são substituídas por fontes do tipo NA, conectadas por meio de componentes do tipo NA. Nas condições normais de operação, o ramal opera independentemente dos demais, atendendo a carga conectada a ele. Porém em situações de falta, é possível que um ramal atenda as cargas dos demais devido a ação do chaveamento. Assim, a potência dessas fontes NA deve ser referente à capacidade de transferência do alimentador ao qual venha a substituir e ainda atender às suas condições operacionais.

Assim, após decomposto, o sistema da Figura 2.8 pode ser representado por quatro ramos que operam sem a interferência dos demais, como mostra a Figura 2.9.

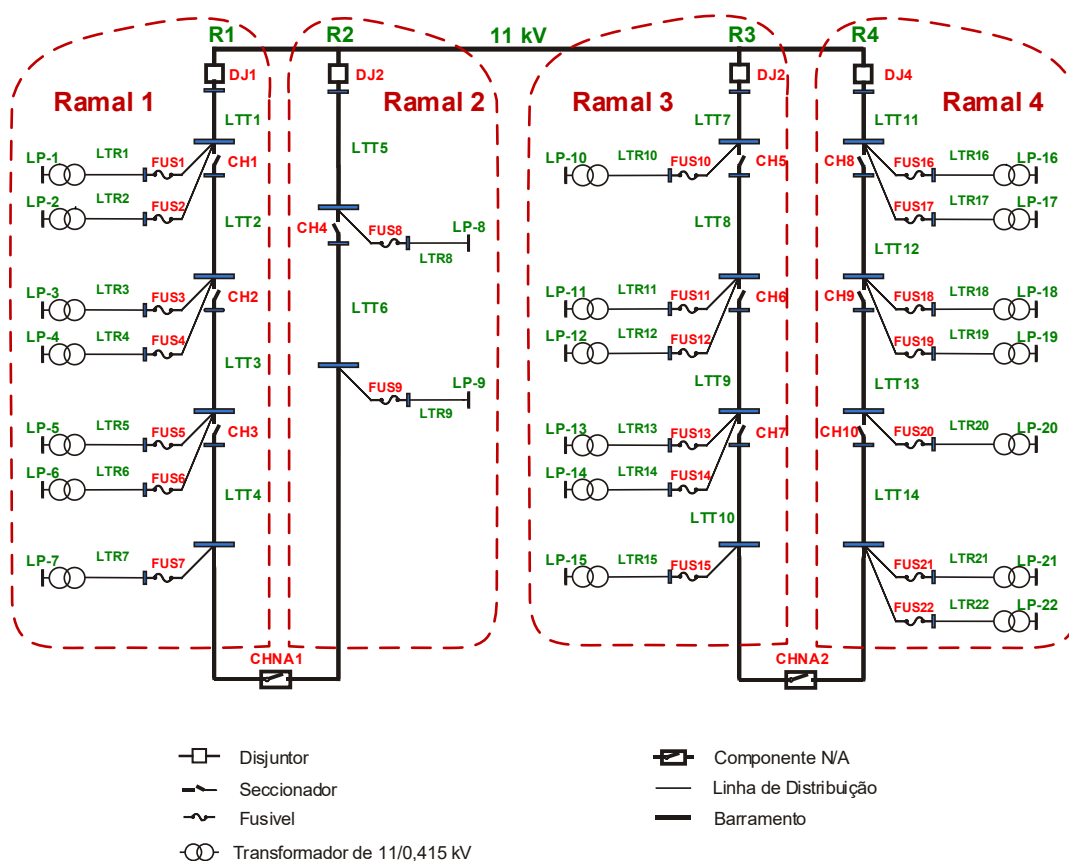


Figura 2.9- Sistema IEEE-RBTS BUS 2 Identificação de Ramais

A seguir, Figura 2.10, é apresentado o sistema decomposto. Do ponto de vista de confiabilidade, a aplicação da ferramenta de decomposição afeta o sistema apenas em situações em que o chaveamento NA ocorreria. Na referência [N05] é possível ver com detalhes um estudo onde é validado o uso do método. Ao ser implementado, as variações observadas ao aplicar a decomposição foram de 0,93% para o índice FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão) e máxima de 1,4% para o índice DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), ao comparar com uma simulação do sistema completo.

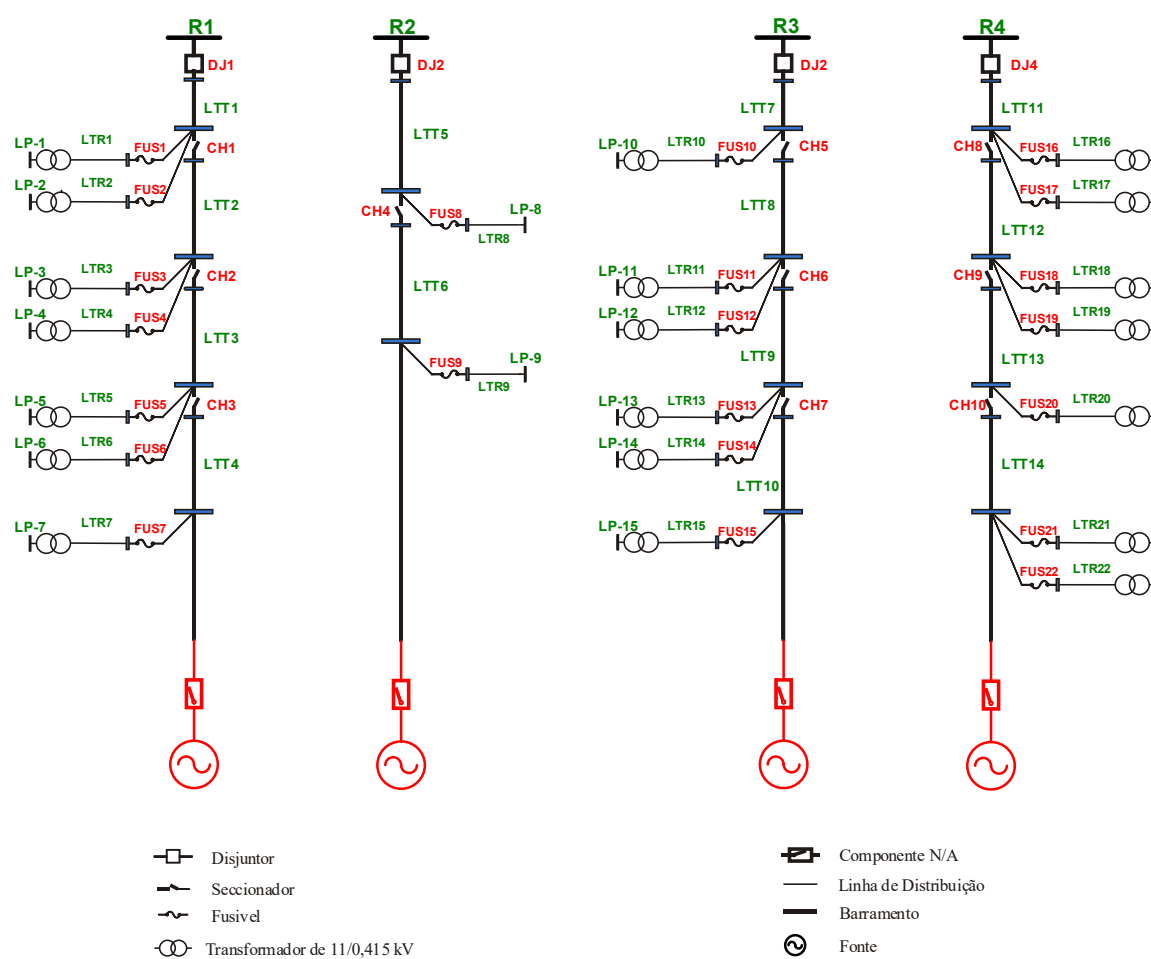


Figura 2.10- Sistema IEEE-RBTS BUS 2 Decomposto

2.5 Dinâmica dos Dispositivos de Proteção

Como citado no item 2.1, existem duas formas possíveis de se reestabelecer a energia em um dado ponto do sistema. Assim, classificam-se as ações de reparo e chaveamento. Ao ser identificada uma falha no SD, a proteção atua como medida de segurança, evitando que o efeito causado pela falha do equipamento se propague para os demais posteriores. Isso faz com que os danos fiquem restritos à uma determinada área do sistema. Em sistemas cuja topologia é radial ou radiais com recurso, a abertura de um dispositivo de proteção em geral provoca o corte da carga em um ponto posterior. Por isso, caso seja possível executar um chaveamento, essa ação é tomada no intuito de isolar o componente indisponível. A carga por sua vez é redistribuída aos demais alimentadores, reduzindo o valor total de energia interrompida durante o reparo do componente. Do ponto de vista consumidor, o tempo em que o ponto de carga ficaria sem energia deixa de ser o tempo utilizado no reparo do componente, passando a ser o tempo necessário para que a falha seja isolada e haja redistribuição da carga [BO02].

Para que os índices de confiabilidade sejam calculados de forma adequada, é preciso considerar a ação de chaveamento durante a ocorrência da falta. O chaveamento é feito em geral pelas equipes de manutenção, que irão computar o tempo gasto para que seja utilizado no cálculo da confiabilidade. É comum a ação de chaveamento ser considerada em toda situação em que esta é possível. Uma vez que o tempo de chaveamento (t_s) é em geral menor que o tempo de reparo (t_r), essa análise não se torna incorreta. Contudo, na referência [BO02], o autor apresenta um estudo detalhado sobre os impactos decorrentes da atitude de se considerar o chaveamento sempre que esse é possível. A análise dos valores de t_s e t_r é dada mediante um histórico de ocorrências, ou seja, valores médios. Desconsiderando assim, as avaliações individuais de ocorrências, onde em um dado instante t_s pode ser maior que t_r , o que inviabiliza o chaveamento. Isso traz como consequência um cálculo inadequado dos índices de confiabilidade. Tornando indispensável a comparação do menor entre os dois tempos de restauração do SD.

2.6 Índices de Desempenho do Sistema de Distribuição

Os índices de confiabilidade de um sistema relacionam a duração e frequência com que as faltas ocorrem. Servem ainda para quantificar o desempenho passado, presente e futuro de um dado sistema. Com a implementação da Resolução 24, revisada posteriormente pelo PRODIST- Módulo 8 [ANE12], se tornou regulamentada as leis que fiscalizam o serviço contratado pelo consumidor. Os índices comumente fiscalizados pelo órgão nacional, ANEEL, são divididos entre aqueles que avaliam o sistema e os que avaliam o consumidor. Estes são listados abaixo:

Sistema:

- **Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC):** Pode ser calculado pela Equação (2.12), está relacionado o número de interrupções ocorridas em média, para um determinado período de apuração, em cada unidade consumidora do conjunto considerado [Interrupções/consumidor ano] [ANE12];
- **Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC):** Calculado pela Equação (2.13), é dado pelo intervalo de tempo em que, em média, para um determinado período de apuração, ocorreu a descontinuidade da distribuição de energia elétrica em cada unidade consumidora do conjunto considerado [ANE12].

$$FEC = \frac{\sum_1^k C_a(i)}{C_c} \quad (2.12)$$

$$DEC = \frac{\sum_1^k C_a(i)t(i)}{C_c} \quad (2.13)$$

Onde:

k: número máximo de eventos no período considerado;

$C_a(i)$: número de unidades consumidoras interrompidas em um evento (i), no período de apuração;

i: índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;

C_c : número total de unidades consumidoras do conjunto considerado, no final do período de apuração.

$t(i)$: duração de cada evento (i), no período de apuração;

Consumidor:

- **Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidor (DIC):**
Calculado pela Equação (2.14) cuja unidade é horas/ano, é definido pelo intervalo de tempo no qual, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica [ANE12];
- **Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora:**
número de interrupções ocorridas, no período de apuração, em cada

unidade consumidora. O cálculo é feito pela Equação (2.15), dado em interrupções/ano [ANE12];

- **Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC):** tempo máximo de interrupção contínua da distribuição de energia elétrica, para uma unidade consumidora qualquer. A unidade é dada em horas, e o cálculo pode ser feito por meio da Equação (2.16) [ANE12];

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (2.14)$$

$$FIC = n \quad (2.15)$$

$$DIMIC = t(i)_{\max} \quad (2.16)$$

Onde:

n: número de interrupções da unidade consumidora ou do ponto de conexão considerada, no período de apuração [ANE12];

t(i): tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora ou do ponto de conexão considerada, no período de apuração [ANE12];

i: índice de interrupção por unidade consumidora ou ponto de conexão, no período a ser apurado, o valor varia de 1 a n [ANE12];

t(i)_{max}: valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção (i), no período de apuração. A ser verificada na unidade consumidora ou no ponto de conexão considerado [ANE12].

2.7 Métodos de Simulação

Durante anos, a análise de confiabilidade foi efetuada pelo uso de métodos determinísticos, principalmente na área do planejamento de sistemas por serem consideradas ferramentas de mais fácil implementação [SNR12], [IE16]. Atualmente, a aplicação dos métodos probabilísticos vem garantindo melhor representação quanto à natureza estocástica do problema abordado. Para avaliar os índices de confiabilidade podem ser empregadas técnicas que variam desde a de enumeração de estados (conhecidas também por analíticas) ou SMC (sequencial ou cronológica e não-sequencial).

2.7.1 Modelos analíticos

As técnicas analíticas foram as primeiras a serem implementadas na avaliação do desempenho de um sistema. Os métodos convencionais utilizam de modelos *Markovianos* para representar a transição entre os estados operativos. Usualmente são empregadas junto aos métodos analíticos técnicas de frequência e duração (F&D) e conjunto mínimos de corte, para cálculo da confiabilidade. Essa metodologia, contudo, fornece valores médios para os índices. A utilização de valores médios por sua vez pode não refletir de forma satisfatória o comportamento de um SD, pois, os valores médios não são capazes de fornecer informações relacionadas à dispersão, que constitui uma distribuição de probabilidade. Esse fato ocorre, pois, as características aleatórias presentes no problema, necessitam de um modelo capaz de captar o comportamento estocástico do sistema. Assim, os modelos analíticos passaram a ser substituídos por modelos estruturados em métodos SMC. A vantagem da metodologia analítica sobre a SMC está vinculada ao desempenho computacional da ferramenta. Sendo exigido maior tempo para execução daqueles que possuem como base a SMC.

2.7.2 Simulação Monte Carlo

A avaliação da confiabilidade pode ser feita por métodos que tem como base a SMC. Esses, podem ainda ser subdivididos em não-sequenciais ou sequenciais (cronológicos). Na SMC não-sequencial tal como na metodologia analítica, são empregados os modelos *Markovianos* para representação das transições entre estados operativos tanto de equipamentos quanto dos níveis de carga envolvidos [R81]. Dessa forma são esperados valores médios para os índices calculados.

A SMC cronológica por outro lado, apresenta a flexibilidade de representação de uma distribuição de probabilidade, considerando um histórico de falhas. Segundo publicações disponíveis, ao se propor avaliar um histórico de ocorrências ao longo de um período de simulação, um elevado esforço computacional é requerido o que consequentemente inviabiliza sua aplicação em diversas situações [R81].

A avaliação da confiabilidade utilizando a SMC cronológica é em geral aplicada na análise de SD [BCP02], [S02]. Durante uma simulação sequencial, são gerados históricos referentes aos tempos de reparo e de falha dos componentes. Isso é feito por meio de um gerador de números pseudoaleatórios, o que resulta em um ciclo de operação para o sistema. Os equipamentos presentes no sistema, tais como linhas de transmissão, chaves, disjuntores, podem ser representados por um modelo reparável, Figura 2.11, cuja representação a dois estados é mostrada abaixo.

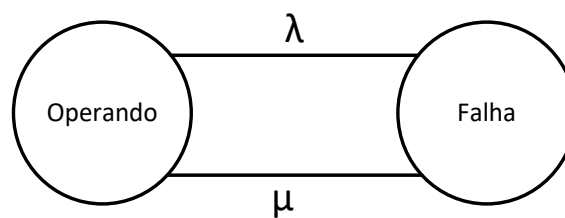


Figura 2.11- Diagrama de um Subsistema a Dois Estados

Seja o tempo médio de reparo do componente dado por r , e o tempo médio de operação dado por m , o histórico de falha para o sistema, Figura 2.12, é descrito por:

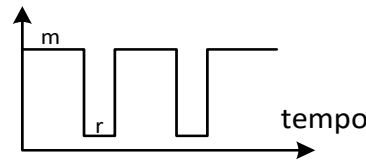


Figura 2.12- Histórico de Falhas

O ciclo completo de funcionamento do sistema ou T (período), é representado pela soma do tempo médio para falha ($MTTF$ – *Mean Time to Failure*) e do tempo médio para reparo do componente ($MTTR$ – *Mean Time to Repair*), Equação (2.17). Esta soma define ainda o tempo médio entre falhas ($MTBF$ – *Mean Time Between Failures*). Em geral o tempo gasto no reparo do componente é baixo, se comparados ao tempo em que o componente permanece na operação, o que é esperado na prática. Assim observando a Equação (2.17), valor de $MTBF$ e $MTTF$ serão próximos, uma vez que $MTTR$ é relativamente baixo.

$$MTBF = MTTR + MTTF \quad (2.17)$$

A representação desses tempos na SMCS é feita por distribuições de probabilidade como Exponencial, Gama, Normal, Lognormal e Weibull. Na SMCS os índices de desempenho do sistema seguem a expressão dada pela Equação (2.18) [MSA06], [G06], [DM99].

$$E(G) = \frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt \quad (2.18)$$

Onde $G(t)$ representa uma função teste qualquer. Essa é capaz de verificar para um dado instante t a situação do sistema, sendo o período analisado representado por T . Com a Equação (2.18) é possível estimar qualquer índice de desempenho, variando a função teste de forma adequada. Outra forma de se estimar um valor para a função teste é mostrado na Equação (2.19).

$$\tilde{E}(G) = \frac{1}{NS} \int_0^{NS} G(Y_k) dt \quad (2.19)$$

Em que Y_k representa uma sequência de estados no ano k , NS por sua vez o número de anos simulados. Para uma frequência de falhas, basta que sejam somadas as interrupções ocorrentes durante o ano de simulação. A variância do estimador de estados, Equação (2.20), confere incerteza ao índice de confiabilidade.

$$V(\tilde{E}[G]) = \frac{V(G)}{NS} \quad (2.20)$$

Em que se define $V(G)$ sendo a variância associada à função teste. Conclui-se que a incerteza do índice é dependente do número amostral, sendo assim, a quantidade de amostras simuladas confere menor erro no resultado. A convergência do processo de simulação é verificada pelo coeficiente de simulação β , Equação (2.21) [R81]. Esse dado representa a quantidade de simulações executadas pelo programa durante o processo. O valor definido por β , permite que o programa seja interrompido quando a amostra de dados seja suficiente para gerar um resultado satisfatório.

$$\beta = \frac{\sqrt{V(\tilde{E}[G])}}{\tilde{E}[G]} \quad (2.21)$$

O elevado esforço computacional que inviabiliza o uso da técnica vem sendo corrigido por recursos adicionais como exemplo a programação orientada a objetos (POO), programação paralela ou distribuída e a decomposição de sistema [BA94]. Essas ferramentas têm como função auxiliar durante o processamento dos sistemas promovendo benefícios especialmente em sistemas de grande porte.

2.8 Considerações do Capítulo

Os conceitos apresentados nesse capítulo descrevem de forma sucinta as características gerais de um SD. Tais conceitos são tomados por princípios básicos na avaliação do desempenho dos sistemas e por isso são empregados no desenvolvimento de programas computacionais cuja função é o cálculo da confiabilidade. Alguns componentes, porém, ao serem inseridos ao SD precisam ser descritos com detalhes que excedem os princípios básicos, isso devido tanto à alta tecnologia envolvida, quanto a influência das variáveis externas. Como exemplo podem ser destacadas as fontes de natureza renovável, que além de fazerem uso de maiores auxílios tecnológicos, dependem de recursos naturais para geração de energia. Com isso, passa a ser remetida uma maior complexidade ao modelo do sistema, dificultando na análise do desempenho. No capítulo que segue é abordado um conteúdo referente ao impacto gerado pela agregação de fontes distribuídas no SD, destacando ainda a necessidade de representar informações detalhadas desse tipo de componente.

CAPÍTULO 3

Modelo de Geração Distribuída (MGD)

3.1 Introdução

A estrutura do sistema elétrico de potência (SEP) tradicional é planejada para atender os consumidores gerando energia de forma centralizada, onde o fluxo de potência disponível percorre o caminho que conecta as centrais geradoras (em geral afastadas) e a carga. O SE passou por diversas mudanças ao longo dos anos, o que refletiu diretamente na arquitetura do SEP devido a normatizações a serem seguidas. O crescimento e desenvolvimento tecnológico dos dias atuais contribuem para que a evolução do setor seja mantida, acarretando modificações não só a níveis estruturais, como econômicos e ambientais. Esse desenvolvimento incentivou para que houvesse o surgimento de recursos em prol da melhoria na confiabilidade do SEP. Desencadeando iniciativas favoráveis à descentralização da geração de energia, com a integração de Recursos Energéticos Distribuídos (RED) no suporte da geração principal [NSL12].

Diariamente são conectadas novas cargas ao SD, ação que promove um aumento na demanda por potência. Não sendo capaz de suprir essa demanda, o sistema vivencia cenários de sobrecarga e consequentemente submete o consumidor à descontinuidade do serviço. Uma vez que o desempenho da concessionária é mensurado pela continuidade da energia ofertada, a inserção dos RED no SD passa a ser uma alternativa para solucionar ou pelo menos reduzir os problemas ocasionados pelo crescimento da carga conectada. Evitando assim, possíveis descontinuidades em pontos consumidores.

3.2 Geração Distribuída (GD)

O acordo assinado em abril de 2016, coloca em vigência as medidas propostas na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP 21), que expõe a grande necessidade em se discutir o uso de recursos energéticos limpos no Brasil [F15]. A predominância de uma geração hídrica e centralizada no país, faz com que seja necessário o planejamento e inclusão de recursos auxiliares com a finalidade de reforçar o SEP em vigência.

Os RED podem intervir na estrutura do sistema, promovendo eficiência e contribuindo na facilidade ao acesso à energia. Visto que, reduzem a dependência de geração atribuída às grandes centrais, além disso, são tomados como opção quanto ao uso de fontes poluentes. Por RED entende-se: o uso de Geração Distribuída (GD), armazenamento de energia, eficiência energética e gerenciamento de demanda. Ou seja, todo e qualquer recurso disponível para atuar no sistema elétrico favorecendo tanto o lado da oferta quanto da procura [BH16].

Dentre os RED, o uso geração distribuída junto ao sistema de distribuição vem se destacando. As GDs estão associadas ao uso de tecnologias disponíveis para geração de energia de pequeno porte [ANE12]. O Artigo 14º do Decreto Lei nº 5.163/2004 conceitua essa geração por fontes de energia conectadas à rede de distribuição do consumidor. Todavia, não são incluídas as fontes hídricas com capacidade superior a 30MW, as termoeletricas e os cogeneradores de eficiência inferior a 75% [BH16]. A ANEEL categoriza ainda a GD em subgrupos de acordo com a capacidade de geração de cada unidade. Dado isso, tem-se: micro geradores (com capacidade de geração de até 75kW) e minigeradores (entre 75kW e 5MW) [ABGD].

A preocupação associada aos problemas ambientais como a escassez de recursos hídricos, resulta no desenvolvimento de novas fontes renováveis de energia, destacando no país o domínio da energia solar fotovoltaica na classe de consumo. De acordo com os dados fornecidos pela ANEEL juntamente com a ABGD (Associação

Brasileira de Geração Distribuída), é visto que o Brasil conta atualmente com mais de 400MW de potência instalada representado por GD. Desse total, 87,6% são gerados a partir de fontes solares e o restante distribuído entre os demais recursos. É importante ressaltar que, a atuação dos RED é visualizada em maior número na classe de consumidores residenciais. Segundo os dados, no ano de 2017, 79,28% das unidades geradoras encontravam-se instaladas a nível residencial [ABGD]. Apesar do grande desenvolvimento das fontes renováveis e dos benefícios que estas podem agregar ao SD, sua utilização confere maior grau de dificuldade durante na análise da confiabilidade. Isso ocorre devido a intermitência na potência gerada, não sendo possível fornecer um valor de potência constante ao sistema, assim uma vez que se agrega este recurso ao projeto, é importante considerar aspectos como variação na geração de potência.

3.3 Impactos da Inserção da GD no Sistema de Distribuição

O SD é projetado partindo do princípio de que a energia segue um curso unidirecional, iniciando nos geradores e sendo transportada até os pontos de carga. O acréscimo de uma unidade distribuída na estrutura física do sistema pode afetar o curso natural da energia, possivelmente invertendo o fluxo de cargas. Além disso pode dificultar nas ações de controle do sistema e na atuação de dispositivos de proteção. Como resultado, tem-se o comprometimento do desempenho do SD [NSL12]. Os impactos causados pela inserção desses recursos, podem ser favoráveis ou não, sendo eles de caráter econômico e técnico. Devido a isso existem normas e regulamentações que devem ser cumpridas uma vez que se deseja imergir essa unidade ao SD, preservando assim as características de segurança e operação do sistema [OPH06].

Segundo a literatura disponível é possível ver que a utilização da GD pode ser benéfica, isso quando a unidade é conectada de forma adequada, em locais propícios

e coordenada junto aos dispositivos de proteção do SD [BF01]. Nessa proposta de estudo, a conexão dessas fontes é feita diretamente na rede de distribuição como uma carga negativa, permitindo com que sejam posicionadas nas proximidades do ponto a ser suprido. Sob essas condições, é possível alocar uma unidade com o objetivo de reforçar os pontos críticos do sistema, ou seja, melhorar o desempenho em regiões onde há descontinuidade de energia. Como benefícios resultantes dessa tecnologia apontam-se: a redução das perdas devido ao posicionamento da unidade próxima ao local de consumo; controle da variação de tensão e frequência na rede, atendimento de consumidores situados em locais de difícil acesso e redução nos cortes de carga. Atesta-se com isso, que a GD em diversos cenários é recomendada para melhora da qualidade e confiabilidade do sistema [ILR11].

Com a imposição das normas que regulamentam os níveis de qualidade e confiabilidade do serviço ofertado pelas concessionárias, níveis mínimos de desempenho e qualidade se tornaram imprescindíveis. Assim, o uso de fontes auxiliares é visto como uma alternativa que permite às concessionárias a adequação do SD junto as normas vigentes. O emprego de uma unidade distribuída pode levar à redução das penalidades recebidas por interrupção do fornecimento, pois auxiliam reduzindo a descontinuidade do serviço [SNR12].

Recentemente, ANEEL passou a promover grande incentivo em favor da inserção de GD na rede de distribuição, tanto para pequenos quanto grandes produtores. Para esse propósito é apresentado o método da compensação, cujo objetivo é valorizar o gerenciamento do consumo de energia, refletido sobre as tarifas. Na Resolução Normativa 687/2015 [ANE15] define-se que a energia gerada e não utilizada pelo consumidor, pode ser oferecida à concessionária sob a forma de empréstimo. Este valor, é então revertido ao consumidor como crédito de energia ativa podendo ser entregue (ou devolvido) durante os meses subsequentes [N05], [ANE15]. Essa resolução atua como incentivo ao uso da GD provendo o desenvolvimento desses recursos no Brasil, criando assim um cenário onde as concessionárias são expostas à possibilidade de agregação da GD sem custo de instalação, uma vez que a unidade

é instalada pelo usuário. Com isso é possível melhorar os índices de confiabilidade à baixo custo de investimento, ação que favorece tanto a companhia distribuidora quanto ao consumidor. Além do método de compensação, o governo apresenta outros programas de incentivo a GD, que podem ser vistos com maiores detalhes no estudo apresentado na referência [N17].

A inserção de GD requer diversos cuidados, pois, seu posicionamento pode desencadear problemas no controle e na atuação das proteções. Estudos desenvolvidos pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) comprovam que quanto maior a imersão dessas fontes no sistema, maior o impacto provocado nas proteções, pois a arquitetura radial é afetada [HA95]. Dessa forma, o dimensionamento da capacidade de geração da unidade inserida é fator pontual para que não haja inversão do fluxo de cargas (ou fluxo de potência) original. Além disso, do ponto de vista do contratante, ou seja, da concessionária que adquire o excesso de energia do consumidor, existe uma incerteza relacionada a adição de potência de valor não constante e difícil modelagem que passa a ser agregada ao SD. Isso ocorre devido ao caráter intermitente das fontes adquiridas, podendo desencadear um desequilíbrio no sistema [ABR92].

Ao se tratar de mercado a GD é favorecida, pois pode participar tanto da venda regulamentada quanto direta. A energia entregue ao consumidor é adquirida pela distribuidora por meio de leilões, o órgão regulador permite que 10% do valor adquirido no ato da compra seja composto por GD [ANE04]. Contudo, ainda que baixo, esse percentual não chega a ser atingido, pois o repasse tarifário se torna dependente do valor máximo atingido pelo leilão, podendo elevar a tarifa do consumidor [SHC16]. Assim, visando não elevar a tarifa do consumidor e ao mesmo tempo auxiliar na expansão do SD, vê-se como alternativa viável as propostas da ANEEL em utilizar as fontes agregadas pelo consumidor, uma vez que estas não fazem parte do comércio regulamentado (leilões) [SHC16]. Contudo, isso desfavorece as classes sociais mais baixas cujos recursos disponíveis inviabiliza na obtenção de uma unidade GD. Ainda, como o maior percentual de posse dessas unidades fica sob os cuidados dos

consumidores residenciais, já citado anteriormente, o SD deve estar sempre apto a receber esses novos recursos, estando em constante cenário evolutivo.

3.4 Modelagem da GD

Na presente proposta a GD se refere a conexão de fontes renováveis de natureza solar e eólica ao SD. Essas fontes necessitam de um modelo específico devido sua característica de produção intermitente, onde potência disponível é dependente de valores variáveis, como níveis de radiação solar incidentes e velocidade atribuída aos ventos na região[SOL], [ER]. Para que a representação adotada se aproxime do modelo real, é necessário o uso de uma ferramenta que seja capaz de captar o comportamento estocástico observado.

A GD pode interferir no balanço energético, uma vez que agrega potência disponível ao suprimento. Dessa forma pode ser tratada como uma ferramenta favorável à eficiência energética do sistema do ponto de vista de balanço energético. Ao avaliar as fontes renováveis, é sabido que estas caracterizam-se pela intermitência da potência disponível, ainda, a carga conectada ao sistema é também variável, dessa forma a capacidade de suprimento da GD pode ser por vezes maior ou menor que o valor a ser suprido. Para que essa intermitência seja modelada adequadamente, são analisadas todas as características temporais da GD. Nesse intuito avaliam-se as curvas referentes à potência disponível ao longo do dia, juntamente com o percentual de transferência de carga da unidade distribuída. Essa análise é mais bem captada por meio da implementação da utilização da SMCS. A partir dela, modelam-se as curvas horárias da capacidade de potência da GD para todo o período de simulação.

3.5 Fluxo de Potência (FPT)

Conhecer a potência disponível em cada ponto do sistema trata-se de uma informação importante não só para a análise da confiabilidade, como também para o planejamento e operação do sistema. Para obter essa informação, é necessário a aplicação de cálculos referentes ao FPT definindo assim o estado operacional do sistema. Inteira-se por meio do FPT, do montante de energia disponível a ser utilizado no suprimento da carga. Caso esse valor seja superior à demanda, é possível determinar a carga a ser atendida em caso de transferência entre os ramais, resultante de um cenário de falta. É importante ressaltar que, cada alimentador do sistema é projetado para atender determinada carga a condições operacionais pré-definidas em projeto, tais como a tensão de operação do sistema, a máxima corrente suportada pelos cabos, sobrecarga e queda de tensão nas linhas de transmissão. Essas condições delimitam a máxima carga a ser transferida entre os ramais e devem ser respeitadas caso haja transferência.

Ao verificar o comportamento do FPT após a conexão da GD é esperado um aumento na capacidade de transferência de carga do alimentador. Isso ocorre devido a injeção de potência ativa agregada promovido GD, incrementando o total disponível para o suprimento das demais cargas do sistema. A potência injetada via GD deve ser modelada para fins de análise do desempenho, sendo então representada nos tópicos posteriores.

Existe uma grande diversidade de métodos que podem ser aplicados no cálculo do FPT, dentre eles encontram-se os mais convencionais como: métodos de Newton, metodologias embasadas na construção da matriz admitância e diversos outros. Contudo sistemas de topologia radial como os SD exigem uma abordagem particular, uma vez que os métodos convencionais são inviabilizados devido a problemas agregados a convergência. Dessa forma, é comum a aplicação de métodos de caráter robusto para o cálculo da potência disponível, como o método da soma de potências

(MSP), que tem como princípio a aplicação das Leis de ohm, ou ainda o método da soma de correntes (MSC), que aborda a aplicação das Leis de Kirchhoff [BW89].

Para execução do cálculo do FPT aplicado neste estudo, utiliza-se um algoritmo conhecido por Varredura Progressiva-Regressiva (VPR), que consiste em estimar a potência (MSP) e tensão do SD, explorando dessa forma, os benefícios da topologia radial do problema para executar os cálculos necessários [BW89]. A base do algoritmo pode ser dividida em duas etapas como proposta na referência [N06], sendo elas a varredura regressiva (VR) e varredura progressiva (VP):

- 1ª Etapa, VR: durante esta etapa, são efetuados cálculos referentes a potência (ou a corrente injetada) em todos os pontos do sistema, partindo de valores de tensão inicialmente definidos. Assim, utilizando como exemplo o sistema da Figura 3.1, podem ser definidas as Equações (3.1) a (3.4) apresentadas seguir:

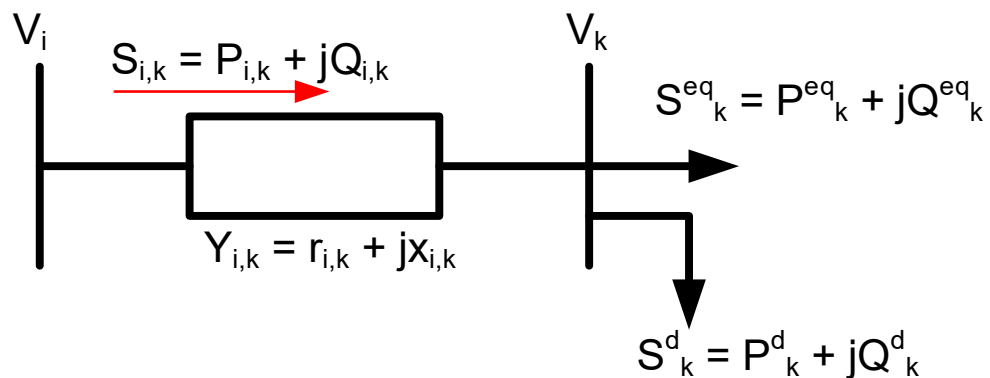


Figura 3.1: Sistema exemplo MSP

$$P_{i,k} = P_k^{eq} + r_{i,k} \times \frac{P_k^{eq^2} + Q_k^{eq^2}}{V_k^2} \quad (3.1)$$

$$Q_{i,k} = Q_k^{eq} + x_{i,k} \times \frac{P_k^{eq^2} + Q_k^{eq^2}}{V_k^2} \quad (3.2)$$

$$P_k^{eq} = \sum_{l \in \Omega_k} P_{k,l} + P_k^d \quad (3.3)$$

$$Q_k^{eq} = \sum_{l \in \Omega_k} Q_{k,l} + Q_k^d \quad (3.4)$$

onde:

$P_{i,k}$: fluxo de potência ativa no ramo entre as barras i e k;

$Q_{i,k}$: fluxo de potência reativa no ramo entre as barras i e k;

P_k^d : carga ativa conectada à barra k;

Q_k^d : carga reativa conectada à barra k;

Ω_k : conjunto de nós à jusante do nó k;

$r_{i,k}$: resistência associada com o ramo entre os nós i e k;

$x_{i,k}$: reatância associada com o ramo entre os nós i e k;

- 2ª Etapa, VP: Terminada a varredura VR, o cálculo segue para a segunda etapa, definida por VP. Nela os valores de tensão são recalculados utilizando agora os valores de potência (ou corrente) calculados na etapa anterior (VR), aplicando a Equação (3.5) [BW89], [SHS88].

$$V_k^2 = V_i^2 - 2(P_{i,k}r_{i,k} + Q_{i,k}x_{i,k}) + (P_{i,k}^2 + Q_{i,k}^2) \frac{r_{i,k}^2 + x_{i,k}^2}{V_{i,k}^2} \quad (3.5)$$

onde define-se:

V_k^2 : tensão na barra k;

$V_{i,k}^2$: diferença de entre as tensões da barra i e da barra k;

Na proposta mostrada em [N06] o autor apresenta um estudo comprovando que o método de soma de potências é capaz de fornecer melhores resultados quando aplicado à um SD, dessa forma utiliza-se deste na presente proposta.

Ainda no intuito de reduzir o tempo de simulação, utiliza-se o método VPR-A (aproximado) [C14]. Sabe-se que o custo computacional da análise está associado ao cálculo iterativo executado no método. Dessa forma, os valores a serem utilizados no fluxo são calculados em uma única iteração, favorecendo a agregação junto à SMCS.

3.6 Análise do Problema

A utilização da GD em um SD é proposta de uma forma geral como alternativa viável para solucionar problemas relacionados ao desempenho das redes de distribuição refletindo diretamente nos índices de confiabilidade. No presente estudo propõe-se analisar o impacto provocado nos índices de confiabilidade, após a inserção da

variável GD na rede de distribuição em avaliação. Para isso é necessário agregar ao modelo do SD aspectos capazes de impactar no desempenho, como os citados a seguir que se tornam imprescindíveis para que os cálculos dos índices de confiabilidade sejam computados de forma ideal:

- 1- Impacto causado no fluxo de carga do alimentador ao qual a fonte foi inserida;
- 2- Impacto gerado na confiabilidade do sistema.

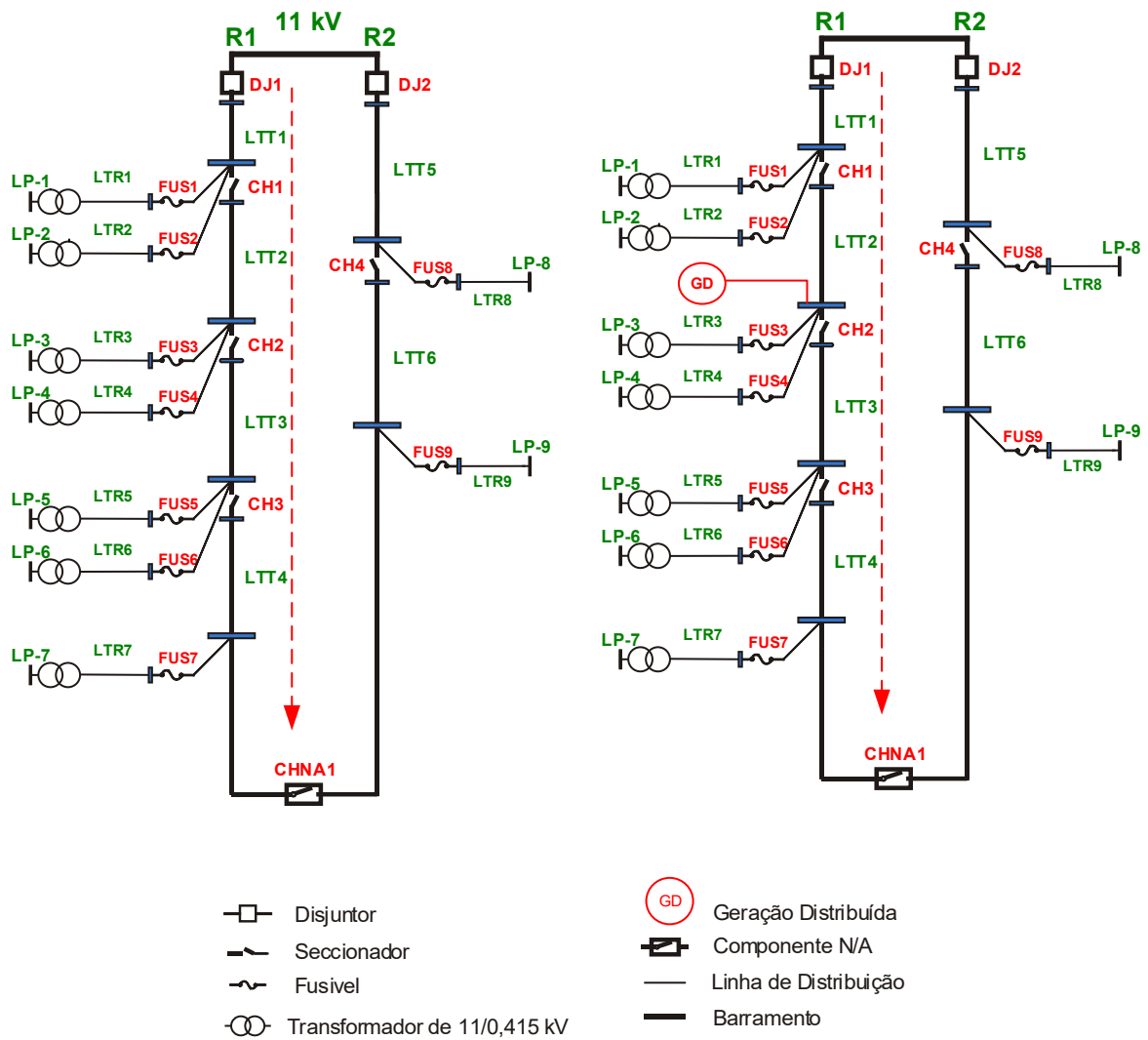
Para que tais impactos sejam representados, a GD recebe duas modelagens distintas durante a simulação do SD, a fim de capturar e refletir as características de intermitência agregadas a ela em cada cenário de atuação.

3.6.1 Modelo da Fonte no Fluxo

Como citado nos tópicos precedentes, o RED ao ser inserido no SD é capaz de alterar o total de energia disponível para uso. Sendo assim, parte do montante a ser entregue pela concessionária é fornecido por fontes distribuídas ao longo do sistema (GD). Devido a característica intermitente das fontes renováveis abordadas nesse estudo, a GD quando inserida no sistema deve ser monitorada no intuito de capturar informações horárias referentes ao nível de potência gerado. Por serem intermitentes, o valor de potência fornecida pela fonte é tratado como variável dinâmica, dependendo assim de características não controláveis como vento e incidência solar. Isso impossibilita a concessionária de prever um valor fixo de potência disponível a ser inserido como reforço.

No intuito de modelar a variação da capacidade de geração de uma fonte GD, a SMCS atua com elevado grau de importância, possibilitando a captura dos diversos níveis de potência por meio de uma distribuição horária da potência renovável gerada ao longo

do dia. A GD avaliada neste estudo é categorizada como baixa tensão o que possibilita a adesão desse recurso por consumidores do grupo B [ANE15]. Após ser inserida, a GD altera o FPT, consequência atribuída a potência extra que passa colaborar com o suprimento da demanda. Essa variação é observada no fluxo de cargas do alimentador cuja fonte é conectada. Se o alimentador que recebe a fonte estiver conectado a outro por meio de uma chave NA, é esperado que haja impactos nos índices de confiabilidade do alimentador (não conectado à fonte) cuja análise de desempenho depende do FPT. Para exemplificar esse cenário, considera-se o sistema já apresentado na Figura 2.8. Nele, os pares de alimentadores são interconectados via chaves NA. É possível notar pela representação da Figura 3.1 (a) que o alimentador 1 está conectado ao alimentador 2 por uma chave NA. Ao executar o fluxo do Ramal 1 (destacado pela seta), cujo funcionamento é independente dos demais devido a aplicação do método de decomposição, determina-se a capacidade de transferência de carga desse alimentador. Essa capacidade é representada em forma de potência disponível na chave NA, definindo a possibilidade deste Ramal assumir as cargas do Ramal 2 em uma situação de falta. O valor de potência encontra-se distribuído em uma curva horária devido à natureza estocástica tanto da demanda, quando da GD conectadas ao SD.



(a) Ramais 1 e 2 RBTS – Bus 2

(b) Inserção de GD no Ramal 1 RBTS-
Bus 2

Figura 3.2 Ramais 1 e 2 IEEE-RBTS BUS 2: Análise da GD no Fluxo de Potência

O valor de potência disponível na chave NA pode ser alterado uma vez que o consumidor agrega uma GD ao sistema. A situação mostrada pela Figura 3.2 (b) representa o equivalente de potência de diversas fontes distribuídas, que por sua vez seriam inseridas por vários consumidores representados pelos pontos de carga. Atenta-se ao fato que inserção a potência agregada ao sistema por meio da fonte, não

deve em hipótese alguma provocar uma inversão no fluxo de cargas, sendo esse critério avaliado durante o cálculo do fluxo de potência adotado nesta proposta. A inversão do fluxo de cargas provocado pela GD ocorre quando em determinado instante de operação houver excedente de geração. Como exemplo, ao avaliar o Ramal 1 do sistema apresentado na Figura 2.8, o somatório das cargas no instante de pico é equivalente à 3.645kW, o que pode visualizado na referência original do sistema [ABS91]. Para simplificar o exemplo, considera-se que a carga a ser suprida seja constante, assim, o FPT deve fluir de forma radial partindo da fonte atendendo os pontos de carga e as perdas do sistema. A GD por sua vez, é modelada no problema como uma carga negativa a ser injetada no sistema, sendo a potência gerada por ela subtraída da demanda total. Uma vez que o valor da demanda é reduzido pela presença da GD, é possível que este se torne muito baixo ou negativo, havendo assim um excedente de geração. Assim, o FPT passa a se comportar de maneira inversa tendendo a fluir no sentido oposto, o que infringe o padrão de operação do SD. Por essa razão é determinado um valor máximo de potência distribuída que pode ser agregada ao SD, garantindo que a operação seja mantida dentro das normas de segurança e qualidade exigidas pelo órgão regulamentador.

3.6.2 Modelo da GD na Análise da Confiabilidade

Ao utilizar RED em um SD acredita-se que a influência provocada ocorra não somente no fluxo de cargas disponíveis, como também na confiabilidade. Dessa forma, ao avaliar o desempenho de um sistema cujo modelo abrange a GD, são observados impactos positivos refletidos nos índices de confiabilidade. Assim, durante o cálculo da confiabilidade é necessário verificar a existência de conexões referentes a GD. Para exemplificar a modelagem dessa ação no programa proposto, considera-se o sistema da Figura 2.8. Após ser decomposto é possível tomar os ramais como circuitos independentes, dessa forma, considerando apenas os Ramais 1 e 2 (Figura

3.3), e avaliando por sua vez a confiabilidade do Ramal 1, os seguintes aspectos devem ser considerados:

- O fluxo de cargas referente ao Ramal 2 é responsável por definir a potência disponível na chave NA que interliga os alimentadores (1 e 2). Esse valor determina a capacidade do Ramal 2 em suprir as cargas conectadas a ele e a demanda (ou parte) referente ao Ramal 1. Definindo assim a ação de transferência de cargas, cenário visualizado quando a falta em determinado componente do alimentador 1 impossibilita o suprimento dos pontos de carga conectados;
- A presença da GD no Ramal 2 influencia na potência disponível na chave que interliga os alimentadores, caso haja uma falha em uma linha do Ramal 1 **e.g.:** LTT3, as proteções atuam para que o defeito seja isolado. Como consequência os pontos de carga abaixo da linha LP-5 a 7, Figura 3.3, são desconectados. Caso o valor de potência disponível na chave, referente ao FPT do Ramal 2, seja superior a demanda do Ramal 2, pode-se esperar que este consiga atender os pontos em descontinuidade de energia do Ramal 1, a ação de chaveamento pode então ser executada permitindo a transferência de carga entre os Ramais até que o defeito seja solucionado;
- A fonte GD inserida no Ramal 1 irá impactar no suprimento de cargas deste ramal, agregando ao modelo proposto uma carga de valor negativa. Com isso o valor de energia a ser fornecido pela concessionária é reduzido, além de ocasionar benefícios quanto a redução das cargas que supostamente seriam cortadas do sistema na presença de falta;
- A posição da GD no Ramal 1 impacta diretamente na capacidade que esta tem de beneficiar na confiabilidade, considerando novamente que haja uma falha neste Ramal e que a falha seja localizada novamente na LTT3, Figura 3.3. Caso a fonte seja instalada em qualquer posição 'acima' das proteções que irão atuar para isolar o defeito (como na posição mostrada na figura), a presença desta não terá capacidade de melhorar a confiabilidade, pois a

atuação dos dispositivos de proteção fará com que ela seja isolada dos pontos de carga em corte;

- Ao modelar o comportamento da fonte inserida no ramal são considerados aspectos referentes a intermitência na potência gerada. Para essa modelagem é necessário verificar o percentual disponível de carga no momento da falta. Isso é feito utilizando curvas horárias referentes a carga disponível na fonte e seu fator de carga horário.

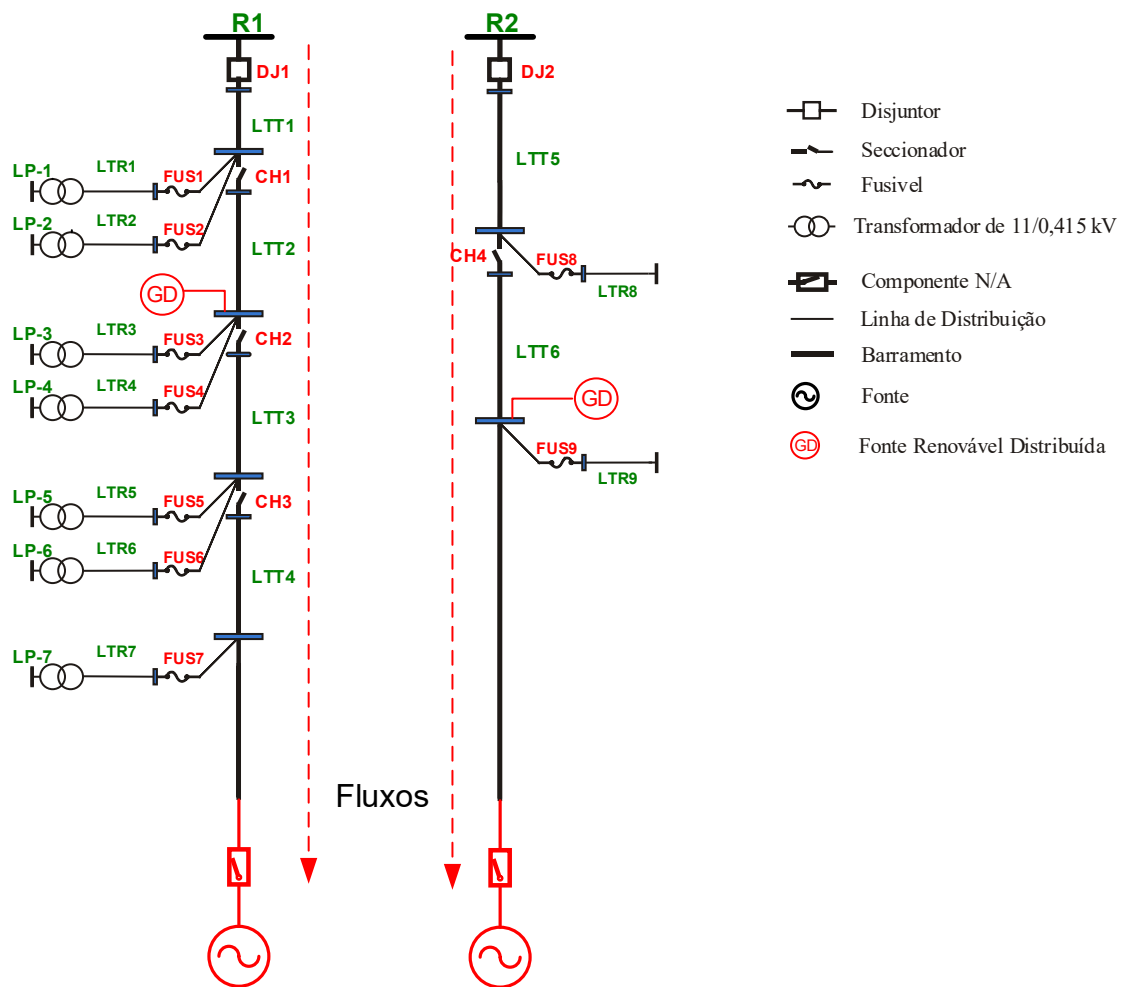


Figura 3.3 Ramais 1 e 2 do Sistema RBTS BUS 2: Modelo da GD na Confiabilidade

3.7 Considerações do Capítulo

Os conceitos da GD abordados nesse capítulo apresentam as características que envolvem esse tipo de geração e os impactos advindos de sua inserção ao SD. Neste é descrito de maneira resumida, o FPT utilizado nesta proposta. Destaca-se que a inserção da GD altera na capacidade de suprimento da carga, valor computado por meio pelo fluxo de potência. Assim, dado ao fato que os RED são capazes de afetar no desempenho do SD, as características referentes a elas devem ser agregadas ao modelo computacional proposto no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 4

Metodologia Proposta

4.1 Introdução

O cálculo da confiabilidade de um SD exige a aplicação de diversas metodologias e técnicas, no sentido de garantir o desenvolvimento de um modelo que se aproxime do sistema real. A partir do modelo implementado, se torna praticável o uso de equações matemáticas no intuito de avaliar o desempenho das concessionárias responsáveis pela distribuição de energia aos consumidores. A análise do desempenho de um SD é em geral obtida por programas computacionais, cuja composição inclui ferramentas capazes de representar o modelo do sistema vigente. A característica principal das ferramentas envolvidas no processo de avaliação de desempenho, trata-se da capacidade em fornecer informações detalhadas dos índices de confiabilidade. Além disso, espera-se que as funções agregadas a elas sejam desempenhadas a níveis computacionais satisfatórios, o que é definido pela redução tanto no tempo de simulação, quanto da memória computacional utilizados no processo. Essas características, por estarem presentes no algoritmo proposto neste estudo, fazem do programa apresentado um recurso aplicável a sistemas reais de maior porte, contribuindo no estudo da confiabilidade do SD.

Ao empregar um programa computacional na verificação da performance do SD, tem-se a pretensão de adquirir uma previsão dos valores aproximados dos índices de confiabilidade do sistema. O acesso prévio a esses dados permite que os investimentos sejam destinados a reforçar pontos críticos do sistema. O que possibilita por sua vez, que haja redução do corte de carga em pontos consumidores, evitando possíveis penalidades decorrentes do não fornecimento de energia.

A ferramenta elaborada nesta dissertação propõe atender as especificações de alto desempenho computacional e confiança nos dados fornecidos ao usuário. O algoritmo é desenvolvido no intuito de avaliar o desempenho de um SD, cuja característica comportamental pode ser descrita por um modelo estocástico, podendo assim ser utilizada a Simulação Monte Carlo Sequencial (SMCS). A escolha desse método se dá em razão da necessidade de capturar o histórico comportamental do sistema, permitindo com que o aspecto sequencial da ocorrência das falhas individuais seja agregado a análise do sistema. Com isso é conferido um caráter preciso aos resultados, possibilitando dessa maneira, a avaliação de falhas de grau superior com uma abordagem que vai além de dados referentes aos valores médios de índices (o que ocorre com metodologias não sequenciais).

Os cálculos obtidos em função de valores médios podem acarretar a omissão de informações importantes nos resultados. Cada componente do sistema tem seu estado analisado separadamente durante a SMCS, o estado em que o componente se encontra impacta na operação do sistema como um todo, assim a cada mudança operacional do componente são avaliadas as ocorrências provocadas no sistema. Cabe ressaltar que o emprego dos métodos baseados em SMC apresentam limitações que restringem sua implementação. Isso ocorre, pois, a análise cronológica dos estados operacionais dos componentes, faz do tempo de simulação uma variável onerosa.

No intuito de atingir um estudo detalhado dos parâmetros de confiabilidade, buscando atingir maior eficiência durante a simulação sem que haja distorção dos resultados, opta-se por agregar ao método, algumas técnicas para representação do SD. Desde que estas não comprometam a análise alcançada pela implementação de um método SMCS puro. Assim, exploram-se os benefícios em se aplicar Programação Orientada a Objetos (POO), desenvolvida neste estudo em C++. Onde podem ser utilizados os conceitos de “classes”, “objetos” e “ponteiros”, que garante a organização da programação e a interação dos objetos preservando memória computacional. Além disso, explora-se as vantagens obtidas da decomposição do sistema, que promete a

subdivisão do sistema em subsistemas mais simples. Essas implementações trazem ganhos ao programa, tal como a redução do esforço computacional envolvido.

4.2 Etapas da Simulação Monte Carlo Sequencial

Usualmente os algoritmos responsáveis pela execução da SMCS, são divididos em etapas, como citado na referência [N09]. Os estágios percorridos pelo algoritmo proposto constam-se de algumas modificações das etapas comumente utilizadas, fazendo com que os passos a serem seguidos sejam condizentes a abordagem adotada. Nos itens a seguir, são apresentados os passos adotados durante a execução do algoritmo proposto:

1. Atribui-se aos componentes do sistema um estado inicial de operação, definido como funcionamento (ou operando);
2. Com o auxílio de um gerador de números aleatórios e das distribuições de probabilidade, atribui-se aos componentes cuja falta será avaliada, valores que serão referentes aos tempos para a falha e tempo de reparo. São considerados nessa proposta, apenas as faltas ocorridas nas linhas de transmissão;
3. Dentre os valores atribuídos a variável *tempo*, calculados em (2), identificar qual o menor tempo (*TMIN*) e defini-lo como “*clock*” do processo. O elemento vinculado ao menor tempo, será aquele cujo estado e seus impactos serão avaliados;
4. Analisar o comportamento do elemento identificado em (3), buscando isolar o defeito por meio da atuação das proteções do sistema;
5. Finalizado o passo (4), avalia-se os pontos de carga impactados pela mudança de estado do elemento em análise. Em seguida, percorre-se o sistema executando uma varredura em busca de possíveis chaves para reestabelecimento da operação dos pontos impactados. A restauração da energia requer que o fluxo de energia percorra caminhos alternativos que

garantam o isolamento da falta e o suprimento da carga, decorrentes da atuação da chave. Nesse passo do processo são computadas as interrupções de energia nos pontos de carga e suas respectivas durações. Esses valores refletem o índice de confiabilidade referente ao ano de simulação devido a contribuição de cada ponto cuja energia foi suspensa;

6. Gerar um novo número aleatório que resultará em um novo tempo e estado para o componente em análise. Como é definida a duração da análise, exemplo: 1 ano, é verificado se o tempo atual do componente é pertencente ao período. Se afirmativo, retornar em (3). Senão, calcular os índices de confiabilidade referente ao ano de simulação, para todos os pontos de carga influenciados pela falta e segue-se para o passo (7).
7. Avaliar o fator de convergência do algoritmo. Para isso, utilizar o coeficiente de variação (β). Enquanto o valor de convergência de uma dada função não for atendido, retorna-se ao passo (3). Quando o algoritmo convergir, calculam-se os índices de confiabilidade médios, esses valores são dependentes dos índices calculados ao final de cada ano (passos 5 e 6) encerrando com isso o processo de simulação. Nesse ponto é possível ainda estipular as curvas de distribuição de probabilidade referentes aos índices de confiabilidade dos pontos de carga, característica que difere a SMCS dos demais métodos.

4.3 Representação do Sistema em Árvore

4.3.1 Construção da Árvore Normalmente Fechada (NF)

Como citado nos capítulos que antecedem, o SD é representado por meio de uma topologia complexa. Por essa razão, é necessário agregar à SMCS, o uso de ferramentas auxiliares. Dessa forma, analisar a probabilidade de ocorrência dos estados (falha e operação) dos componentes constituintes do SD, torna-se um trabalho menos exaustivo, fornecendo assim, a confiabilidade do sistema. Para isso,

emprega-se na representação do sistema o diagrama em árvore, ou árvore de conexões [N05]. Essa ferramenta, assim como as demais apresentadas posteriormente contribuem na aplicação da SMCS proposta neste estudo. Pois reduzem o esforço e tempo computacional requeridos durante o processo de simulação.

Uma árvore de conexões é construída no intuito de simplificar a representação do sistema durante a análise da confiabilidade. Uma árvore de conexões do tipo NF é composta de componentes que quando energizados, possibilitam a alimentação de um ponto, como linhas de transmissão, disjuntores, barras de entrada e saída e pontos de carga do SD. A influência de uma falha no sistema, é determinada por fatores que incluem sua posição dentro do SD, sendo essencial uma representação que beneficie durante a busca pela identificação do local da falta, favorecendo no esforço requisitado por essa ação. O sistema apresentado da Figura 4.1, é tomado como base para exemplificar o processo construtivo do diagrama em árvore. Esse sistema é composto por fontes (G1 e Fonte NA), disjuntor (DJ1) chaves do tipo NF e NA (CH1 e DJA1 respectivamente), linhas de distribuição (LT1 a LT4), fusíveis (FUS1, FUS2, FUS3) e por fim, pontos de carga (TR1, TR2 e TR3).

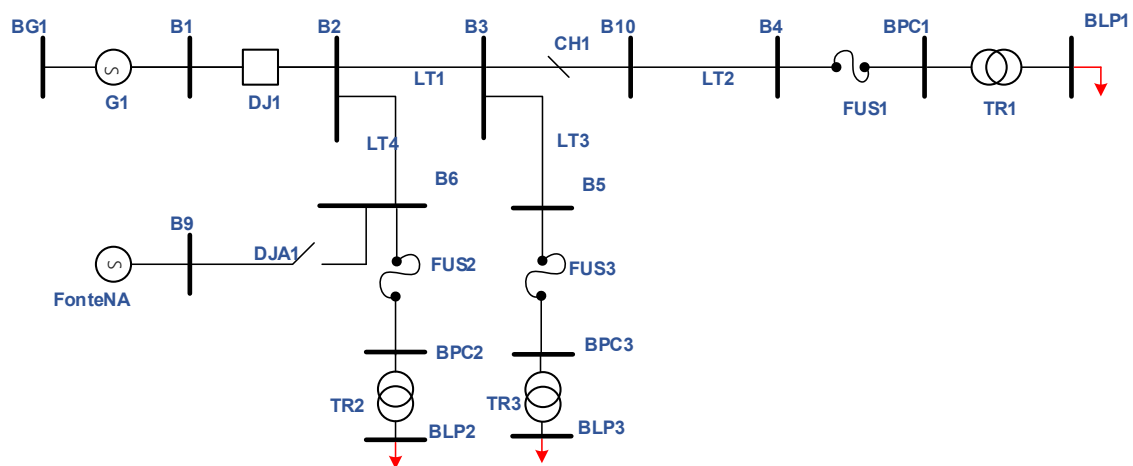
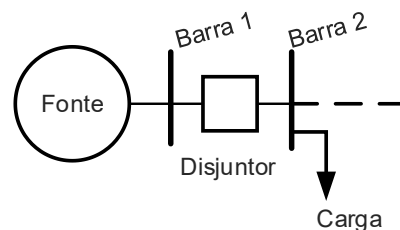


Figura 4.1- Sistema Teste de Distribuição

Durante a construção da estrutura, busca-se identificar a posição de cada elemento no sistema, tal como os componentes conectados a ele. Para contribuir no processo de localização são criadas listas de conexões, essas contêm informações referentes a posição do componente e suas respectivas conexões. A identificação das conexões é feita ao analisar o nó que interliga um ou mais componentes do SD, ou seja, a barra. O uso da lista permite trabalhar com dados concentrados e já dispostos de forma organizada, reduzindo a ação de percorrer todo o arquivo de entrada em busca das conexões ao comparar as informações dos elementos de dois a dois. As Figura 4.2 (a) e (b) ilustram parte de um SD e a construção de sua respectiva lista auxiliar. Ao analisar a fonte por exemplo, vê-se que ela está conectada à uma barra do sistema (Barra1), essa conexão é representada por uma seta (em vermelho) que aponta da fonte para a barra, como destacado na Figura 4.2(b). Essa mesma barra pode conter diversos componentes conectados, nesse caso além da fonte, apenas o disjuntor. Com isso, conclui-se que o disjuntor está conectado a fonte por meio da barra, indicando que este é nó comum entre os dois. Para construir a lista auxiliar, é necessário avaliar os nós comuns entre os elementos. Isso é feito pela lista de barras, onde é possível ver quais elementos estão conectados entre si. Cada elemento recebe então *nodo* do componente conectado a ele, compondo assim a lista auxiliar. Por meio do nodo tem-se acesso direto aos elementos conectados sem a necessidade de uma varredura completa do sistema.



(a) Exemplo de Sistema

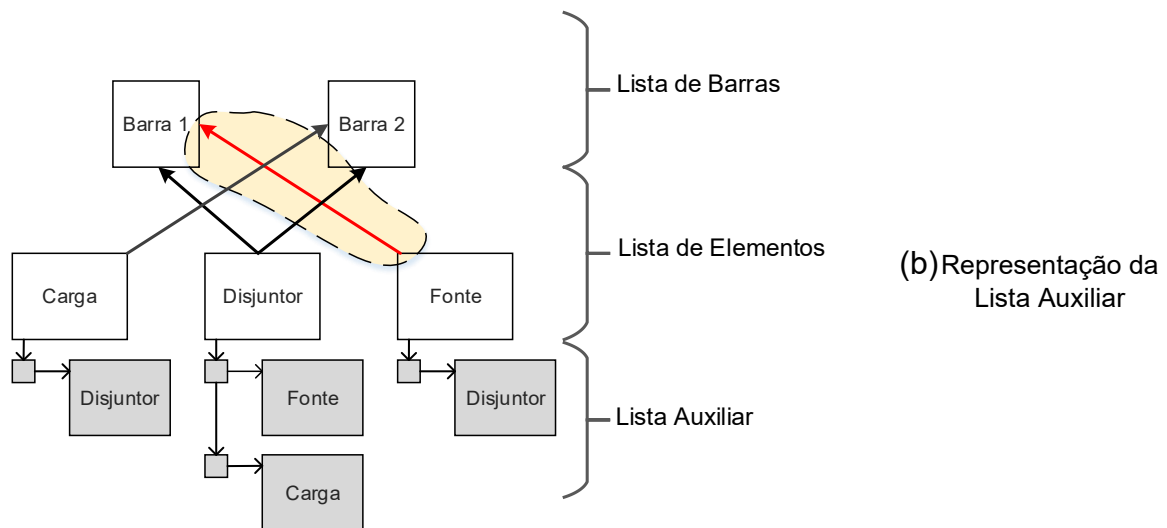


Figura 4.2 Aplicação da lista Auxiliar

Para o sistema da Figura 4.1, avaliando o caminho que percorrido desde a fonte G1 até o ponto consumidor TR2, é possível ver que os elementos que possuem barras em comum são inseridos nas listas uns dos outros compondo a lista auxiliar, destacada na Figura 4.3. Como exemplo, tem-se a fonte geradora G1 cuja barra B1 é comum ao disjuntor DJ1. Por compartilharem a mesma barra, ou seja, estarem conectados a um mesmo nó, a lista de auxiliar de G1 deve conter o componente DJ1 e da mesma forma, a lista de DJ1 deve conter G1. Um outro exemplo é a linha LT4, esse componente possui uma barra comum com DJ1 e ainda com FUS2, com isso, dado suas conexões em comum, conclui-se que LT4 está inserida na lista auxiliar de DJ1 e FUS2 e ambos compondo a lista de LT4.

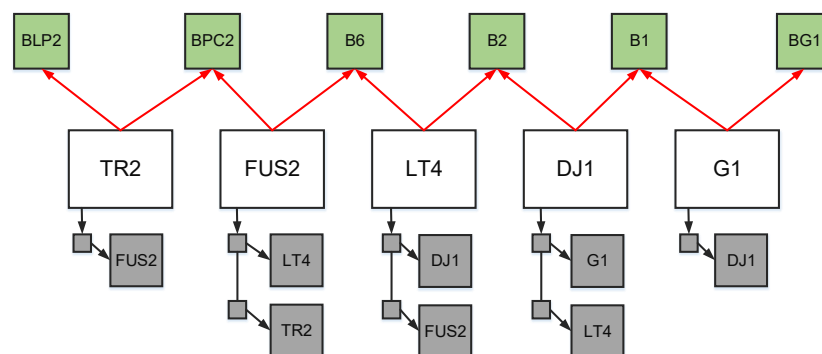


Figura 4.3 -Lista Auxiliar

Finalizada a construção da lista auxiliar, o passo seguinte é a construção da árvore do sistema. Cada elemento do SD é representado na árvore por um nodo, ou nó, ou seja, pontos de interligação. Durante o processo de identificação e disposição dos componentes na árvore, são atribuídos aos nodos os conceitos de 'pai', 'filho' e 'irmão'. O nodo que recebe o nome de 'pai', é aquele que se localiza logo acima do nodo identificado como 'filho'. Os nodos que possuírem o mesmo 'pai', recebem o nome de 'irmãos' [N09]. O processo construtivo do diagrama em árvore, requer a aplicação de funções recursivas, pois a construção é feita em níveis, similar ao que seria o galho de uma árvore.

Para que o sistema exemplo, Figura 4.1, seja disposto sob a forma de árvore, é fundamental identificar o componente que dará início ao processo construtivo. O componente inicial ou raiz da estrutura, recebe o nome de 'pai'. Em condições normais de operação, o sistema exemplo alimenta as cargas com o fluxo de potência que percorre o caminho fechado que parte da fonte G1 até os consumidores (TR1, TR2 e TR3). Distinguindo da referência [N05] cuja estrutura inicia do ponto de carga, nessa proposta adota-se a fonte como ponto inicial, assim percorre-se o SD desde a fonte até que sejam alcançados os pontos de carga. De posse do primeiro elemento a compor a estrutura, o 'pai', os demais passos para a construção do diagrama constam-se na identificação dos 'filhos' e 'irmãos'. Os 'filhos' são determinados ao identificar os nodos conectados ao nodo pai. A partir deles, é possível analisar se há presença de 'irmãos', isto é, componentes que possuem o mesmo pai. A lista auxiliar construída durante a fase inicial do programa contribui para identificação dos filhos, isso ocorre porque, os elementos que compõe a lista auxiliar do elemento inserido na árvore são os respectivos filhos. Na Figura 4.5(a) é representado o início da construção da árvore, onde G1 é o pai, conectado a ele, compondo sua lista auxiliar tem-se DJ1, que consequentemente é o filho de G1.

Na Figura 4.4(b) são representados os passos seguintes do processo construtivo, onde G1 e LT4 fazem parte da lista auxiliar de DJ1, sendo assim os respectivos filhos do disjuntor, atual pai. Cada componente do sistema é modelado com uma variável

de identificação ('inserido', inicialmente zero) que define sua inserção na estrutura árvore. Ao se percorrer o caminho entre a fonte e a carga, o componente que for inserido na árvore passa a ter a variável alterada para um. Essa identificação permite reduzir o número de elementos a serem representados, sendo retirados aqueles que seriam duplicados. É notável por meio da lista auxiliar que em um caminho fechado, o mesmo elemento seria representado repetidamente na árvore, atuando como 'pai' e 'filho' como destacado na Figura 4.4 (b) pelo elemento G1. Analisando a lista auxiliar construída e apresentada na Figura 4.3, vê-se que G1 está presente na lista de DJ1, o que faz dele o filho deste componente. Como forma de interferir nesse processo de duplicação, as referências [N05] e [N09] propuseram atuar efetuando uma 'poda' da árvore, contudo isso requer a inserção e retirada do nodo duplicado. Os conceitos como 'pai', 'filho' e 'irmão' são agregados a outros tais como 'tio' e 'avô' e se fazem essenciais nessas referências, pois, a partir deles analisa-se a descendência do nodo efetuando sua retirada (poda) da estrutura. A árvore proposta não atua diretamente executando uma 'poda', nesse caso o nodo não chega a ser representado. Ao utilizar a identificação 'inserido' verifica-se se o nodo já está representado, em caso positivo, o processo segue para o nodo seguinte. Com isso deixa de haver componentes duplicados dentro de um caminho, reduzindo o número de análises ao utilizar a estrutura. Para o caso da Figura 4.4 (b), a fonte (G1) deixaria de ser inserida na posição de filho do disjuntor (DJ1). Na Figura (c) é apresentada a árvore de conexões referente ao caminho que supre a demanda de energia do ponto TR2 partindo de G1. Nessa representação estão destacados os nodos que possivelmente seriam repetidos na estrutura, o que não ocorre devido a verificação da variável 'inserido' utilizado na proposta.

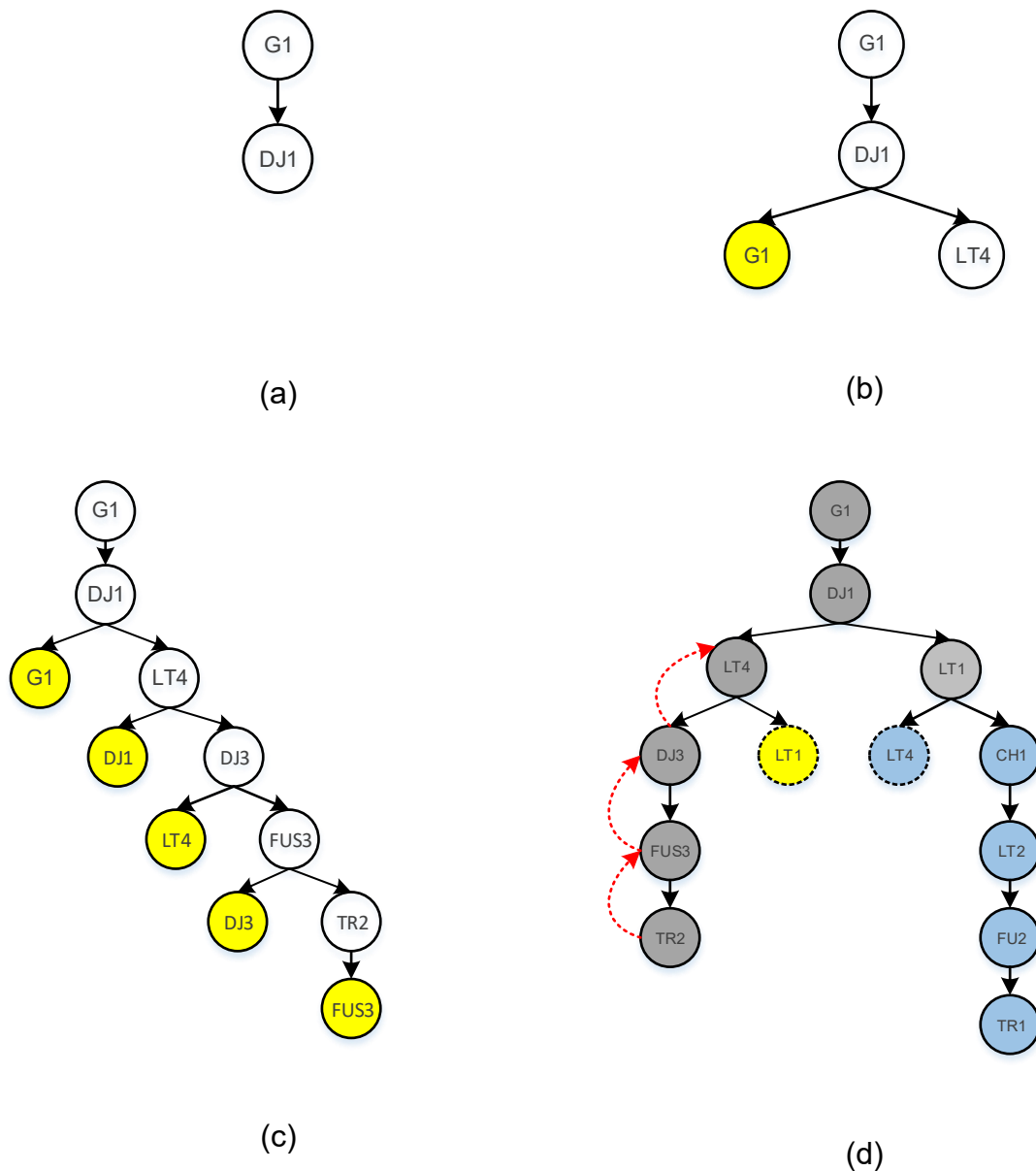


Figura 4.4-Construção da Árvore de Conexões

Um caso particular de construção trata-se de um cenário tomado por bifurcação, onde é permitido a inserção do elemento duas vezes. Um exemplo de bifurcação pode ser identificado no exemplo da Figura 4.1, pelo trecho composto por DJ1, B2, LT4 e LT1. Nesse cenário, um único elemento está presente em duas listas auxiliares distintas, atuando como filho de dois componentes. Em casos em que há bifurcação, a variável de identificação é restaurada a seu estado inicial, assim o elemento volta a ser analisado, tornando possível a reinserção dele. Para que isso, a cada nível da árvore

se finaliza, a variável de identificação, 'inserido', deve ser retornada ao seu estado inicial. A Figura 4.4 (d) ilustra essa situação, o primeiro passo construtivo da árvore é destacado em cinza, onde há a determinação de todos os filhos dando início partindo da fonte G1 e finalizando no ponto de carga, percorrendo a lista auxiliar de todos os elementos para a determinação de cada nível. Ao terminar esse passo, as funções recursivas atuam 'subindo' a estrutura, como mostram as setas em vermelho. Ao subir a estrutura, cada nodo anteriormente identificado por 'inserido', tem seu estado de inserção restaurando, para que possam ser inseridos em situações em que haja um caminho alternativo entre fonte e carga. O nodo destacado em amarelo por sua vez, não é adicionado à estrutura por ter sido inserido em passos anteriores. A segunda parte da construção destacada em azul, contém um nodo já presente no braço esquerdo da árvore. Possibilidade que ocorre devido a presença da bifurcação no SD.

Uma das vantagens em se utilizar a árvore de conexões NF está associada o fato das fontes do SD serem adotadas como raízes do diagrama. Isso faz com que o processo construtivo seja mais simples que o apresentado em [N05]. Ao iniciar a árvore por meio do elemento fonte, reduz-se o número de caminhos normalmente fechados, reduzindo conseqüentemente o número de representações possíveis. Situação essa que não ocorre quando ao iniciar a representação dos pontos de carga. Uma vez que, um sistema possui apenas uma fonte (quando decomposto) percorrendo um caminho até o ponto, ao passo que possui diversos pontos conectados à mesma fonte.

4.4 Construção da Árvore Normalmente Aberta (NA)

Em um sistema decomposto, cada fonte de alimentação identificada compõe um subsistema que é executado e avaliado pelo algoritmo proposto. Dessa forma, cada parcela simulada é composta de uma árvore construída por elementos que partem da fonte até os pontos de carga, constituindo os caminhos fechados, ou árvore de conexões NF. Ao decompor o sistema original, cada parcela decomposta recebe em

sua construção uma chave NA e uma fonte NA. Estes componentes representam a ligação entre os ramais e a potência do ramal que é representado pela fonte. A árvore NA é então construída a partir da fonte inserida durante a decomposição. Sua construção deve ser feita separadamente, pois um único subsistema pode estar conectado a vários outros por meio da chave NA. Isso inclui ao modelo diversas fontes NA, permitindo concluir que o número de árvores a ser construindo dependa dos possíveis chaveamentos do sistema.

Utilizando a mesma estrutura em árvore NF proposta no item 4.3.1, são construídas árvores de conexões do tipo NA. Sendo que estas se diferem pela presença de dispositivos NA, por meio delas são analisados os caminhos alternativos para o suprimento das cargas, sendo possível dessa forma restaurar a energia nos pontos afetados pela falha. Para o SD exemplo, Figura , identifica-se a presença de uma chave NA que conecta o ramal 1 a uma Fonte NA, essa fonte por sua vez representa o equivalente em potência de um outro ramal que faz ligação com o Ramal 1 (como visto em 2.4). Ressaltando, durante a simulação, há apenas uma fonte NF por Ramal decomposto, logo uma árvore para todos os pontos, enquanto as árvores NA dependem da quantidade de ramais interligados. Para este exemplo, tem-se G1 como fonte NF, e a nova fonte NA criada na decomposição. A Figura ilustra a árvore NA para o exemplo apresentado.

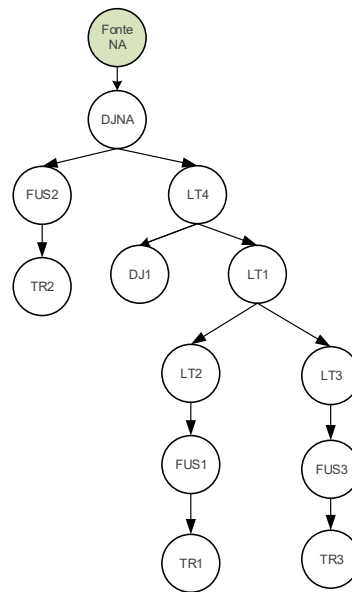


Figura 4.5 -Árvore NA

4.5 Análise da Falta

A metodologia da decomposição de sistemas descrita no 0, atua como suporte a SMCS proposta nesta dissertação, reduzindo o tamanho do SD avaliado. De posse da estrutura utilizada para construção das árvores de conexões (NF e NA), torna-se possível identificar de maneira mais rápida os circuitos que compõem os subsistemas da decomposição, sendo eles identificados por um caminho NF entre a fonte principal até os pontos consumidores. Após a decomposição do sistema original, a análise de faltas é aplicada para cada subsistema operando individualmente. Isso reduz o tempo de processamento necessário para computar a análise de desempenho total do sistema.

Em um SD, a ocorrência da falta provoca a atuação dos dispositivos de proteção e em seguida a abertura dos dispositivos de manobra, com o objetivo de isolar o defeito do restante do sistema, impedindo que este se propague. Considerando o sistema da

Figura 4.1, onde uma suposta falha ocorra na linha LT2. Esta provocaria a atuação imediata do disjuntor (DJ1) e em seguida a abertura da Chave (CH1). Essas ações isolariam completamente a linha defeituosa do restante dos equipamentos e consequentemente interromperia o fornecimento de energia até os pontos de carga TR1, TR2 e TR3. O diagrama em árvore, por conter a posição de cada nodo e suas respectivas conexões, possibilita a localização dos dispositivos de proteção e manobra sem a necessidade de percorrer todo o sistema. Assim ao identificar uma falha na linha de transmissão, localiza-se o nodo referente a ela dentro da estrutura NF, que representa o caminho do fluxo de cargas em condições normais de operação. A partir do nodo defeituoso, percorre-se a estrutura da árvore NF partindo do defeito em direção ao pai (subindo a estrutura), em busca do primeiro dispositivo de proteção capaz de isolar o componente com defeito, fazendo com que ele atue. A Figura 4.6 representa a atuação dos dispositivos responsáveis por isolar a falta em LT2 (vermelho), sendo eles a proteção (DJ1) e a chave manobra (CH1). Os nodos com destaque em amarelo são aqueles que se repetem, não sendo inseridos na estrutura.

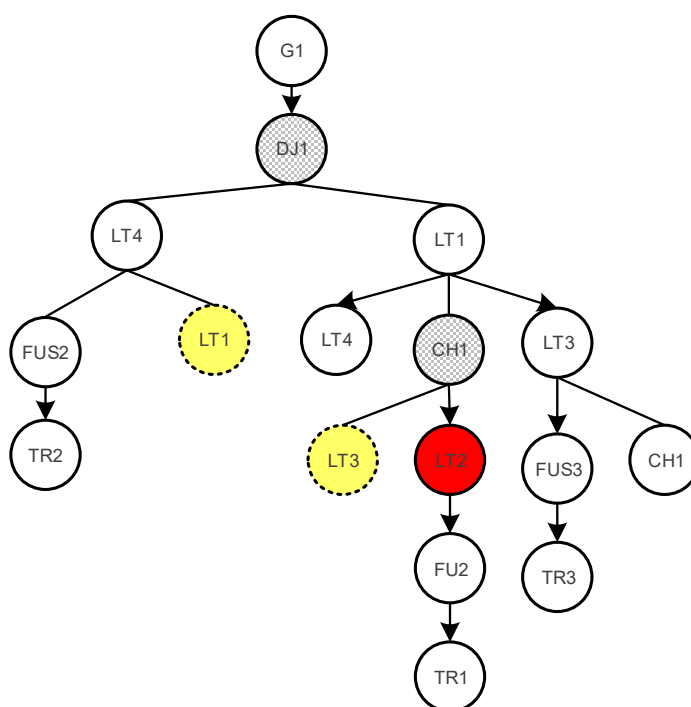


Figura 4.6- Identificação de Dispositivos de Proteção

Ao analisar o sistema da Figura 4.1, nota-se ainda a existência da chave normalmente aberta (DJA1), destacada no trecho do sistema representado na Figura 4.7. É possível reestabelecer a energia no ponto TR2 e TR3 pela atuação da chave DJA1 em destaque. Para isso, utiliza-se a estrutura da árvore NA que deve ser percorrida no sentido de suprir os pontos interrompidos (subindo). Para o exemplo, o fechamento da chave permite transferir a carga do Ramal para a Fonte NA, essa possibilidade só será existente caso o Ramal representado pela fonte seja capaz de suprir a demanda a ser transferida garantindo a restauração do ponto interrompido antes do reparo na linha LT2. Na situação proposta é observado a possibilidade de restauração de TR2 e TR3, dessa forma o tempo em que os pontos ficam expostos a falha, é computado pelo tempo necessário para a chave NA seja fechada. O ponto TR1 por sua vez, assume o tempo de reestabelecimento igual ao tempo de reparo da linha, avaliando a estrutura NA da Figura 4.5 fica evidente a impossibilidade em percorrer a árvore partindo do ponto TR1 até a fonte NA sem incluir a falha. Como o tempo de chaveamento é em geral menor que o tempo de reparo de um componente, a existência da chave de uma forma geral, provoca redução no tempo de interrupção de energia. Analisando o efeito da falha na confiabilidade de cada ponto consumidor, para o exemplo, são computados os seguintes aspectos:

- 1 falta contabilizada para cada ponto TR1, TR2 e TR3 (FIC);
- Tempo de reparo para restaurar o ponto TR1 (DIC);
- Tempo de chaveamento para restaurar os pontos TR2 e TR3 (DIC).

O efeito positivo do chaveamento na confiabilidade pode ser observado no índice DIC, que representa a duração das falhas nos pontos consumidores, podendo haver uma redução expressiva no tempo computado.

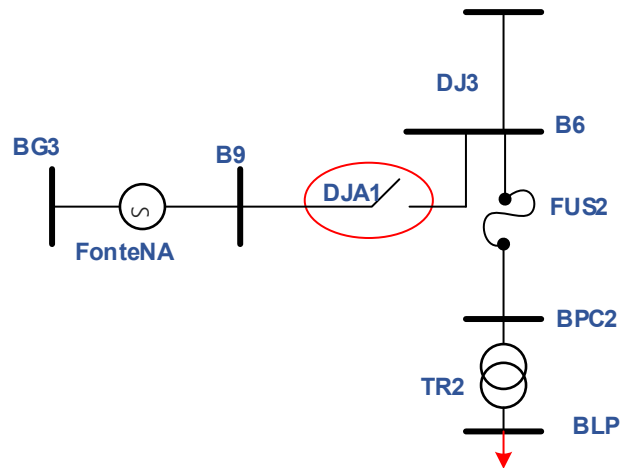


Figura 4.7-Trecho do SD: Destaque da Chave NA

4.5.1 Análise da Falha com GD

A Figura 4.8 é referente ao sistema IEEE-RBTS Bus 2 modificado. A representação mostra o estado operacional do sistema após passar pelo processo de decomposição e abordando a inserção de fontes de características renováveis ao longo dos ramais que o compõe. Cada alimentador desse sistema incorpora em sua estrutura, um componente referente a parcela GD esse componente representa um agrupamento de unidades de geração inseridas no ramal.

O incentivo ao uso de GD pelo consumidor é representado via acordo entre as concessionárias e os órgãos regulamentadores, onde são definidas as condições de operação dessas fontes. Na operação de SD composto de GD, deve ser considerada a potência agregada pela fonte distribuída durante a análise de desempenho. Para essa análise utiliza-se a ferramenta em árvore, onde é representada a posição das fontes renováveis dentro do SD. Na análise proposta neste estudo, não são consideradas falhas na GD inserida, contudo por se tratar de fontes de potência intermitente, a cada falha do sistema o valor disponível desse componente deve ser

recalculado. Assim, ao identificar a falha de um componente os seguintes passos devem ser executados:

- (i) Procurar o componente do tipo manobra ou proteção mais próximo do componente falhado, auxiliado pela árvore NF (Figura), e fazer com que esse atue;
- (ii) Abrir os dispositivos de manobra, isolando completamente o defeito do restante do sistema;
- (iii) Percorrer a árvore partindo da fonte principal (NF) e verificar quais pontos são mantidos energizados, ou seja, não sofrem corte de carga;
- (iv) Percorrer a árvore NA verificando possíveis reestabelecimentos de energia nos pontos em corte, pelo chaveamento NA. Transferindo a carga não suprida entre os ramais conectados pela chave. Nesse ponto a fonte renovável (GD) atua agregando potência ao sistema. Ao verificar a potência a ser transferida do ramal em falha para o ramal interligado, atenta-se a presença de fontes extras, no caso em abordagem às GDs. Caso existam fontes auxiliares analisam-se os critérios:
 - a. Instante em que houve a ocorrência da falha. Ao identificar o instante da falha, este projetado na curva horária equivalente aos níveis de potência GD, obtendo assim a geração referente quando houve o defeito, sendo está a geração à qual será utilizada no sistema;
 - b. Verificar a potência gerada pela fonte (percentual) no momento de ocorrência da falta (a);
 - c. A potência referente a GD é então agregada (negativamente) à carga a ser transferida ao alimentador, reduzindo o total a ser suprido pelo ramal receptor, impactando positivamente a confiabilidade.

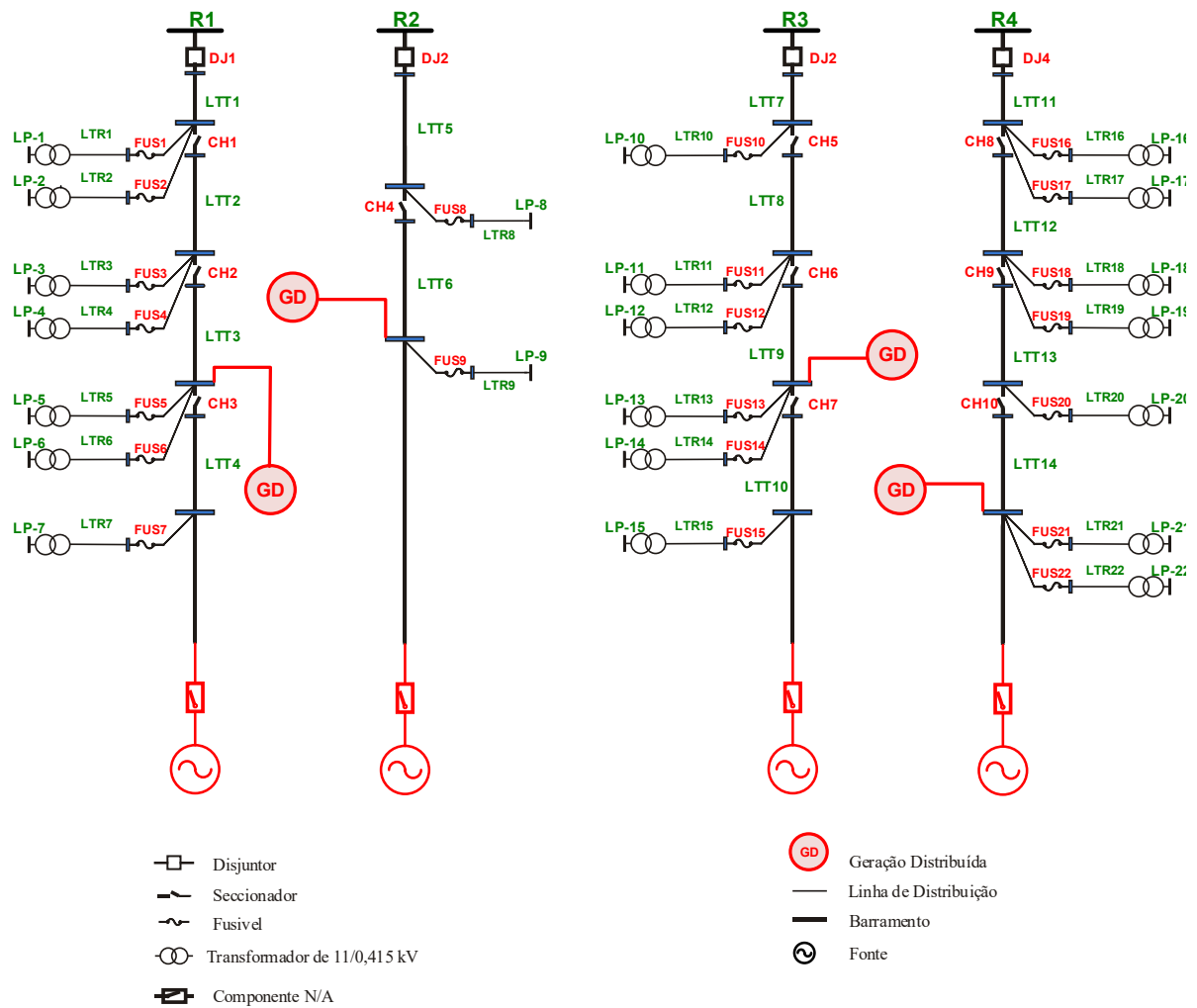


Figura 4.8- Sistema IEEE RBTS Bus 2 Modificado: Decomposto e com GD

4.6 Fluxograma da Ferramenta

A ferramenta elaborada pode resumidamente ser estruturada em fases que descrevem o processo como um todo. Cada etapa contém as ações já apresentadas, que são tomadas ao longo do processo. Estas são inteiradas de sub-rotinas a serem executadas para que a ação se complete. Algumas etapas podem ser consideradas estáticas, ou seja, são executadas apenas uma vez durante toda a simulação. Assim,

são definidas a seguir as fases principais do algoritmo ilustradas pelo fluxograma da Figura 4.9:

- Etapa A (cinza): Composta das ações que definem:
 - a. Entrada dos dados do sistema;
 - b. Decomposição do sistema;
 - c. Fluxo de potência;
- Etapa B (amarelo): Representação do sistema pelo método adotado;
 - a. Construção da Árvore NF;
 - b. Construção da Árvore NA.
- Fase C (azul): Execução do método estatístico:
 - a. SMCS: Destacando na representação as sub-rotinas que definem de maneira geral o decorrer do processo.

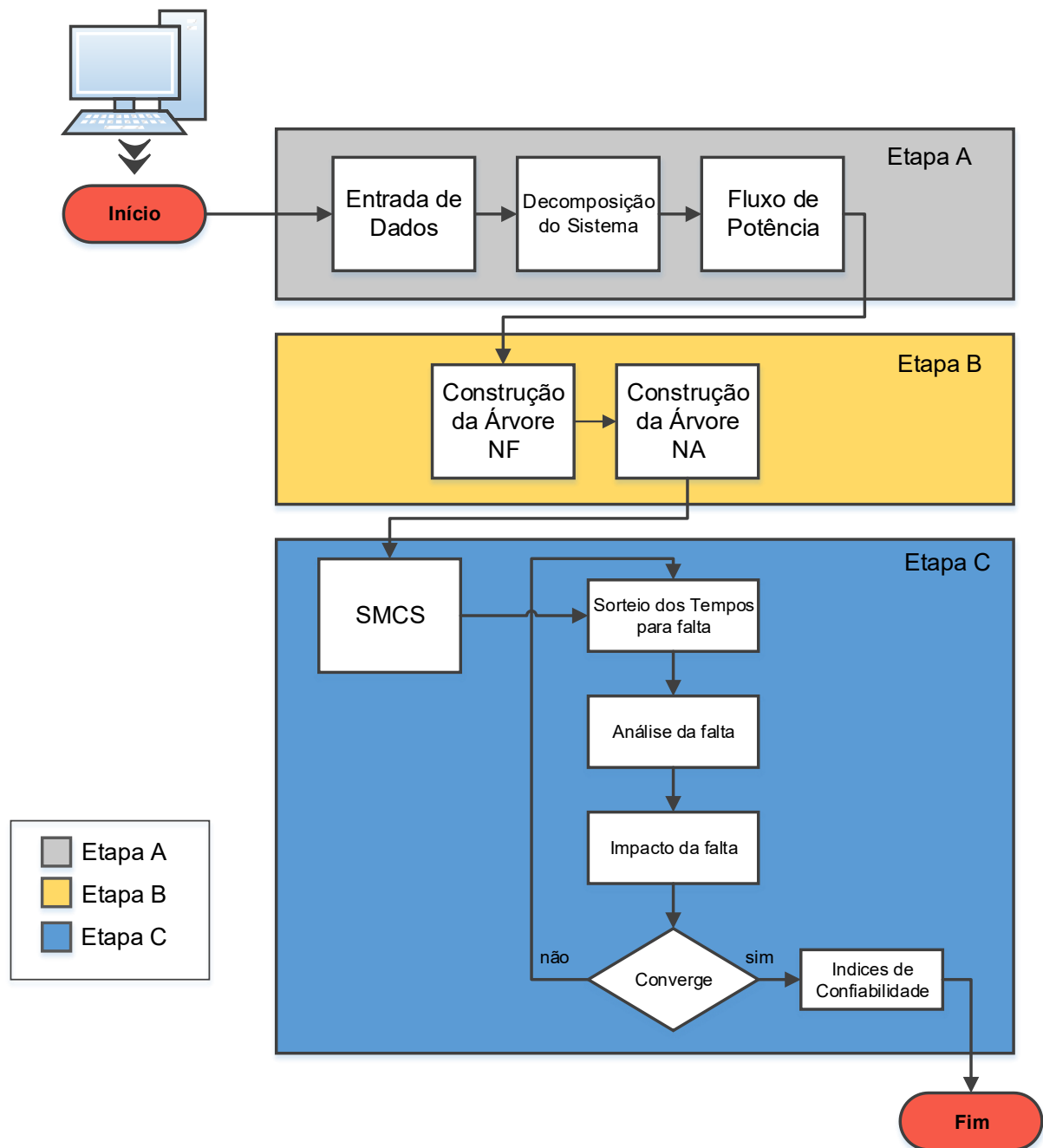


Figura 4.9- Fluxograma do Algoritmo Proposto

4.7 Considerações do Capítulo

Esse capítulo se objetiva em apresentar a ferramenta proposta e como esta atua durante a análise de confiabilidade de um SD. As teorias, métodos e modelos descritos nos capítulos anteriores são aplicados no desenvolvimento da ferramenta, garantindo a representação dos impactos de cada componente no SD. Neste capítulo é apresentado ainda, um fluxograma resumido do algoritmo proposto, para simplificar o entendimento do leitor quanto as rotinas executadas pelo programa aplicado no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 5

Resultados

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados coletados ao aplicar a ferramenta desenvolvida no presente estudo. No intuito de avaliar o desempenho da ferramenta e os impactos provocados pela inserção GD em um SD, aplicam-se rotinas testes no sistema apresentado no Capítulo 2, representada novamente a seguir. Os efeitos provocados pela agregação da GD são avaliados mediante a comparação dos índices de confiabilidade computados em condições de falta, antes e depois da utilização da fonte renovável. O valor atribuído para a convergência do programa (β) é de 1% avaliado sobre o índice de duração da falha (DIC). Os resultados apresentados nesse módulo foram simulados em um uma máquina com as seguintes configurações: Intel® Core™ i5-3337U CPU @1.8GHz, 6GB de RAM instalada.

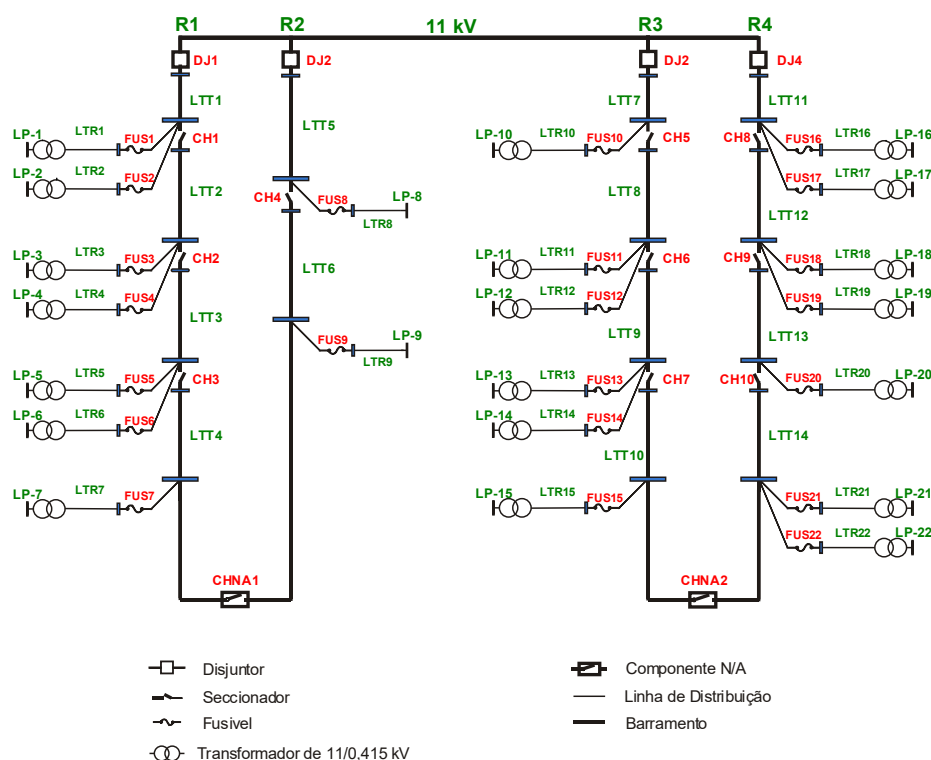


Figura 2.8- Sistema IEEE- RBTS Bus 2

5.1 Sistema IEEE RBTS Bus 2

A aplicação da ferramenta demanda o uso de um SD. Inicialmente nesta proposta utiliza-se o sistema IEEE RBTS Bus 2. Para que sejam avaliados os resultados referentes ao comportamento do sistema fez-se necessário avaliar as condições a seguir apresentadas:

a) Sistema em condições normais de operação:

Em condições normais de operação o SD não possui GD inserida em sua topologia. Esse cenário, considerado Caso Referência, serve para validação da ferramenta desenvolvida. Isso foi feito comparando os resultados obtidos para os índices de confiabilidade, com os resultados apresentados em estudos precedentes como em [N09], uma das referências principais dessa proposta de estudo, verificando assim o desvio (ou erro) máximo aceitável entre eles. Enfatiza-se, contudo, que em [N09], a análise dos cortes de carga apurados não abrange possíveis cortes de ordem superior como feito neste estudo. Além disso, existem diferenças quanto a SMC utilizada, tanto no aspecto construtivo da ferramenta (programação), tanto no número de análises efetuadas pelas funções envolvidas na construção do algoritmo, o que afeta levemente o valor final convergido.

Na Tabela 5.1 a seguir apresenta cada ponto de carga do SD e seus respectivos índices de confiabilidade. Os dados fornecidos pelo programa proposto estão expostos juntamente com os índices originais do sistema IEEE-RBTS encontrados na literatura. Para fins comparativos e validação da ferramenta, apresenta-se o desvio percentual referente a comparação dos dados fornecidos pela simulação atual e os do IEEE. Nesse contexto, considera-se o Caso Base sendo aquele resultante da aplicação do programa proposto sem a adição de GD. Em sequência, na Tabela 5.2, são apresentados os valores referentes as multas a serem pagas pela concessionária dada a indisponibilidade do serviço efetuado ao final do tempo de análise, onde aplica-

se a Equação 5.1. Para a simulação desse caso, o sistema original validado na Tabela 5.1 sofre alteração no valor da resistência das linhas de transmissão. Essa alteração visa provocar maiores impactos na confiabilidade durante os passos posteriores (restrição dos cabos e inserção de fontes. Para esse sistema a convergência foi determinada em 1% sobre o valor do índice DIC (devido a convergência ocorrer depois do índice FIC). O tempo necessário para executar a simulação do caso é cerca de 30 segundos.

$$\text{Multa} = \left(\frac{\text{Índice}_c}{\text{Índice}_p} - 1 \right) \text{Índice}_p(\text{Tar})(kei) \quad (5.1)$$

Onde:

Índice_c : Índice calculado pelo programa. Seja ele FIC, DIC ou outro;

Índice_p : Valor padrão estabelecido pela ANEEL;

Tar: Tarifa média adotada. Considerou-se para a avaliação das multas uma tarifa de 0,20US\$/kWh segundo [SNR12]. Segundo o Módulo 8, da legislação vigente [ANE12], o cálculo da tarifa média adotada, em reais, pode ser feito partido da

$$\text{Tar}_{R\$} = \left(\frac{EUSD_{med}}{730} \right) (\text{consumo médio}) \quad (5.2)$$

$EUSD_{med}$: média aritmética do encargo de uso do sistema de distribuição associado ao ponto de conexão, verificado no período considerado, expresso em moeda corrente [ANE12];

Como exemplo, utilizando uma conta de energia de um consumidor, cujos dados de consumo são listados a seguir:

Consumo [KWh]: 71

Média [KWh/dia]: 2,37

Dias de Faturamento: 30

Preço [KWh]: 0,936

$$Tar_{R\$} = \left(\frac{0,936 \frac{R\$}{kWh}}{730h} \right) (71kWh) \cong 0,1 \frac{R\$}{h}$$

Kei: Coeficiente de Majoração definido pela agência reguladora, atualmente 15 [Aneel];

Tabela 5.1- Precisão dos índices de Confiabilidade

Pontos de Carga	FIC [falhas/ano]	FIC IEEE [falhas/ano]	Desvio [%]	DIC [horas/ano]	DIC IEEE [horas/ano]	Desvio [%]
TR01	0,2403	0,2400	0,13	3,5242	3,5800	-1,56
TR02	0,2537	0,2530	0,27	3,6125	3,6400	-0,76
TR03	0,2541	0,2530	0,43	3,6204	3,6400	-0,54
TR04	0,2411	0,2400	0,47	3,5844	3,5800	0,12
TR05	0,2538	0,2530	0,33	3,6311	3,6400	-0,24
TR06	0,2508	0,2500	0,32	3,5703	3,6300	-1,64
TR07	0,2538	0,2530	0,31	3,5514	3,6000	-1,35
TR08	0,1413	0,1400	0,92	0,5392	0,5400	-0,16
TR09	0,1410	0,1400	0,68	0,4939	0,5000	-1,23
TR10	0,2433	0,2430	0,13	3,5067	3,5800	-2,05
TR11	0,2534	0,2530	0,15	3,6560	3,6400	0,44
TR12	0,2567	0,2560	0,28	3,6779	3,6600	0,49
TR13	0,2532	0,2530	0,09	3,5935	3,5900	0,10
TR14	0,2561	0,2560	0,05	3,6196	3,6100	0,27
TR15	0,2435	0,2430	0,22	3,6117	3,5800	0,89
TR16	0,2524	0,2530	-0,24	3,5793	3,6400	-1,67
TR17	0,2430	0,2430	0,02	3,6226	3,5900	0,91
TR18	0,2428	0,2430	-0,09	3,5615	3,5800	-0,52
TR19	0,2558	0,2560	-0,08	3,5911	3,6500	-1,61
TR20	0,2554	0,2560	-0,25	3,6376	3,6500	-0,34
TR21	0,2525	0,2530	-0,19	3,5033	3,5900	-2,42
TR22	0,2556	0,2560	-0,14	3,5572	3,6100	-1,46

Tabela 5.2 - Multas Referentes aos índices do Caso Base

Pontos de Carga	FIC [falhas/ano]	DIC [horas/ano]	Multas [US\$/ano]	
			FIC	DIC
TR01	0,2403	3,5242	258,57	4865,64
TR02	0,2537	3,6125	286,84	4938,32
TR03	0,2541	3,6204	286,19	4951,58
TR04	0,2411	3,5844	274,22	5247,56
TR05	0,2538	3,6311	300,80	5259,42
TR06	0,2508	3,5703	236,49	4147,46
TR07	0,2538	3,5514	241,26	4142,86
TR08	0,1413	0,5392	169,92	485,07
TR09	0,1410	0,4939	197,75	496,63
TR10	0,2433	3,5067	262,01	4831,47
TR11	0,2534	3,6560	282,56	5010,11
TR12	0,2567	3,6779	244,84	4228,26
TR13	0,2532	3,5935	300,84	5250,06
TR14	0,2561	3,6196	306,22	5276,95
TR15	0,2435	3,6117	222,49	4244,67
TR16	0,2524	3,5793	238,52	4149,86
TR17	0,2430	3,6226	218,43	4211,28
TR18	0,2428	3,5615	218,64	4140,67
TR19	0,2558	3,5911	241,43	4123,70
TR20	0,2554	3,6376	304,38	5271,31
TR21	0,2525	3,5033	295,64	5099,72
TR22	0,2556	3,5572	243,63	4150,54
Total de Multas			5631,67	94523,13

b) Restrições do alimentador:

Como dito, um sistema em condições normais de operação, deve por norma ser capaz de atender à demanda de carga conectada a ele à níveis de qualidade e continuidade pré-determinados pelo órgão regulamentador. Isso é avaliado pelos índices de desempenho do sistema. No intuito de analisar as possíveis melhorias advindas da agregação de uma geração adicional inserida

em um SD, é necessário, portanto, submetê-lo à um cenário de falta. Assim, o sistema do **Caso Base** fica sujeito a situações de contingência.

Para que isso seja feito, cada ramal do sistema decomposto passou por uma análise minuciosa da capacidade de condução de carga visando encontrar o ponto de restrição operacional. Assim, os ramais foram submetidos a uma restrição em sua capacidade de condução máxima, o que resultou, como esperado, na limitação do FPT do sistema. Dessa forma, o montante de potência disponível para uso do consumidor é reduzido ao se comparar com o **Caso Base**.

O cenário em que existe a restrição na capacidade de transferência de potência existente entre os alimentadores, é tratado por **Caso Restrito** e se refere assim, a um procedimento executado manualmente e agregado ao estudo. Nesse ponto da análise, os valores referentes a capacidade máxima de condução de cada ramal (um a um) foram submetidos a uma redução e a confiabilidade simulada sequencialmente. O valor determinado para simular a restrição foi definido no instante em que a análise da confiabilidade passou a fornecer valores que excediam consideravelmente os valores do **Caso Referencial**. Como o sistema apresenta Ramais onde há maior demanda que outros, o limite de corrente foi definido em valores distintos, sendo eles:

- 15% da capacidade de corrente para o Ramal 1;
- 8% da capacidade de corrente para o Ramal 2;
- 12% da capacidade de corrente para o Ramal 3;
- 11% da capacidade de corrente para o Ramal 4.

Ressalta-se que ao aplicar as restrições de transferência de carga nos alimentadores, juntamente com o aumento da resistência das linhas de transmissão, o FPT que é responsável por fornecer a potência disponível na chave NA que interliga ramais distintos de um sistema, possibilitando avaliar

possíveis transferências de cargas entre alimentadores é impactado, consequentemente alterando a confiabilidade. Dessa forma, ao simular o fluxo do RAMAL 1, com as devidas restrições, analisa-se a confiabilidade afetada no RAMAL 2. O que pode ser realizado para os ramais 3 e 4.

c) Inserção da GD:

Após submetido à condição citada em (b), o sistema se encontra em defasagem no suprimento de carga. Nessas condições, a demanda por potência é maior que a capacidade de suprimento, e mesmo que haja possíveis condições de chaveamento, os ramais são incapazes de atender a demanda de outro ramal. Dessa forma, as fontes distribuídas ou GD são inseridas em posições esquemáticas, de forma a agregar potência ao sistema, melhorando o equilíbrio entre demanda e suprimento. A GD do tipo solar comporta-se como uma carga negativa, reduzindo substancialmente a demanda do sistema, dessa forma observa-se a melhora na confiabilidade quando comparado ao Caso Referencial.

A Tabela 5.3 apresenta o impacto da GD nos Alimentadores 1 e 2, que recebem destaque. Os alimentadores 3 e 4, para esse caso só sofrem mudanças quando se executa a restrição dos alimentadores. Ao inserir a GD, estas influenciam apenas em 1 e 2. Para que a confiabilidade de 3 e 4 seja beneficiada é necessário assim a alocação de unidades distribuídas nesses trechos. O processo é o mesmo exercido em 1 e 2, onde foram testadas posições diversas para a GD e alguns níveis de potência.

Tabela 5.3- Inserção de Fontes Distribuídas

				Potência total em GD [kW]			
Ramal	Pontos	Caso Base	Caso restrito	500	600	700	800
01	TR01	4865.64	4865.64	4865.64	4865.64	4865.64	4865.64
	TR02	4938.32	4938.32	4938.32	4938.32	4938.32	4938.32
	TR03	4951.58	5093.27	5082.65	5077.14	5071.14	5065.91
	TR04	5247.56	5396.06	5385.01	5379.19	5372.89	5367.40
	TR05	5259.42	5535.47	5485.10	5471.59	5458.56	5446.85
	TR06	4147.46	4369.20	4328.85	4318.13	4307.77	4298.46
	TR07	4142.86	4339.10	4245.89	4238.79	4233.53	4229.45
02	TR08	485.07	485.07	485.07	485.07	485.07	485.07
	TR09	496.63	636.73	581.87	574.15	568.88	565.67
	Total em Multas	34534.54	35658.86	35398.41	35348.02	35301.80	35262.76

A Figura 5.1 ilustra uma das posições testadas neste estudo para posicionar as fontes distribuídas agregadas ao SD. Ao avaliar tanto a posição das fontes quanto critérios como restrição dos alimentadores, é possível notar que há melhoria nos índices e consequentemente redução na multa até certo valor de potência inserida. A partir disso há saturação das linhas do SD e apesar do aumento da potência da GD, não há melhora na confiabilidade, pois há restrições físicas do sistema, como baixos limites da capacidade de transmissão de corrente definidos para os alimentadores. Como apresentado, foram testados valores de potências entre 500kW e 800kW, representados na Tabela 5.3.

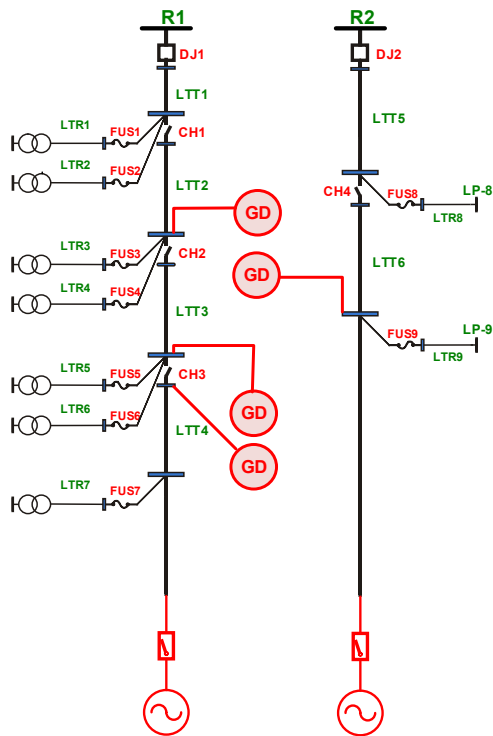


Figura 5.1 -Posição das Fontes Distribuídas

Tabela 5.4- Análise da Variação percentual Ponto a Ponto Análise

Potência total em GD [kW]									
Ramal	Pontos	5000	%	6000	%	7000	%	8000	%
01	TR01	4865.64	0.00	4865.64	0.00	4865.64	0.00	4865.64	0.00
	TR02	4938.32	0.00	4938.32	0.00	4938.32	0.00	4938.32	0.00
	TR03	5082.65	-0.21	5077.14	-0.32	5071.14	-0.43	5065.91	-0.54
	TR04	5385.01	-0.20	5379.19	-0.31	5372.89	-0.43	5367.40	-0.53
	TR05	5485.10	-0.91	5471.59	-1.15	5458.56	-1.39	5446.85	-1.60
	TR06	4328.85	-0.92	4318.13	-1.17	4307.77	-1.41	4298.46	-1.62
	TR07	4245.89	-2.15	4238.79	-2.31	4233.53	-2.43	4229.45	-2.53
02	TR08	485.07	0.00	485.07	0.00	485.07	0.00	485.07	0.00
	TR09	581.87	-8.62	574.15	-9.83	568.88	-10.66	565.67	-11.16

Acima, Tabela 5.4, são avaliados os impactos de cada ponto dos Alimentadores 1 e 2, destacando aqueles que representam melhorias significativas perante a inserção da fonte. Para isso admite-se que em torno de 2 a 3% pode ser considerado impacto positivo, pois não é mais considerada variação devido a convergência do programa. A simulação valores superiores a 2000kW por fonte, conduz ao efeito de saturação das linhas. Esse fator é decorrente dos baixos limites de capacidade de transmissão definidos para os alimentadores. Destaca-se ainda que os valores de multas apresentados na Tabela 5.1 se referem à duração da indisponibilidade do serviço prestado, ou seja, do índice DIC.

5.2 Considerações

O presente capítulo é composto da aplicação da ferramenta em um sistema teste (IEEE RBTS bus 2). A aplicação do método mostra a flexibilidade da ferramenta em receber alterações nos dados a serem simulados. Os resultados analisados exibem a precisão da ferramenta para executar o cálculo da confiabilidade em SD, tornando-a viável tanto em questão de exatidão quanto em desempenho computacional.

CAPÍTULO 6

Conclusões

6.1 Contribuições do Estudo

Por se tratar de um cenário em constante evolução onde a demanda por energia elétrica cresce de forma não proporcional à capacidade de suprimento do sistema, é fundamental que sejam mantidos estudos contínuos visando agregar novas ferramentas que auxiliem no estudo e avaliação do sistema. Espera-se que estas sejam cada vez mais precisas quanto ao critério de avaliação sendo importantes para análise de confiabilidade de SD e com isso auxiliar as diversas áreas como planejamento e operação do sistema. O presente estudo cumpre dessa forma com a proposta de fornecer uma ferramenta capaz de avaliar a confiabilidade de um SD de forma precisa e em tempo hábil de simulação.

Ainda, trazendo como valor agregado, a metodologia além de cumprir seu papel quanto a avaliação da confiabilidade, foi capaz de modelar a intermitência dos recursos distribuídos agregados ao sistema e avaliar os impactos causados nos índices de desempenho mediante a inserção deles. O alcance desses objetivos só foi possível devido as condições tecnológicas proporcionadas atualmente que envolvem melhores recursos computacionais e o fácil acesso a eles. E em razão de uma implementação adequada de um algoritmo que envolveu em sua construção técnicas de programação e representação capazes de beneficiar durante a execução dele.

Essa dissertação contou com recursos adicionais em favor da redução do tempo de simulação, sendo um deles a POO, cuja contribuição levou a uma execução mais rápida da ferramenta, e ainda possibilitou ao desenvolvimento de um código reciclável.

Com isso quer-se dizer que é possível utilizar as partes principais ou até mesmo todo o programa para uma outra finalidade, adicionando apenas funções específicas a ele. Contribuindo ainda para o melhor desempenho computacional, a escolha do MSP se fez de grande importância, pois é possível utilizar a representação em árvore adotada, além de calcular o fluxo por meio de estimativas, não sendo necessária uma execução em loop até a convergência do processo.

Durante o desenvolvimento desse estudo e após avaliar o impacto da GD no SD concluiu-se que a posição das fontes, assim como os níveis de potência são fatores que influenciam diretamente na melhoria da confiabilidade. Sendo assim, nem todas as posições do SD estão preparadas para receber recursos adicionais, pois essa imersão de fontes ocasionaria na inversão de fluxo que não é possível dada as limitações físicas do sistema.

A presente dissertação foi desenvolvida aplicando a ferramenta em um sistema teste, contudo, por apresentar bons parâmetros de desempenho computacional, pode ter sua aplicação estendida para avaliação de sistemas reais e de grande porte. A flexibilidade da ferramenta permite ainda explorar as diversas possibilidades, conseguindo lugar de importância tanto para estudos da avaliação da confiabilidade, quanto para Planejamento e expansão de Sistemas de Potência.

6.2 Propostas Futuras

Para agregar valores ao trabalho e dar continuidade ao mesmo, sugere-se como trabalhos futuros:

- Aplicação da ferramenta em um sistema real;

- Introdução de um módulo capaz de identificar a melhor posição da GD, tal como o nível de potência ideal (dentro dos valores permitidos) nos trechos do SD. Visando assim atingir o valor máximo de melhoria na confiabilidade;
- Assim como as multas impostas, existem bonificação pelo bom desempenho do sistema. Assim, explorar o módulo bonificações, utilizando os benefícios ofertados pelas concessionárias àqueles que fornecem índices dentro dos valores estipulados;
- Acrescentar o cálculo de outros índices de confiabilidade presentes na legislação.

REFERÊNCIAS

[A07] W. S., Andrade. "Avaliação da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição e Sub-transmissão Considerando Geração Distribuída." *Tese de Doutorado, UFRJ*, Outubro de 2007.

[AAS01] T., Ackermann; G., Andersson, e L., Söder, "Distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp. 195–204, Abril 2001.

[ABB94] R. N., Allan; R., Billinton; A. M., Breipohl e C. H., Grigg, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1987-1991," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 41-49, 1994 Fevereiro.

[ABB99] R. N., Allan; R., Billinton; A. M., Breipohl e C. H Grigg, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1992-1996," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 51-57, Fevereiro 1999.

[ABGD] Distribuída, Associação Brasileira de Geração. ABDG. s.d.
<https://www.geracaodistribuida.org/>.

[ABRADEE] ABRADDEE. *Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica*. s.d.
<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/>.

[ABL82] R. N., Allan; R., Billinton e S. H., Lee, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1977-1982

[ABL84] R. N. Allan; R., Billinton e S. H., Lee, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1977-1982," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 2, pp. 275 - 282, Fevereiro 1984.

[ABS91] R. N., Allan; R., Billinton; I., Sjarief; L., Goel e K., So, "A Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Distribution System Data and Results," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 813 - 820, Maio 1991

- [ABS98] R. N., Allan; R., Billinton; S. M., Shahidehpour e C., Singh, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1982-1987," *EEE Trans. on Power Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 1555-1564, Novembro 1998.
- [ADH79] R.N., Allan; E. N., Dialynas e I. R., Homer, "Modelling and Evaluating the Reliability of Distribution Systems." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Novembro de 1979: 2181 - 2189.
- [AM97] S., Asgarpour; e M.J., Mathine, "Reliability Evaluation of Distribution System with Non-Exponential Down Time." *IEEE Transactions on Power Systems*, Maio de 1997: 579 - 584.
- [ANE04] ANEEL. "Decreto 5163." 2004.
- [ANE12] ANEEL. "Resolução Normativa Nº 482." 2012.
- [ANE15] ANEEL. "Resolução Normativa Nº. 687." 2015.
- [ANE96] ANEEL, "Decreto Nº 2003." 1996.
- [AS95] R. N., Allan e M. G., Da Silva, "Evaluation of Reliability Indices and Outage Costs in Distribution Systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 413-419, Fevereiro 1995.
- [BA92] R., Billinton e R.N., Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems*, 2nd ed.: New York: Plenum, 1992.
- [BA94] R., Billinton e R. N., Allan. *Reliability Evaluation of Power System*. 2ª. Nova Iorque: Plenum Press, 1994.

[BCP02] R., Billinton; L., Cui e Z., Pan, "Quantitative reliability considerations in the determination of performance-based rates and customer service disruption payments." Novembro de 2002: 640 – 644.

[BF01] R. E., Brown e L. A. A., Freeman, "Analyzing the reliability impact of distributed generation." *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, Julho de 2001.

[BG96] R. E., Brown; S., Gupta; R. D., Christie; S. S., Venkata e R., Fletcher, "Distribution system reliability assessment using hierarchical Markov modeling." *IEEE Transactions on Power Delivery*, Outubro de 1996: 1929 - 1934.

[BH16] T., Bradford, e A., Hoskins, "Valuing Distributed Energy: Economic and Regulatory Challenges. Event Summary & Conclusions." Columbia University and Princeton University, 2016.

[BM00] P. P., Barker e Inc. R.W., Mello Power Technologies, "Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems," in *Power Technologies Society Summer Meeting*, Seattle, Julho 2000, pp. 486-493.

[BO02] R. E., Brown, "Electric Power Distribution Reliability", 2nd Edition, Marcel Dekker, New York, 2002.

[BS12] M., Bashir, e J., Sadeh, "Optimal Sizing of Hybrid Wind/Photovoltaic/Battery Considering the Uncertainty of Wind and Photovoltaic Power Using Monte Carlo." *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Maio de 2012.

[BW89] M. E., Baran, e F.F., Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing." *IEEE Transactions on Power Delivery* 4 (Abril 1989): 1401 - 1407.

- [C12] Cemig. *Memória da Eletricidade*. Abril de 2012. http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/historia_da_eletricidade_no_brasil.aspx].
- [C14] A.M., Cassula, “Reconfiguração De Sistemas De Distribuição Utilizando Metaheurísticas E Critérios De Confiabilidade.” Tese de Livre Docência, Unesp, 2014.
- [CC04] *Câmara de Comercialização de Energia Elétrica*. 2004. <https://www.ccee.org.br> (acesso em 2016).
- [CCEE] CCEE. “Reestruturação do Setor Elétrico.” *Camera de Comercialização de Energia Elétrica*. s.d. https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-somos/historia?_adf.ctrl-state=7lbrdrdmj_18&_afLoop=28583579024242#!
- [CK09] A. A., Chowdhury e D.O., Koval. *Power distribution system reliability practical methods and applications*. Wiley-IEEE Press, 2009.
- [CLSM03] A.M., Cassula, A.M., Leite da Silva, C. E., Sacramento e L.A.F., Manso, “Avaliação Integrada da Confiabilidade de Sistemas de Geração, Transmissão.” *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Outubro de 2003.
- [DM99] K. L. C., Dedini e M. A. R., Mojena, “Avaliação da Confiabilidade em Sistemas pelo Metodo da Matriz de Conexao.” *COBEM - Cong. Brasileiro de Engenharia Mecânica*, 1999.
- [DS06] S.S., Duttagupta e C. Singh, “A reliability assessment methodology for distribution systems with distributed generation.” *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Junho de 2006.
- [EHS06] W., El-Khattam; Y. Hegazy e M. Salama. “Investigating Distributed Generation Systems Performance Using Monte Carlo Simulation.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Maio de 2006: 524 - 532.

[ER]Service, US National Weather. s.d. <https://earth.nullschool.net/pt/>.

[F15] Framework convention of climate change, Adoption of the Paris Agreement, Paris, 2015

[FR05] M., Fotuhi-Firuzabad e A. Rajabi-Ghahnavie, "An Analytical Method to Consider DG Impacts on Distribution System Reliability." *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Agosto de 2005.

[G06] A.C.R., Guimaraes. "Confiabilidade de Sistemas de Distribuição: Calibração de Dados e Mecanismos para Avaliação de Desempenho." *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá*, Outubro de 2006.

[GB93] L., Goel e R., Billinton, "Utilization of interrupted energy assessment rates to evaluate reliability worth in electric power systems." *IEEE Transactions on Power Systems*, Agosto de 1993: 929 - 936.

[GMP64] D. P., Gaver; F. E. Montmeat e A. D. Patton, "Power System Reliability: I – Measures and Methods of Calculation." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Julho de 1964: 727 - 737.

[D05] H. M., Deitel e P., Deitel. "Como Programar C++". 5ª Edição, Pearson. 2005

[HA95] H., Helman e P.R.P., Andery, "Análise de falhas (Aplicação dos métodos de FMEA e FTA)." Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995.

[IE16] IEA: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, "Photovoltaic Power Systems Programme," Anual 2016.

- [ILR11] D., Issicaba, J. A., Peças Lopes e M.A., Rosa, "Distribution systems performance evaluation considering islanded operation." *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2011.
- [IN02] INEE, "Geração Distribuída e Conexão ao Sistema Elétrico," Instituto Nacional de Eficiência Energética, Proposta de Revisão de Resolução 2002
- [MH12] M. A., Muhaini e G.T., Heydt, "A Novel Method for Evaluating Future Power Distribution System Reliability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3018 - 3027, Dezembro 2012.
- [MPL93] A.C.G., Melo; M.V.F., Pereira e A.M., Leite da Silva. "A conditional probability approach to the calculation of frequency and duration indices in composite reliability evaluation." *IEEE Transactions on Power Systems*, Agosto de 1993: 1118 - 1125.
- [MPS93] A. G., Melo; M. V. F., Pereira e A. M., Leite da Silva, "A Conditional Probability Approach to the Calculation of Frequency and Duration Indices in Composite Reliability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, nº 3, pp. 1118 - 1125, Agosto 1993.
- [MSA06] C. Marantes; G., Strbac e R. Allan. "Sequential Monte Carlo Simulation Assessment of the Quality of Supply in Distribution Networks." *9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*. Stockholm, Sweden, 2006.
- [MLR09] M., Matos; J. P., Lopes; M., Rosa; R., Ferreira; A. M., Leite da Silva; W., Sales; L., Resende; L. A. F., Manso; P., Cabral; M., Ferreira; N., Martins, C. Artaiz, F. Soto e R. López. "Probabilistic evaluation of reserve requirements of generating systems with renewable power sources: The Portuguese and Spanish cases." *International Journal of Electrical and Energy Systems*, Vol.31, pp. 562-569, 2009.

- [N05] L.C., Nascimento. "Avaliação da Confiabilidade Utilizando Programação Orientada a Objeto: Aplicação em um Sistema Elétrico Interligado a uma Central de Cogeração." Dissertação de Mestrado, Unesp, 2005.
- [N06] A. C., Neto. "Análise da Confiabilidade em Redes de Distribuição Radiais: Reconfiguração e Alocação de Geração Distribuída." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Maranhão, 2006.
- [N09] L.C., Nascimento. "Avaliação da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição." *Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá*, Setembro 2009.
- [N17] R.L., Nascimento. "Energia Solar no Brasil: Situações e Perspectivas." Estudo Técnico, 2017.
- [NSL12] L.C., Nascimento, Leite da Silva A. M., Rosa M., e Lopes J.A.P. "Impacto Na Confiabilidade De Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica Sujeitos À Restrição De Carga E Integrados A Recursos Energéticos Distribuídos." *XIX Congresso Brasileiro de Automática*, Setembro de 2012.
- [NSR06] A. C., Neto, M. G. da Silva, e A. B. Rodrigues. "Impact of Distributed Generation on Reliability Evaluation of Radial Distribution Systems Under Network Constraints." *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*. Stockholm, Sweden, 2006.
- [OG99] Y., Ou, e L. Goel. "Using Monte Carlo Simulation for Overall Distribution System Reliability Worth Assessment." *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Setembro de 1999: 535 - 540.
- [OPH06] L.F., Ochoa, Padilha-Feltrin A., e Harrison G.P. "Evaluating distributed generation impacts with a multiobjective." *IEEE Transactions on Power Delivery*, Julho de 2006: 1452 - 1458.

- [R02] C. R. C. Rodrigues, "Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede," UNICAMP, Campinas, Dissertação de Mestrado 2002.
- [R81] R. Y., Rubinstein. *Simulation and the Monte Carlo Method*. New York: John Wiley & Sons, 1981 .
- [RR92] R., Billinton, R. N. Allan. *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*. New York: Plenum Press, 1992.
- [S00] R.H, Stillman. "Modeling failure data of overhead distribution Systems." *IEEE Trans. Power Delivery*, Outubro de 2000: 1238 - 1242.
- [S02] W. F., Schmitt. "Confiabilidade de Sistemas de Distribuição: Metodologias Cronológica e Analítica." *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá..*, Outubro de 2002.
- [S04] T.A., Short. *Electric Power Distribution Handbook*. CRC Press, 2004.
- [SCB02] A.M., Leite da Silva, A. M. Cassula, R. Billinton, e L. A. F. Manso. "Integrated reliability evaluation of generation, transmission and distribution systems." *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Agosto de 2002: 1350-2360.
- [SCN07] A. M., Leite da Silva, Cassula A. M., Nascimento L. C., Freire J. C., Sacramento C. E., e Guimaraes A. C. R. "Chronological Monte Carlo-based Assessment of Distribution System Reliability." *2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Maio de 2007.
- [SHC16] T. B., Silva, Hollanda L., e Cunha P.C.F. "Recursos Energéticos Distribuídos." *FGV Energia* 7 (Maio 2016).

[SHS88]D., Shirmohammadi, Hong H.W., Semlyen A., e Luo G.X. "A compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Network." *IEEE Transactions on Power Systems* 3 (Maio 1988): 753 - 762.

[SMC91] A. Leite da Silva, A. C. G. Melo e S. H. F. Cunha, "Frequency and duration method for reliability evaluation of large-scale hydrothermal generating systems," *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 138, nº 1, pp. 94 - 102, Janeiro 1991.

[SNR12] A. M. Leite da Silva, L. C. Nascimento, M. A. Rosa, D. Issicaba, and J. A. P. Lopes, "Distributed Energy Resources Impact on Distribution System Reliability Under Load Transfer Restrictions," *IEEE Transactions on Smart Grid* , vol. 3, no. 4, pp. 2048 - 2055, Maio 2012.

[SOL]Solargis. s.d. <https://solargis.info/>.

[T64]Todd, Z. G. "A Probability Method for Transmission and Distribution Outage Calculations." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Julho de 1964: 695 - 701.

[WSQ02] Z. Wang, F. Shokooh, and J. Qiu, "An efficient algorithm for assessing reliability indexes of general distribution systems," *IEEE Power & Energy Society*, vol. 17, no. 3, pp. 608 - 614, Novembro 2002.

[ZBS06]Zhu, D., R.P. Broadwater, Kwa-Sur Tam, R. Seguin, e H. Asgeirsson. "Impact of DG placement on reliability and efficiency with time-varying loads." *IEEE Transactions on Power Systems*, Fevereiro de 2006: 419 - 427.