



RESTABELECIMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO
FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Thiago Trezza Borges

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Sandoval Carneiro Junior
José Luiz Rezende Pereira

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2012

RESTABELECIMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO
FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Thiago Trezza Borges

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Sandoval Carneiro Junior, Ph.D.

Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

Prof^a. Carmen Lucia Tancredo Borges, D.Sc.

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

Prof. Nelson Kagan, Ph.D.

Prof. Paulo Augusto Nepomuceno Garcia, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2012

Borges, Thiago Trezza

Restabelecimento de Sistemas de Distribuição Utilizando Fluxo de Potência Ótimo/ Thiago Trezza Borges. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XVII, 135 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Sandoval Carneiro Junior

José Luiz Rezende Pereira

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2012.

Referencias Bibliográficas: p. 108-120.

1. Restabelecimento de Sistemas de Distribuição. 2. Reconfiguração. 3. Fluxo de Potência Ótimo. 4. Pontos Interiores. I. Carneiro Junior, Sandoval *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

A Deus, aos meus pais Severino e Isolina,
e minha namorada Carolina,
com muito amor.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Severino e Isolina que nunca mediram esforços para que pudesse ter as melhores condições para estudar e me mostraram o valor da educação em minha vida.

Aos Professores Sandoval Carneiro Junior, José Luiz Rezende Pereira e Paulo Augusto Nepomuceno Garcia pela excelência na orientação e dedicação dispensadas para a realização deste trabalho e por acreditarem no meu trabalho desde o início da Iniciação Científica.

Ao Professor Paulo Sérgio Rodrigues Alonso, gerente da extinta área de Engenharia de Materiais da Petrobras, pela confiança e liberação de horas preciosas de trabalho durante o período de créditos na UFRJ/COPPE. Sem a sua ajuda, este trabalho não seria possível.

Aos Professores da UFJF Leonardo Willer de Oliveira e Ivo Chaves da Silva Junior, pelas orientações, comentários, sugestões e pela amizade desde o mestrado na Universidade Federal de Juiz de Fora.

Aos Professores Carmen Lúcia Tancredo Borges e Glauco Nery Taranto pelas relevantes sugestões e considerações dadas na defesa do tema de tese e que foram, da melhor maneira possível, incorporadas ao trabalho final.

Aos amigos da Petrobras que direta ou indiretamente, contribuíram e me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho. Um agradecimento especial ao ex-gerente da Padronização de Materiais Gottfried Elgelbert Wolgien Junior pelo grande apoio e pela liberação para realizar esse trabalho.

À minha namorada Carolina Matos Mokdeci, pelo apoio, incentivo e tolerância, durante todo o curso de doutorado.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

RESTABELECIMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Thiago Trezza Borges

Fevereiro / 2012

Orientadores: Sandoval Carneiro Junior
José Luiz Rezende Pereira.

Programa: Engenharia Elétrica

O presente trabalho propõe uma metodologia para solução do problema de restabelecimento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) após a ocorrência de um defeito no sistema. O objetivo do método é restaurar o suprimento de energia elétrica aos consumidores afetados por problemas na rede.

Trata-se de um problema de programação não linear inteira mista de difícil solução pelos métodos tradicionais de cálculo. As variáveis discretas do problema são modeladas como uma função contínua, permitindo que o problema possa ser resolvido utilizando-se o Método Primal-Dual de Pontos Interiores. O método proposto utiliza a teoria de grafos para determinação das áreas isoladas e dos laços do sistema. Durante a solução do problema, as chaves são fechadas com base em um índice obtido a partir do Fluxo de Potência Ótimo (FPO). Este índice indica qual chave restabelece a maior quantidade de carga na área afetada pelo defeito. Quando o fechamento de uma chave causa a formação de um laço no sistema, a metodologia indica qual chave deve ser aberta para que se mantenha a radialidade da rede.

A metodologia resolve o problema passo a passo, fornecendo uma sequência viável de operação, ou seja, a quantidade de carga a ser restabelecida não causa violações de corrente nos circuitos e as tensões permanecem dentro dos limites pré-estabelecidos. O método é testado em dois sistemas encontrados na literatura, incluindo um sistema real de distribuição. Os resultados são comparados com referências encontradas na literatura para validação da metodologia proposta.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DISTRIBUTION SYSTEM RESTORATION USING OPTIMUM POWER FLOW

Thiago Trezza Borges

February / 2012

Advisors: Sandoval Carneiro Junior
José Luiz Rezende Pereira.

Department: Electrical Engineering

This work proposes a methodology to solve the Distribution System Restoration problem after the occurrence of a fault in the system. The main objective of the proposed methodology is to restore as much as possible the load supplied to the consumers in the areas affected by the fault.

The solution of this problem requires a mix integer nonlinear programming approach which might be very time consuming. The discrete variables are dealt with by adopting a suitable continuous function to describe the status of each switch and thus the problem can be solved using the Primal-Dual Interior Point method. The proposed methodology uses graph theory to identify isolated areas and existing loops in the system. The switches of the distribution system are closed based on an index, obtained from an Optimum Power Flow (OPF) algorithm. This index indicates the switch that restores the greatest amount of load in the faulted area. When a switch closure introduces a loop in the network, the methodology indicates the switch that must be opened to keep the system radiality.

The problem is solved step-by-step, providing a feasible switching operation sequence. In other words, the amount of load to be restored does not cause any current limit violation and all voltages are within the pre-specified limits. The algorithm is applied to two test systems proposed in the literature, including a real distribution system. The results are compared with existing methods to validate the proposed methodology.

SUMÁRIO

Capítulo I.....	1
Introdução.....	1
I.1 Considerações Iniciais	1
I.2 Aspectos do Restabelecimento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.....	7
I.3 Motivação da Tese.....	15
I.4 Objetivos da Tese	15
I.5 Publicações e/ou Submissões Decorrentes da Pesquisa	16
I.6 Organização da Tese.....	17
Capítulo II.....	18
Revisão Bibliográfica	18
II.1 Introdução.....	18
II.2 Metodologias para a Solução do Problema de Restabelecimento dos Sistemas de Distribuição.....	18
II.2.1 Métodos de Busca Exaustiva.....	19
II.2.2 Abordagem do Problema de Restabelecimento de Sistemas de Distribuição através de Lógicas de Automação	19
II.2.3 Inteligência Artificial.....	21
II.2.3.1 Lógica <i>Fuzzy</i>	21
II.2.3.2 Algoritmo Genético (AG).....	25
II.2.3.3 Redes Neurais Artificiais (RNA).....	29
II.2.3.4 Sistema Imunológico Artificial.....	29
II.2.3.5 Cultura de Bactérias.....	30
II.2.3.6 Colônia de Formigas.....	31
II.2.3.7 Enxame de Partículas.....	31
II.2.4 Métodos Heurísticos	32
II.2.4.1 Branch Exchange (“troca de ligações”).....	33
II.2.4.2 Sistemas Especialistas	34
II.2.4.3 Busca Heurística	36
II.2.5 Meta-heurísticas.....	39
II.2.5.1 Busca Tabu (BT).....	39
II.2.6 Métodos de Programação Matemática.....	41
II.2.7 Métodos Híbridos	44

II.3	Conclusões.....	45
Capítulo III	.....	48
Modelagem Matemática do Problema de Restabelecimento.....		48
III.1	Introdução.....	48
III.2	Teoria de Grafos aplicada à Análise de Redes Elétricas	48
III.2.1	Aplicações ao problema de Restabelecimento de SDE.....	49
III.2.1.1	Identificação de barras ilhadas no sistema.....	50
III.2.1.2	Identificação de Laços do Sistema	51
III.2.1.3	Identificação de caminhos no sistema	55
III.3	Metodologia Proposta para Restabelecimento Ótima de SDEE.....	58
III.3.1.1	Função Objetivo.....	60
III.3.1.2	Restrições de Balanço de Potência	61
III.3.1.3	Restrições de Desigualdade	65
III.3.1.4	Formulação do FPO.....	66
III.3.2	Índice Proposto para o Restabelecimento de SDEE.....	67
III.3.3	Algoritmo Proposto para Restabelecimento de SDE (ARESDEE)	69
III.3.3.1	Etapa-1	70
III.3.3.2	Etapa-2.....	71
III.3.3.3	Etapa-3	71
III.3.3.4	Etapa-4.....	71
III.3.3.5	Etapa-5	72
III.3.3.6	Etapa-6.....	72
III.4	Tutorial ARESDEE	73
III.5	Conclusões.....	84
Capítulo IV	.....	86
Resultados.....		86
IV.1	Introdução.....	86
IV.2	Caso-1: Sistema de 33 Barras.....	86
IV.2.1	Análise 1	89
IV.2.2	Análise 2 - Limites de Tensão	91
IV.2.3	Análise 3 – Violação de Fluxo.....	96
IV.2.4	Análise 4 – Consumidores prioritários	98
IV.3	Caso-2: Sistema de 476 Barras.....	100
IV.3.1	Análise-1:.....	101

IV.3.2	Análise-2:.....	102
IV.4	Desempenho Computacional.....	103
IV.5	Conclusões.....	104
Capítulo V	.....	105
Conclusões	.....	105
V.1	Considerações Finais.....	105
V.2	Propostas de Desenvolvimentos Futuros.....	106
Referências Bibliográficas	.....	108
Apêndice A	.....	121
Teoria de Grafos	.....	121
A.1	Grafo.....	121
A.2	Árvore.....	121
A.3	Matriz Incidência.....	122
A.4	Matriz de Circuitos ou Malhas.....	123
Apêndice B	.....	124
Resolução do problema de Fluxo de Potência Ótimo	.....	124
Apêndice C	.....	129
Modelagem Computacional	.....	129
C.1	Introdução.....	129
C.2	Classes dos Componentes da Rede.....	129
C.3	Modelagem do Sistema Elétrico.....	131
C.4	Funcionamento do Modelo Proposto.....	132
C.5	Implementação da Metodologia de Restabelecimento.....	133
C.6	Conclusões.....	135

LISTA DE FIGURAS

Figura I-1- Evolução dos limites anuais de DIC e FIC para unidade consumidora com DEC de 17 horas e FEC de 13 interrupções. (Fonte: Nota Técnica n°22/2011-SRD/ANEEL).....	6
Figura I-2 - Evolução da compensação por transgressão dos indicadores DIC, FIC e DMIC e da multa por violação dos limites de DEC e FEC para o período de 2007 a 2010. (Fonte: Nota Técnica n°22/2011-SRD/ANEEL)	6
Figura I-3 – Principais causas de distúrbio na rede elétrica (GOMES, 2008).....	8
Figura I-4 Curva de aversão aos blecautes (GOMES, 2008)	10
Figura I-5 Sistema de Distribuição no momento do defeito.....	11
Figura I-6 Sistema de Distribuição afetado pelo defeito	11
Figura I-7 – Sistema de Distribuição após o restabelecimento.	12
Figura I-8 - Tempos envolvidos na operação e planejamento de sistemas elétricos (Pérez-Guerrero <i>et al.</i> ,2008).....	14
Figura III-1- Sistema Exemplo	49
Figura III-2- Grafo associado ao sistema da Figura III-1	50
Figura III-3- Sistema Exemplo com Defeito entre as barras 1 e 2.	51
Figura III-4- Árvore do sistema após defeito entre as barras 1 e 2	51
Figura III-5- Sistema teste com a chave entre as barras 3 e 6 fechada.....	52
Figura III-6- Árvore do sistema exemplo proposto na Figura III-5	53
Figura III-7- Grafo do sistema exemplo proposto com o laço representado em vermelho	55
Figura III-8 – Grafo exemplo para o cálculo dos caminhos.....	55
Figura III-9 - Funções degrau e sigmoide.	63
Figura III-10 – Variações do parâmetro da função α sigmoide.....	64
Figura III-11- Fluxograma do ARSD proposto.....	70
Figura III-12- Sistema de 16 barras (CIVANLAR <i>et al.</i> , 1988) – topologia inicial.	73
Figura III-13 - Sistema de 16 barras (CIVANLAR <i>et al.</i> , 1988) – reconfigurado	74
Figura III-14- Defeito no sistema de 16 barras reconfigurado	74
Figura III-15 - Sistema de 16 barras com a chave S_8 fechada.....	78
Figura III-16 - Sistema 16 barras reconfigurado com as chaves S_7 e S_8 fechadas	81
Figura III-17 – Sistema 16 barras reconfigurado com as chaves S_7 e S_8 fechadas e a chave S_6 aberta.....	83
Figura IV-1 - Sistema de 33 barras (BARAN e WU, 1989) - topologia original.....	87

Figura IV-2 - Sistema de 33 barras (LIN e CHIN 1998).....	88
Figura IV-3 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras.	90
Figura IV-4 – Configuração final, sistema 33 barras. (a) ARESDEE, (b) LIN e CHIN, (c) (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011).	91
Figura IV-5 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras, limite de tensão 0.85 p.u.	92
Figura IV-6 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras, limite de tensão 0.90 p.u.	93
Figura IV-7 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras, limite de tensão 0.95 p.u.	95
Figura IV-8 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras, limite de tensão 0.95 p.u.	96
Figura IV-9 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras, com consumidores prioritários	100
Figura IV-10- Diagrama unifilar do sistema de 476 barras (GOMES <i>et al.</i> , 2006).	101

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1- Algoritmo de <i>Dijkstra</i> – 1° Passo.....	56
Tabela III.2- Algoritmo de <i>Dijkstra</i> – 2° Passo.....	56
Tabela III.3- Algoritmo de <i>Dijkstra</i> – 3° Passo.....	57
Tabela III.4- Algoritmo de <i>Dijkstra</i> – 4° Passo.....	57
Tabela III.5- Algoritmo de <i>Dijkstra</i> – Solução final	57
Tabela III.6- Carga Restabelecida do Sistema 16 barras.....	75
Tabela III.7- Tensões do sistema– FPO-2 – 1ª Execução.....	76
Tabela III.8- Fluxos de potência aparente circuitos - FPO-2 – 1ª Execução.....	76
Tabela III.9- Posição das chaves - FPO-1 – 1ª Execução.....	76
Tabela III.10- Índices <i>IDX</i> - 1ª execução	77
Tabela III.11- Chaves candidatas para fechamento.....	77
Tabela III.12- Tensões do sistema– FPO-5 – 1ª Execução.....	78
Tabela III.13- Fluxos de potência ativa nos circuitos - FPO-5 – 1ª Execução.....	78
Tabela III.14- Carga Restabelecida no sistema 16 barras – 1ª Execução.....	79
Tabela III.15- Tensões do sistema– FPO-2 – 2ª Execução.....	79
Tabela III.16- Fluxos de potência aparente nos circuitos - FPO-2 – 2ª Execução.	80
Tabela III.17- Posição das chaves	80
Tabela III.18- Índices <i>IDX</i> , sistema 16 barras, 2ª execução	80
Tabela III.19- Chaves candidatas para fechamento , sistema 16 barras.....	80
Tabela III.20- Tensões do sistema– FPO-5 – 2ª Execução.....	82
Tabela III.21- Fluxos de potência ativa nos circuitos - FPO-5 – 2ª Execução.....	82
Tabela III.22- Tensões do sistema– FPO-5 – 3ª Execução.....	83
Tabela III.23- Carga Restabelecida no Sistema 16 barras - 3ª Execução.....	83
Tabela III.24- Carga Restabelecida no Sistema 16 barras - 3ª Execução.....	84
Tabela IV.1- Soluções para o restabelecimento do sistema de 33 barras – Limite inferior de tensão de 0,80 p.u.	89
Tabela IV.2- Solução para o sistema de 33 barras – Limite inferior de tensão de 0,85 p.u.	92
Tabela IV.3- Solução para o sistema de 33 barras – Limite inferior de tensão de 0,90 p.u.	93
Tabela IV.4- Solução para o sistema de 33 barras – Limite inferior de tensão de 0,95 p.u.	94

Tabela IV.5- Carga restabelecida por barra para o sistema de 33 barras – tensão de 0,95 p.u.	95
Tabela IV.6- Fluxos de potência aparente para o caso base	97
Tabela IV.7- Soluções para o restabelecimento do sistema de 33 barras – Limite potência ativa habilitado.	98
Tabela IV.8- Solução para o sistema de 33 barras – Consumidores prioritários.....	99
Tabela IV.9- Solução para o sistema de 476 barras – Limite mínimo de tensão 0,90 p.u.	102
Tabela IV.10- Solução para o sistema de 476 barras – Limite mínimo de tensão 0,95 p.u.	103
Tabela IV.11- Tempos computacionais médios	103

LISTA DE SÍMBOLOS

A_a	: Matriz incidência completa;
A_e	: Matriz incidência dos elos;
A_f	: Matriz incidência reduzida;
A_r	: Matriz incidência dos ramos;
B_f	: Matriz de circuitos fundamentais;
B_r	: Matriz de circuitos fundamentais dos ramos;
b_{km}	: Susceptância série do circuito k-m;
b_{km}^{sh}	: Susceptância em derivação do circuito k-m do lado da barra k;
$CH_{km}(x_{km})$	: Valor de posição da chave manobrável no circuito k-m;
C_{END}	: Custo na energia não distribuída;
g_{km}	: Condutância série do circuito k-m;
G_z	: Vetor gradiente de solução do FPO;
H	: Matriz hessiana do problema de FPO;
$\bar{h}(\bar{z})$	: Vetor de restrições de igualdade do problema;
IDX_{km}	: Índice para definição do estado da chave km;
$MPIG_{x_{km}}$	: Contribuição do método de pontos interiores para a variável x_{km} no vetor gradiente;
$MPIG_{\alpha_m}$	: Contribuição do método de pontos interiores para a variável α_m no vetor gradiente;
Pl_k	: Carga ativa na barra k;
P_{km}	: Fluxo de potência ativa no circuito entre as barras k-m;
Pg_k	: Geração de potência ativa na barra k;
Pg_k^{\max}	: Limite máximo de geração de potência ativa na barra k;
Pg_k^{\min}	: Limite mínimo de geração de potência ativa na barra k;
Qg_k	: Geração de potência reativa na barra k;
Qg_k^{\max}	: Limite máximo de geração de potência reativa na barra k;
Qg_k^{\min}	: Limite mínimo de geração de potência reativa na barra k;
S_{disp}	: Capacidade reserva de potência ativa da chave;
S_{disp}^{mn}	: Capacidade disponível de potência ativa do circuito entre as barras m-n;
S_{km}	: Fluxo de potência aparente no circuito km;
S_{km}^{\max}	: Fluxo de potência aparente máximo no circuito km;
$sl_{x_{km}}$	: Variável de folga associadas às restrições de limite inferior da variável x_{km} ;
sl_{γ_m}	: Variável de folga associadas às restrições de limite inferior da variável γ_m ;
$su_{x_{km}}$	: Variável de folga associadas às restrições de limite superior da variável x_{km} ;

su_{γ_m}	: Variável de folga associadas às restrições de limite superior da variável γ_m ;
V_k	: Módulo da tensão da barra k;
V_m	: Módulo da tensão da barra m;
V_k^{\max}	: Limite máximo de tensão na barra k.
V_k^{\min}	: Limite mínimo de tensão na barra k;
x_{km}	: Variável de otimização associada à chave k-m;
x^{\max}	: Limite máximo do argumento da função sigmoidal;
x^{\min}	: Limite mínimo do argumento da função sigmoidal;
\bar{z}	: Vetor de variáveis de otimização;
\bar{z}^{\max}	: Vetor de limites máximos de \bar{z} ;
\bar{z}^{\min}	: Vetor de limites mínimos de \bar{z} ;
α	: Parâmetro da função sigmóide;
γ_k	: Percentual de carga restabelecida associado às barras da área desenergizada do sistema;
$\Delta_{\bar{z}}$	: Vetor independente para as variáveis de otimização do FPO;
Ωr	: Conjunto de barras na área desenergizada;
θ_{km}	: Defasagem angular entre as barras k e m ;
Ωk	: Conjunto de barras diretamente conectadas a barra k;
λp_k	: Multiplicador de Lagrange associado à equação de balanço de potência ativa;
λq_k	: Multiplicador de Lagrange associado à equação de balanço de potência reativa;
μ	: Parâmetro barreira;
FOB	: Função objetivo do problema;
ANEEL	: Agência Nacional de Energia Elétrica;
ARESDEE	: Algoritmo de Restabelecimento de Sistemas de Distribuição;
DEC	: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;
DIC	: Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora;
DMIC	: Duração Máxima de Interrupção Individual por Unidade Consumidora;
DNAEE	: Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica;
FEC	: Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;
FIC	: Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FPO	: Fluxo de Potência Ótimo;
GD	: Geração Distribuída;
IED	: <i>Intelligent Electronic Device</i> ;
MOO	: Modelagem Orientada a Objeto;
MPI	: Método de Pontos Interiores;
NA	: Normalmente Aberto;

NF : Normalmente Fechado;
PRODIST : Procedimentos de Distribuição da ANEEL;
SDEE : Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.

Capítulo I

Introdução

I.1 Considerações Iniciais

O sistema de energia elétrica é uma das infraestruturas básicas na nossa sociedade moderna e, portanto, requer alta confiabilidade. Um sistema de energia elétrica pode ser dividido em três subsistemas: geração, transmissão e distribuição. A eletricidade é, primeiramente, produzida por geradores elétricos (nucleares, térmicos, hidráulicos, etc.) e então é transmitida através do sistema de transmissão utilizando alta tensão. Em seguida, o nível de tensão é abaixado usando transformadores e a energia é transferida aos consumidores através dos sistemas de distribuição. O principal propósito dos sistemas de transmissão é transferir energia elétrica dos geradores de energia para as áreas consumidoras. Por outro lado, o principal propósito dos sistemas de distribuição é entregar diretamente a energia elétrica para cada consumidor (FUKUYAMA e CHIANG, 1995).

As empresas de eletricidade, principalmente as distribuidoras de energia elétrica, estão sendo afetadas por grandes mudanças regulatórias e desenvolvimentos tecnológicos. Essas novas tecnologias proporcionam maior flexibilidade operacional e consequentemente permitem melhorias na confiabilidade de modo que não era possível anteriormente. São exemplos dessas inovações os dispositivos de controle e proteção inteligentes (IEDs - *Intelligent Electronic Devices*), as chaves automatizadas e telecomandadas, além da adoção de comunicação intensiva entre esses dispositivos e os centros de controle. A inserção desses dispositivos inteligentes na rede permite uma maior controlabilidade do sistema durante a ocorrência de distúrbios ou indisponibilidade da geração (MARTINS e BORGES, 2011).

Em relação aos aspectos regulatórios, observa-se o aumento das exigências em relação à qualidade e à confiabilidade dos sistemas elétricos, impactando inclusive nas estruturas de tarifação. Nesse sentido, as tarifas baseadas em desempenho podem penalizar empresas por baixa disponibilidade do suprimento de energia. Esse novo

modelo de tarifação já é uma realidade no exterior e uma tendência no Brasil (BROWN e HANSON, 2001) (CELIK, 1999).

O primeiro regulamento no Brasil que dispôs sobre continuidade na prestação do serviço de distribuição de energia foi a Portaria nº 46, de 17 de abril de 1978, publicada pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE. Atualmente no país, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão responsável por avaliar as empresas concessionárias quanto à continuidade de fornecimento de energia elétrica com base em indicadores coletivos e individuais. Em 27 de janeiro de 2000, com a publicação da Resolução nº 024, os limites dos indicadores individuais tiveram sua primeira revisão, passando a ser vinculados aos limites dos indicadores coletivos, que são definidos para cada conjunto de unidades consumidoras através de análise comparativa de desempenho. Essa resolução também instituiu a compensação financeira em caso de violação dos mesmos. Portanto, as distribuidoras que não atenderem aos referidos limites têm a obrigação de efetuar o pagamento de compensação aos seus consumidores na forma de abatimento na fatura de energia. Em relação aos indicadores coletivos, até o ano de 2009, caso as distribuidoras não atendessem os limites estabelecidos, a forma de penalidade era através de multa. Essa penalidade foi extinta no final de 2009 com a publicação da Resolução Normativa nº 395, de 15 de dezembro de 2009, que também aprovou a Revisão 1 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição da ANEEL). Essa resolução também revisou os limites dos indicadores individuais de continuidade.

Esses indicadores de continuidade são calculados para períodos de apuração mensal, trimestral e anual, e são regulamentados pelo Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2011). Esses indicadores devem ser apurados considerando as interrupções com duração maior ou igual a três minutos, ou seja, de longa duração.

Para o acompanhamento das interrupções individuais, ocorridas em cada unidade consumidora, a concessionária de energia deve apurar três índices:

- 1) DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora): indica o intervalo de tempo em que ocorreu descontinuidade da prestação do serviço em uma unidade, no período de apuração, em horas, utilizando a seguinte fórmula:

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

- 2) FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora): indica o número de vezes em que ocorreu descontinuidade da prestação do serviço de energia em uma unidade, no período de apuração, utilizando a seguinte fórmula:

$$FIC = n \quad (I.2)$$

- 3) DMIC (Duração Máxima de Interrupção Individual por Unidade Consumidora): indica o intervalo máximo em que ocorreu as descontinuidades da prestação de serviço de energia em uma unidade no período de apuração, em horas, utilizando a seguinte fórmula:

$$DMIC = t(i)max \quad (I.3)$$

Onde:

- i Representa o índice de interrupções da unidade consumidora, variando de 1 a n ;
- n Representa o número de interrupções da unidade consumidora considerada;
- $t(i)$ Representa o tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada;

O acompanhamento dos indicadores de continuidade coletivos do serviço de energia elétrica é feito pela ANEEL através de subdivisões das distribuidoras, denominadas “Conjuntos Elétricos”. Esses conjuntos podem abranger diversos municípios, da mesma forma que os grandes municípios podem possuir mais de um conjunto. Para esse acompanhamento, a concessionária deve apurar dois índices:

- 1) DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora): indica o intervalo de tempo, em média, em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em cada unidade consumidora do conjunto considerado, no período de apuração, em horas, utilizando a seguinte fórmula:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c} \quad (I.4)$$

- 2) FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora): indica o número de vezes, em média, em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em cada unidade consumidora

do conjunto considerado, no período de apuração, utilizando a seguinte fórmula:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC(i)}{Cc} \quad (I.5)$$

Onde:

- i Representa o índice de unidades consumidoras atendidas em BT ou MT faturadas do conjunto;
- Cc Representa o número total de unidades consumidoras do conjunto no período de apuração, atendidas em BT ou MT.

Além dos indicadores individuais e coletivos, a ANEEL também calcula indicadores de desempenho global de continuidade. Estes indicadores indicam o desempenho relativo anual para os indicadores coletivos. O cálculo do desempenho relativo global consiste na média aritmética simples entre os desempenhos relativos anuais dos indicadores DEC e FEC, com duas casas decimais. Esses valores são calculados pelas seguintes fórmulas:

$$DEC_{MENSAL} = \frac{\sum_{i=1}^M [DEC_i \cdot Cc_i]}{\sum_{i=1}^M Cc_i} \quad (I.6)$$

$$DEC_{TRIM} = \frac{\sum_{i=1}^M [DEC_{TRIM_i} \cdot Cc_{MED_TRIM_i}]}{\sum_{i=1}^M Cc_{MED_TRIM_i}} \quad (I.7)$$

$$DEC_{ANUAL} = \frac{\sum_{i=1}^M [DEC_{ANUAL_i} \cdot Cc_{MED_ANUAL_i}]}{\sum_{i=1}^M Cc_{MED_ANUAL_i}} \quad (I.8)$$

$$FEC_{MENSAL} = \frac{\sum_{i=1}^M [FEC_i \cdot Cc_i]}{\sum_{i=1}^M Cc_i} \quad (I.9)$$

$$FEC_{TRIM} = \frac{\sum_{i=1}^M [FEC_{TRIM_i} \cdot Cc_{MED_TRIM_i}]}{\sum_{i=1}^M Cc_{MED_TRIM_i}} \quad (I.10)$$

$$FEC_{ANUAL} = \frac{\sum_{i=1}^M [FEC_{ANUAL_i} \cdot Cc_{MED_ANUAL_i}]}{\sum_{i=1}^M Cc_{MED_ANUAL_i}} \quad (I.11)$$

Onde:

DEC_i	Representa o valor mensal do DEC, do conjunto i ;
FEC_i	Representa o valor mensal do FEC, do conjunto i ;
DEC_{MENSAL}	Representa o valor mensal global do DEC, no mês de referência;
FEC_{MENSAL}	Representa o valor mensal global do FEC, no mês de referência;
DEC_{TRIM}	Representa o valor trimestral global do DEC, no trimestre de referência;
FEC_{TRIM}	Representa o valor trimestral global do FEC, no trimestre de referência;
DEC_{TRIM_i}	Representa o valor do DEC, trimestral do conjunto i ;
FEC_{TRIM_i}	Representa o valor do FEC, trimestral do conjunto i ;
DEC_{ANUAL_i}	Representa o valor do DEC, anual do conjunto i ;
FEC_{ANUAL_i}	Representa o valor do FEC, anual do conjunto i ;
DEC_{ANUAL}	Representa o valor anual global do DEC, no ano de referência;
FEC_{ANUAL}	Representa o valor anual global do FEC, no ano de referência;
Cc_i	Representa o número de unidades consumidoras faturadas e atendidas em BT ou MT do conjunto i ;
$Cc_{MED_TRIM_i}$	Representa a média aritmética do número de unidades consumidoras faturadas e atendidas em BT ou MT do conjunto i para o período trimestral;
$Cc_{MED_ANUAL_i}$	Representa a média aritmética do número de unidades consumidoras faturadas e atendidas em BT ou MT do conjunto i para o período anual;
M	Representa o número total de conjuntos considerados para o cálculo do indicador global.

A ANEEL estabelece limites para os indicadores de continuidade individuais para os períodos de apuração mensais, trimestrais e anuais. A Figura I.1 mostra a diminuição desses limites ao longo dos anos para uma unidade consumidora situada em uma área urbana e pertencente a um conjunto com o limite de DEC de 17 horas/ano e de FEC de 13 interrupções/ano. Como pode ser visto, os índices de continuidade estão sendo reduzidos ao longo dos anos, obrigando as concessionárias de energia elétrica a investir cada vez mais em seus sistemas para manterem seus índices dentro dos limites estabelecidos pelo agente regulador.

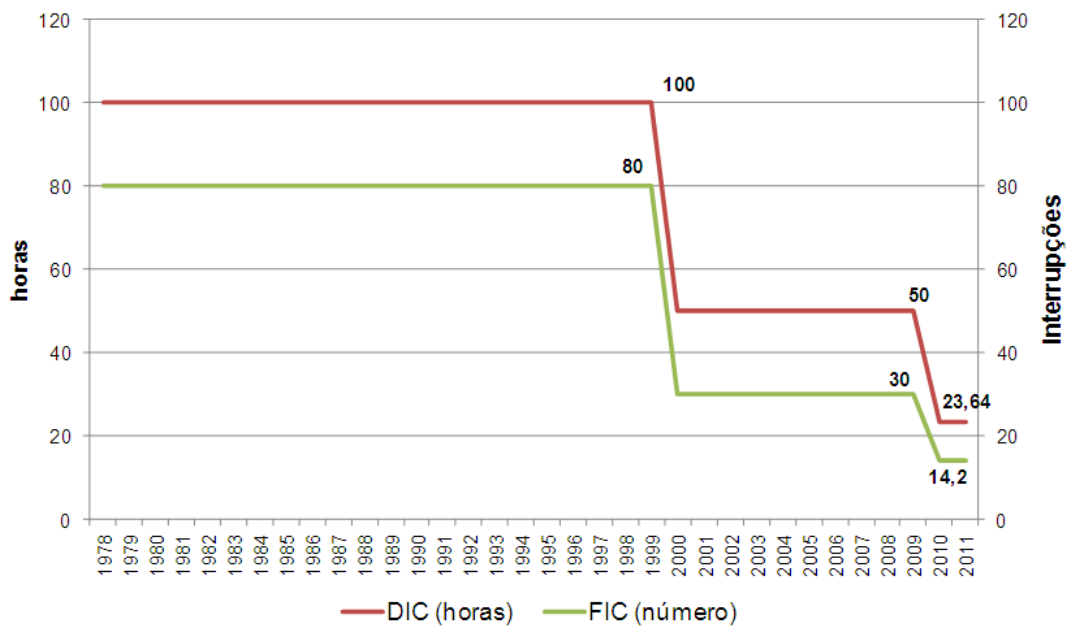


Figura I.1- Evolução dos limites anuais de DIC e FIC para unidade consumidora com DEC de 17 horas e FEC de 13 interrupções. (Fonte: Nota Técnica n°22/2011-SRD/ANEEL)

Quando ocorre a violação dos índices de continuidade do suprimento de energia individuais, a distribuidora deve compensar financeiramente a unidade consumidora. A compensação é automática, e deve ser paga em até dois meses após a apuração do indicador (mês em que houve a interrupção). A Figura I.2 apresenta na coluna azul o valor total de compensação pago pelas distribuidoras para o período de 2007 a 2010 devido à transgressão dos indicadores DIC, FIC e DMIC. Na coluna verde constam os montantes de multas por transgressão dos indicadores coletivos de continuidade DEC e FEC no período de 2007 a 2009.

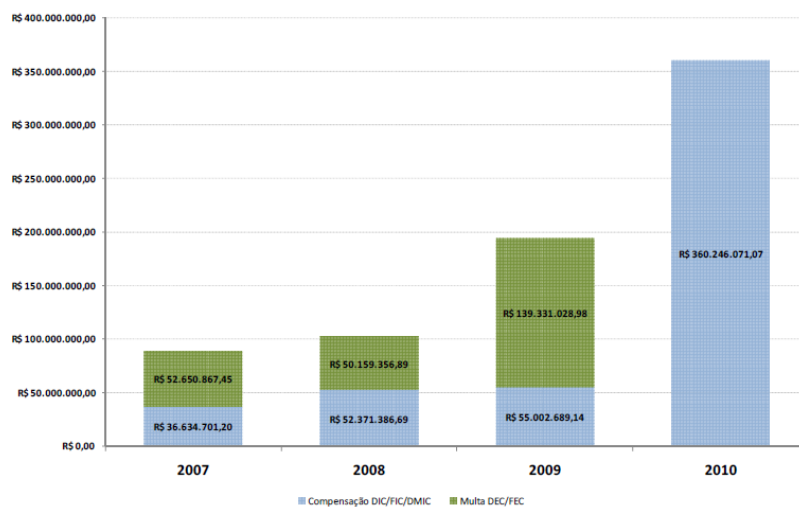


Figura I.2 - Evolução da compensação por transgressão dos indicadores DIC, FIC e DMIC e da multa por violação dos limites de DEC e FEC para o período de 2007 a 2010. (Fonte: Nota Técnica n°22/2011-SRD/ANEEL)

Nota-se, portanto, que investimento em novos equipamentos e metodologias de estudo e análise de sistemas de distribuição que contribuam para a melhoria dos indicadores de continuidade do serviço de energia elétrica, podem trazer ganhos, evitando o pagamento de cifras elevadas de compensações financeiras aos consumidores.

I.2 Aspectos do Restabelecimento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Em um SDEE, dois níveis de tensão podem ser identificados: primário (rede de média tensão entre 13,8 e 34,5 kV) e secundário (rede de baixa tensão entre 220 e 380V). Estes sistemas são geralmente operados de forma radial, ou seja, sem fechamento de malha. Este tipo de configuração facilita a coordenação da proteção das redes elétricas, facilitando sua operação. No entanto, uma rede radial oferece menos confiabilidade no que se refere à continuidade do serviço de fornecimento de energia quando comparada com uma rede malhada. Para aumentar a confiabilidade, uma solução atrativa sob o ponto de vista econômico é a utilização de chaves nos circuitos do sistema no nível primário. Esta configuração de rede é conhecida como “Radial com Socorro”.

Recentemente, com as sanções impostas pelos órgãos reguladores, as concessionárias de energia têm tomado ações para reduzir o número e a duração das interrupções nos SDEE. Logo, algumas distribuidoras estão modificando uma parte do sistema com configuração radial tradicional, adotando uma estrutura malhada mais flexível e confiável (CELLI *et al.*, 2004). Em um futuro próximo, a radialidade do sistema de distribuição pode deixar de ser uma restrição para a operação do sistema.

Através de operações de abertura/fechamento destas chaves manobráveis é possível aumentar a qualidade, a eficiência, a confiabilidade e a segurança dos SDEE através da reconfiguração do sistema. No entanto, para alcançar estes objetivos, tais operações devem ser realizadas considerando-se aspectos de ordem técnica e econômica. Estes aspectos são tratados em estudos de reconfiguração, que se propõem a determinar a topologia da rede elétrica atendendo diversos requisitos, tais como (SCHMIDT, 2005):

- Redução de perdas;
- Balanceamento de carga;

- Isolamento de trechos;
- Estabilidade;
- Melhoria na qualidade de fornecimento.

Portanto, a reconfiguração das redes torna flexível a operação dos SDEE, constituindo-se uma alternativa de grande importância para o planejamento e operação destes sistemas.

Após a ocorrência de um defeito na rede, a reconfiguração dos alimentadores pode restaurar o suprimento de energia a uma parte ou mesmo a totalidade dos consumidores, tendo um papel importante no planejamento e operação dos sistemas de distribuição. O processo de reenergização é conhecido como restabelecimento ou recomposição do sistema. De acordo com Módulo 1 do PRODIST, a recomposição do sistema é o conjunto de ações que objetivam restabelecer a topologia do sistema ou a entrega de energia elétrica, interrompida por desligamentos imprevistos de equipamentos ou linhas.

Conforme ADIBI *et al.* (1987), o problema de restauração do sistema elétrico depois de um colapso total ou parcial, é praticamente tão antigo como a indústria de energia elétrica em si. Em (BRYSON e HAYWARD, 1940), foram discutidos os problemas e procedimentos para o restabelecimento do sistema metropolitano da *Duquesne Light Company*, Pittsburgh, Estados Unidos. De uma forma geral, as companhias de eletricidade têm desenvolvido, ao longo dos anos, esquemas de restauração do sistema que satisfazem suas necessidades particulares de operação.

Estas interrupções no fornecimento de energia aos consumidores são inevitáveis nos sistemas de distribuição. Segundo (GOMES, 2008), essas interrupções ocorrem normalmente após um defeito na rede devido a diversos fatores, os quais são listados na Figura I.3.

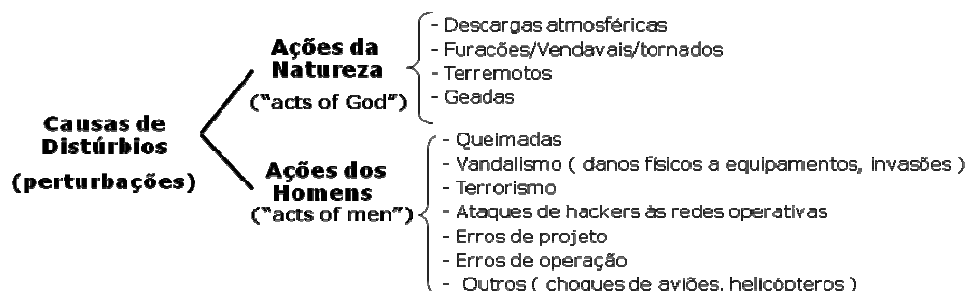


Figura I.3 – Principais causas de distúrbio na rede elétrica (GOMES, 2008)

Além disso, cada vez mais pressão vem sendo feita para a redução de custos operacionais, fazendo com que os sistemas de energia sejam operados mais perto dos seus limites. Esses fatores levam a um maior risco falhas no suprimento de energia, especialmente apagões (LIN e WEN, 2007).

Após a ocorrência de um defeito, os equipamentos de proteção detectam as áreas faltosas e a desconectam da rede. Neste momento, as cargas que estão na região de influência do defeito ficam sem energia, ocasionando um blecaute em parte do sistema.

Em seus estudos, (ADIBI, 2008) verificou que a falta de energia pode causar diversos impactos à sociedade. Esses impactos podem ser classificados como diretos e indiretos. Como impactos diretos pode-se citar:

- Deterioração dos alimentos por falta de refrigeração;
- Desligamento plantas fabris;
- Danos em dados eletrônicos e perda de serviços de informática;
- Perda de sistemas de suporte à vida em hospitais;
- Suspensão de transporte eletrificado como trens e metrô;
- Congestionamento de tráfego.

Podem-se destacar também os impactos indiretos dos blecautes:

- Curto prazo
 - Saques de propriedades e incêndios criminosos;
 - Pagamento de horas extras para policiais e bombeiros;
 - Cancelamento de programas sociais;
- Médio prazo
 - Custo para recuperação dos saques;
 - Pagamento de salários extras para o pessoal de restauração do sistema;
 - Perdas de receitas fiscais durante o período de recuperação;
- Longo prazo
 - Aumento nas taxas de seguro;
 - Contaminações devido a problemas com o tratamento de esgoto e consequente aumento de doenças;
 - Custo para prisão dos saqueadores.

Além dos danos causados a sociedade, diversos estudos baseados na experiência das empresas concessionárias de energia sugerem que a satisfação do consumidor está estreitamente relacionada com a frequência de interrupção do serviço e a duração da interrupção (FUKUYAMA e CHIANG, 1995). A Figura I.4 mostra o grau de irritação dos consumidores em relação à duração de um blecaute. Cabe ressaltar que com o uso cada vez mais intensivo de equipamentos elétricos na sociedade moderna, a sensibilidade em relação a falhas no sistema será cada vez maior.

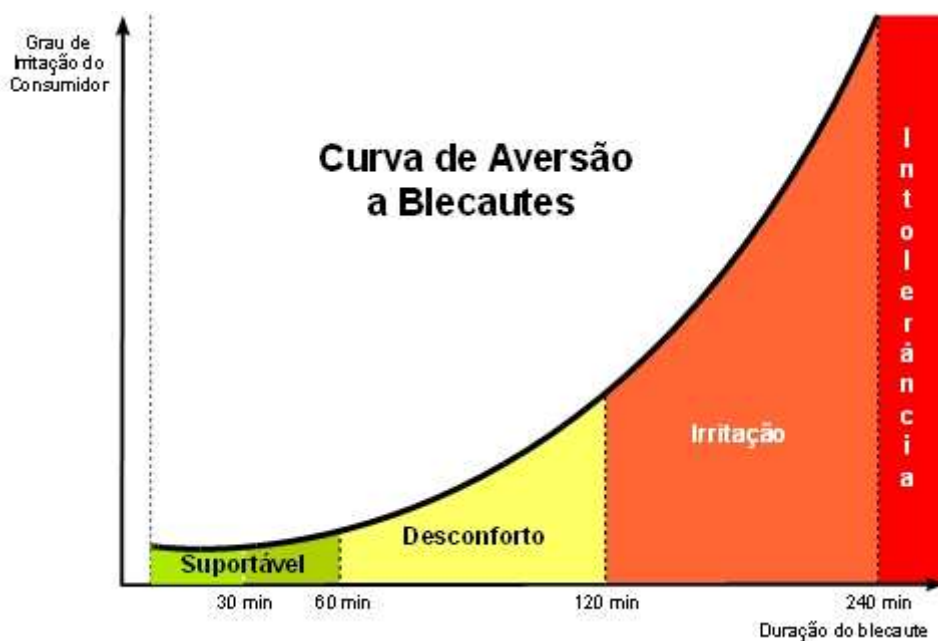


Figura I.4 Curva de aversão aos blecautes (GOMES, 2008)

Em geral, o restabelecimento dos sistemas de transmissão e geração interconectados é um problema complicado. Muitos fatores devem ser levados em consideração, como por exemplo, requisitos das cargas, variações de frequência, tensões, condições de desbalanço, proteção, estabilidade, etc. O restabelecimento dos sistemas de distribuição tradicionais é um pouco diferente, pois os alimentadores primários são tipicamente radiais. Nas áreas urbanas, os alimentadores são projetados de tal forma que os consumidores podem ser restabelecidos através de alimentadores vizinhos conectados por chaves normalmente abertas (NA). Além disso, nos sistemas de distribuição tradicionais, as fontes de energia, que são as subestações, estão sempre disponíveis. A principal tarefa é encontrar um caminho de energização para a carga, evitando sobrecargas e sobretensões, através de uma sequência de chaveamentos.

Portanto, o objetivo do restabelecimento é encontrar uma fonte apropriada e um caminho para restabelecer a carga nas ilhas sem energia (TEO e GOOI, 1998).

Para exemplificar o problema enfrentado no restabelecimento dos sistemas de distribuição, considera-se o sistema da Figura I.5 operando normalmente em sua configuração radial. Considera-se então a ocorrência de um defeito no sistema próximo do disjuntor DJ1 (representado pelo desenho do raio).

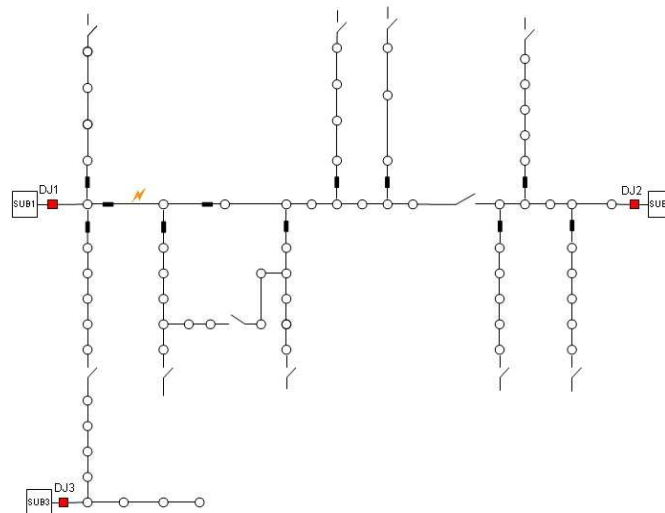


Figura I.5 Sistema de Distribuição no momento do defeito

Como consequência do defeito, o disjuntor DJ1 é operado por um dispositivo de proteção. Para alimentadores radiais (que é o caso mais comum nos sistemas de distribuição) essa operação irá resultar na isolação de alguns trechos do alimentador à jusante da área afetada conforme ilustrado pela Figura I.6.

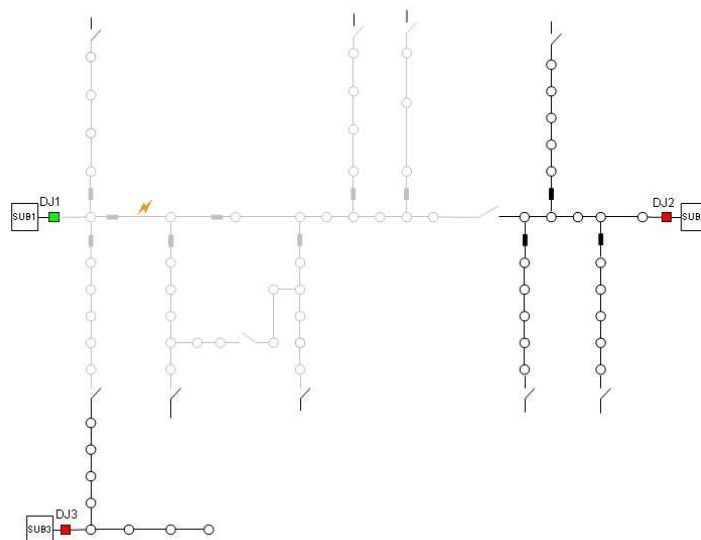


Figura I.6 Sistema de Distribuição afetado pelo defeito

A prática comum nessas condições de defeito é isolar os trechos afetados do alimentador abrindo todas as chaves ao redor.

Portanto, o próximo passo será restabelecer o serviço a esses ramos através da reconfiguração dos alimentadores. Esta reconfiguração envolve o uso de chaves existentes, normalmente abertas (NA) entre as áreas isoladas e os alimentadores adjacentes, conforme mostrado na Figura I.7.

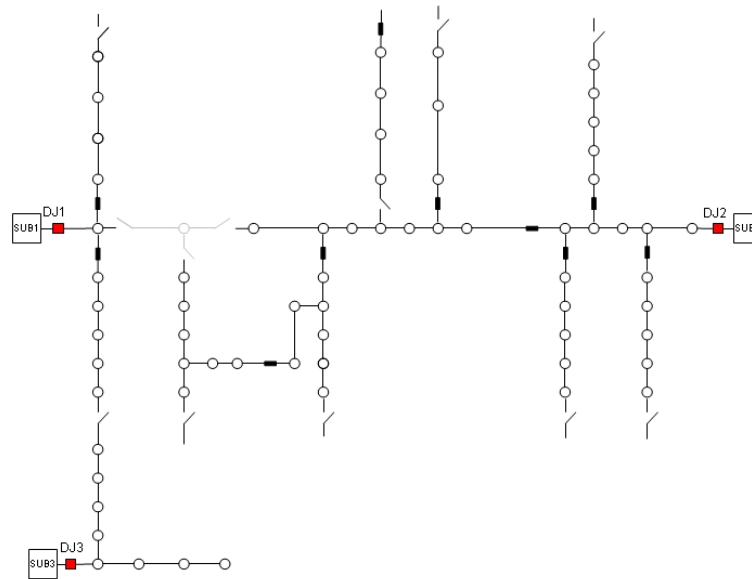


Figura I.7 – Sistema de Distribuição após o restabelecimento.

Normalmente, o problema de reconfiguração é muito complicado e demorado para ser resolvido. Isso ocorre, pois este é um problema de otimização inteira mista não linear de grandes dimensões, devido ao fato dos sistemas urbanos de distribuição serem de grande porte e possuírem um grande número de chaves candidatas para serem operadas (AOKI *et al.*, 1989).

Este problema pode ser entendido facilmente com uma análise matemática simples. Configurações de sistemas de distribuição normalmente são representadas pelo conjunto dos estados das chaves. Essas configurações podem ser descritas por um vetor conforme Equação (I.6).

$$x = [x_1, \dots, x_n] \tag{I.6}$$

Onde:

- x_i Representa estado da chave. Aberta ($x_i = 0$) ou fechada ($x_i = 1$);
- n Representa o número de chaves do sistema.

Portanto, 2ⁿ combinações podem ser geradas até que uma possível configuração viável seja encontrada. Isso pode requerer um tempo de processamento muito elevado, principalmente se o sistema de distribuição considerado for de grande dimensão. Os métodos que analisam todas as possíveis soluções não são práticos, até mesmo para sistemas de distribuição de pequeno porte (DELBEM *et al.*, 2000).

Durante o processo de restabelecimento dos SDEE, devido ao tempo limitado para a tomada de ações, somente um número reduzido de alternativas é analisado pelos operadores. Portanto, para atender critérios cada vez mais rigorosos de confiabilidade, uma decisão assistida por computador deve ser utilizada para resolver o problema de restabelecimento de maneira mais eficiente (KUMAR *et al.*, 2006).

Sendo assim, o principal objetivo de um método para restabelecimento deve ser recompor a maior quantidade de carga possível, transferindo os consumidores da área afetada pelo defeito para alimentadores vizinhos (FUKUYAMA e CHIANG, 1995). Além do objetivo acima, o restabelecimento de consumidores considerados essenciais deve ser priorizado no processo de recomposição do sistema. De acordo com PRODIST Módulo 1, são caracterizados como consumidores essenciais aqueles que desempenham serviço ou atividade fundamental para sociedade.

Entretanto, outros objetivos também podem ser explorados de acordo com as exigências de cada concessionária, como por exemplo, minimizar energia não faturada, manter a carga equilibrada entre alimentadores (reduzindo o nível de queda de tensão), minimizar as perdas, evitar planos que precisem de operação de chaves distantes umas das outras, restabelecer prioritariamente consumidores que estejam com os indicadores de continuidade próximos limite, etc.

Resumindo as premissas destacadas anteriormente, um plano adequado de restabelecimento deve atender aos seguintes requisitos (HSU *et al.*, 1992):

1. O serviço de eletricidade deve ser restabelecido o mais rápido possível para evitar problemas aos consumidores e garantir a confiabilidade do suprimento de energia elétrica;
2. Restabelecer o máximo de carga possível de acordo com a prioridade dos consumidores ou minimizar o custo da energia não distribuída;
3. O número de chaveamentos requeridos no restabelecimento deve ser o mínimo possível. O grande número de manobras diminui a vida útil das chaves. Além disso, operação de muitas chaves pode demandar tempos significativos, principalmente devido ao deslocamento de equipes;

4. A estrutura do sistema deve ser mantida radial para coordenação adequada dos relés e facilidade de localização dos defeitos (em sistema onde a radialidade seja uma restrição);
5. Os componentes do sistema não devem ser sobrecarregados. (Ex. carregamento dos transformadores e capacidade de condução das linhas);
6. Os limites de queda de tensão devem ser obedecidos.

Além do exposto anteriormente, uma metodologia de restabelecimento deve fornecer uma sequência viável de operações para atingir o esquema final de restauração da rede. Se uma sequência de operações de chaveamento não é fornecida, não há garantia da implementação da solução de modo seguro. Por exemplo, se uma restrição de corrente não é satisfeita em uma das etapas de chaveamento, a operação indesejável de um dispositivo de proteção pode causar a perda de energia em uma área previamente não afetada pelo defeito.

Cabe ressaltar ainda que o restabelecimento é um problema de operação em tempo real e, conforme mostrado na Figura I.8, é desejável que uma solução seja obtida na escala de minutos, para que as ações sejam realizadas no máximo na escala de horas (período de operação). Com a penetração cada vez maior das redes inteligentes (*Smart Grids*), como sua capacidade de autocura (*self healing*), os tempos restabelecimento após ocorrência de um defeito na rede serão cada vez menores.

Vale salientar novamente que são considerados no cálculo dos índices de continuidade somente os eventos de longa duração (acima de três minutos). Com isso, ações rápidas que levem ao restabelecimento dos SDEEs evitam que concessionárias sofram sanções financeiras impostas pelos órgãos reguladores.

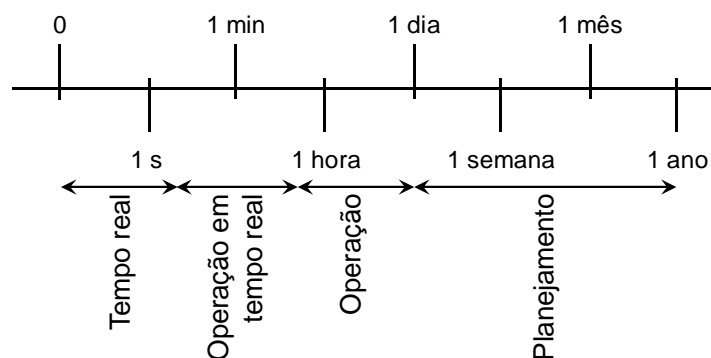


Figura I.8 - Tempos envolvidos na operação e planejamento de sistemas elétricos (Pérez-Guerrero *et al.*, 2008)

I.3 Motivação da Tese

Considerando que as pressões dos órgãos reguladores em relação aos índices de continuidade estão cada vez maiores e que os consumidores, principalmente devido ao uso intensivo de equipamentos elétricos, estão mais exigentes em relação aos serviços de distribuição, é necessário que as concessionárias invistam cada vez mais em programas de controle e automação dos sistemas elétricos. Ao encontro dessa nova demanda, existe o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias de equipamentos e programas computacionais que permitem uma mudança substancial na filosofia de operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Neste sentido o desenvolvimento de um método computacional que auxilie o restabelecimento do sistema de distribuição contribuirá para melhoria da confiabilidade do suprimento de energia elétrica, aumentando a satisfação dos consumidores, evitando a aplicação de penalidades às concessionárias e reduzindo o custo da energia não distribuída (C_{END}).

Considerando que existem na literatura poucos trabalhos que incorporam as características reais dos sistemas de distribuição e a realidade da operação dos mesmos em uma única ferramenta computacional, este tema torna-se prioritário para o setor elétrico.

I.4 Objetivos da Tese

Uma das maiores dificuldades impostas pelos problemas de reconfiguração e restabelecimento de sistemas de distribuição de energia elétrica é a característica discreta do problema devido principalmente a presença de chaves, cujo modelo matemático ideal é a função degrau unitário. Essa característica coloca os problemas de reconfiguração e restabelecimento na categoria de otimização não linear inteira mista.

Em se tratando de reconfiguração de SDEE, uma abordagem bastante eficiente no tratamento da característica discreta do problema foi apresentada em (OLIVEIRA *et al.*, 2005), (GOMES *et al.*, 2006), (SILVA JUNIOR *et al.*, 2008a), (SILVA JUNIOR *et al.*, 2008b), (OLIVEIRA *et al.*, 2010), (SILVA JUNIOR *et al.*, 2011) e (NASCIMENTO *et al.*, 2011). Nestes trabalhos, a função degrau foi aproximada por uma função contínua da família das sigmóides, pois possuem dinâmica similar. Os resultados apresentados

mostram que a modelagem proposta foi bastante eficiente quando comparada com outros trabalhos apresentados na literatura.

No entanto, nesses trabalhos, as restrições operacionais não foram representadas na formulação do problema de otimização. Para determinação da solução ótima foi proposta a criação de uma lista de prioridade, onde as chaves a serem operadas são classificadas de acordo com seu impacto na função objetivo. A partir dessa lista de prioridades, executa-se um processo de busca, verificando-se qual a chave da lista determina as menores perdas de energia e que atende às restrições do problema. A aplicação das metodologias acima citadas no restabelecimento ótimo de SDEE torna-se inviável, principalmente devido à característica de operação em tempo real do problema, pois gasta-se certo tempo para percorrer toda lista de prioridade. Tendo em vista também que os processos de otimização propostos nesses trabalhos partem de uma topologia onde todas as chaves estão fechadas, não é possível a obtenção de uma sequência viável de operação das chaves, o que é muito importante no processo de restabelecimento. A operação errada de uma chave pode atuar um dispositivo de proteção indevidamente, aumentando o número de cargas desenergizadas.

Dessa forma, utilizando a mesma técnica de mitigação da característica discreta das chaves, o objetivo desta tese é desenvolver uma metodologia para o restabelecimento de SDEE que considere as restrições operacionais dentro da formulação do problema de otimização, obtendo-se uma sequência viável de operação de chaveamento. Da mesma forma busca-se representar a porcentagem de carga restabelecida dentro do processo de otimização, o que também não é encontrado na literatura pesquisada e que também evita passos adicionais na resolução do problema. Com tudo isso, o desempenho computacional da metodologia proposta torna-se adequado à resolução do problema.

I.5 Publicações e/ou Submissões Decorrentes da Pesquisa

- ◆ “Distribution systems restoration using the Interior Point Method and sensibility analysis”, BORGES, T. T., CARNEIRO, S., GARCIA, P. A. N., PEREIRA, J. L. R., DE OLIVEIRA, L. W., DA SILVA, I. C., 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, , Detroit, USA.

- ◆ “Restabelecimento de sistemas de distribuição utilizando fluxo de potência ótimo”, BORGES, T. T., CARNEIRO, S., GARCIA, P. A. N., PEREIRA, Artigo aprovado para publicação na *Revista da Sociedade Brasileira de Automática (SBA)*.

I.6 Organização da Tese

Além deste capítulo esta tese contém mais quatro capítulos e três apêndices. O Capítulo II apresenta as linhas de pesquisa e uma revisão dos métodos de restabelecimento em SDEE encontrados na literatura.

O Capítulo III apresenta a metodologia proposta para o restabelecimento de SDEE além de um sistema tutorial mostrando passo a passo a solução do problema.

No Capítulo IV são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a aplicação da metodologia proposta, os quais são comparados com os resultados de outros métodos da literatura. Os estudos de casos apresentados são referentes a sistemas conhecidos na literatura, incluindo um sistema equivalente brasileiro de médio porte.

No Capítulo V são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para desenvolvimentos futuros.

O Apêndice A apresenta alguns conceitos básicos sobre a Teoria de Grafos.

O Apêndice B apresenta detalhes da resolução do problema de Fluxo de Potência Ótimo.

O Apêndice C apresenta detalhes da modelagem computacional utilizada na implementação da metodologia proposta.

Capítulo II

Revisão Bibliográfica

II.1 Introdução

Devido à importância do restabelecimento das redes de distribuição de energia elétrica para confiabilidade do sistema, satisfação dos consumidores e melhoria dos indicadores operacionais das concessionárias de energia elétrica, existem vários trabalhos publicados sobre métodos e algoritmos para solução deste problema. Este capítulo tem como objetivo descrever as principais linhas de pesquisa, seus aspectos, vantagens e desvantagens, além de revisar os principais trabalhos encontrados na literatura sobre o tema.

II.2 Metodologias para a Solução do Problema de Restabelecimento dos Sistemas de Distribuição

Tendo em vista a grande importância da solução do problema de restabelecimento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos. Dessa forma, várias metodologias são aplicadas destacando-se:

- Métodos de Busca Exaustiva;
- Lógicas de Automação;
- Sistemas Inteligentes;
- Métodos Heurísticos;
- Métodos Matemáticos, etc.

A seguir, buscando uma abordagem didática, apresenta-se uma revisão bibliográfica dividida de acordo com os métodos acima citados:

II.2.1 Métodos de Busca Exaustiva

Consiste na enumeração completa de todas as possibilidades de restabelecimento do sistema, ou seja, na avaliação de todas as topologias radiais factíveis que satisfaçam as restrições impostas pelo problema. Estes métodos também são conhecidos como métodos de “força bruta” e permitem obter a solução ótima global do problema de restauração do SDEE. No entanto, esta solução requer um considerável esforço computacional mesmo para SDEE de pequena proporção. Isto se deve à natureza não linear do problema, que requer uma análise de fluxo de potência para determinação do estado da rede a cada operação de chaveamento. Portanto, as dimensões elevadas do espaço de soluções inviabilizam procedimentos de Busca Exaustiva (OLIVEIRA, 2009).

SARMA *et al.* (1994) propuseram um algoritmo de Busca Exaustiva que realiza uma redução na rede. A metodologia funde grupos de nós, tornando mais fácil a tarefa de encontrar um caminho de energização para as cargas afetadas. O algoritmo apresenta todas as soluções do problema que atendam às restrições de tensão, corrente e radialidade. No entanto, não indica aos operadores qual solução ótima a ser utilizada. Além disso, a utilização desse método para operação em tempo real fica inviável.

II.2.2 Abordagem do Problema de Restabelecimento de Sistemas de Distribuição através de Lógicas de Automação

Uma forma de resolver o problema do restabelecimento de sistemas de distribuição de energia é a utilização de lógicas previamente definidas e implementadas em controladores programáveis. Estes equipamentos monitoram as variáveis do sistema elétrico e tomam ações caso ocorra mudanças fora dos limites estabelecidos.

Utilizando uma metodologia conhecida como Técnica de Controle Supervisório, LEE e LIM (2004) propuseram uma metodologia para obter as estratégias de restabelecimento de sistemas de distribuição após uma contingência. O Controle Supervisório é um termo geral utilizado para ferramentas analíticas de automação e controle de sistemas complexos de grande porte. Esta referência sintetiza automaticamente a ação de um supervisor humano que controla o comportamento de um

processo de modo a mantê-lo dentro de certos limites. Este termo é comumente usado em sistemas de controle conhecidos como SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition System*). Com esta técnica, os autores buscam obter estratégias de restabelecimento que retornam o sistema de distribuição de energia a seu estado normal. Nesta metodologia são geradas todas as possibilidades de restabelecimento do sistema e a cada possibilidade associa-se um indicador baseado no atendimento à carga, nos limites de tensão nas barras e nos limites de corrente das linhas. Contudo, a decisão de qual configuração utilizar fica a cargo do operador do sistema, que deve analisar os indicadores estabelecidos. Tendo em vista a capacidade limitada de processamento dos controladores lógicos, o método adota modelos reduzidos do sistema de distribuição para que o tempo de execução da lógica de restabelecimento não seja comprometido.

BAXEVANOS e LABRIDIS (2007a e 2007b), LIM *et. al* (2008) e LIN *et. al* (2009) propuseram abordagens similares à LEE e LIM (2004). Porém, ao invés de centralizar a ação de restabelecimento em um só agente (no caso o controle central), os autores propuseram distribuir a capacidade de diagnóstico e restabelecimento pelos dispositivos inteligentes da rede (IED – *Intelligent Electronic Device* e PLC – *Programmable Logic Controller*). Dessa forma diminuem-se os tempos de identificação dos defeitos e restabelecimento dos sistemas de distribuição. SOLANKI *et al.* (2007) também apresentaram as vantagens de realizar um processo de restabelecimento descentralizado, destacando como a principal desvantagem do sistema centralizado a necessidade de recursos computacionais e de comunicação potentes para tratar grande quantidade de informações. Em (LO *et al.*, 2009) foi apresentado um sistema distribuído de restabelecimento considerando a presença de geração distribuída e possibilidade de operação ilhada.

MELIC *et al.* (2009) apresentaram uma implementação prática do restabelecimento dos sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando as informações disponíveis nos IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) instalados no sistema. No algoritmo de solução do problema é montada uma árvore do sistema, considerando o disjuntor aberto pelo defeito como nó raiz. A partir desse ponto, o algoritmo procura quais as chaves candidatas para o fechamento que restabelecem a carga desalimentada, considerando os limites de tensão e corrente. Essa metodologia foi implementada pela empresa ABB utilizando um sistema demonstrativo em escala reduzida com três fontes, cinco chaves e três cargas.

Os trabalhos que utilizam Lógicas de Automação apresentam aplicações práticas de restabelecimento de sistemas de distribuição, mostrando detalhes como, por exemplo, o sistema de comunicação de dados entre dispositivos de proteção e manobra. Nessas referências não são apresentadas em detalhes as metodologias implementadas para executar o processo de restabelecimento dos sistemas de distribuição. Além disso, estas técnicas só podem ser aplicadas em sistemas que são totalmente automatizados, ou seja, onde não exista a presença de chaves manuais. A troca de todas as chaves manuais por chaves automáticas é um processo financeiramente dispendioso e seus benefícios devem ser avaliados dos pontos de vista técnico e econômico.

II.2.3 Inteligência Artificial

O conceito de inteligência artificial baseia-se na simulação computacional do pensamento humano para a solução de um problema específico a partir do conhecimento das características do mesmo (TAYLOR e LUBKEMAN, 1989). A aplicação de sistemas de inteligência artificial no restabelecimento de redes de distribuição possibilita uma maior flexibilidade para a análise dos complexos sistemas atuais.

II.2.3.1 Lógica *Fuzzy*

A teoria de Lógica *Fuzzy* propõe a modelagem computacional de regras baseadas no conhecimento humano para solução de um determinado problema. Uma característica da Lógica *Fuzzy* é que ela é capaz de trabalhar com termos incertos como, por exemplo, corrente em um trecho do sistema. A principal razão de adotar Lógica *Fuzzy* para resolver o problema de restabelecimento é que especialistas humanos tendem a usar regras heurísticas (HSU e KUO, 1994). Eles normalmente utilizam variáveis linguísticas para descrevê-las. Por exemplo, pode-se usar a seguinte descrição linguística para o carregamento de uma linha: “manter a corrente do alimentador dentro do limite”.

KUO e HSU (1993) propuseram uma metodologia baseada em Lógica *Fuzzy* para estimar as cargas no sistema de distribuição e desenvolver um plano de

restabelecimento apropriado após a ocorrência de um defeito. Para estimar a carga nos ramos sem medidores, foram definidos patamares típicos de carga para os consumidores do tipo comercial, industrial e residencial. Esses patamares de carga foram transformados em variáveis linguísticas usando notações de Lógica *Fuzzy*. Após definidas as cargas, um método de busca heurística baseado em Lógica *Fuzzy* foi proposto para definir o plano de restabelecimento com um número mínimo de operações de chaveamento, evitando sobrecargas nos trechos do sistema e minimizando os desvios dos limites de tensão. Uma metodologia semelhante foi proposta em (HSU *et al.*, 1992). Nestes trabalhos, foi utilizada como variável de decisão somente o balanço de corrente entre os alimentadores, não sendo considerados os níveis de tensão das barras durante o processo de restabelecimento. Além disso, não foi considerada a possibilidade de cortes de carga na área afetada pelo defeito, nem a presença de consumidores prioritários.

HSU e KUO (1994) apresentaram uma extensão natural do trabalho (KUO e HSU, 1993). Ao invés de utilizarem restrições rígidas para o problema (ex. corrente em um ramo deve ser menor ou igual a 20 amperes), os autores utilizaram restrições mais flexíveis através de Lógica *Fuzzy* (ex. a sobrecarga no alimentador deve ser a menor possível). Dessa forma conseguiu-se estabelecer planos de restabelecimento onde pequenas sobrecargas são permitidas, encontrando-se soluções viáveis para problemas considerados sem solução por outras metodologias. Da mesma forma que no trabalho anterior, os níveis de tensão nas barras foram negligenciados.

Em (LEE *et al.*, 1998), foi proposto um algoritmo para a determinação do melhor plano de restabelecimento baseado em Lógica *Fuzzy*. Primeiramente a metodologia determina diversas configurações candidatas ao restabelecimento do sistema. Na segunda etapa do algoritmo, essas configurações são avaliadas de acordo com quatro critérios *fuzzy*: capacidade de restabelecimento do alimentador (calculado a partir do número de alimentadores adjacentes e suas respectivas margens), margem de carregamento dos alimentadores, número de operações de chaveamento e número de cargas restabelecidas. Este método foi implementado utilizando Modelagem Orientada a Objetos (MOO) de forma que o código de programação desenvolvido pudesse ser reutilizado e melhorado no futuro. Não são dados detalhes no trabalho como são geradas as configurações de restabelecimento, apresentando um método apenas para a avaliação das mesmas. Além disso, são apresentadas somente as configurações finais das soluções, não apresentando uma sequência de chaveamento.

TROVATO *et al.* (1999) propuseram uma metodologia *Fuzzy* para escolher o melhor plano de restabelecimento, dentre planos pré-estabelecidos. Estes planos devem atender objetivos e restrições do sistema como minimizar o tempo sem energia dos consumidores e não permitir sobrecarga dos equipamentos. Para tanto, foram definidas variáveis *fuzzy* para as correntes nas linhas de acordo com o conhecimento de ordem prática dos operadores do sistema de distribuição. O método desenvolvido apenas avalia planos de restabelecimentos pré-existent, não apresentando nenhum algoritmo para o cálculo desses planos.

Em (DELBEM *et al.*, 2000), foi proposto um processo de busca utilizando heurísticas *fuzzy* para obtenção de um plano adequado de restabelecimento da energia para os consumidores. Diversas heurísticas comumente utilizadas pelos operadores foram implementadas no algoritmo de busca. Os conjuntos *fuzzy* permitiram traduzir esses conhecimentos intuitivos para uma representação computacional. Como vantagem, o trabalho propõe uma simplificação da representação da rede para a diminuição do número de configurações não factíveis e melhoria no desempenho computacional. Como principal desvantagem, é apresentada somente a configuração final do sistema.

Em HUANG (2003), foi proposto o uso de uma metodologia conhecida com Rede Causa-Efeito *Fuzzy* para resolver o problema de restabelecimento de sistemas de energia. As redes de Causa-Efeito *Fuzzy* oferecem uma ferramenta de modelagem gráfica para representação das causalidades entre as premissas (entrada) e sua associada consequência (saída). As regras heurísticas para modelagem dos conjuntos *Fuzzy* foram obtidas através de entrevistas com os operadores do sistema de distribuição. Da mesma forma que em outras metodologias, este método somente apresenta a configuração final da rede, além de depender de um conhecimento prévio do sistema para o ajuste dos conjuntos *Fuzzy*.

POPOVIC e POPOVIC (2004) propuseram uma metodologia para representação dos estados da rede utilizando a Lógica *Fuzzy*. As cargas dos consumidores e os fluxos de potência na rede são representados por funções triangulares *Fuzzy*. Em seguida é utilizada uma árvore de decisão para a escolha do plano de restabelecimento a ser seguido, baseando-se no custo da energia não distribuída aos consumidores. O objetivo final dessa metodologia é a determinação da configuração que fornece o custo mínimo total da energia não suprida durante o processo de restabelecimento. No trabalho são

modelados conjuntos *fuzzy* somente para as cargas e fluxos nas linhas, sendo as tensões nas barras negligenciadas.

RODRÍGUEZ e VARGAS (2005) desenvolveram uma metodologia baseada em *Fuzzy-Heurística* para estimar o tempo total de restauração do sistema. Nas redes de média tensão, o tempo de restabelecimento depende de diversos fatores como o número de chaves operadas, localização e características técnicas das chaves, disponibilidade de equipes, tráfego de veículos nas ruas, condições climáticas entre outros. A dependência desses fatores e o alto grau de incerteza de alguns tornam difícil a tarefa de determinar um tempo de restabelecimento para um dado defeito. Essa abordagem deve fazer parte de um método de otimização para resolver o problema de restabelecimento da carga. A correta decisão sobre uma alternativa de restabelecimento no momento inicial do defeito pode ser feita baseada na estimativa de tempo proposta no trabalho.

LIM *et al.* (2006a) propuseram a utilização de *Lógica Fuzzy* para restabelecimento de sistemas de distribuição considerando a ocorrência de múltiplos defeitos. No trabalho foi apresentada uma metodologia de restabelecimento em dois passos: um sequencial e outro simultâneo. O algoritmo inicia com um esquema de restabelecimento sequencial que determina a ordem de restauração da cada parte do sistema, baseando-se na capacidade de fornecimento dos alimentadores próximos a região sem energia. Se esse método não encontrar uma solução viável, o segundo esquema de restauração simultânea é aplicado. Esse esquema tenta encontrar uma nova configuração que inclua todas as regiões sem energia através de um algoritmo de balanço de carga. Como principal vantagem, o método propõe um esquema de restabelecimento passo a passo, apresentando uma sequência viável de chaveamentos quando possível. Como desvantagens, não são considerados pelo método os níveis de tensão do sistema e nem a presença de consumidores prioritários.

Em (LIM *et al.*, 2006b), foi proposto o cálculo de um índice utilizando *Lógica Fuzzy* para determinar a capacidade de restabelecimento de cada trecho do sistema. Se os índices para cada trecho forem positivos, o sistema tem capacidade de se restabelecer utilizando chaves próximas da zona sem energia. Dessa forma, os autores propõem uma metodologia para reconfigurar a rede antes da ocorrência de um defeito, de tal forma que o índice proposto para todos os trechos sejam positivos, tornando assim o processo de restabelecimento após a ocorrência de um defeito mais fácil.

Em (WEN-HUI CHEN, 2010), foi desenvolvido um método baseado em *lógica Fuzzy* para avaliação de desempenho de diversas opções de restabelecimento de

sistemas de distribuição. Nessa metodologia, foram criados cinco conjuntos *Fuzzy* para avaliar os esquemas de restabelecimento, sendo eles: número de operações de chaveamento, disponibilidade de carga nos alimentadores reservas principais, disponibilidade de carga nos alimentadores reservas laterais, desbalanço da carga entre os alimentadores principais e desbalanço da carga entre os alimentadores principais laterais. Neste trabalho não são apresentados métodos para a determinação de planos de restabelecimento.

KAEWMANEE e SIRISUMRANNUKUL (2011) desenvolveram um algoritmo de decisão *Fuzzy* de forma que o operador do sistema possa usar expressões linguísticas para resolver o problema de restabelecimento do SDEE. O método desenvolvido utilizou conjuntos *Fuzzy* para representação dos objetivos, restrições e variáveis de decisão. Os principais objetivos da metodologia são o mínimo número de operações de chaveamento, corrente nos alimentadores dentro dos limites, tensões nas barras dentro dos limites, maximização da carga na área de blecaute e balanceamento da carga entre os alimentadores. Para tornar o processo de solução mais robusto, os autores representaram a rede através de uma estrutura de árvore conhecida como *Node Depth Encoding* (NDE). Esta estrutura não gera configurações malhadas ou desconexas. Como principal desvantagem, o método não apresenta uma solução passo a passo para o restabelecimento do SDEE.

II.2.3.2 Algoritmo Genético (AG)

O Algoritmo Genético (AG) é um algoritmo de otimização baseado nos princípios da genética e seleção natural. Este método foi introduzido no início dos anos 70 por John Holland (MUN *et al.*, 2001). Ele encontra a melhor solução no ambiente de procura do espaço de solução com a utilização de um método probabilístico e a troca hierárquica de informações entre os indivíduos.

As variáveis para solução do problema são primeiramente representadas usando cromossomos artificiais (sequência de caracteres). Em outras palavras, o problema é codificado em sequências que o AG possa manipular. Uma sequência de caracteres representa um estado (ponto de pesquisa) no espaço de solução. O AG modifica estas sequências (pontos de pesquisa) através de seleção natural e operadores genéticos, tais

como cruzamento e mutação. Após a convergência, as sequências são decodificadas e as soluções são obtidas (TOUNE *et al.*, 2002). Devido à sua capacidade para encontrar soluções globais ótimas para problemas de otimização combinatória de grande escala, os AGs são considerados métodos eficazes para solução de problemas de sistema elétricos, incluindo o restabelecimento de sistemas de distribuição de energia.

Em (FUKUYAMA e CHIANG, 1995), foi desenvolvido um algoritmo genético paralelo com o objetivo de gerar um procedimento para restabelecimento do sistema de distribuição, restaurando o máximo de carga possível e sujeito as restrições de tensão e corrente. A metodologia não considera um esquema de restabelecimento passo a passo.

Em (MUN *et al.*, 2001) foi apresentada uma metodologia baseada em algoritmo genético onde a função aptidão é formada pela ponderação de cinco objetivos: custo de operação das chaves, reserva de potência nos transformadores, reserva de corrente nos alimentadores, queda de tensão e balanço de carga nos alimentadores. O problema é resolvido utilizando-se três algoritmos. O primeiro verifica se a área sem energia pode ser alimentada pelo seu alimentador suporte através de uma chave normalmente aberta (NA). Se o alimentador suporte não possuir capacidade suficiente para restabelecer a área completa, o segundo algoritmo tenta suprir as cargas através de outros alimentadores. Caso as cargas não possam ser totalmente supridas pelos alimentadores de suporte, o terceiro algoritmo transfere a carga desses alimentadores para outros, de forma a aumentar sua capacidade reserva. A metodologia apresenta somente a configuração final da rede, apesar de estar explícito no texto do artigo que sua aplicação é adequada para operação do sistema em tempo real.

BRETAS *et al.* (2001) propuseram um método que usa Algoritmo Genético (AG) para o restabelecimento de sistemas de distribuição radiais. Para isso, é utilizada uma nova representação dos sistemas de distribuição através de Cadeias de Grafos. Essa nova representação evita a geração de configurações não factíveis, reduzindo consideravelmente a característica combinatorial do problema. A função aptidão proposta é composta de dois objetivos: reduzir o número de operações de chaves e minimizar desbalanço das cargas entre os alimentadores. Para estimar os estados da rede é utilizado Fluxo de Potência CC, o qual não considera os níveis de tensão nas barras do sistema.

Em (CHAVALI *et al.*, 2002), o Algoritmo Genético é utilizado para a determinação da sequência de chaveamento ótima e viável para restabelecer o sistema. Nesse trabalho, é considerado o fenômeno conhecido na literatura como *Cold Load*

Pickup (CLPU). A modelagem matemática do problema é a mesma utilizada em (UÇAK e PAHWA, 1994). Continuando na mesma linha de pesquisa, KUMAR *et al.* (2006) incluíram no problema as restrições operativas de rede, como limites de tensão e corrente ao longo dos alimentadores. Em (KUMAR *et al.*, 2010), foi incluída na modelagem do problema a presença de Geração Distribuída (GD). Nestes trabalhos os autores não consideram na modelagem a existência de chaves NA entre os alimentadores e nem a possibilidade de fechamento de laços momentâneos para o restabelecimento do sistema.

LUAN *et al.* (2002) empregaram o Algoritmo Genético para encontrar uma configuração viável para a rede após a ocorrência de um defeito. Um esquema conhecido como “permutação inteira” é utilizado para codificação dos indivíduos, onde cada cromossomo é uma lista dos índices das chaves. Dessa forma, cada cromossomo mapeia uma topologia viável da rede. Quando necessário, a metodologia define qual é a estratégia de descarte ótimo de carga. A função aptidão do problema é composta por cinco parcelas: demanda não suprida, perdas na rede, sobrecarga nos trechos, desvio das tensões nos barramentos e custo da operação das chaves. Como desvantagem, o método calcula o descarte de carga em blocos, ao invés de calculá-lo por barra. Com isso, pode-se descartar mais carga que o necessário para que o sistema possa ser restabelecido.

Em (KUMAR *et al.*, 2006), foi proposta uma metodologia para restabelecimento dos sistemas de distribuição utilizando Algoritmo Genético (AG). A metodologia considera a utilização de chaveamento de capacitores que podem aumentar a capacidade de transferência de potência, diminuindo a área do sistema sem energia. Além disso, são considerados dois tipos de chaves (manuais e automáticas) separadamente, pois seus tempos de operação são diferentes. Para o esquema de codificação foram utilizados cromossomos com genes binários que indicam a posição aberta e fechada de cada chave. A função aptidão pondera sete objetivos e restrições: minimizar as áreas sem energia, minimizar o número de operações de chaves manuais, minimizar o número de operações de chaves automáticas, minimizar as perdas, radialidade da rede, não violar limite de tensão, não violar o limite de corrente nos ramais e a priorização de consumidores. Ao fim da execução, a metodologia apresenta somente a configuração final do sistema.

Em (MANJUNATH e MOHAN, 2007), os autores realizaram uma modificação no Algoritmo Genético (AG) para obter uma resposta para o restabelecimento de forma mais rápida e sem perder a precisão. A seleção dos cromossomos para a geração

seguinte é baseada no desvio da função objetivo da geração anterior. Com isso, o número de iterações do problema é reduzido. A função objetivo do problema é restabelecer a maior quantidade de cargas possível sujeito a restrições de tensão, sobrecarga nas linhas e transformadores, radialidade e consumidores prioritários. O método apresenta como desvantagem a determinação somente da configuração final da rede. Além disso, os autores testaram defeitos no sistema que afetam apenas um pequeno número de barras, sendo difícil a avaliação da qualidade do método.

SANTOS *et al.* (2008) propuseram uma nova forma de representar os cromossomos de forma a melhorar o desempenho da metodologia de restabelecimento de sistemas de distribuição. Ao invés de utilizarem a representação tradicional de uma sequência de *bits* contendo os estados das chaves, os autores utilizaram uma notação conhecida na literatura como *Node-Depth Encoding (NDE)*. Com essa representação é possível gerar somente configurações radiais viáveis, melhorando o desempenho da metodologia. No trabalho é considerada como função objetivo a maximização da área restaurada, o mínimo número de operações de chaveamento além da minimização das perdas. O método fornece uma resposta para o problema de restabelecimento em um tempo computacional baixo, porém apresenta somente a configuração final da rede.

Em (GARCIA *et al.*, 2009), os autores propuseram a utilização de um algoritmo evolucionário multiobjetivo conhecido como SPEA2. Inicialmente a metodologia identifica todas as barras nas áreas desenergizadas. Em seguida, são identificados todos os caminhos possíveis entre os nós das áreas afetadas pelo defeito e as áreas com energia. Os cromossomos são codificados de forma que cada gene representa um nó localizado na área desenergizada do sistema. O valor de cada gene corresponde ao número do caminho entre o nó e a área energizada. Com essa codificação, sempre são geradas configurações radiais e conexas do sistema, diminuindo o espaço de busca. Como desvantagem, o método não fornece a sequência de operação das chaves.

SHENG SIQING *et al.* (2009) propuseram um método heurístico para a geração de configurações viáveis de rede para formar a população inicial do AG. Com isso os autores conseguiram melhorar a convergência do método, tornando possível aplicá-lo na operação do sistema elétrico. O método foi testado no sistema de 33 barras de (BARAN e WU, 1989) e os autores apresentaram como resultado somente o desempenho computacional do método, sem apresentar a configuração final da rede.

Utilizando uma implementação de Algoritmo Genético (AG) conhecida como NSGA-II (*The non-dominated sorting genetic algorithm-II*), HUANG XIANCHAO *et*

al. (2010) desenvolveram uma metodologia multiobjetivo para a solução do problema de restabelecimento. Neste trabalho, os autores consideraram a presença de Geração Distribuída e a possibilidade de operação em modo ilhado. Durante o processo de restabelecimento, o método maximiza o fornecimento de potência das GDs, evitando a necessidade de operações desnecessárias de chaveamento. No entanto, o algoritmo proposto apresenta somente a configuração final da rede.

II.2.3.3 Redes Neurais Artificiais (RNA)

As Redes Neurais Artificiais são estruturas computacionais que modelam fenômenos com base no comportamento das redes neurais biológicas. Estas estruturas possuem capacidade de aprendizado e adaptabilidade. Estas características potencializam sua aplicação no problema de restabelecimento, tendo em vista que o SDEE está sujeito a constantes variações, tais como o aumento da demanda e mudanças de configuração.

O trabalho (HSU e HUANG, 1995) foi desenvolvido como uma continuação do trabalho desenvolvido por (HSU e KUO, 1994). Neste trabalho, os autores utilizam uma rede neural multicamada *feedforward* para estabelecer o plano de restabelecimento do sistema. A rede neural recebe como entrada o estado atual da rede (carga, posição das chaves) e retorna como saída o estado desejado das chaves do sistema (Ligado/Desligado). A modelagem proposta pelos autores não considera os limites de tensão para o restabelecimento da rede, além de apresentar na saída da rede neural somente a configuração final das chaves do sistema.

II.2.3.4 Sistema Imunológico Artificial

Os Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA) tem como objetivo modelar a estrutura e as funções dos sistemas imunológicos biológicos em sistemas computacionais, investigando sua aplicação para a solução de problemas matemáticos e de engenharia.

LI, XU e ZHANG (2009) propuseram uma metodologia baseada em Algoritmo Imunológico (AI) para a solução do problema de restabelecimento do SDEE considerando a presença de Geração Distribuída (GD) no sistema. Os autores representam a rede como um grafo, onde as linhas e chaves são representadas por arcos. No trabalho, os autores apresentam um estudo comparativo entre os resultados obtidos com o AI e o Algoritmo Genético (AG). Para o mesmo problema, o AG atinge a melhor solução depois de 20 gerações, enquanto o AI atinge a mesma resposta em 4 iterações. No entanto, o método testa somente as configurações finais das redes de distribuição, não considerando o processo passo a passo de operação das chaves.

II.2.3.5 Cultura de Bactérias

De acordo com a seleção natural das espécies, indivíduos com estratégias eficientes de coleta de alimentos tendem a sobreviver, enquanto aqueles menos eficientes são eliminados ou transformados em espécies melhores. Nessa busca por alimento, o indivíduo toma ações para maximizar a energia utilizada por unidade de tempo nesta tarefa. Considerando todas as restrições presentes em sua própria fisiologia, tais como capacidades sensoriais, cognitivas e parâmetros ambientais, a evolução natural pode conduzir à otimização do processo (SERAPIÃO, 2009). A otimização através de Cultura de Bactérias é um algoritmo inspirado nos biomimetismos da bactéria e-coli e foi proposto inicialmente por Kevin M. Passino em 2002.

Em (LU *et al.*, 2010), os autores apresentaram um método para restabelecimento que considera a presença de várias nuances dos sistemas de distribuição, tais como descarte de cargas, consumidores prioritários e Geração Distribuída (GD). A função objetivo do problema é minimizar o número de operações de chaveamento. Para o cálculo dos estados do sistema, os autores utilizam um método conhecido na literatura como *Flexible Power Flow* (FPL), que permite calcular a frequência do sistema. Dessa forma é possível avaliar a real capacidade de fornecimento de potência ativa da GD quando operando no modo ilha (desconectada do sistema principal). Como principal desvantagem, apresenta como resposta somente a configuração final da rede restabelecida.

II.2.3.6 Colônia de Formigas

O método de Otimização de Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*) é um algoritmo computacional natural que imita o comportamento das formigas, sendo proposto inicialmente por M. Dorigo nos anos 90 (DORIGO, 1992). As formigas depositam feromônios no solo de forma a demarcar alguns caminhos favoráveis que devem ser seguidos pelos outros membros da colônia. O método de otimização explora o mesmo mecanismo para resolver problemas de otimização (YOUNG e ZHAO, 2003).

LU *et al.* (2009) propuseram um método de restabelecimento utilizando o algoritmo de colônia de formigas. A função objetivo do problema é maximizar a carga alimentada na área não suprida de acordo com a importância do consumidor e minimizar o número de operações de chaveamento. Se o sistema possuir a capacidade de restabelecer toda a carga, é adicionada na função objetivo uma parcela de minimização de perdas ativas. Além disso, foram consideradas no problema as condições operativas da rede, como limite de tensão nas barras, corrente nos trechos e operação radial. A metodologia proposta foi testada em sistemas tradicionais da literatura de 16, 33 e 69 barras. No entanto, foram aplicadas contingências simples, que isolam apenas uma barra, não sendo possível avaliar a real capacidade do método.

II.2.3.7 Enxame de Partículas

O algoritmo de otimização por enxame de partículas foi introduzido por James Kennedy e Russell Elberhart em 1995 (KENNEDY e ELBERHART, 1995). Este método surgiu de experiências com algoritmos que modelam o "comportamento social" de espécies de pássaros e cardumes de peixes. Cada indivíduo de uma população possui sua própria experiência e é capaz de estimar a qualidade dessa experiência. Como os indivíduos são sociais, eles também possuem conhecimentos sobre como seus vizinhos comportam-se. Esses dois tipos de informação correspondem à aprendizagem individual e à transmissão cultural respectivamente. Portanto, a probabilidade de que um determinado indivíduo tome certa decisão será função de seu desempenho no passado e do desempenho de alguns de seus vizinhos (SERAPIÃO, 2009).

Utilizando a técnica de Otimização por Enxame de Partículas, YE TIAN *et al.* (2009) propuseram um método para restabelecimento de sistemas de distribuição considerando a presença de geração distribuída (GD). Neste trabalho, a função objetivo proposta é minimizar o corte de carga na área afetada por um defeito e minimizar as perdas na rede. Para o cálculo dos estados da rede, foi utilizado no trabalho um fluxo de potência CC em conjunto com o método de Newton Raphson. As vantagens apresentadas por essa metodologia são a consideração de consumidores prioritários e de cortes de carga discretos. Complementando esse trabalho, YE TIAN *et al.* (2010), melhorou a modelagem da Geração Distribuída, executando um fluxo de potência na parte ilhada do sistema, ao invés de somente calcular o balanço entre carga e geração. Como principal desvantagem, os métodos não apresentam uma sequência de chaveamento.

YI-XIONG *et al.* (2011) propuseram a utilização do método de otimização de Enxame de Partículas para resolução do problema de restabelecimento em sistemas de distribuição com presença de Geração Distribuída (GD). O método dá especial atenção à capacidade de fornecimento de potência ativa das GD's quanto estão operando em modo ilha. Nesse sentido, os autores apresentam uma fórmula para o cálculo da potência máxima gerada pela GD baseando-se na máxima queda de frequência permitida no sistema. Da mesma forma que o trabalho anterior, o método apresenta somente a configuração final da rede, além de não considerar a presença de consumidores prioritários.

II.2.4 Métodos Heurísticos

De modo geral, devido à dimensão elevada de sistemas reais e de grande porte, uma solução prática do restabelecimento de SDEE requer o emprego de métodos de busca heurísticos, possivelmente conduzidos por uma metodologia simplificada de otimização (RADHA *et al.*, 2003). Estes métodos oferecem redução dos tempos de processamento em relação aos métodos de programação matemática, através da aplicação de um conjunto de regras estabelecidas de acordo com as características do problema que permitem reduzir o espaço de busca. Portanto, estes métodos requerem o conhecimento prévio do problema sob análise para uma correta aplicação das regras.

O grande atrativo que os métodos heurísticos trazem é a oportunidade de representar e utilizar conhecimentos especializados em máquinas (computadores) que tradicionalmente são utilizadas para resolver problemas numéricos. O conhecimento especializado significa conhecimento qualitativo, geralmente representado por regras práticas e mecanismos de inferência adotados por engenheiros, incluindo os procedimentos “receitas de bolo” utilizados pelos operadores dos sistemas de distribuição (MORELATO E MONTICELLI, 1989).

Os métodos heurísticos podem conduzir a soluções ótimas locais (KALANTAR *et al.*, 2006) tendo em vista que, apesar de possuírem as mesmas características básicas, as redes de distribuição possuem peculiaridades que as diferenciam entre si. Ou seja, um bom desempenho da aplicação de determinadas regras heurísticas em uma rede não implica em sucesso destas mesmas regras para todas as redes. Entre os métodos heurísticos, destacam-se o método conhecido como *Branch Exchange* (“troca de ligações”), Sistemas Especialistas e Busca Heurística (LUAN, IRVING e DANIEL, 2002).

II.2.4.1 Branch Exchange (“troca de ligações”)

O método consiste na avaliação de configurações radiais “vizinhas”, geradas a partir de uma configuração radial inicial através do fechamento de uma chave e da abertura de outra. Uma vez gerada uma nova configuração, outra configuração radial “vizinha” é obtida a partir da primeira. Durante essas operações de chaveamento trocado, uma solução aceitável é encontrada e o algoritmo converge. A maior desvantagem desse método é que ele é altamente dependente da condição inicial do sistema. Além disso, não há garantia que o número de chaveamentos será o mínimo necessário. Além disso, estes algoritmos podem começar a entrar em ciclo e a solução pode nunca ser encontrada (SHIRMOHAMMADI, 1992).

PEPONIS e PAPADOPOULOS (1995) propuseram uma metodologia para minimizar perdas durante a operação normal e outra para aliviar a sobrecarga e balancear as cargas entre os alimentadores durante os procedimentos de restabelecimento do sistema. As alterações de configuração são executadas trocando-se os estados das chaves, de forma que a radialidade seja sempre mantida no fim das manipulações. As chaves são escolhidas baseadas em índices calculados através de

dados obtidos do fluxo de potência. Considera-se dessa forma, que o restabelecimento pode ser tratado com um caso particular de balanço de carga. Com isso, não é garantido que o método restaure a maior quantidade de carga possível, uma vez que esse não é a função objetivo do problema.

LEI *et al.* (2000) foi apresentada uma metodologia de reconfiguração de rede para restabelecimento do sistema de distribuição de energia baseada em uma estratégia heurística de operações de troca de chaves. Essa troca de chaves consiste primeiramente no fechamento de uma chave para formar um laço e em seguida na abertura de outra, mantendo a rede radial. Nessa formulação, são considerados como objetivos prioritários a maximização da quantidade de carga restaurada, alívio ou eliminação da sobrecarga no sistema e minimização do número de operações de chaveamento. O método proposto utiliza uma modelagem trifásica da rede e pode ser aplicado em sistemas desbalanceados. Como principal vantagem, o método proposto apresenta uma sequência de chaveamento para restabelecer o SDEE. As principais desvantagens são a não consideração de consumidores prioritários e cortes de cargas.

II.2.4.2 Sistemas Especialistas

Também conhecido como método baseado em conhecimento, esta metodologia tem como objetivo principal tentar capturar o conhecimento e regras práticas utilizadas pelos operadores dos sistemas de energia elétrica. No caso do restabelecimento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, os sistemas especialistas utilizam essas regras para determinar as operações de chaveamento para restaurar a energia elétrica sob uma condição de falha. Essas informações são normalmente armazenadas em uma base de conhecimento na forma de regras. Essa base é normalmente interpretada pelo núcleo do sistema especialista, procurando imitar o processo de tomada de decisão dos operadores humanos. No entanto, o conhecimento heurístico é difícil de adquirir e interpretar. Uma vez que esse conhecimento é adquirido para um sistema específico em sua configuração normal de funcionamento, a base terá de ser construída para cada rede a qual o método for aplicado. Além disso, não há garantia de que, em um determinado caso, a solução encontrada será próxima da solução ótima (LUAN *et al.*, 2002).

LIU *et al.* (1988) apresentaram uma metodologia baseada em sistemas especialistas. A base de conhecimento foi construída utilizando aproximadamente 180

regras que são empregadas pelos operadores no esquema de restabelecimento. Essas regras foram adquiridas em conversas com os engenheiros de distribuição, operadores do sistema e na literatura sobre o assunto. O trabalho também propõe algumas regras que podem ser utilizadas na operação normal do sistema para redução das perdas no sistema. Como desvantagem, o método não considera os níveis de tensão nas barras do sistema, utilizando para o restabelecimento somente as potências das cargas e a capacidade livre dos alimentadores.

Em (TSAI e WU, 2002), foi desenvolvido um sistema especialista para definir as ações de chaveamento da rede. Essa metodologia foi desenvolvida aplicando-se as técnicas de modelagem orientação a objetos (MOO) de forma a representar os elementos da rede de distribuição. Neste trabalho, foram consideradas as variações diárias de carga. Segundo os autores, não foi considerado no processo de restabelecimento a existência de consumidores prioritários.

CHEN *et al.* (2002) apresentaram uma metodologia baseada em sistemas especialistas utilizando como modelo de inferência uma Rede Petri Colorida para o restabelecimento de sistemas de distribuição. As regras para o sistema especialista foram baseadas na experiência de operadores e em procedimentos operacionais padrões da *Taiwan Power Company (Taipower)*. Para garantir um suprimento de energia de qualidade às cargas críticas (hospitais, delegacias, etc.), este algoritmo foi desenvolvido de forma a restabelecer prioritariamente estes consumidores. A metodologia proposta dá preferência à operação de chaves automáticas ao invés de chaves manuais, diminuindo o tempo de conclusão do plano de restabelecimento. Uma vantagem deste método é realizar o descarte de cargas não prioritárias nas áreas não afetadas pelo defeito, diminuindo o número de chaveamentos necessários para o restabelecimento do sistema. Como desvantagem, apesar de fornecer uma sequência de chaveamentos, o método não garante que as primeiras chaves que são manobradas são aquelas que mais restabelecem a carga para a área desenergizada da rede.

Em (TSAI, 2008), foi desenvolvido um método de restabelecimento baseado em sistemas especialistas e utilizando os paradigmas da modelagem orientada a objetos (MOO) para a representação da rede de distribuição. O autor leva em consideração a variação de carga do sistema através das curvas típicas dos diversos consumidores (residenciais, comerciais e industriais). O método proposto apresenta como resposta diversos planos de restabelecimento, sendo que, o plano mais adequado, deve ser escolhido pelo operador do sistema.

Em KHALID *et al.* (2008), foi proposto uma metodologia baseada em regras (*Rule-Based Method*) para o restabelecimento de sistemas de distribuição. Os objetivos do método são: mínimo número de chaveamentos e redução das perdas (I^2R). O algoritmo proposto fornece múltiplas soluções para o usuário e recomenda a melhor configuração do sistema. Como desvantagens, o método considera a ocorrência somente de um defeito, além de não permitir o fechamento de laços no sistema.

II.2.4.3 Busca Heurística

A abordagem de Busca Heurística combina regras heurísticas e programação convencional para alcançar um esquema adequado de restabelecimento da rede de distribuição. Com um compromisso entre a aquisição de conhecimento e o desempenho da solução, as abordagens por buscas heurísticas têm sido consideradas confiáveis pelos operadores dos sistemas de distribuição (HUANG, 2003).

Este método compara um número de soluções candidatas de restauração com critérios de desempenho especificados. Regras heurísticas são utilizadas durante o processo de solução para reduzir o espaço de busca. Como resultado, as soluções podem ser alcançadas com um período de tempo aceitável. Esta abordagem é eficiente e não depende de conhecimento específico sobre um sistema. No entanto, o número de soluções possíveis será exageradamente grande, a menos que regras heurísticas eficazes sejam desenvolvidas (LUAN *et al.*, 2002).

Em (MORELATO E MONTICELLI, 1989), foi proposta a montagem de uma árvore de decisão binária com os estados operativos das chaves (aberto/fechado). A estratégia de solução envolve a busca em profundidade nessa árvore, utilizando conhecimentos específicos sobre o problema (heurísticas), incorporando procedimentos operacionais práticos. Além de restabelecer o sistema, a função objetivo do problema é balancear a carga entre os alimentadores. Como desvantagem, essa metodologia fornece apenas a configuração final da posição das chaves.

HSU *et al.* (1992) foi desenvolvido um plano de restabelecimento que satisfaz todos os requerimentos básicos utilizando regras que foram compiladas em entrevistas com os operadores da *Taiwan Power Company*. Essas regras heurísticas são utilizadas para diminuir o número de chaves candidatas para operação e para alcançar um plano de restabelecimento em um curto período de tempo. O algoritmo verifica inicialmente se

carga desalimentada pode ser suprida pelo alimentador principal. Caso não seja possível, parte da carga é transferida para alimentadores laterais, até que fique compatível com o alimentador principal. Essa metodologia só pode ser empregada se a rede possuir alimentadores laterais ao longo de todo alimentador principal.

Em SHIRMOHAMMADI (1992) foi apresentada uma metodologia heurística para restabelecimento através da reconfiguração do sistema. O algoritmo inicia com todas as chaves do sistema fechadas. Em seguida, as chaves que conduzem as menores correntes são abertas uma a uma. O algoritmo é finalizado quando todas as restrições do problema são atendidas. O autor ressalta como principal vantagem do seu método a não necessidade de conhecimento prévio do sistema a ser estudado, ao contrário das metodologias apresentadas que utilizam sistemas especialistas. As principais desvantagens do método são a apresentação somente da configuração final da rede e a não consideração de consumidores prioritários no processo de restabelecimento.

MIU *et al.* (1998) apresentou um algoritmo de busca baseado em índices associados às chaves. Esses índices são obtidos aplicando informações dos estados da rede obtidos através de fluxo de potência trifásico. A função objetivo do problema é restabelecer a maior quantidade de consumidores prioritários aliado à maximização da quantidade de carga total restaurada e minimização do número de chaveamentos. A metodologia proposta pelos autores resolve o problema passo a passo, verificando as restrições operativas a cada operação de chaveamento. A principal desvantagem dessa metodologia é a necessidade de passos adicionais visando o atendimento das restrições operacionais, ou seja, utiliza-se vários fluxos de potência para a determinação dos cortes de carga e para o tratamento das violações de fluxo de potência nas linhas e tensão nas barras. Complementando o trabalho, MIU *et al.* (2000) incluiu na modelagem do problema a utilização de capacitores para aumentar a quantidade de carga restabelecida. Além disso, também foi considerada a distância geográfica entre as chaves de forma a minimizar o tempo de viagem das equipes de manobra e o tempo de restabelecimento. Em seguida, KLEINBERG *et al.* (2011) deu continuidade ao trabalho, considerando no problema a possibilidade de corte de cargas e controle direto da demanda na área não afetada pelo defeito. Essa implementação trouxe como resultado a redução do número de operações de chaveamentos requeridos, aumento no número de consumidores atendidos e aumento total na carga restabelecida.

LIN e CHIN (1998) propuseram um algoritmo para resolver o problema de redução de perdas e restabelecimento usando três índices para a classificação das

chaves. A metodologia inicia com a rede malhada, fechando-se todas as chaves. O índice classifica as chaves dos laços, sendo que aquela que possui o maior índice é aberta. Nesse trabalho, a metodologia foi aplicada a sistemas conhecidos da literatura de 16 barras (CINVALAR *et al.*, 1988) e 33 barras (BARAN e WU, 1989). O método, no entanto, não apresenta uma sequência de chaveamento, além de determinar os índices para operação das chaves uma única vez após a ocorrência de defeito. Esse procedimento pode causar a seleção de chaves não ótimas para operação. A cada operação de chaveamento esses índices devem ser recalculados.

Em (TEO e GOOI, 1998), foram apresentados dois métodos para o restabelecimento. A primeira metodologia, nomeada de “Restabelecimento por Algoritmo”, faz uma busca no sistema pelas chaves entre a área energizada e a área não energizada. Em seguida, essas chaves são fechadas e é verificado se as mesmas restabelecem a ilha desenergizada. Caso não haja violações, essa chave é classificada como *full link* e é fechada. Caso ocorra alguma violação na rede, essa chave é classificada como *partial link*. Caso não seja encontrada nenhuma chave *full link* que restabeleça a rede, um novo algoritmo é executado de forma a descartar parte da carga e o sistema possa ser restabelecido através de uma chave *partial link*. A segunda metodologia utiliza uma base de dados de conhecimento contendo as ações de restabelecimento pré-definidas para cada tipo de falta no sistema.

Utilizando os paradigmas da Modelagem Orientada a Objetos (MOO), DREZGA *et al.* (2001) propuseram uma metodologia de restabelecimento de sistemas de distribuição. Inicialmente, todos os componentes da rede elétrica foram modelados como classes. Em seguida, uma classe chamada Reconfiguração executa o processo de restabelecimento fazendo uma busca nas chaves que possuem capacidade de restabelecer a parte desenergizada da rede. Essas chaves são classificadas pela importância e tamanho da carga e pelo número de consumidores atendidos. Como desvantagem, o método utiliza para cálculo dos índices, somente as condições pré-falta do sistema, não executando nenhuma metodologia para determinação dos estados da rede após a operação das chaves.

ZHEN-HONG e CHUANG-YE (2009) apresentaram um algoritmo de restabelecimento que representa a rede utilizando um modelo simplificado, através de uma modificação na matriz adjacência do sistema. Com isso, os autores desenvolveram um algoritmo simples e rápido que pode, juntamente com a automação do sistema de distribuição, fornecer uma lista de chaves para operação. O objetivo da metodologia

proposta foi minimizar a carga não suprida e diminuir perdas no sistema. Este método, no entanto, indica somente a topologia final da rede.

Em (MATHIAS-NETO *et al.*, 2010), foi proposta uma metodologia em que são avaliadas diversas configurações viáveis de rede que recompõe o sistema de acordo com a função objetivo. Essa função busca minimizar número de consumidores sem energia e o número de operações de chaveamento. Também são consideradas no problema as restrições operativas da rede (tensão, corrente e operação radial) e a presença de GD. Como desvantagem, o trabalho não apresenta um método para a determinação das configurações a serem avaliadas, além de apresentar somente a topologia final da rede.

ZIDAN e EL-SAADANY (2011) apresentaram um método de restabelecimento baseado no cálculo índices de sensibilidade para fechamento das chaves. Esses índices são calculados fechando-se todas as chaves normalmente abertas (NA) do sistema e executando-se um fluxo de potência balanceado ou desbalanceado, dependendo do sistema estudado. A chave com o maior índice é aberta e caso ocorra alguma violação, outra é escolhida para ser operada. Neste trabalho também é considerada a presença de geração distribuída (GD) no sistema. Caso este gerador esteja localizado na área afetada pelo defeito, ele é desconsiderado no processo de restabelecimento. Não é considerada nesta referência a ordem de fechamento das chaves e nem a presença de consumidores prioritários na rede.

II.2.5 Meta-heurísticas

Estas metodologias também são baseadas em regras heurísticas, mas permitem uma maior aproximação da solução ótima global em problemas complexos de natureza combinatória, através de uma varredura mais apurada do espaço de busca. Entre estes métodos destaca-se:

II.2.5.1 Busca Tabu (BT)

O método de Busca Tabu (BT) é um algoritmo de meta-heurística originalmente proposto para solução de problemas combinatoriais. Ele força o algoritmo a explorar

novas áreas do espaço de busca, evitando o ótimo local. A memória do método é uma ferramenta que ajuda na diversificação do procedimento de busca. Durante a procura por um ótimo global, o algoritmo mantém duas listas: Lista Elite (memória de longo prazo) e Lista Tabu (memória de curto prazo). As melhores soluções visitadas são armazenadas na Lista Elite. A Lista Tabu contém as soluções recentemente visitadas. Todas as vezes que uma nova solução ou um movimento é feito, ele é comparado com as soluções gravadas na Lista Tabu. Se a nova solução está na Lista Tabu ela é considerada ilegal e então é descartada. As soluções são mantidas na Lista Tabu durante certo número de operações conhecido como Período Tabu. À medida que as iterações prosseguem, soluções antigas são apagadas da Lista Tabu enquanto as novas são incorporadas nela. Sob certas condições, é necessário considerar o estado Tabu de um movimento porque ele produz uma solução melhor. Isto é conhecido como uma condição desejada e a solução é trazida para a Lista Elite. A atualização repetida das Listas Tabu e Elite por determinado número de iterações faz com que o algoritmo chegue próximo ao ótimo global. A principal vantagem do BT em relação aos convencionais Algoritmo Genético (AG) e *Simulated Annealing* (SA) situa-se no uso inteligente do histórico da pesquisa para influenciar os seus procedimentos de busca do futuro (TOUNE *et al.*, 2002) .

Este método foi aplicado no restabelecimento de SDEE em (MORI e FURUTA, 2005). Como resultado do trabalho, é mostrada a eficiência da Busca-Tabu quando comparada a outras metodologias como Algoritmo Genético e *Simulated Annealing*. Além disso, o autor considera a presença de Geração Distribuída (GD) no sistema.

DUQUE E MORÍÑIGO (2006) utilizaram o método de Busca Tabu para o restabelecimento do sistema, considerando múltiplos objetivos, tais como maximizar a carga transferida, minimizar o tempo requerido para a restauração e perdas de potência ativa na configuração final. A metodologia não apresenta uma sequência de chaveamento nem a presença de consumidores prioritários na rede.

Em (MORI e MUROI, 2011), foi apresentado um algoritmo para a solução do problema introduzindo um conceito conhecido com Amostragem Probabilística (*Probabilistic Sampling*) de forma a reduzir o esforço computacional na criação de soluções candidatas. Com essa melhoria no método, o autor obteve um ganho de 40% no tempo computacional em relação ao método de Busca Tabu tradicional. Da mesma forma que o artigo anterior, neste trabalho não é apresentada uma sequência de operação das chaves nem é representado a possibilidade de corte de carga.

II.2.6 Métodos de Programação Matemática

Os métodos de programação matemática consistem em ferramentas de otimização, as quais formulam a restauração de energia como um problema de otimização que pode ser solucionado utilizando, por exemplo, programação linear. Tais métodos podem ser aplicados a qualquer configuração de rede, podendo encontrar a solução ótima desde que o problema seja formulado adequadamente (LUAN *et al.*, 2002). Estes métodos podem considerar ou não a natureza discreta do problema de reconfiguração. Os métodos de otimização contínua, tais como Newton e programação linear *simplex*, geram soluções ótimas locais devido às aproximações necessárias para tratar as variáveis discretas como contínuas. Os métodos de otimização inteira mista permitem representar as variáveis discretas, mas o tempo de processamento elevado para a análise de redes reais limita sua aplicação.

Entre os métodos de programação matemática inteira mista dois se destacam: Busca em Profundidade e *Branch and Bound*. O primeiro não permite, em geral, determinar a solução ótima global, mas apresenta tempos de processamento baixos e fornece soluções sub-ótimas de boa qualidade. O segundo, por sua vez, pode conduzir à solução ótima global, mas o tempo de processamento torna-se proibitivamente elevado em redes de grande porte (SCHMIDT, 2005).

Em (AOKI *et al.*, 1989), foi apresentado o método do gradiente dual efetivo, uma extensão do método dual para programação inteira. O algoritmo proposto consiste em identificar as ilhas que não estão alimentadas e, a partir desse ponto, fechar as chaves dos alimentadores de fronteira. Em seguida, é verificado se houve alguma violação na rede. Caso afirmativo, a metodologia transfere a carga entre alimentadores de forma a eliminar essas violações. Para essa tarefa, é utilizada a ferramenta de otimização inteira a fim de escolher quais as chaves mais efetivas para eliminação da violação. A vantagem dessa metodologia é o fornecimento uma sequência de operação das chaves do sistema. No entanto, não considera em sua modelagem a existência de consumidores prioritários para o restabelecimento. Outra desvantagem do método é a necessidade vários passos adicionais ao fluxo de potência para o tratamento das violações de corrente nos alimentadores, tensão nas barras e cortes de carga.

Em (UÇAK e PAHWA, 1994), foi proposta uma aproximação analítica para o restabelecimento de sistemas de distribuição diante de um fenômeno conhecido como “*Cold Load Pickup*” (CLPU). Este fenômeno pode ser definido como a perda da

diversidade das cargas após um defeito na rede. Essa perda de diversidade pode causar, durante certo tempo, um aumento de 2 a 5 vezes na demanda total do sistema. Neste trabalho foi criado um modelo exponencial para as cargas e para o carregamento dos transformadores. O restabelecimento é feito passo a passo, de forma que uma sequência ótima de chaveamento das diferentes seções do sistema de distribuição é determinada de forma a não sobrecarregar os equipamentos da rede. Não é abordada nesse trabalho a questão de fechamento de chaves entre os alimentadores do sistema, apenas das chaves localizadas ao longo dos circuitos e na subestação.

Em (GRUPPELLI JUNIOR *et al.*, 2002), foi proposto um método para resolução do problema utilizando Programação Inteira Mista. Para isso, os autores modelaram o problema de otimização onde a função objetivo é minimizar o número de operações de chaveamento e maximizar o atendimento das cargas na área afetada por um defeito. Esse problema está sujeito às restrições de balanço de potência, radialidade e capacidade dos trechos. Na solução do problema, os autores utilizaram o *LINGO* (*Language for Interactive General Optimizer*), um biblioteca comercial para solução de problemas de otimização. Este algoritmo utiliza o método de *Branch and Bound* para solução do problema de programação inteira. No trabalho, as restrições de tensão são avaliadas somente após a execução do algoritmo, podendo levar o método a resultados equivocados. Além disso, somente a configuração final da rede é apresentada como resultado da metodologia.

MOMOH e CAVEN (2003) propuseram uma metodologia de otimização para resolução do problema de restabelecimento que combina a técnica de *Branch and Bound* para programação inteira com o Método de Pontos Interiores para resolução do problema de Programação Linear (PL). No trabalho, os autores utilizaram um Fluxo de Potência Linear simplificado para definição dos estados da rede. No problema são modeladas restrições de conectividade e radialidade. Como desvantagens, o método apresenta somente a topologia final da rede, não considera a presença de consumidores prioritários e calcula apenas o balanço de potência ativa nos nós da rede, negligenciando o balanço de potência reativa.

Utilizando um método conhecido como Programação Dinâmica (PD), CARVALHO *et al.* (2007) propuseram um algoritmo para o restabelecimento de sistemas de distribuição passo a passo para a determinação da sequência ótima de operação das chaves. Neste trabalho, os autores consideraram na modelagem o problema da movimentação das equipes de operação para manobra de chaves manuais

no sistema. O método apresentado não considera a presença de consumidores prioritários na rede e corte de carga dos consumidores afetados pelo defeito. Além disso, o tempo computacional para análise de diversas opções de chaveamento apresentadas pelo método torna sua utilização inviável para a operação dos sistemas de distribuição de grande porte.

PÉREZ-GUERRERO e HEYDT (2008b) propuseram a utilização de Relaxação Lagrangeana para resolução do problema de restabelecimento de sistemas de distribuição. Conforme o mesmo autor em (PÉREZ-GUERRERO e HEYDT, 2008a), o problema de restabelecimento de sistemas de distribuição é similar ao problema de *Unit Commitment* de geradores térmicos. No trabalho, o sistema de distribuição é representado pela subestação e os alimentadores a ela ligados, sendo considerado como uma barra única. O método divide o problema em intervalos de tempo discretos, indicando em cada um desses passos quais alimentadores devem ser ligados. O método proposto não considera os níveis de tensão das barras do sistema e não trabalha com a possibilidade de fechamento de chaves entre os alimentadores. Além disso, como o sistema é representado por uma barra única, não é possível representar as restrições elétricas da rede.

Utilizando a método *Branch and Bound*, PHAM, BÉSANGER e HADJSAID (2009) apresentaram um algoritmo para recomposição dos sistemas de distribuição na presença de Geração Distribuída (GD). Nesta abordagem, os autores consideram apenas geradores com capacidade de *Black-Start*. Esta capacidade indica que a GD tem capacidade de restauração autônoma, sem a necessidade de sua barra estar alimentada. O processo de restabelecimento foi dividido em três etapas. Na primeira, é verificado se geração distribuída (GD) tem capacidade de restabelecer carga da ilha onde ela está localizada. Na segunda etapa, é verificada a possibilidade de sincronismo entre as ilhas que possuem GD através do fechamento de chaves. Na etapa final é fechado o sincronismo entre as ilhas e a subestação do sistema de distribuição. As principais vantagens da utilização de GD no processo de restabelecimento de sistemas de distribuição são a reenergização de mais consumidores em um menor tempo, principalmente os prioritários, além da aceleração do processo completo de restabelecimento, evitando a manobra desnecessária de chaves. Neste trabalho, todas as possibilidades de sequências de chaves que restabelecem o SDEE são testadas para verificar se atendem as restrições do problema. Dependendo da dimensão do sistema de distribuição, essa análise pode-se tornar inviável.

II.2.7 Métodos Híbridos

Os algoritmos híbridos foram desenvolvidos para aliar as vantagens e minimizar as desvantagens dos métodos desenvolvidos para o restabelecimento de SDEE. Basicamente, estes modelos híbridos utilizam métodos de otimização matemática para a solução de problemas relaxados, juntamente com técnicas heurísticas ou inteligência artificial para otimizar o processo de reconfiguração.

Em (TOUNE *et al.*, 2002) foi apresentado um estudo comparativo entre as metodologias chamada pelos autores de “Algoritmos Heurísticos Modernos” para o restabelecimento de sistemas de distribuição. O autor investiga a aplicabilidade de quatro métodos existentes: Algoritmo Genético, *Simulated Annealing* Paralelo, Busca Tabu e Busca Tabu Reativo. O autor destaca que apesar de consumir muito tempo computacional, é importante para os sistemas de distribuição a determinação da sequência de chaveamento e da consideração de consumidores prioritários.

INAGAKI *et al.* (2006) propuseram um algoritmo híbrido que associa Algoritmo Genético (AG) com *Simulated Annealing* (SA) para restabelecimento de redes de distribuição de forma a melhorar a precisão das soluções. A modelagem dos cromossomos para o algoritmo genético é feita com o número de chaves do sistema e cada gene com sua posição. A precisão das soluções do algoritmo genético é aumentada utilizando-se um bom método de otimização local, que no caso do trabalho é o *Simulated Annealing*. Na metodologia são considerados a priorização de consumidores e os diferentes tipos de chaves do sistema (manuais e automáticas). Porém, não é considerada no problema a sequência de operação das chaves.

Em (CHAO-MING HUANG e YANN-CHANG HUANG, 2010), foi proposto um algoritmo híbrido que combina o método de Colônia de Formigas com *Lógica Fuzzy*. Dessa forma, o problema de otimização inteira é resolvido utilizando o método de Colônia de Formigas enquanto os conjuntos *Fuzzy* são utilizados para modelagem da função objetivo e restrições do problema. Uma desvantagem do método é que somente o balanço e os limites de carregamento dos ramos do sistema são considerados, negligenciando os valores e limites de tensão das barras.

ZHU *et al.* (2010) desenvolveram um método híbrido que combina a utilização de Algoritmo Genético e Colônia de Formigas. Neste trabalho, os autores mostraram que a combinação dos dois métodos produz esquemas de restabelecimento melhores e mais rápidos quando comparado com as metodologias analisadas separadamente. O

método não apresenta em sua modelagem a presença de consumidores prioritários nem corte de carga.

HUANG *et al.* (2011) propuseram a utilização de uma rede neural para produzir planos de restabelecimento após a ocorrência de um defeito no sistema considerando vários patamares de carga. Para treinar a rede neural, os autores utilizaram um método de computação evolucionária conhecido como EDE (*Enhanced Differential Evolution*), obtendo melhores resultados do que outras metodologias de treinamento como o Algoritmo Genético e o Gradiente Estocástico. A metodologia apresenta como grande vantagem a produção quase instantânea de planos de restabelecimento após a ocorrência de um defeito no sistema de distribuição. Da mesma forma que apresentado em (CHAO-MING HUANG e YANN-CHANG HUANG, 2010), o método somente considera o balanço de carga dos ramos do sistema, negligenciando os valores e limites de tensão das barras. Uma desvantagem do método é que a rede neural proposta apresenta somente a topologia final de restabelecimento da rede, não fornecendo uma sequência viável de operação das chaves. Além disso, caso ocorram variações de topologia no sistema, a rede neural deve ser retreinada.

II.3 Conclusões

Este capítulo apresentou uma revisão das metodologias e dos trabalhos publicados sobre o restabelecimento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE). Pode-se observar que:

- (i) A utilização de métodos de busca exaustiva permite determinar a solução ótima global destes problemas. No entanto, esta solução requer um considerável esforço computacional mesmo para SDEE de proporções moderadas. Tendo em vista que o problema de restabelecimento pode ser desenvolvido para operação em tempo real, a utilização desta metodologia torna-se inviável.
- (ii) A solução do problema também pode ser obtida pelo uso de métodos de programação matemática inteira mista. Como no item anterior o tempo de processamento pode ser elevado, limitando sua aplicação.
- (iii) Uma solução prática visando a redução da dimensão e da complexidade do problema de restabelecimento de SDEE é o emprego de métodos

heurísticos, que necessitam de conhecimento prévio do problema para sua aplicação. Dentro dessa metodologia, diversas técnicas utilizando sistemas especialistas foram utilizadas para desenvolver planos de restabelecimento. No entanto a desvantagem dessas técnicas é a dificuldade em representar uma grande base de conhecimento, e projetar um sistema de inferência que extraia conclusões a partir de um grande volume de conhecimento baseado em regras (HUANG, 2003). Além disso, os métodos baseados em Heurísticas e experiências podem produzir soluções que podem nem ser sub-ótimas (FUKUYAMA e CHIANG, 1996).

- (iv) A utilização de inteligência artificial e de algoritmos evolutivos permite uma maior flexibilidade e a representação de incertezas no processo de solução, além de permitir a modelagem de aspectos não determinísticos inerentes ao planejamento e à operação dos SDEE. A abordagem baseada em algoritmos evolutivos geralmente leva muito tempo para sistemas de grande escala, e por isso às vezes, não é viável para as aplicações em tempo real (LIM *et al.*, 2006a). Um problema comum a estas metodologias é o tratamento da dinâmica dos sistemas de distribuição, que mudam suas condições operacionais e topologias com muita frequência, o que obriga a atualização dos parâmetros destes algoritmos.
- (v) Outra opção apresentada é a utilização dos algoritmos híbridos que têm como objetivo combinar os métodos de restabelecimento existentes, aliando as vantagens de cada um e minimizando suas deficiências.

Após a análise dos trabalhos encontrados na literatura, uma ferramenta ideal para recomposição de SDEE deve atender aos seguintes requisitos:

- Representar os valores de tensão nas barras, bem como seus limites;
- Representar os limites de fluxo nas linhas;
- Representar os balanços de potência ativa e reativa nas barras;
- Apresentar como resposta uma sequência de operações de chaveamento e não somente a topologia final da rede;
- Representar a presença de consumidores prioritários;
- Representar a porcentagem de carga a ser restabelecida;

- Resolver o problema sem a necessidade de passos adicionais para o tratamento de restrições de tensão nas barras e fluxo nas linhas;
- Apresentar um tempo de processamento baixo para que as ações de restabelecimento sejam tomadas o mais rápido possível, a fim de evitar penalidades às concessionárias de energia elétrica.

Conclui-se, portanto, que o estudo de métodos de restabelecimento dos sistemas de distribuição que atendam os requisitos acima e tratem de forma adequada todas as características reais de um sistema de distribuição, constitui um tema promissor para a pesquisa e desenvolvimento.

Capítulo III

Modelagem Matemática do Problema de Restabelecimento

III.1 Introdução

O restabelecimento em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) pode ter múltiplos objetivos. Dentre eles pode-se citar a restauração da maior quantidade de carga, do maior número de consumidores, minimização da energia não distribuída e melhoria dos indicadores de continuidade. Além disso, todos os objetivos devem ser alinhados ao atendimento dos limites técnicos de tensão nas barras e fluxo nas linhas.

Neste trabalho é proposto um algoritmo de restabelecimento ótimo do sistema de distribuição de energia elétrica (ARESDEE) que tem como objetivo recompor o sistema de distribuição após a ocorrência de um defeito, restaurando a maior quantidade de carga possível. Este algoritmo é baseado no fechamento sequencial das chaves a partir da topologia do sistema após o isolamento do defeito. Essas chaves são fechadas baseando-se em um índice obtido através da solução de um Fluxo de Potência Ótimo (FPO). Em sistemas onde existe a restrição de operação radial, a cada fechamento de chave é verificada a ocorrência de formação de laços. Caso essa situação ocorra, uma chave desse laço é escolhida para ser aberta de modo a manter a estrutura radial do sistema, respeitando os limites operacionais.

O algoritmo (ARESDEE) proposto traz duas vantagens quando comparado com a maioria dos métodos propostos na literatura. A primeira é o desenvolvimento de um novo índice para operação das chaves baseado em FPO. A segunda é o fornecimento de uma sequência de chaveamento viável, dentro dos limites operacionais previamente estabelecidos para o restabelecimento do sistema de distribuição.

III.2 Teoria de Grafos aplicada à Análise de Redes Elétricas

No processo de restabelecimento do sistema de distribuição de energia elétrica é importante que se conheça a topologia da rede. Antes de fazer qualquer análise deve-se verificar quais barras estão ilhadas devido à ocorrência de um defeito no sistema.

Durante o processo de solução do problema, é necessário também verificar se o fechamento de uma chave causa a formação de um laço em sistemas onde a radialidade é uma restrição. Além disso, quando se deseja verificar a capacidade disponível de transferência de potência de uma chave, deve-se identificar o caminho entre a barra terminal dessa chave e a subestação.

Para resolver esses problemas pode-se utilizar a teoria de grafos. Essa teoria é aplicada na solução de inúmeros problemas práticos nas áreas de engenharia, física, linguística, ciências sociais e biológicas. O emprego de grafos na previsão do comportamento de circuitos elétricos originou-se com G. Kirchhoff em 1847 e foi melhorado por J. C. Maxwell em 1892. No início a vantagem de se utilizar tal metodologia era muito pequena, mudando vertiginosamente com o advento dos computadores digitais de alta velocidade de processamento (TOMIM, 2004). No Apêndice A estão detalhadas todas as definições da Teoria de Grafos necessárias para o entendimento do assunto.

III.2.1 Aplicações ao problema de Restabelecimento de SDE

Considere a rede fictícia mostrada na Figura III.1 composta por sete barras. A barra número 1 foi considerada a barra de geração.

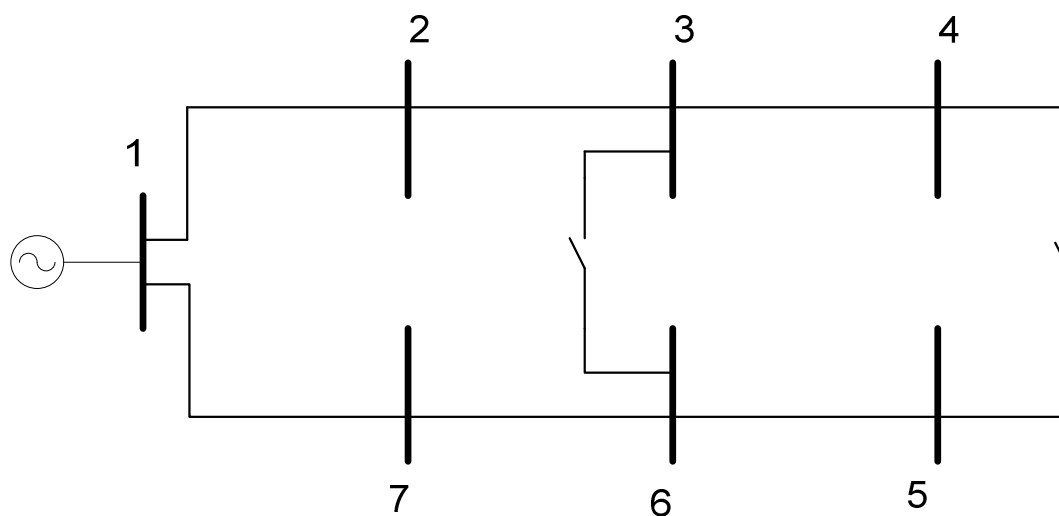


Figura III.1- Sistema Exemplo

A topologia dos circuitos elétricos é totalmente independente dos elementos que os compõem, referindo-se inteiramente à sua geometria ou estrutura. Portanto, pode-se associar o circuito elétrico a um grafo que consiste, basicamente, em um conjunto de vértices conectados através de arestas.

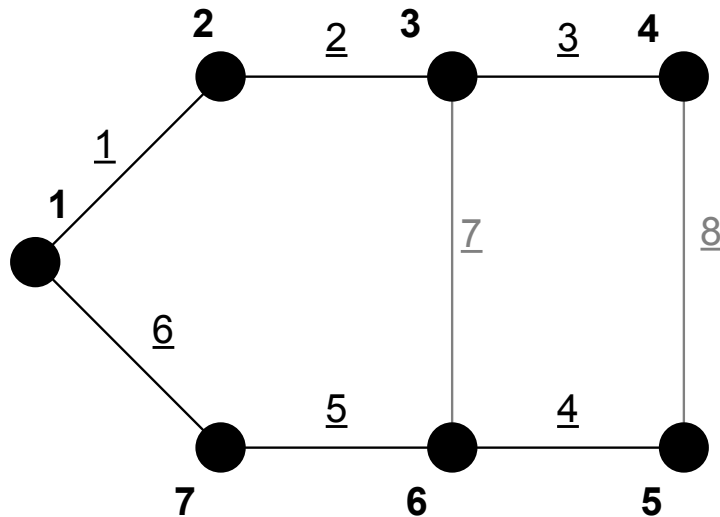


Figura III.2- Grafo associado ao sistema da Figura III.1

Na Figura III.2, os números sublinhados identificam as arestas enquanto os não sublinhados nomeiam os vértices. As arestas 7 e 8 em cinza representam as chaves do sistema, que dependendo dos seus estados (aberta ou fechada), podem ou não fazerem parte do grafo.

III.2.1.1 Identificação de barras ilhadas no sistema

No problema de restabelecimento dos SDEE é importante que se saiba quais barras do sistema estão ilhadas após o defeito em um dos circuitos. Para isso, deve-se montar a árvore do sistema, tendo como nó inicial a barra da subestação. Os vértices que não pertencerem a essa árvore são os nós ilhados do sistema.

Na Figura III.3, considera-se o sistema exemplo proposto após ocorrência de um defeito entre os as barras 1 e 2. Dessa forma, as barras 2, 3 e 4 ficam desenergizadas.

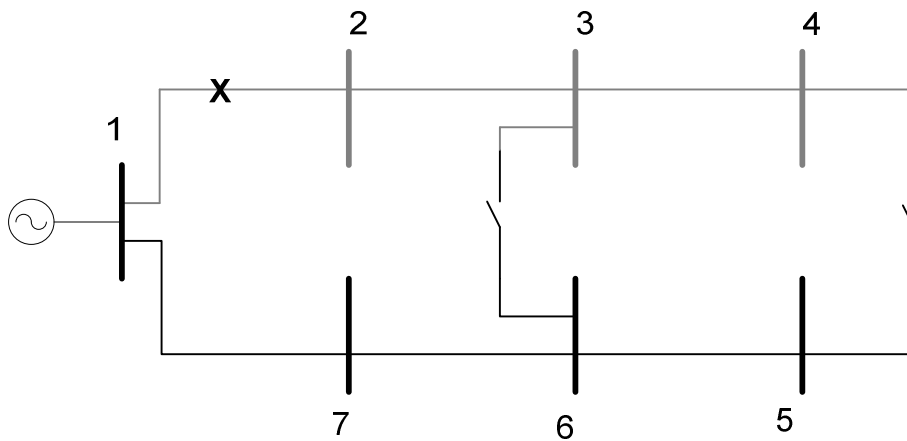


Figura III.3- Sistema Exemplo com Defeito entre as barras 1 e 2.

Na Figura III.4, verifica-se que as barras da área desalimentada não fazem parte da árvore do sistema.

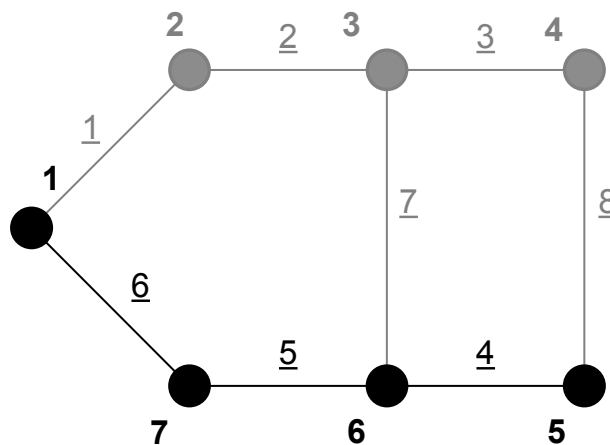


Figura III.4- Árvore do sistema após defeito entre as barras 1 e 2

III.2.1.2 Identificação de Laços do Sistema

Em SDEE onde a operação radial é uma restrição, é importante que para cada chave fechada no algoritmo de restabelecimento, verifique-se a formação de laços. Essa situação pode ocorrer, por exemplo, quando são fechadas duas chaves para recompor a mesma área afetada do sistema.

De acordo com (BALABANIAN e BICKART, 1981), para um dado grafo, há uma relação de ortogonalidade entre sua matriz de incidência A_f e sua matriz de circuitos fundamentais B_f , de tal forma que:

$$A_f B_f^t = 0 \quad (\text{III.1})$$

Onde:

A_f Representa a matriz incidência reduzida;

B_f^t Representa a matriz de circuitos fundamentais transposta.

Através da manipulação algébrica apresentada em (TOMIM, 2004), a matriz de circuitos fundamentais pode ser representada pela Equação (III.2).

$$B_r^t = -A_r^{-1} A_e \quad (\text{III.2})$$

Onde:

B_r^t Representa a matriz de circuitos fundamentais dos ramos transposta;

A_r Representa a matriz incidência dos ramos;

A_e Representa a matriz incidência dos elos.

Como exemplo da aplicação dessa metodologia, a chave entre as barras 3 e 6 foi fechada no sistema exemplo, conforme apresentado na Figura III.5.

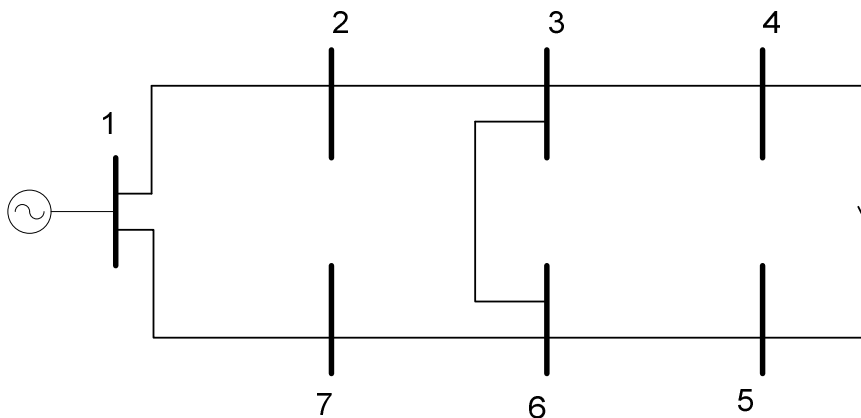


Figura III.5- Sistema teste com a chave entre as barras 3 e 6 fechada

O primeiro passo para identificar os laços é montar a árvore do sistema. As arestas pertencentes à árvore do sistema são chamadas ramos, enquanto as que não foram consideradas são chamados elos. Na Figura III.6 é apresentada uma das possíveis árvores do sistema. A aresta 7 não pertence à árvore proposta, sendo considerada um elo.

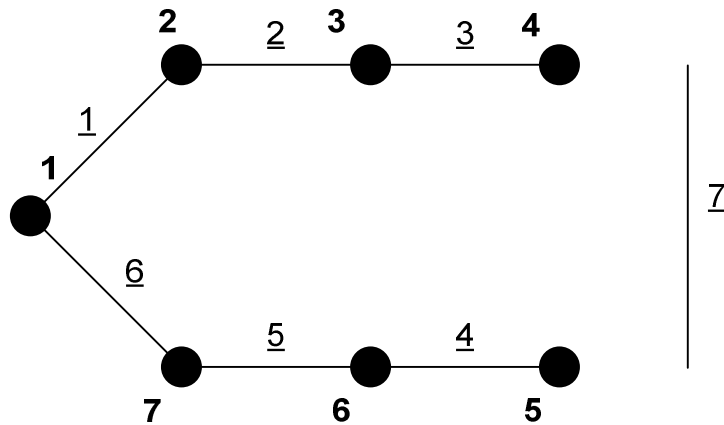


Figura III.6- Árvore do sistema exemplo proposto na Figura III.5

Em seguida, deve-se montar a matriz incidência completa do sistema conforme a lei de formação indicada no item A.3. Em (III.3) é apresentada a matriz incidência completa do sistema onde as linhas são os vértices e as colunas as arestas. No caso do estudo da topologia da rede, pode-se adotar qualquer direção para orientação para os ramos e elos.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 a \ r \ e \ s \ t \ a \\
 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \\
 v \ 1 \left[\begin{array}{ccccccc}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 e \ 2 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 r \ 3 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 A_a = t \ 4 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 i \ 5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 c \ 6 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\
 e \ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}
 \quad (III.3)$$

No entanto, verifica-se que a soma de todas as linhas de A_a resulta em uma linha nula. Esta característica é comum a todos os grafos já que cada coluna possui apenas dois elementos não nulos, 1 e -1 . Isto se traduz em uma dependência linear entre as linhas da matriz A_a . Essa restrição pode ser eliminada retirando-se uma linha da matriz. Nesse exemplo, o vértice 7 é retirado gerando matriz A_f , que é chamada matriz incidência reduzida. Essa matriz para o sistema proposto é apresentada em (III.4).

$$A_f = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (\text{III.4})$$

O próximo passo é dividir a matriz A_f em duas submatrizes: matriz incidência dos ramos (A_r) e matriz incidência dos elos A_e . Essas duas novas matrizes podem ser vistas em (III.5).

$$A_f = [A_r \mid A_e] = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & | & 7 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & | & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & | & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & | & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (\text{III.5})$$

ramos *elo*

Aplicando as matrizes (A_r) e (A_e) na equação (III.2) chega-se a matriz (B_r) que corresponde a submatriz de ramos da matriz de circuitos fundamentais (B_f). Através de (III.6) pode ser visto que o sistema exemplo possui apenas o laço a , que é formado pelos ramos 1, 2, 5 e 6.

$$B_r = a \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Adicionando a submatriz (B_r) à submatriz dos elos (B_e), é formada a matriz de circuitos fundamentais (B_f). Dessa forma, além dos ramos citados acima, o laço a também é formado pelo elo 7, conforme (III.7).

$$B_f = a \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Na Figura III.7 é representado o grafo do sistema proposto, representado em vermelho o laço identificado pela metodologia proposta.

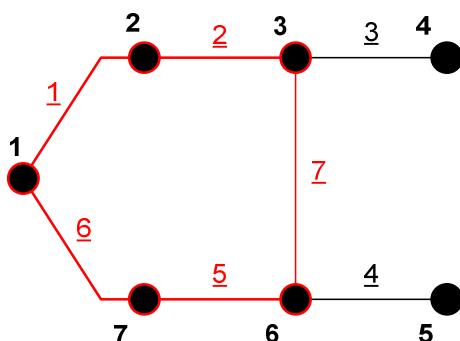


Figura III.7- Grafo do sistema exemplo proposto com o laço representado em vermelho

III.2.1.3 Identificação de caminhos no sistema

Quando se deseja verificar a capacidade disponível de corrente de uma chave do SDEE, é necessário identificar o caminho entre a barra terminal dessa chave e a subestação. Para essa tarefa, deve-se utilizar um algoritmo eficiente de cálculo de caminhos em grafos.

O algoritmo de *Dijkstra* é o mais conhecido algoritmo para cálculo de custo mínimo entre os vértices de um grafo. No caso de restabelecimento de sistemas de distribuição, ele pode ser utilizado para determinar o caminho entre todas as barras e a subestação. Nesse caso, adotaremos os pesos das arestas iguais a 1.

Associados a cada vértice do grafo existem 3 vetores: *visitado*, *distância* e *caminho*. O vetor *visitado* contém todos os vértices para os quais já foram determinados os menores caminhos. No vetor *caminho* é armazenado o vértice predecessor do vértice atual. A distância entre o nó fonte (raiz da busca) e o vértice atual é armazenada no vértice caminho.

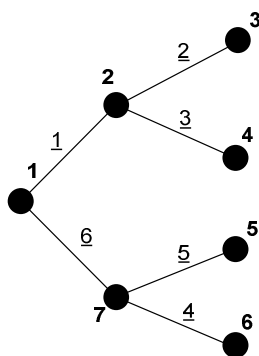


Figura III.8 – Grafo exemplo para o cálculo dos caminhos.

Considerando o grafo exemplo da Figura III.8, define-se como nó fonte o nó 1. No caso do restabelecimento de SDEE esse nó deve ser a barra da subestação. O valor da distância do nó fonte é inicializado com 0, enquanto os outros nós tem suas distâncias inicializadas com um valor muito elevado. Portanto, os vetores do problema apresentam-se conforme Tabela III.1.

Tabela III.1- Algoritmo de *Dijkstra* – 1º Passo

Vértice	<i>visitado</i>	<i>distância</i>	<i>caminho</i>
1	sim	0	-
2	não	∞	-
3	não	∞	-
4	não	∞	-
5	não	∞	-
6	não	∞	-
7	não	∞	-

A partir do vértice 1, consultam-se os vértices adjacentes a ele. Para um vértice adjacente qualquer, calcula-se a distância entre eles utilizando o seguinte algoritmo:

$$\begin{aligned} \text{Se } \textit{distância}[\textit{adjacente}] > \textit{distância}[\textit{atual}] + \textit{peso}(\textit{atual}, \textit{adjacente}) \\ \textit{distância}[\textit{adjacente}] &= \textit{distância}[\textit{atual}] + \textit{peso}(\textit{atual}, \textit{adjacente}) \\ \textit{caminho}[\textit{adjacente}] &= \textit{atual} \end{aligned}$$

Do caso do grafo atual, os vértices 2 e 7 são adjacentes ao vértice 1. Dessa forma, seus valores associados aos vetores distâncias e caminho são atualizados conforme Tabela III.2.

Tabela III.2- Algoritmo de *Dijkstra* – 2º Passo

Vértice	<i>visitado</i>	<i>distância</i>	<i>caminho</i>
1	sim	0	-
2	não	1	1
3	não	∞	-
4	não	∞	-
5	não	∞	-
6	não	∞	-
7	não	1	1

Dentre os nós não pertencentes ao vetor *visitados* escolhe-se aquele com a menor distância. Pode-se escolher o vértice 2 ou 7, pois ambos têm valores de distância iguais a 1. Neste caso, escolhe-se o vértice 2, marcando o mesmo na lista de visitados. O vértice 2 é marcado como nó fonte e a partir dele consultam-se todos os vértices

adjacentes não visitados anteriormente calculando-se as novas distâncias. Dessa forma, os vetores associados ao problema apresentam os valores conforme Tabela III.3.

Tabela III.3- Algoritmo de *Dijkstra* – 3º Passo

Vértice	<i>visitado</i>	<i>distância</i>	<i>caminho</i>
1	sim	0	-
2	não	1	1
3	não	2	2
4	não	2	2
5	não	∞	-
6	não	∞	-
7	não	1	1

Novamente, dentre os nós não pertencentes ao vetor *visitado* escolhe-se aquele com a menor distância. Neste caso, inspecionando-se a Tabela III.3 escolhe-se o vértice 7 e o mesmo é marcado na lista de visitados. O vértice 7 é marcado como nó fonte e a partir dele a consulta aos vértices adjacentes não visitados anteriormente calculando-se as novas distâncias. Dessa forma, os vetores associados ao problema apresentam os valores conforme Tabela III.4.

Tabela III.4- Algoritmo de *Dijkstra* – 4º Passo

Vértice	Visitado	Distância	Caminho
1	Sim	0	-
2	Sim	1	1
3	Sim	2	2
4	Não	2	2
5	Não	2	7
6	Não	2	7
7	Sim	1	1

Os procedimentos do Algoritmo de *Dijkstra* devem ser continuados até que todos os nós sejam visitados. A solução final do algoritmo é mostrada na Tabela III.5.

Tabela III.5- Algoritmo de *Dijkstra* – Solução final

Vértice	Visitado	Distância	Caminho
1	Sim	0	-
2	Sim	1	1
3	Sim	2	2
4	Sim	2	2
5	Sim	2	7
6	Sim	2	7
7	Sim	1	1

Para montar o caminho entre a barra atual e nó raiz, deve-se utilizar o vetor *caminho*. Por exemplo, partindo do vértice 6, seu vértice antecessor, indicado no vetor *caminho* é o vértice 7. Da mesma forma, a partir do vértice 7, seu vértice antecessor é o vértice 1, que é o nó raiz. Nesse caso o caminho entre a barra 6 e a subestação do sistema são as barras números 6,7 e 1.

III.3 Metodologia Proposta para Restabelecimento Ótima de SDEE

Um problema geral de otimização não linear com restrições pode ser formulado como:

$$Max\ FOB(\bar{z}) \quad (III.8)$$

s.a.

$$\bar{h}(\bar{z}) = 0 \quad (III.9)$$

$$\bar{z}^{\min} \leq \bar{z} \leq \bar{z}^{\max} \quad (III.10)$$

Onde:

- \bar{z} Representa o vetor de variáveis de otimização;
- FOB Representa a função objetivo do problema;
- $\bar{h}(\bar{z})$ Representa o vetor de restrições de igualdade do problema;
- $\bar{z}^{\min}, \bar{z}^{\max}$ Representam os vetores de limites mínimos e máximos de \bar{z} , respectivamente.

Em um problema de otimização de sistemas elétricos, o vetor \bar{z} contém as variáveis que representam as tensões nodais em módulo e fase, as potências ativa e reativa injetadas em cada barra. Incluindo-se as variáveis de folga (sl , su) nas restrições de desigualdade (III.10), essas passam a ser restrições de igualdade. Dessa forma, o problema de otimização não linear passa a ser formulado como:

$$Max\ FOB(\bar{z}) \quad (III.11)$$

s.a.

$$\bar{h}(\bar{z}) = 0 \quad (III.12)$$

$$\bar{z} - \bar{sl} = \bar{z}^{\min} \quad (III.13)$$

$$\bar{z} + \bar{su} = \bar{z}^{\max} \quad (III.14)$$

$$\bar{sl}, \bar{su} \geq 0 \quad (III.15)$$

As restrições de desigualdade (III.15) são do tipo (“ ≥ 0 ”), ou seja, as restrições de desigualdade originais foram transformadas em variáveis não negativas, sendo tratadas através do Método Primal-Dual de Pontos Interiores (MPI) (KARMAKAR, 1991) (GRANVILLE,1994). Este método utiliza uma função de penalidade conhecida como barreira logarítmica ($-\sum \ln(s)$), que transforma o problema original em uma sequência de problemas parametrizados pelo parâmetro barreira (μ), como mostrado a seguir:

$$Max\ FOB(\bar{z}) - \mu \cdot \sum_{i=1}^n \ln(sl_i) - \mu \cdot \sum_{i=1}^n \ln(su_i) \quad (III.16)$$

s.a.

$$\bar{h}(\bar{z}) = 0 \quad (III.17)$$

$$\bar{z} - \bar{sl} = \bar{z}^{\min} \quad (III.18)$$

$$\bar{z} + \bar{su} = \bar{z}^{\max} \quad (III.19)$$

Em (III.16), n é o número de variáveis de otimização que apresentam limites.

Com o objetivo de transformar o problema de otimização (III.16) a (III.19) sujeito a apenas restrições de igualdade em um problema de otimização sem restrições, utiliza-se a função Lagrangeana. Esta função é obtida através de uma combinação linear entre as restrições do problema, na qual os coeficientes desta combinação são os multiplicadores de Lagrange (λ, π_l, π_u). Assim, a função lagrangeana referente ao problema (III.16) a (III.19) pode ser escrita como:

$$L = FOB(\bar{z}) - \mu \cdot \sum_{i=1}^n \ln(sl_i) - \mu \cdot \sum_{i=1}^n \ln(su_i) - \bar{\lambda}^T \cdot \bar{h}(\bar{z}) - \bar{\pi}_l^T \cdot (\bar{z} - \bar{sl} - \bar{z}^{\min}) - \bar{\pi}_u^T \cdot (\bar{z} + \bar{su} - \bar{z}^{\max}) \quad (III.20)$$

Aplicando-se as condições de otimalidade de primeira ordem de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) (WRIGHT, 1997) e o método de Newton-Raphson ao sistema de equações resultante, obtém-se:

$$(\nabla^2 FOB(\bar{z}) - \bar{\lambda}^T \cdot \nabla^2 \bar{h}(\bar{z})) \cdot \Delta \bar{z} - \nabla \bar{h}(\bar{z}) \cdot \Delta \bar{\lambda} - \Delta \bar{\pi}_l - \Delta \bar{\pi}_u = \quad (III.21)$$

$$-(\nabla FOB(\bar{z}) - \bar{\lambda}^T \cdot \nabla \bar{h}(\bar{z}) - \bar{\pi}_l - \bar{\pi}_u)$$

$$\nabla \bar{h}(\bar{z}) \cdot \Delta \bar{z} = -\bar{h}(\bar{z}) \quad (III.22)$$

$$\Delta \bar{z} - \Delta \bar{s}_l = -(\bar{z} - \bar{s}_l - \bar{z}^{\min}) \quad (III.23)$$

$$\Delta \bar{z} + \Delta \bar{s}_u = -(\bar{z} + \bar{s}_u - \bar{z}^{\max}) \quad (III.24)$$

$$-\Pi_l \cdot \Delta \bar{s}_l - S_l \cdot \Delta \bar{\pi}_l = -(\mu \cdot e - S_l \cdot \bar{\pi}_l) \quad (III.25)$$

$$\Pi_u \cdot \Delta \bar{s}_u - S_u \cdot \Delta \bar{\pi}_u = -(\mu \cdot e + S_u \cdot \bar{\pi}_u) \quad (\text{III.26})$$

Onde:

- Π_l, Π_u Representam matrizes diagonais cujos elementos são as componentes dos vetores $\bar{\pi}_l$ e $\bar{\pi}_u$ respectivamente;
- S_l, S_u Representam matrizes diagonais cujos elementos são as componentes dos vetores \bar{s}_l e \bar{s}_u respectivamente, $e^T = [1, \dots, 1]$.

Manipulando-se o sistema de equações (III.21)(III.26), obtém-se a seguinte representação matricial:

$$\begin{bmatrix} W & -\bar{J}^T \\ -\bar{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{g}(\bar{z}) \\ \bar{h}(\bar{z}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

$$H = \nabla^2 FOB(\bar{z}) - \bar{\lambda}^T \cdot \nabla^2 \bar{h}(\bar{z}) + S_l^{-1} \cdot \Pi_l - S_u^{-1} \cdot \Pi_u \quad (\text{III.28})$$

$$\bar{g}(\bar{z}) = -(\nabla FOB(\bar{z}) - \bar{\lambda}^T \cdot \nabla \bar{h}(\bar{z})) + \mu \cdot (S_l^{-1} \cdot e - S_u^{-1} \cdot e) \quad (\text{III.29})$$

As matriz W e \bar{J} representam a hessiana e o jacobiano da função lagrangeana, respectivamente. As contribuições $S_l^{-1} \cdot \Pi_l - S_u^{-1} \cdot \Pi_u$ na hessiana, e $\mu \cdot (S_l^{-1} \cdot e - S_u^{-1} \cdot e)$ no vetor gradiente $\bar{g}(\bar{z})$ são devidas ao parâmetro barreira utilizado no método de pontos interiores. Maiores detalhes sobre a formulação do problema estão detalhados no Apêndice B.

A seguir serão apresentados os principais aspectos da modelagem do problema de FPO aliado ao método de pontos interiores para solução do problema de restabelecimento de sistemas de distribuição.

III.3.1.1 Função Objetivo

A função objetivo do FPO para o restabelecimento ótimo de SDEE proposta nesse trabalho corresponde à maximização da carga a ser restabelecida do sistema após a ocorrência de um defeito. Esta função objetivo é formulada na Equação (III.30).

$$Max\ FOB = \sum_{k \in \Omega_r} (\gamma_k Pl_k) \quad (\text{III.30})$$

Onde:

- Ω_r Representa o conjunto de barras na área desenergizada;
- γ_k Representa o percentual de carga restabelecida associado às barras da área desenergizada do sistema;
- Pl_k Representa a carga ativa na barra k

No modelo proposto, as barras que não estão sendo alimentadas são identificadas utilizando teoria de grafos formando o conjunto Ω_r . Para cada uma dessas barras é associada uma variável γ_k que representa o percentual de carga restabelecida na barra k . Nas equações de balanço de potência essa variável multiplica a carga ativa e reativa de cada barra da região desenergizada do sistema. No início do processo de solução essa variável vale 0, indicando que a carga está desenergizada.

Nos atuais SDEE, o percentual de carga restabelecida pode assumir somente valores discretos, devido ao uso de chaves para controlar a demanda dos alimentadores. Com a penetração cada vez maior nas redes de distribuição de medidores inteligentes, será possível atuar individualmente nas cargas dos consumidores. Portanto, o percentual poderá ser representado como uma variável contínua.

III.3.1.2 Restrições de Balanço de Potência

O vetor de restrições $\bar{h}(\bar{x})$ do problema de otimização formulado em (III.1) deve incluir as equações estáticas de fluxo de carga ativa e reativa em todas as barras do sistema.

Conforme (MONTICELLI, 1993) o fluxo de potência ativa e reativa entre em duas barras k e m pode ser expresso pelas equações (III.31) e (III.32):

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_{km}) - V_k V_m b_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (III.31)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos(\theta_{km}) - V_k V_m g_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (III.32)$$

Onde:

- P_{km} Representa o fluxo de potência ativa no circuito entre as barras k e m .
- V_k Representa o módulo da tensão da barra k .

V_m	Representa o módulo da tensão da barra m .
θ_{km}	Representa a defasagem angular entre as barras k e m .
g_{km}	Representa a condutância série do circuito km ;
b_{km}	Representa a susceptância série do circuito km ;
b_{km}^{sh}	Representa a susceptância em derivação do circuito km do lado da barra k ;

Nos SDEE é comum a existência de chaves nos trechos entre as barras. Esses dispositivos de chaveamento, tais como disjuntores, chaves fusíveis e religadores devem ser modelados no problema de fluxo de potência ótimo (FPO) como variáveis discretas, apresentando apenas dois estados: 0 (chave aberta) e 1 (chave fechada). No problema de otimização, essas funções devem multiplicar as equações dos fluxos de potência ativa e reativa nos trechos onde existam estes dispositivos de chaveamento.

A função que melhor representa os estados operativos de uma chave é a função degrau unitário. Porém, a função degrau apresenta descontinuidade no ponto de mudança de estado e não possui derivada finita, não podendo ser modelada em problemas de Fluxo de Potência Ótimo (FPO).

Para solucionar esse problema deve-se adotar uma função que seja contínua e possua derivadas finitas para que o problema possa ser resolvido utilizando FPO. Em (OLIVEIRA *et al.*, 2005), (SILVA JUNIOR *et al.*, 2008a), (SILVA JUNIOR *et al.*, 2008b), (OLIVEIRA *et al.*, 2010), (SILVA JUNIOR *et al.*, 2011) e (NASCIMENTO *et al.*, 2011), os autores adotaram uma função contínua da família das sigmóides para representação das variáveis discretas no problemas de otimização de sistemas elétricos. Essas funções são adequadas neste problema, pois possuem uma dinâmica similar a da função degrau unitário na representação dos dois estados da chave (LIGADA-DESLIDAGA). Assim, o problema que originalmente é de programação inteira passa a ser formulado como um problema de programação contínua (SILVA JUNIOR *et al.*, 2008a).

As funções sigmóides são conhecidas na literatura e são aplicadas em Redes Neurais Artificiais (HAYKIN, 2002). A função sigmoide adotada nessa tese é formulada na Equação (III.33) e ilustrada na Figura III.9.

$$CH_{km}(x_{km}) = \frac{e^{\alpha \cdot x_{km}} - 1}{e^{\alpha \cdot x_{km}} + 1} \quad \text{para } x_{km} \geq 0 \quad (\text{III.33})$$

$$x^{\min} \leq x_{km} \leq x^{\max}$$

Onde:

- x_{km} Representa a variável de otimização associada à chave $k-m$.
 $CH_{km}(x_{km})$ Representa o valor de posição da chave manobrável no circuito $k-m$
 α Parâmetro da função sigmoide.
 x^{\min}, x^{\max} Limites de canalização do argumento da função sigmoide.

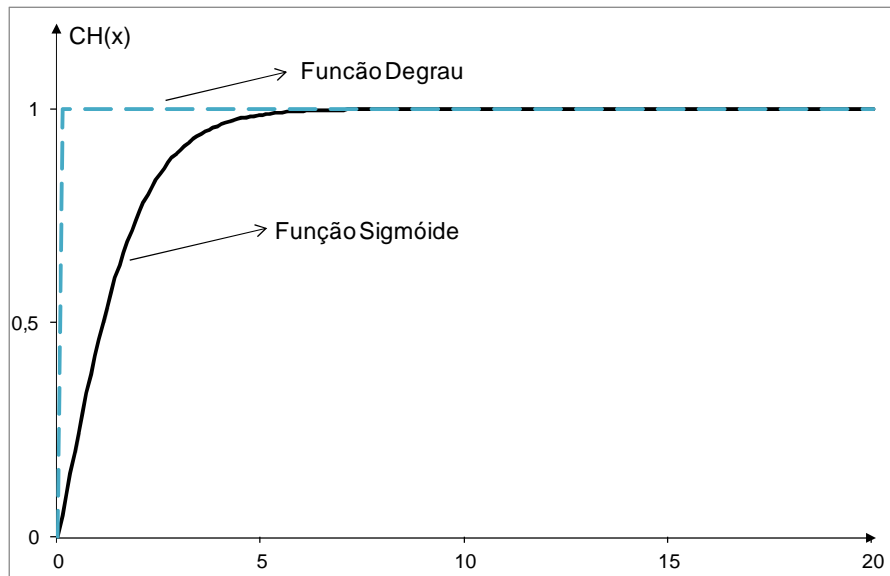


Figura III.9 - Funções degrau e sigmoide.

Diversos valores do parâmetro α da função sigmoide apresentada em (III.33) foram testados de forma a encontrar um valor que apresentasse um bom compromisso entre convergência e resultados, conforme ilustrado na Figura III.10. Um valor de α muito grande pode conduzir o processo de FPO à divergência, pois neste caso a derivada da função sigmoide tem valores elevados. Por outro lado, uma função cujo valor de α é muito pequeno não é uma boa aproximação da função degrau e, portanto, não pode ser utilizada no problema. A função sigmoide adotada nesse trabalho utilizou o valor do parâmetro α igual a 1, pois este valor atende satisfatoriamente aos requisitos de convergência e qualidade dos resultados.

O argumento da função sigmoide (x_{km}) deve variar entre 0 e um valor no qual a função $CH(x_{km})$ seja igual a 1. Neste trabalho, como nos demais trabalhos onde esta função foi utilizada, adotou-se o valor de x^{\max} igual a 20.

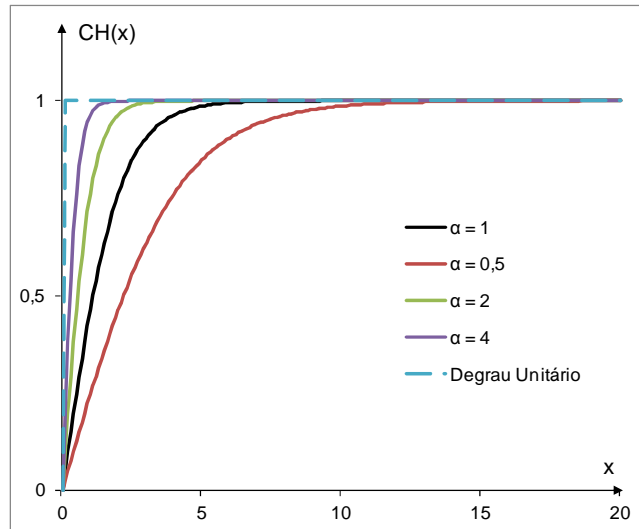


Figura III.10 – Variações do parâmetro da função α sigmoide

Na metodologia proposta nesse trabalho, a função sigmoide que representa as chaves multiplica o fluxo de potência ativa e reativa dos trechos, transformando as variáveis discretas associadas aos dispositivos de manobras em variáveis contínuas. Com esse artifício, o problema pode ser resolvido utilizando-se FPO contínuo convencional. A definição dos estados das chaves (0: aberta e 1: fechada) são baseados em um índice calculados através dos resultados do FPO proposto.

A restrição de balanço de potência ativa em uma barra k é dada por:

$$Pg_k - Pl_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km}(x_{km}) \cdot P_{km} = 0 \quad (III.34)$$

Onde:

Pg_k A geração de potência ativa na barra k .

Ω_k Representa o conjunto de barras diretamente conectadas a barra k

A restrição de balanço de potência reativa da barra k é dada por:

$$Qg_k - Ql_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km}(x_{km}) \cdot Q_{km} = 0 \quad (III.35)$$

Onde:

Qg_k A geração de potência reativa na barra k .

Das Equações (III.34) e (III.35), o valor de posição da chave do circuito km (CH_{km}) é multiplicado pelo fluxo de potência ativa (P_{km}) e reativa (Q_{km}). Ou seja, se a

chave do circuito km é aberta, este circuito não contribui para o balanço de potência ativa e reativa.

III.3.1.3 Restrições de Desigualdade

No problema de restabelecimento de SDE, as restrições de desigualdade (III.10) devem incluir as restrições de canalização relativas às variáveis de otimização. Estas restrições estabelecem os limites mínimo e máximo das variáveis do problema de otimização. A variável (x_{km}) , que representa a posição da chave, pode variar entre 0 e 20, conforme equação (III.36).

$$0 \leq x_{km} \leq 20 \quad (III.36)$$

Para cada uma das barras do sistema localizada na parte desalimentada é associada uma variável de carga a ser restabelecida (α_k) . Ela varia entre 0 e 1 representando a porcentagem de carga restabelecida na barra.

Além da restrição (III.36), em um problema de FPO outros limites técnicos e operativos devem ser considerados. As tensões nodais nas barras devem estar dentro de limites aceitáveis de operação (por exemplo, entre 0,95 e 1,05 pu) para se evitar grandes quedas de tensão, garantindo a qualidade da energia elétrica fornecida.

O limite de geração pode ter duas abordagens diferentes. Quando o gerador está representando a barra da subestação, este limite está associado à capacidade de fornecimento de potência através do transformador localizado na própria subestação. Quando o gerador representa uma máquina localizada no próprio SDEE (como por exemplo, um gerador distribuído no sistema) o limite está associado à capacidade da máquina em fornecer potência ativa e reativa ao sistema.

Além disso, o fluxo nas linhas não deve ultrapassar seu limite térmico de forma a não degradar o cabo e não aumentar as perdas no sistema.

Portanto esses limites operativos de tensão nodal, geração de potência ativa e reativa e fluxo nas linhas são representados por restrições de canalização:

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad (III.37)$$

$$Pg_k^{\min} \leq Pg_k \leq Pg_k^{\max} \quad (III.38)$$

$$Qg_k^{\min} \leq Qg_k \leq Qg_k^{\max} \quad (III.39)$$

$$0 \leq S_{km} \leq S_{km}^{\max} \quad (III.40)$$

Onde:

- V_k^{\min}, V_k^{\max} Representam os limites mínimo e máximo de tensão na barra k .
- Pg_k^{\min}, Pg_k^{\max} Representam os limites mínimo e máximo de geração de potência ativa na barra k .
- Qg_k^{\min}, Qg_k^{\max} Representam os limites mínimo e máximo de geração de potência reativa na barra k .
- S_{km} Representa o fluxo de potência aparente no trecho km .
- S_{km}^{\max} Representa o limite de fluxo de potência aparente no trecho km .

III.3.1.4 Formulação do FPO

A partir da função objetivo e as restrições definidas nos itens III.3.1.1, III.3.1.2, III.3.1.3 o problema de FPO para o restabelecimento de SDEEE pode ser formulado como:

$$Max\ FOB = \sum_{k \in \Omega r} (\gamma_k Pl_k) \quad (III.41)$$

s.a.

$$Pg_k - Pl_k + \sum_{m \in \Omega k} CH_{km}(x_{km}).P_{km} = 0 \quad (\lambda p_k) \quad (III.42)$$

$$Qg_k - Ql_k + \sum_{m \in \Omega k} CH_{km}(x_{km}).Q_{km} = 0 \quad (\lambda q_k) \quad (III.43)$$

$$0 \leq x_{km} \leq 20 \quad (III.44)$$

$$0 \leq \gamma_k \leq 1 \quad (III.45)$$

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad (III.46)$$

$$Pg_k^{\min} \leq Pg_k \leq Pg_k^{\max} \quad (III.47)$$

$$Qg_k^{\min} \leq Qg_k \leq Qg_k^{\max} \quad (III.48)$$

$$0 \leq S_{km} \leq S_{km}^{\max} \quad (III.49)$$

Onde:

- λp_k Representa o multiplicador de Lagrange associado à equação de balanço de potência ativa (III.42);
- λq_k Representa o multiplicador de Lagrange associado à equação de balanço de potência reativa (III.43).

A função lagrangeana associada ao problema formulado anteriormente pode ser escrita como:

$$L = FOB - \lambda p_k \cdot (Pg_k - Pl_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km}(x_{km}) \cdot P_{km}) - \lambda q_k \cdot (Qg_k - Ql_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km}(x_{km}) \cdot Q_{km}) \quad (III.50)$$

Para simplificar a notação, as contribuições das restrições (III.44) a (III.49) na função lagrangeana não foram mostradas na Equação (III.50). Estas restrições são tratadas via método de pontos interiores e suas contribuições na modelagem do problema de FPO serão apresentadas diretamente na matriz hessiana e no vetor gradiente da solução. A estrutura detalhada da matriz hessiana e do vetor gradiente são apresentadas no Apêndice B.

III.3.2 Índice Proposto para o Restabelecimento de SDEE

Ao solucionar-se o problema de FPO proposto em (III.3.1.4) para o restabelecimento do SDEE, o valor da posição das chaves manobráveis (CH_{km}) é expresso por um valor contínuo entre 0 e 1. Porém, na prática, os estados das chaves são discretos, sendo ($CH_{km} = 1$) ligada e ($CH_{km} = 0$) desligada. Logo, para a obtenção de uma solução discreta do problema, deve-se adotar uma estratégia para definição dos estados das chaves. Uma estratégia de contornar esse problema é calcular um índice para determinar qual chave será manobrada.

A metodologia de restabelecimento ótima proposta nessa tese visa determinar qual chave manobrável deve ser fechada para restaurar a energia elétrica para uma área do sistema inicialmente não alimentada devido a ocorrência um defeito. A chave escolhida deve ser aquela que restabelece a maior quantidade de carga possível.

Baseado nesta premissa, o índice proposto para determinação dos estados das chaves corresponde a uma medida de qual chave tem maior capacidade de restabelecer o sistema. Esse índice é dado por:

$$IDX_{km} = CH_{km}(x_{km}) \cdot S_{km} \cdot S_{disp} \quad (III.51)$$

Onde:

- IDX_{km} Representa o índice para definição do estado da chave km ;
- S_{km} Representa o fluxo de potência aparente no circuito km .
- S_{disp} Representa a capacidade reserva de potência ativa da chave.

Na Equação (III.51), o índice proposto (IDX_{km}) é proporcional ao valor de posição CH_{km} . Quanto maior do valor de $CH_{km}(x_{km})$, maior a tendência de fechamento do circuito km para maximização da carga na área não suprida da rede, estabelecida na função objetivo.

Adicionalmente, o (IDX_{km}) é proporcional ao fluxo de potência aparente entre as barras do circuito km . Isso retrata a condição de que uma chave que transporta maior quantidade de potência aparente tem maior capacidade de restabelecer as cargas desalimentadas e seu fechamento deve ser priorizado.

O fator S_{disp} representa a capacidade máxima disponível que uma chave pode transportar antes que algum circuito ligado a ela fique sobrecarregado. A capacidade disponível de cada circuito é calculada através da Equação (III.52). O menor S_{disp}^{mn} dos circuitos entre a chave e a subestação é considerado o S_{disp} dessa chave.

$$S_{disp}^{mn} = S_{max} - S_{mn} \quad (III.52)$$

Onde:

- S_{disp}^{mn} Representa a capacidade disponível de potência aparente do circuito entre as barras $m-n$
- S_{max} Representa a capacidade máxima de potência aparente do circuito entre as barras $m-n$.
- S_{mn} Representa a potência aparente do circuito entre as barras $m-n$.

Exemplificando a utilização do fator S_{disp} , supondo a ocorrência de um defeito em S_1 no sistema apresentado na Figura III.11, as barras 2, 3, 4 e 5 ficam desenergizadas.

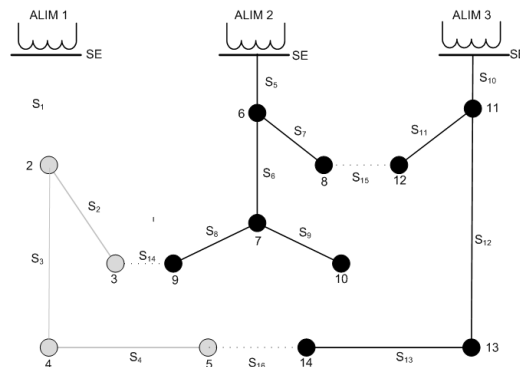


Figura III.11 – Cálculo da folga de potência aparente das chaves

Para restabelecer essa área, as chaves S_{14} ou S_{16} podem-se fechar. Para o cálculo do índice S_{disp} necessita-se primeiramente determinar o caminho entre a chave e a subestação, conforme descrito em (III.53).

$$\begin{aligned} Chave_{14} &\rightarrow 9-7-6-1 \\ Chave_{16} &\rightarrow 14-13-11-1 \end{aligned} \tag{III.53}$$

Utilizando a Equação (III.52) no sistema mostrado na Figura III.11, o fator S_{disp} para as chaves 14 e 16 é calculado conforme descrito em (III.54).

$$\begin{aligned} S_{disp_{14}} &= \text{Min}[(S_{\max} - S_{9-7}), (S_{\max} - S_{7-6}), (S_{\max} - S_{6-1})] \\ S_{disp_{16}} &= \text{Min}[(S_{\max} - S_{14-13}), (S_{\max} - S_{13-11}), (S_{\max} - S_{11-1})] \end{aligned} \tag{III.54}$$

Considerando o índice proposto, conclui-se que a chave preferencial para fechamento é aquela que possui o maior índice (IDX_{km}), pois sua operação resulta no restabelecimento de maior quantidade de carga.

III.3.3 Algoritmo Proposto para Restabelecimento de SDE (ARESDEE)

O algoritmo proposto considera inicialmente a ocorrência de um defeito em um ou mais ramos do sistema. Quando isso ocorre, o sistema de proteção atua e desliga toda a região a jusante do dispositivo de proteção. Em seguida o ramo defeituoso é localizado e retirado do sistema.

A partir dessa configuração, as chaves normalmente abertas são fechadas até que se consiga restabelecer a carga não suprida do sistema. O fluxograma da Figura III.12 apresenta os passos necessários para restabelecer um SDEE após a ocorrência de um defeito de acordo com o algoritmo de restabelecimento (ARESDEE) proposto nesta tese.

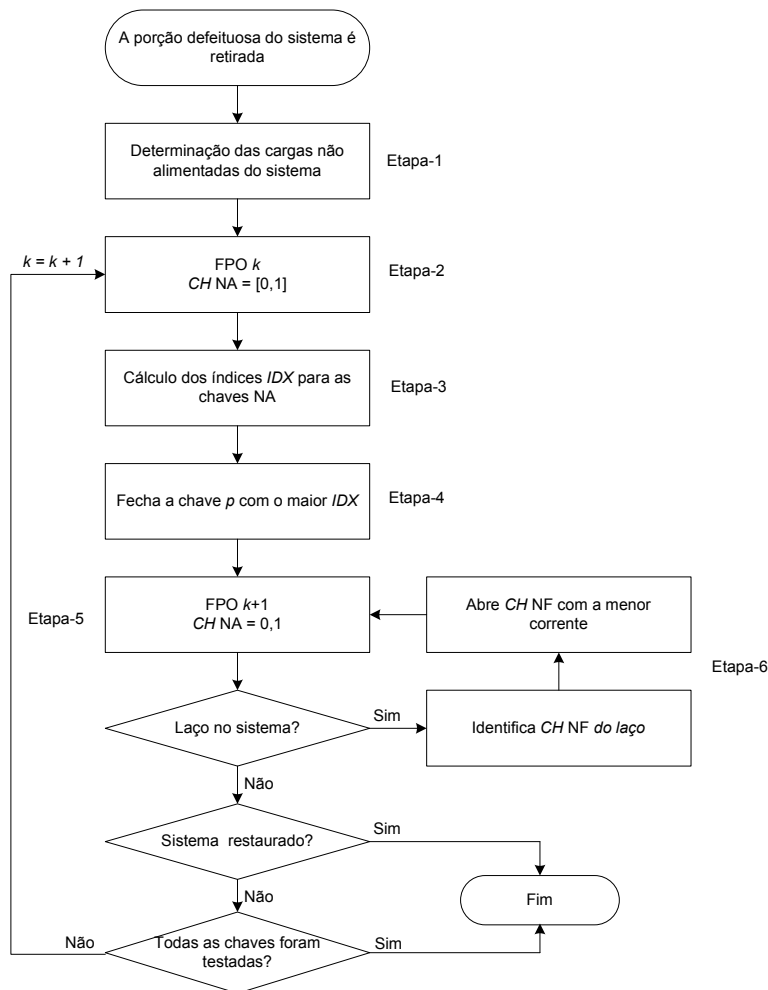


Figura III.12- Fluxograma do ARSD proposto.

No ARESDEE proposto, considera-se que o defeito ocorreu e que o elemento defeituoso já foi localizado e retirado do sistema. A partir dessa configuração, as chaves são fechadas passo a passo de forma a prover uma sequência viável e segura operação de restabelecimento do SDEE. As etapas deste algoritmo são descritas com maiores detalhes a seguir.

III.3.3.1 Etapa-1

O objetivo da Etapa-1 do ARESDEE é determinar quais barras do sistema de distribuição não estão alimentadas após o defeito, ou seja, as barras ilhadas do sistema. Essas barras são determinadas utilizando-se processo de busca no grafo da rede. A cada

carga localizada nessas barras é atribuída uma variável (γ_k) que pode variar entre de 0 a 1 representando o percentual de carga a ser restabelecido. Essa variável multiplica os valores de carga ativa (Pl_k) e reativa (Ql_k) dessas barras.

III.3.3.2 Etapa-2

A Etapa-2 do algoritmo tem como objetivo determinar os valores das variáveis necessários para o cálculo do índice IDX , expresso pela (III.51), de modo a determinar qual chave será fechada. Efetua-se a simulação do FPO (III.41) a (III.49) considerando-se as variáveis associadas às chaves normalmente abertas (NA) do sistema. Os valores de (x_{km}) para estas chaves são iniciados com (x_{km}) = 0. Após a simulação do FPO, os valores das variáveis (x_{km}) associadas às chaves NA encontram-se no intervalo contínuo entre 0 e 1.

III.3.3.3 Etapa-3

Na Etapa-3, é efetuado o cálculo do índice IDX para as chaves NA, conforme (III.51). As variáveis necessárias para este cálculo são obtidas da solução do FPO do problema (III.41)(III.49). As chaves prioritárias para fechamento são listadas de acordo com a ordem decrescente dos índices IDX . A primeira chave dessa lista é a que possui o maior índice IDX e que, portanto, deve ser fechada.

III.3.3.4 Etapa-4

Na Etapa-4, a chave com o maior índice IDX é fechada. Nesta etapa todas as chaves do sistema têm seus valores fixados de acordo com o estado das mesmas: chave aberta $CH_{km}(x_{km}) = 0$ e chave fechada $CH_{km}(x_{km}) = 1$.

III.3.3.5 Etapa-5

Na Etapa-5 do ARESDEE é executado um novo FPO considerando seus valores fixos. São obtidos os valores de (γ_k) associados às cargas das barras inicialmente desenergizadas. Em seguida é verificado se o fechamento da chave criou um laço no sistema. Caso positivo, a Etapa-6 é executada de forma a eliminar o laço formado. Não havendo laços no sistema, os valores de (γ_k) de cada barra inicialmente não alimentada são analisados. Caso todos os valores de (γ_k) sejam iguais a 1, as cargas não supridas do sistema foram restabelecidas e o algoritmo é encerrado. Caso contrário, é verificado se existem chaves NA que podem ser manobradas. Se existirem chaves NA manobráveis, o algoritmo retorna a Etapa-2. Se todas as chaves já tiverem sido manobradas, o algoritmo encerra indicando a quantidade de carga que pode ser restabelecida no sistema.

III.3.3.6 Etapa-6

Caso um laço seja identificado no sistema, todas as chaves normalmente fechadas NF pertencentes ao laço devem ser identificadas. Isso é feito utilizando o algoritmo de busca em grafos proposto por (BALABANIAN e BICKART, 1981). De acordo com (MARTÍN e GIL, 2008), em um laço, a chave que causa o menor impacto nas perdas no sistema é aquela localizada nas proximidades da barra onde os fluxos de potência ativa P e reativa Q se invertem. A mesma analogia pode ser utilizada para o restabelecimento dos SDEE. Através dos resultados obtidos na Etapa-5 é possível determinar a barra onde os fluxos de potência se invertem. A chave NF que deve ser aberta é aquela que possui o menor fluxo de potência ativa passando através dela e que seja próxima da barra onde o fluxo se inverte. Após a escolha da chave que deve ser aberta, a Etapa-5 é executada novamente.

O fechamento momentâneo de laços em sistemas de distribuição é um procedimento rotineiro adotado pelas concessionárias em sistemas de distribuição onde os alimentadores pertencem a mesma subestação. Devido aos problemas de coordenação da proteção, quando o fechamento de uma chave formar um laço, outra chave deve ser

aberta para que se mantenha a estrutura radial da rede. Em sistemas com chaves entre alimentadores de subestações diferentes, deve-se observar a diferença dos módulos e ângulos das tensões entre os terminais das chaves. Caso essa diferença seja significativa, a operação de fechamento dessa chave não deve ser permitida.

III.4 Tutorial ARESDEE

Para apresentar de forma detalhada cada passo do algoritmo de restabelecimento de sistemas de distribuição de energia (ARESDEE) será utilizado o sistema teste de 16 barras proposto por (CINVALAR *et al.*, 1988). Esse sistema é composto por 3 alimentadores de 23 kV, num total de 16 trechos.

O diagrama da Figura III.13 representa a configuração original proposta por (CINVALAR *et al.*, 1988), onde os circuitos são representados por linhas contínuas e que estão acoplados a chaves normalmente fechadas (NF). Os circuitos tracejados representam chaves normalmente abertas (NA).

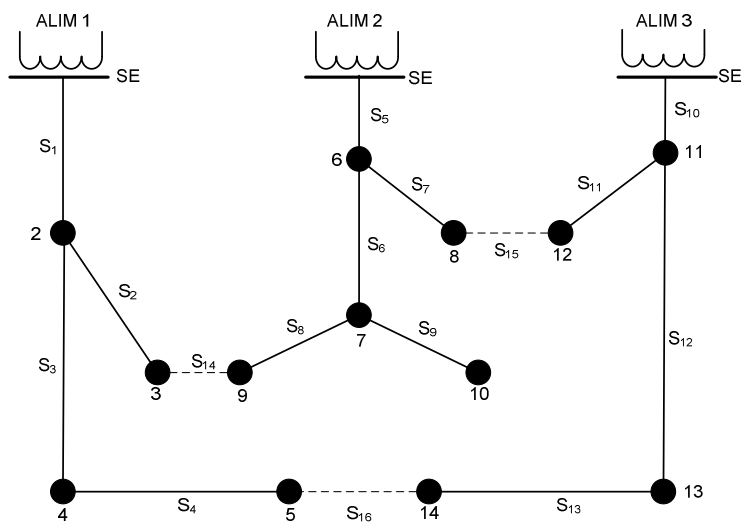


Figura III.13- Sistema de 16 barras (CIVANLAR *et al.*, 1988) – topologia inicial.

No trabalho de (LIN e CHIN, 1998) foi apresentada uma metodologia para o restabelecimento de sistemas de distribuição baseada em índices obtidos a partir do cálculo de fluxo de potência convencional. Portanto, adotou-se a configuração mostrada na Figura III.14 proposta por (LIN e CHIN, 1998) com o objetivo de comparar os resultados do ARESDEE.

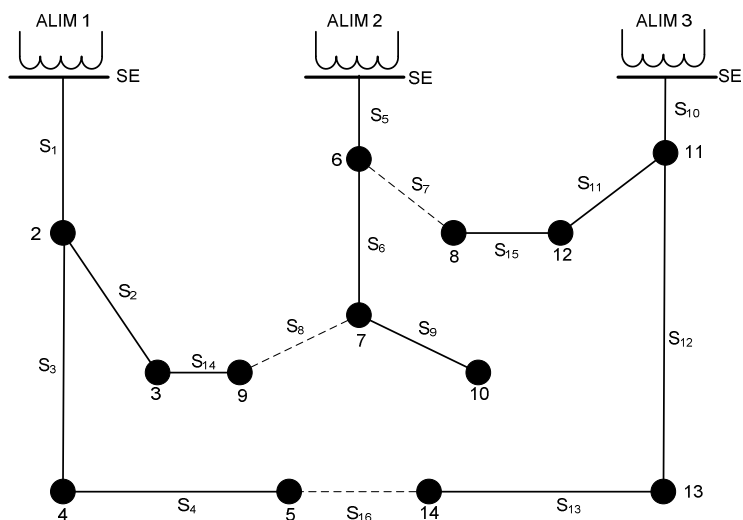


Figura III.14 - Sistema de 16 barras (CIVANLAR *et al.*, 1988) – reconfigurado

A tensão da subestação (SE) foi considerada igual a 1,0 p.u. durante todo o estudo e os limites de tensão nodal considerados são 0,95 p.u. e 1,05 p.u. O limite de potência ativa nos circuitos é considerado 1 p.u.

Inicialmente considera-se a ocorrência de um defeito em um ou mais circuitos do sistema. Esse defeito causa a abertura de um dispositivo de proteção. Em seguida, esse circuito defeituoso é isolado e o processo de restabelecimento do sistema é iniciado. Por exemplo, considerando a ocorrência de um defeito no circuito S_5 mostrado na Figura III.15, o dispositivo de proteção do alimentador 2 atua deixando as cargas à jusante do defeito sem alimentação.

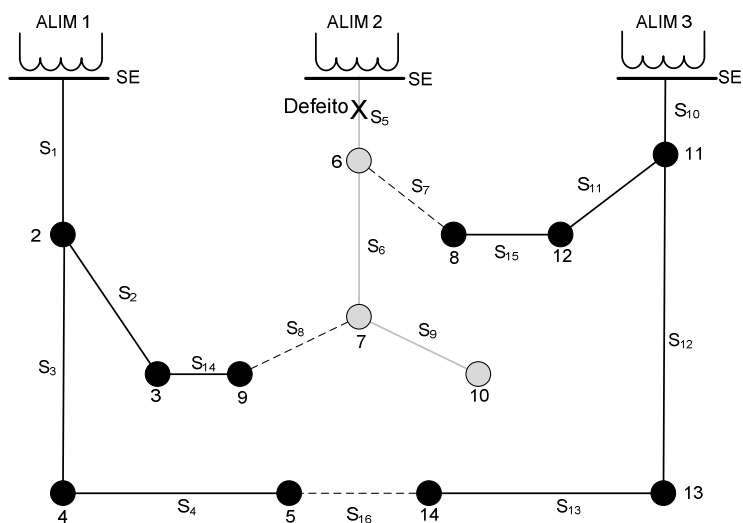


Figura III.15- Defeito no sistema de 16 barras reconfigurado

Etapa-1:

O objetivo da Etapa-1 do ARESDEE é a determinação das barras e cargas não supridas do sistema após o defeito. Essa avaliação é feita através da montagem da árvore do sistema a partir da barra da subestação. As barras que não estiverem nessa árvore são consideradas desconectadas do sistema. Após a retirada do ramo S5 verifica-se que as cargas conectadas às barras 6, 7 e 10 ficam desenergizadas, deixando de suprir 13.500 kW aos consumidores. A partir dessa informação é arbitrada uma variável de carga restabelecida para cada barra da área desenergizadas, conforme Tabela III.6.

Tabela III.6- Carga Restabelecida do Sistema 16 barras

Barra	Carga Restabelecida
6	$\gamma_1 = 0$
7	$\gamma_2 = 0$
10	$\gamma_3 = 0$

Etapa-2 – 1ª execução:

A Etapa-2 tem como objetivo otimizar o sistema através da resolução do FPO formulado em (III.41) a (III.49), maximizando a carga na área não suprida do sistema. Neste ponto, as chaves são tratadas com uma função contínua definida em (III.33). Na execução do FPO obtém-se as seguintes variáveis do problema:

- Valores de posição das chaves (CH_{km});
- Módulos das tensões nodais (V_k);
- Fluxos de potência ativa e aparente nos circuitos (P_{km}, S_{km}).

A Tabela III.7 apresenta os valores obtidos neste passo para a o módulos das tensões nodais (V_k), enquanto que a Tabela III.8 apresenta os fluxos de potência aparente nos circuitos.

Tabela III.7- Tensões do sistema– FPO-2 – 1ª Execução

Barra	V_k (p.u.)	Barra	V_k (p.u.)
1	1	8	0,973
2	0,982	9	0,966
3	0,970	10	0,950
4	0,978	11	0,984
5	0,977	12	0,976
6	0,951	13	0,981
7	0,952	14	0,980

Tabela III.8- Fluxos de potência aparente circuitos - FPO-2 – 1ª Execução

Circuito	S_{km} (p.u.)	Circuito	S_{km} (p.u.)
S_1	0,180	S_9	0,048
S_2	0,123	S_{10}	0,124
S_3	0,031	S_{11}	0,075
S_4	0,015	S_{12}	0,036
S_5	DEFEITO	S_{13}	0,027
S_6	0,021	S_{14}	0,091
S_7	0,054	S_{15}	0,067
S_8	0,084	S_{16}	0,005

O valor da variável e da função que representam as chaves são apresentados na Tabela III.9.

Tabela III.9- Posição das chaves - FPO-1 – 1ª Execução

Chave	(x_{km})	(CH_{km})
S_7	0,710510	0,341028
S_8	2,295440	0,816998
S_{16}	0,393145	0,194079

Etapa-3 – 1ª Execução:

Esta etapa efetua o cálculo dos índices IDX, conforme Equação (III.51) para todas as chaves NA do sistema (S_7 , S_8 , S_{16}). Estes índices são apresentados na Tabela III.10.

Tabela III.10- Índices IDX - 1ª execução

Chave	x_{km}	CH_{km}	S_{km} (p.u.)	S_{disp} (p.u.)	IDX
S_7	0,710510	0,341028	0,054	0,937832	0,017271
S_8	2,295440	0,816998	0,084	0,904919	0,062103
S_{16}	0,393145	0,194079	0,005	0,937832	0,000910

Após o cálculo dos índices IDX , é montada a lista de chaves para fechamento, dispostas na ordem decrescente dos índices IDX . A Tabela III.11 as chaves definidas no primeiro passo.

Tabela III.11- Chaves candidatas para fechamento.

Chaves	$S_8 - S_7 - S_{16}$
--------	----------------------

Na tabela acima, a chave S_8 está associada ao maior índice IDX . Logo, esta é a primeira chave a ser fechada.

Etapa-4 – 1ª Execução:

Na Etapa-4 a chave S_8 , que possui o maior índice IDX , é fechada. Na sequência, para avaliar o real impacto da manobra no restabelecimento do sistema, as chaves são transformadas em variáveis discretas. O valor da variável (x_{km}) das chaves fechadas é fixado em 20 de modo a manter a variável (CH_{km}) igual a 1. Nas chaves abertas o valor da variável (x_{km}) é fixado em 0.

Etapa-5- 1ª execução:

Nesta etapa é simulado novamente o FPO formulado em (III.41)(III.49), considerando a chave S_8 fechada e as chaves S_7 e S_{16} abertas. Após a execução do FPO é verificado se o fechamento da chave S_8 causa a formação de um laço no sistema. Como pode ser visto na Figura III.16, essa operação não fecha um laço no sistema.

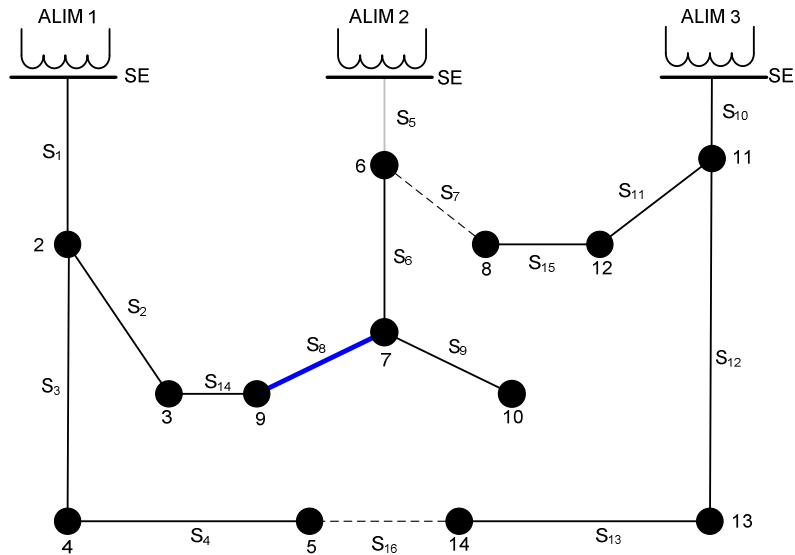


Figura III.16 - Sistema de 16 barras com a chave S_8 fechada

A Tabela III.12 apresenta os módulos das tensões nodais do sistema de 16 barras após o fechamento da chave S_8 .

Tabela III.12- Tensões do sistema– FPO-5 – 1ª Execução

Barra	V_k (p.u.)	Barra	V_k (p.u.)
1	1	8	0,990
2	0,981	9	0,964
3	0,969	10	0,950
4	0,977	11	0,992
5	0,976	12	0,991
6	0,951	13	0,990
7	0,952	14	0,989

Os fluxos de potência ativa nos circuitos são apresentados na Tabela III.13.

Tabela III.13- Fluxos de potência ativa nos circuitos - FPO-5 – 1ª Execução

Circuito	P_{km} (p.u.)	Circuito	P_{km} (p.u.)
S_1	0,200	S_9	0,045
S_2	0,141	S_{10}	0,062
S_3	0,035	S_{11}	0,020
S_4	0,015	S_{12}	0,031
S_5	DEFEITO	S_{13}	0,021
S_6	-0,007	S_{14}	0,110
S_7	CHAVE ABERTA	S_{15}	-0,010
S_8	-0,102	S_{16}	CHAVE ABERTA

Em seguida é verificado se o fechamento da chave S_8 restabelece o sistema. Conforme pode ser visto na Tabela III.14 o sistema não foi totalmente recomposto. As cargas das barras 7 e 10 foram totalmente restauradas, enquanto somente 17,06% da carga da barra 6 foi suprida e 75,42 % da carga não suprida do sistema foi restabelecida.

Tabela III.14- Carga Restabelecida no sistema 16 barras – 1ª Execução.

Barra	Carga (kW)	Carga Restabelecida (%)	Carga Restabelecida (kW)
6	4.000	$\gamma_1 = 17,06 \%$	682,52
7	5.000	$\gamma_2 = 100 \%$	5.000
10	4.500	$\gamma_3 = 100 \%$	4.500

Em seguida é verificado se existem outras chaves NA que podem restabelecer o sistema. As chaves S_7 e S_{16} são chaves NA que podem ser manobradas. Portanto, Etapa-2 é executada novamente.

Etapa-2- 2ª execução:

A Etapa-2 é executada novamente através da simulação do FPO formulado em (III.41) a (III.49), maximizando a carga não suprida do sistema. As chaves são tratadas novamente como função contínua definida em (III.2).

A Tabela III.15 mostra os valores obtidos no FPO para o módulo das tensões nodais, enquanto a Tabela III.16 apresenta os fluxos de potência aparente no sistema.

Tabela III.15- Tensões do sistema– FPO-2 – 2ª Execução

Barra	V_k (p.u.)	Barra	V_k (p.u.)
1	1	8	0,975
2	0,981	9	0,964
3	0,969	10	0,950
4	0,977	11	0,985
5	0,976	12	0,978
6	0,950	13	0,983
7	0,952	14	0,982

Tabela III.16- Fluxos de potência aparente nos circuitos - FPO-2 – 2ª Execução.

Circuito	S_{km} (p.u.)	Circuito	S_{km} (p.u.)
S ₁	0,190	S ₉	0,048
S ₂	0,128	S ₁₀	0,114
S ₃	0,035	S ₁₁	0,070
S ₄	0,019	S ₁₂	0,032
S ₅	DEFEITO	S ₁₃	0,023
S ₆	0,020	S ₁₄	0,096
S ₇	0,049	S ₁₅	0,062
S ₈	0,090	S ₁₆	0,001

O valor da variável e da função que representam as chaves são apresentados na Tabela III.17.

Tabela III.17- Posição das chaves

Chave	(x_{km})	(CH_{km})
S ₇	0,554148	0,270195
S ₁₆	0,022321	0,011160

Etapa-3- 2ª execução:

Os índices *IDX* são calculados conforme Equação (III.3) para todas as chaves NA restantes do sistema (S₇ e S₁₆). Estes índices são apresentados na Tabela III.18.

Tabela III.18- Índices *IDX*, sistema 16 barras, 2ª execução

Chave	x_{km}	CH_{km}	S_{km} (p.u.)	S_{disp} (p.u.)	<i>IDX</i>
S ₇	0,554148	0,270195	0,049	0,937832	0,012416
S ₁₆	0,022321	0,011160	0,001	0,937832	0,000010

Após o cálculo dos índices *IDX*, novamente é montada uma lista de chaves para fechamento. A Tabela III.19 apresenta as chaves NA candidatas no segundo passo.

Tabela III.19- Chaves candidatas para fechamento, sistema 16 barras.

Chaves	S ₇ - S ₁₆
--------	----------------------------------

Na tabela acima a chave S_7 está associada ao maior índice IDX . Portanto, esta é a segunda chave a ser fechada.

Etapa-4- 2ª execução:

Na Etapa-4, a chave com o maior índice IDX é fechada. Nesta etapa todas as chaves do sistema são transformadas em variáveis discretas tendo seus valores fixados de acordo com o estado das mesmas: chave aberta $CH_{km}(x_{km})=0$ e chave fechada $CH_{km}(x_{km})=1$.

Etapa-5- 2ª execução:

O FPO formulado em (III.41)(III.49) é calculado novamente, considerando as chaves S_7 e S_8 fechadas. Após a execução do FPO é verificado que o fechamento da chave S_7 causa a formação de um laço no sistema conforme destacado em vermelho na Figura III.17.

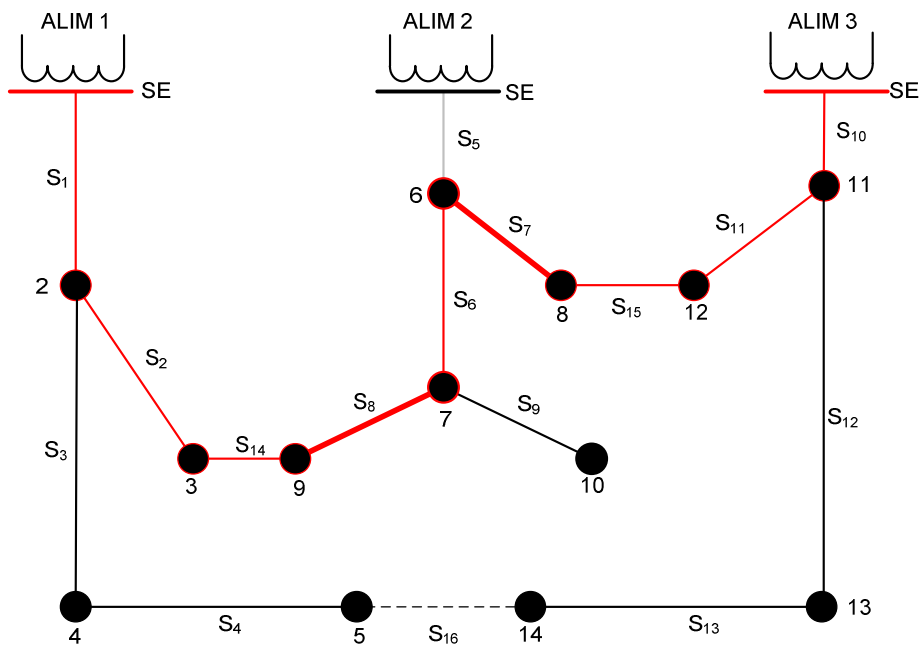


Figura III.17 - Sistema 16 barras reconfigurado com as chaves S_7 e S_8 fechadas

A Tabela III.20 apresenta os módulos das tensões nodais do sistema de 16 barras após o fechamento da chave S_8 .

Tabela III.20- Tensões do sistema– FPO-5 – 2ª Execução

Barra	V_k (p.u.)	Barra	V_k (p.u.)
1	1	8	0,969
2	0,983	9	0,969
3	0,973	10	0,958
4	0,979	11	0,983
5	0,978	12	0,973
6	0,960	13	0,980
7	0,960	14	0,980

Os fluxos de potência ativa nos circuitos são apresentados na Tabela III.21.

Tabela III.21- Fluxos de potência ativa nos circuitos - FPO-5 – 2ª Execução.

Circuito	P_{km} (p.u.)	Circuito	P_{km} (p.u.)
S ₁	0,165	S ₉	0,045
S ₂	0,108	S ₁₀	0,130
S ₃	0,035	S ₁₁	0,087
S ₄	0,015	S ₁₂	0,031
S ₅	DEFEITO	S ₁₃	0,021
S ₆	0,025	S ₁₄	0,077
S ₇	-0,065	S ₁₅	-0,076
S ₈	-0,070	S ₁₆	CHAVE ABERTA

Etapa-6- 2ª execução:

Na Etapa-6 é identificado, utilizando as técnicas de teoria dos grafos, que as chaves S₁, S₂, S₆, S₇, S₈, S₁₀, S₁₁, S₁₄, e S₁₅ formam um laço no sistema. A partir dos resultados obtidos na Etapa-5 verifica-se que o sentido do fluxo de potência se inverte na barra 7 e que o menor fluxo é encontrado na chave S₆. Portanto, essa chave é escolhida para ser aberta. A configuração do sistema pode ser vista na Figura III.18.

Etapa-5- 3ª execução:

O FPO formulado em (III.41) a (III.49) é calculado novamente, considerando as chaves S₇ e S₈ fechadas e a chave S₆ aberta.

A Tabela III.22 apresenta os módulos das tensões nodais do sistema de 16 barras após o fechamento da chave S₇ e S₈ e abertura da chave S₆.

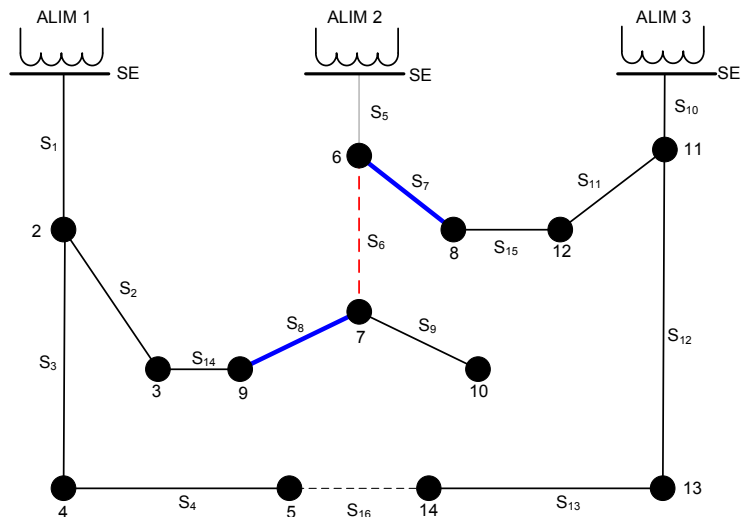


Figura III.18 – Sistema 16 barras reconfigurado com as chaves S_7 e S_8 fechadas e a chave S_6 aberta.

Novamente é verificado se a nova configuração de chaves restabelece o sistema proposto. Conforme Tabela III.23 o sistema é 100% restabelecido e a restrição de radialidade é obedecida. Durante todas as etapas do processo, os níveis de tensão foram mantidos dentro do limite estabelecido (0,95 p.u. a 1,05 p.u.) e as cargas nas barras na área não defeituosa foram atendidas.

Tabela III.22- Tensões do sistema– FPO-5 – 3ª Execução

Barra	V_k (p.u.)	Barra	V_k (p.u.)
1	1	8	0,972
2	0,983	9	0,967
3	0,971	10	0,954
4	0,978	11	0,985
5	0,977	12	0,976
6	0,965	13	0,982
7	0,956	14	0,981

Tabela III.23- Carga Restabelecida no Sistema 16 barras - 3ª Execução

Barra	Carga (kW)	Carga Restabelecida (%)	Carga Restabelecida (kW)
6	4.000	$\gamma_1 = 100 \%$	4.000
7	5.000	$\gamma_2 = 100 \%$	5.000
10	4.500	$\gamma_3 = 100 \%$	4.500

Para comprovar a vantagem do método ARESDEE proposto, a Tabela III.24 mostra o comparativo do resultado obtido com o método proposto por (LIN e CHIN, 1998).

Tabela III.24- Carga Restabelecida no Sistema 16 barras - 3ª Execução

Método	Chaveamentos	Carga Restabelecida
LIN e CHIN (1998)	Fechar S_7	67%
ARESDEE	Fechar S_8 Fechar S_7 Abrir S_6	100 %

Na metodologia de (LIN e CHIN, 1998), os autores consideram que a carga na barra 10 não é prioritária, podendo ser descartada. O autor apresenta como resultado final o fechamento da chave S_7 , restabelecendo somente a carga das barras 6 e 7. Na metodologia proposta, fechando-se inicialmente a chave S_8 , 75,42 % da carga não suprida é restaurada. Fechando-se em seguida a chave S_7 , 100% da carga é restabelecida. Porém, um laço é formado no sistema. Abrindo-se a chave S_6 a restrição de radialidade é respeitada chega-se a uma configuração viável com 100% da carga restabelecida.

III.5 Conclusões

Este capítulo apresentou a metodologia proposta para o restabelecimento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), com o objetivo de minimizar a carga não suprida do sistema.

O algoritmo proposto para o restabelecimento de SDEE (ARESDEE) é baseado em Fluxo de Potência Ótimo (FPO). Para contornar o problema das variáveis discretas no problema, as chaves do sistema são modeladas como uma função sigmoide. A escolha da chave a ser fechada no sistema é baseada em um índice obtido através dos resultados do FPO.

A análise da topologia da rede é feita pelo algoritmo (ARESDEE) utilizando a Teoria de Grafos. Com isso é possível identificar as barras ilhadas do sistema, laços e circuitos entre as chaves e a subestação.

Um aspecto interessante dessa metodologia é que a reconfiguração do sistema é realizada passo a passo, de forma que a cada operação de chaveamento do sistema é apresentada uma configuração viável do sistema. Ao final do processo de solução do problema, é apresentada ao operador do sistema elétrico uma sequência viável e segura de operação das chaves. Em outras metodologias apresentadas na literatura, apenas a configuração inicial e final do problema são apresentadas, não garantindo a viabilidade do problema na transição entre essas configurações.

O método proposto apresenta como vantagem adicional a solução do problema com menor esforço computacional com relação metodologias desenvolvidas utilizando-se técnicas inteligentes (ex. Algoritmo Genético) devido ao reduzido número de execuções de FPO, favorecendo a aplicação do mesmo na operação de sistemas de grande porte.

Os resultados obtidos no sistema tutorial são superiores ao apresentado na literatura, demonstrando a eficácia e validade da metodologia proposta.

Capítulo IV

Resultados

IV.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados da aplicação do algoritmo de Restabelecimento de Sistemas de Distribuição de Energia (ARESDEE) em um sistema conhecido na literatura, incluindo um sistema de médio porte do Brasil.

No Caso-1 são realizadas 4 análises no sistema teste de 33 barras (BARAN e WU, 1989a). Nesse sistema, são considerados defeitos permanentes e simultâneos em dois alimentadores. Na Análise-1, a metodologia proposta é testada com o limite inferior de tensão igual 0,80 p.u. . Na Análise-2 é testada a influência do aumento desse limite inferior de tensão na resposta do algoritmo desenvolvido. A Análise-3 é proposta para avaliar o impacto da representação dos limites de fluxo nas linhas no problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) e seu impacto na solução do problema de restabelecimento dos sistemas de distribuição. Na Análise-4 é considerada a presença de consumidores prioritários no sistema e sua influência na metodologia proposta.

O segundo caso estudado é um sistema de distribuição real de médio porte de 476 barras proposto inicialmente por (GOMES *et al.*, 2006). Na Análise-1 é considerado um defeito permanente no início do alimentador 1, adotando-se o limite inferior de tensão igual à 0,90 p.u. Na Análise-2 é considerado um defeito permanente no mesmo local da análise anterior, porém utilizando o limite de tensão de 0,95 p.u. .

Nestes estudos, as tensões das subestações são consideradas iguais a 1,0 p.u. de forma que fosse possível a comparação com os resultados apresentados na literatura. As simulações foram realizadas utilizando-se um microcomputador Intel Core I5, velocidade 3,2 GHz, e o software Microsoft Visual® C++.

IV.2 Caso-1: Sistema de 33 Barras

Muito utilizado na literatura sobre reconfiguração de SDEE, o sistema teste de 33 barras (BARAN e WU, 1989), 12,66 kV, carga total de 3.715 kW e 2.300 kVAr, é

composto de 37 trechos, incluindo 5 chaves de interconexão (NA). A Figura IV.1 mostra a topologia inicial deste sistema, na qual as chaves NA são S_{33} , S_{34} , S_{35} , S_{36} e S_{37} .

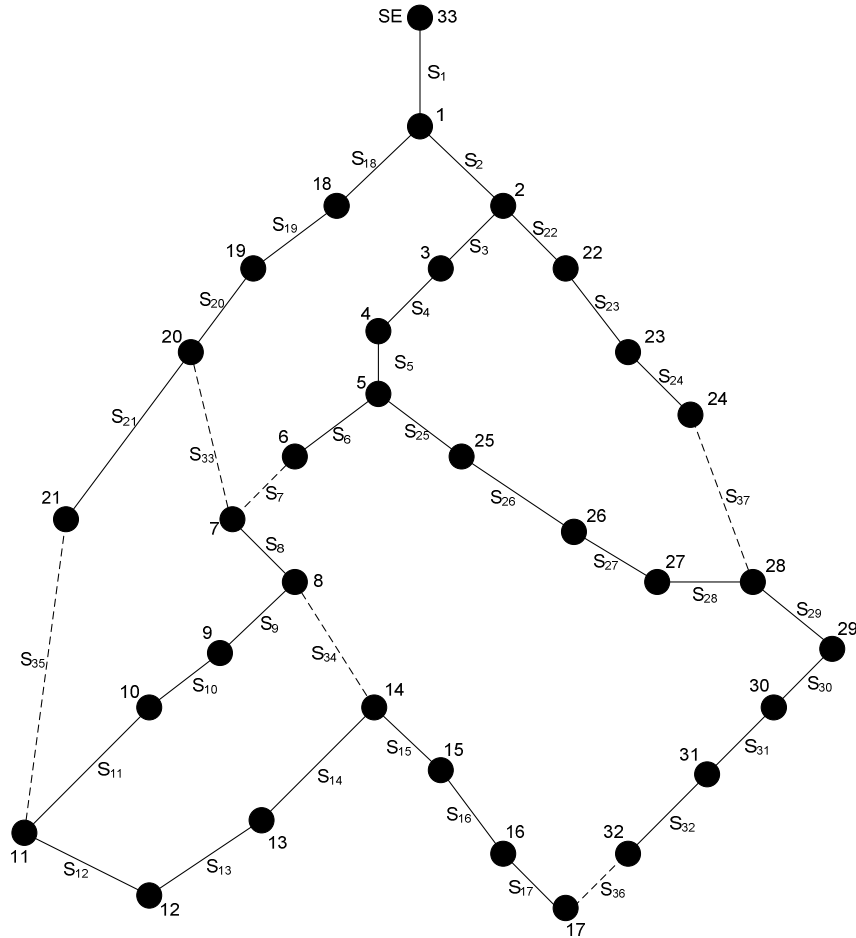


Figura IV.1 - Sistema de 33 barras (BARAN e WU, 1989) - topologia original

Para viabilizar comparações com outra metodologia, a configuração do sistema de 33 barras foi alterada de acordo com proposta por (LIN e CHIN, 1998). Nessa topologia, as chaves de interconexão normalmente abertas (NA) são S_7 , S_9 , S_{14} , S_{32} e S_{37} . Para todos os estudos, a tensão na barra número 33, que é considerada a subestação, foi fixada em 1,0 p.u.

Em (LIN e CHIN, 1998) são aplicados dois defeitos permanentes e simultâneos nos circuitos S_5 e S_{35} . Dessa forma, as barras números 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 25, 26, 27, 28, 29, 30 e 31 ficam desenergizadas, totalizando 1.465 kW de carga não suprida. Na Figura IV.2 essas barras são representadas em cinza.

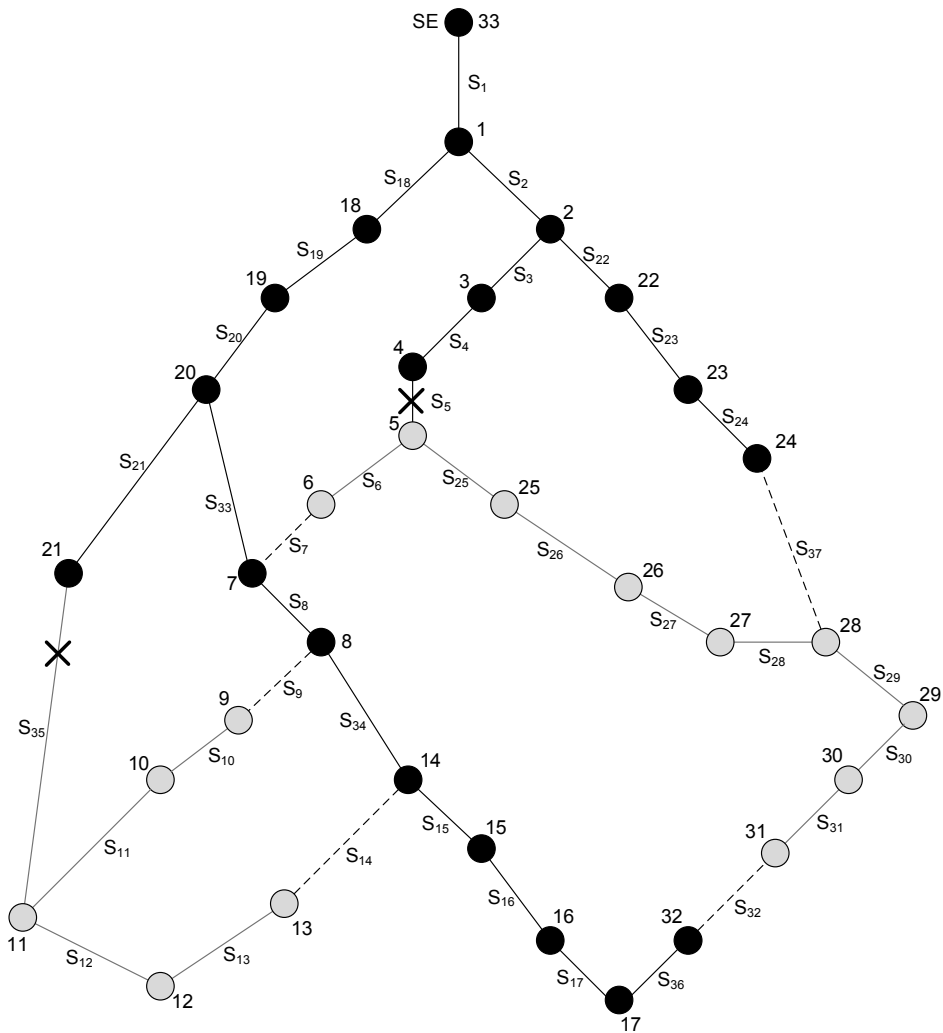


Figura IV.2 - Sistema de 33 barras (LIN e CHIN 1998)

Para ilustrar o potencial da metodologia proposta, os seguintes estudos são realizados:

(i) Avaliação do desempenho do ARESDEE através de um estudo comparativo envolvendo os resultados apresentados em (LIN e CHIN, 1998) e (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011);

(ii) Avaliação da influência dos limites de tensão considerados no desempenho e resultados da metodologia proposta de restabelecimento;

(iii) Avaliação do impacto que a inclusão dos limites de fluxo de potência ativa causa no desempenho e no resultado do método proposto para o restabelecimento;

(iv) Avaliação da influência da representação de consumidores prioritários no desempenho e no resultado do método proposto para o restabelecimento.

IV.2.1 Análise 1

Esta análise consiste na aplicação do ARESDEE para o restabelecimento do sistema de distribuição considerando o nível de tensão nas barras entre 0,80 p.u. e 1,05 p.u. A Tabela IV.1 apresenta a comparação de resultados entre o método proposto e as metodologias apresentadas por (LIN e CHIN, 1998) e (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011). A metodologia proposta (ARESDEE) indica que a chave S₃₇ deve ser a primeira a ser fechada, seguida da chave S₉. A metodologia proposta por (LIN e CHIN, 1998) indica apenas que as chaves S₇ e S₉ devem ser fechadas, sem indicar a sequência de operação. Da mesma forma, ZIDAN e EL-SAADANY (2011) indicam o fechamento das chaves S₃₇ e S₁₄ sem indicar a sequência de operação.

Tabela IV.1- Soluções para o restabelecimento do sistema de 33 barras – Limite inferior de tensão de 0,80 p.u.

Metodologia	Proposto (ARESDEE)	LIN e CHIN (1998)	ZIDAN e EL-SAADANY(2011)
Chaveamento	1° - Fechar S ₃₇ 2° - Fechar S ₉	Fechar S ₇ Fechar S ₉	Fechar S ₃₇ Fechar S ₁₄
Carga Restabelecida	100 %	100%	100%
Tensão Mínima (p.u.)	0,928 (6)	0,842 (31)	0,928 (32)
Perdas (kW)	189	301	195

Um aspecto importante a ser analisado é a sequência de chaveamento. Sendo o processo de reestabelecimento dinâmico no tempo, quanto mais carga é restabelecida, menor será a redução de faturamento da concessionária de energia elétrica e melhor serão seus indicadores de continuidade operacional. Neste sentido, o gráfico da Figura IV.3 apresenta os resultados parciais do processo de restabelecimento do caso 33 barras. O algoritmo ARESDEE indica primeiro o fechamento da chave S₃₇, restabelecendo 1.120 kW (76,45% da carga não suprida). Fechando-se a chave S₉ a carga do sistema é totalmente restabelecida. Os algoritmos propostos por (LIN e CHIN, 1998) e (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011) não fornecem a sequência de chaveamento para restabelecer o sistema. Portanto, foram testadas as duas sequências de chaveamento possíveis em cada caso. No caso chamado de LIN e CHIN (1), a chave S₇ foi fechada primeiro, seguida da

chave S₉. Nesse caso, da mesma forma que apresentando pelo ARESDEE, o sistema foi totalmente restabelecido. Trocando-se a sequência de chaveamento, no caso nomeado como LIN e CHIN (2), fechando-se primeiro a chave S₉, apenas 23,55% da carga é restabelecida. Fechando-se a chave S₇, o sistema é restabelecido em sua totalidade. De forma análoga, no caso chamado ZIDAN e EL-SAADANY (1), a chave S₃₇ foi fechada primeiro, seguida da chave S₁₄. No caso ZIDAN e EL-SAADANY (2) a sequência de chaveamento foi trocada. O caso ZIDAN e EL-SAADANY (1) obteve a mesma resposta que o caso LIN e CHIN (1), quanto o caso ZIDAN e EL-SAADANY (2) obteve resposta semelhante ao caso LIN e CHIN (2).

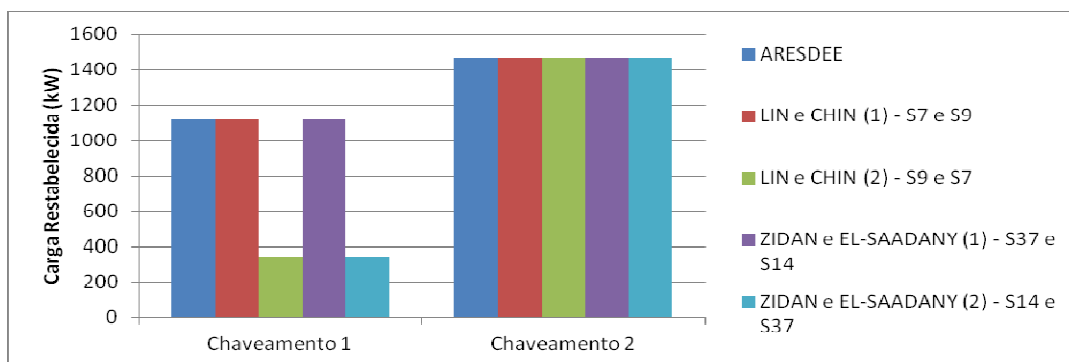


Figura IV.3 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras.

A partir dessa análise pode-se concluir que a sequência de chaveamento é de grande importância no processo de restabelecimento de SDEE. Operando-se a chave correta, a concessionária de energia pode restabelecer um maior bloco de carga mais rápido, atendendo a um maior número de consumidores, melhorando seus índices de continuidade operacional e aumentando seu faturamento.

Além disso, verifica-se que a tensão mínima encontrada nas configurações de rede apresentadas pelo ARESDEE e por (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011) (0,928 p.u.) é maior que a apresentada por (LIN e CHIN, 1998) (0,842 p.u.). Outro ponto que merece destaque é que o método proposto apresenta a menor de perda de potência ativa entre todas as configurações apresentadas.

Na Figura IV.4 são apresentadas as configurações finais para o problema proposto. As linhas azuis representam as chaves que foram fechadas no problema.

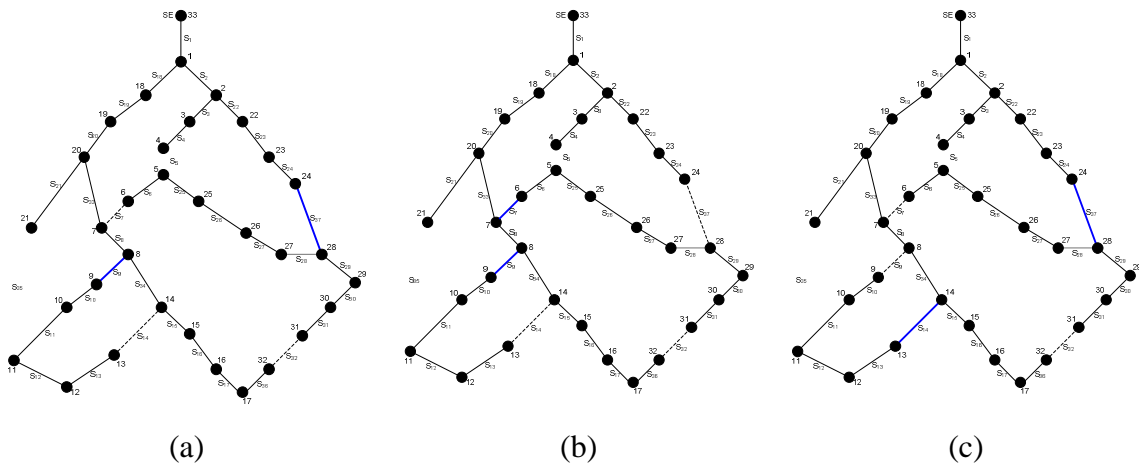


Figura IV.4 – Configuração final, sistema 33 barras. (a) ARESDEE, (b) LIN e CHIN, (c) (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011).

IV.2.2 Análise 2 - Limites de Tensão

O objetivo dessa análise é avaliar a influência dos limites de tensão considerados no restabelecimento de sistemas de distribuição de energia elétrica. Para isso, foram considerados os limites inferiores de tensão de 0,85 p.u., 0,90 p.u. e 0,95 p.u. . O limite superior de tensão foi mantido em 1,05 p.u. .

Os defeitos e a configuração do sistema considerado são os mesmos apresentados na Figura IV.2. Com o aumento do limite inferior de tensão do sistema, espera-se que uma menor quantidade de carga seja restabelecida de forma que o sistema opere com os níveis de tensão desejados. Além disso, metodologias que utilizam fluxo de potência convencional como base (ex. LIN e CHIN, 1998) podem não representar bem esses limites de tensão. Portanto, a utilização de fluxo de potência ótimo (FPO) nesse tipo de problema torna-se uma alternativa atrativa por tratar desses limites de tensão de forma adequada.

Considerando o limite inferior de tensão de 0,85 p.u., verifica-se através da Tabela IV.2 que tanto o ARESDEE quanto o método proposto por (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011) fornecem a mesma resposta da análise 1, restabelecendo 100% do sistema. O algoritmo proposto por (LIN e CHIN, 1998) restabelece 98% da carga, sendo que a tensão mínima de 0,85 p.u. ocorre na barra número 31.

Tabela IV.2- Solução para o sistema de 33 barras – Limite inferior de tensão de 0,85 p.u.

Metodologia	Proposto (ARESDEE)	LIN e CHIN (1998)	ZIDAN e EL-SAADANY(2011)
Chaveamento	1° - Fechar S ₃₇ 2° - Fechar S ₉	Fechar S ₇ Fechar S ₉	Fechar S ₃₇ Fechar S ₁₄
Carga Restabelecida	100 %	98%	100%
Tensão Mínima (p.u.)	0,928 (6)	0,85 (31)	0,928 (31)

Analisando-se o problema a cada passo de chaveamento, tanto a chave S₃₇ como a chave S₇ (chaveamento 1) restabelecem a mesma quantidade de carga (76,45% da carga não suprida). No chaveamento 2, o algoritmo proposto por (LIN e CHIN,1998) restabelece 98% da carga enquanto o ARESDEE e (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011) restabelecem 100%.

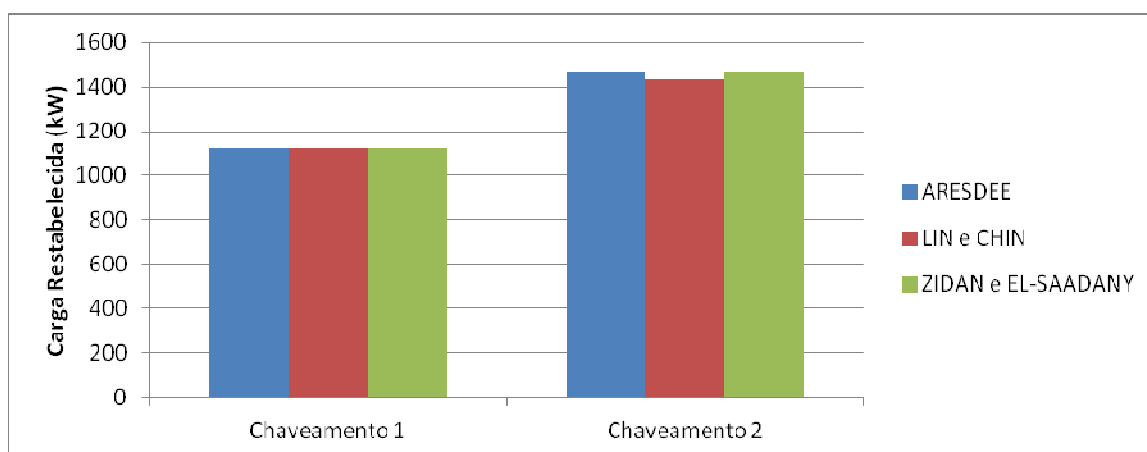


Figura IV.5 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras, limite de tensão 0.85 p.u.

Adotando-se o limite inferior de tensão nas barras de 0,90 p.u. , nota-se pela Tabela IV.3 que o método proposto por (LIN e CHIN, 1998) restabelece ao final do processo de solução 79% da carga e o menor nível de tensão do problema ocorre também na barra número 31. O método proposto neste trabalho (ARESDEE) e o proposto por (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011) obtiveram a mesma resposta da Análise 1.

Tabela IV.3- Solução para o sistema de 33 barras – Limite inferior de tensão de 0,90 p.u.

Metodologia	Proposto (ARESDEE)	LIN e CHIN (1998)	ZIDAN e EL-SAADANY(2011)
Chaveamento	1° - Fechar S ₃₇ 2° - Fechar S ₉	Fechar S ₇ Fechar S ₉	Fechar S ₃₇ Fechar S ₁₄
Carga Restabelecida	100 %	79%	100%
Tensão Mínima (p.u.)	0,928 (6)	0,90 (31)	0,928 (32)

Através da Figura IV.6 verifica-se que tanto no Chaveamento 1 quanto no Chaveamento 2, os métodos ARESDEE e (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011) restabelecem uma maior quantidade de carga que o algoritmo proposto por (LIN e CHIN).

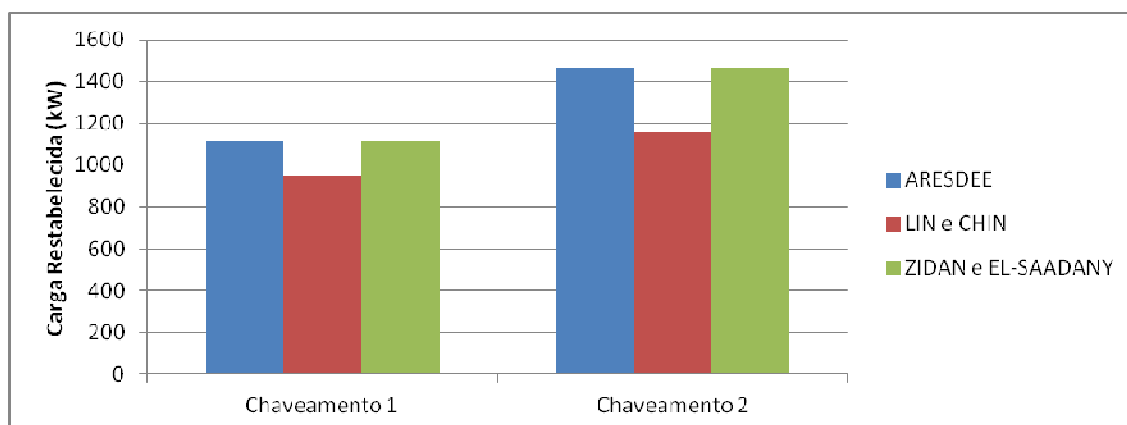


Figura IV.6 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras, limite de tensão 0.90 p.u.

Com o objetivo de comprovar-se a eficácia do método proposto, elevou-se o limite de tensão inferior do sistema até um valor que o sistema apresentasse uma resposta diferente da encontrada na Análise 1 do problema. Considerando-se o limite inferior de tensão de 0,95 p.u., o método proposto restabelece 72% da carga não suprida. Conforme pode ser visto na Tabela IV.4, na metodologia ARESDEE são indicadas 6 ações de chaveamento: fechar S₃₇, fechar S₉, fechar S₃₂, abrir S₁₇, fechar S₇, abrir S₂₅. O método proposto por LIN e CHIN restabelece somente 11% da carga. O método (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011) restabelece 60% da carga não suprida do sistema.

Tabela IV.4- Solução para o sistema de 33 barras – Limite inferior de tensão de 0,95 p.u.

Metodologia	Proposto (ARESDEE)	LIN e CHIN (1998)	ZIDAN e EL-SAADANY(2011)
Chaveamento	1° - Fechar S ₃₇ 2° - Fechar S ₉ 3° - Fechar S ₃₂ 4° - Abrir S ₁₇ 5° - Fechar S ₇ 6° - Abrir S ₂₅	Fechar S ₇ Fechar S ₉	Fechar S ₃₇ Fechar S ₁₄
Carga Restabelecida	72 %	11%	60%
Tensão Mínima (p.u.)	0,95 (16 e 17)	0,95 (32)	0,95 (6 e 32)

A Figura IV.7 apresenta a solução do problema passo a passo considerando o limite inferior de tensão de 0,95 p.u. No caso do algoritmo proposto por LIN e CHIN, o primeiro chaveamento (chave S₇) restabeleceu os 11% da carga não suprida do sistema. O fechamento da chave S₉ não consegue restabelecer nenhuma das cargas localizadas nas barras números 9, 10, 11, 12, 13. O método proposto por (ZIDAN e EL-SAADANY, 2011) restabelece 55% da carga não suprida fechando-se a chave S₃₇. Com o fechamento da chave S₁₄ 60% da carga na área atingida pelo defeito é restabelecida, sendo que as cargas localizadas nas barra números 10, 11, 13 e 29 não são atendidas.

A metodologia proposta (ARESDEE) consegue restabelecer 72% o sistema para essa condição, pois considera a formação momentânea de laços no sistema. Com isso, é possível restaurar um maior número de cargas. Nesse sistema, o fechamento da chave S₃₂ (Chaveamento 3) causa a formação de um laço. Portanto, no passo seguinte (Chaveamento 4) é escolhida uma chave de tal forma que sua abertura cause o menor impacto na função objetivo do problema. Através da Figura IV.7 observa-se que o Chaveamento 4 (abertura da chave S₁₇) causa uma pequena diminuição na carga restabelecida do sistema. Portanto, para o sistema proposto, a carga restabelecida no Chaveamento 3 deve ser considerada a carga apresentada no Chaveamento 4. Isso deve ser feito para que não se permita a ligação de uma carga na etapa 3 do problema e tenha que desligá-la na etapa seguinte.

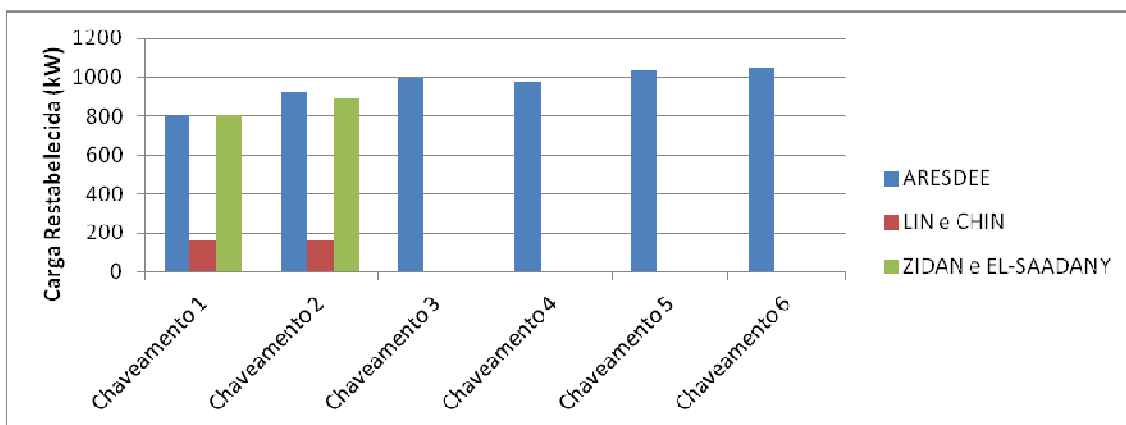


Figura IV.7 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras, limite de tensão 0,95 p.u.

Na Tabela IV.5 é apresentado o percentual de carga restabelecida para cada barra da área inicialmente desenergizada do sistema no final do processo de solução através do ARESDEE. Pode-se notar que as cargas das barras 13 e 29 não foram supridas enquanto as cargas das barras 10 e 31 foram parcialmente atendidas.

Tabela IV.5- Carga restabelecida por barra para o sistema de 33 barras – tensão de 0,95 p.u.

Barra	% Carga Restabelecida	Barra	% Carga Restabelecida
5	100 %	25	100 %
6	100 %	26	100 %
9	100 %	27	100 %
10	45,5 %	28	100 %
11	100 %	29	0 %
12	100 %	30	100 %
13	0 %	31	63,6 %

Na Figura IV.8 é apresentada a configuração final do sistema de 33 barras proposto pela metodologia ARESDEE. As linhas azuis são as chaves que foram fechadas, enquanto as linhas vermelhas tracejadas são as chaves que foram abertas.

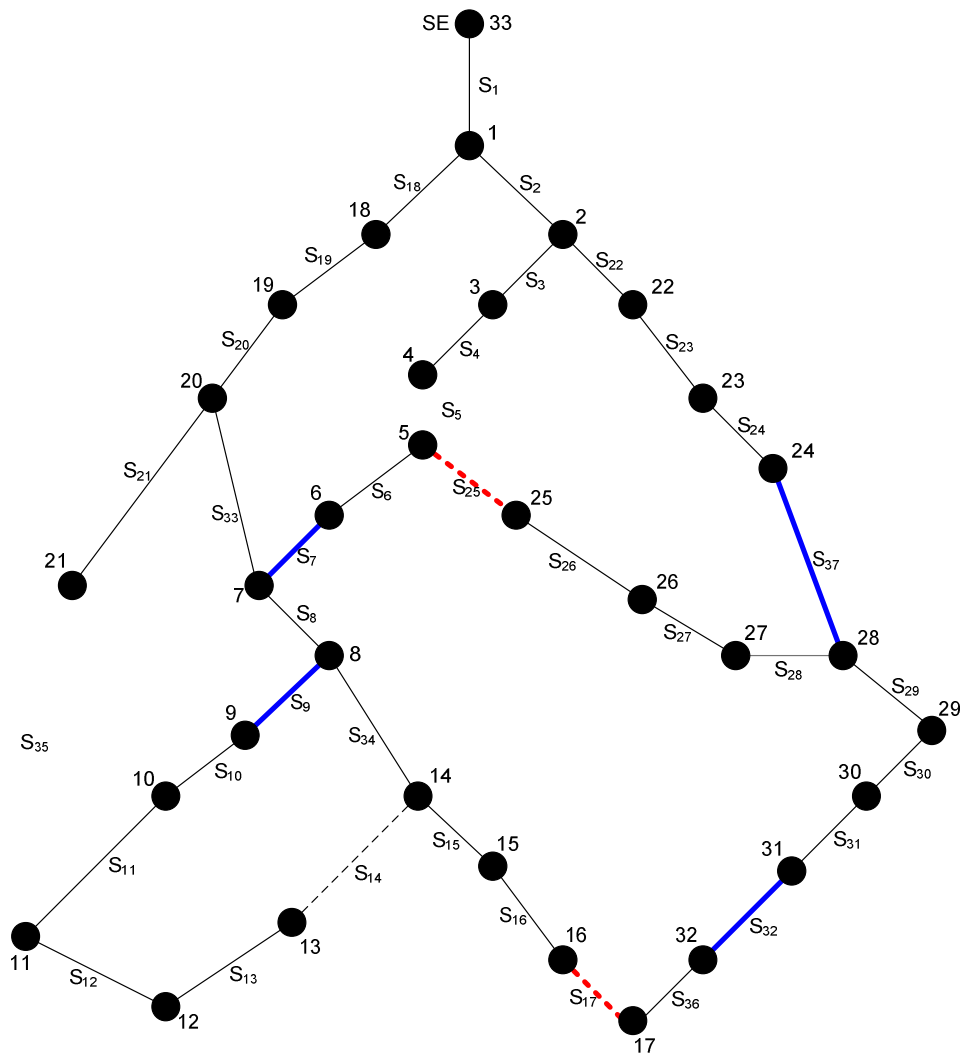


Figura IV.8 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras, limite de tensão 0.95 p.u.

IV.2.3 Análise 3 – Violação de Fluxo

Este estudo tem como objetivo avaliar o impacto causado no problema de restabelecimento de sistemas de distribuição quando os limites de fluxo de potência aparente das linhas são violados.

Para o sistema de 33 barras apresentado por (BARAN e WU, 1989), os limites de fluxo de potência aparente dos circuitos não foram encontradas na literatura, uma vez que a grande maioria dos autores não trata dessa restrição, sendo esta também uma contribuição do trabalho. A partir do caso base reconfigurado e sem defeitos

apresentado na Figura IV.2, calculou-se os fluxos de potência aparente nas linhas do sistema conforme apresentado na Tabela IV.6.

Tabela IV.6- Fluxos de potência aparente para o caso base

Linha	De	Para	Fluxo (kVA)	Linha	De	Para	Fluxo(kVA)
S ₁	33	1	4.541,87	S ₂₀	19	20	1.258,62
S ₂	1	2	2.942,74	S ₂₁	20	21	502,24
S ₃	2	3	1.794,46	S ₂₂	2	22	1.044,86
S ₄	3	4	1.643,33	S ₂₃	22	23	938,30
S ₅	4	5	1.571,50	S ₂₄	23	24	466,77
S ₆	5	6	223,76	S ₂₅	5	25	1.284,09
S ₇	6	7	NA	S ₂₆	25	26	1.222,54
S ₈	7	8	423,01	S ₂₇	26	27	1.161,01
S ₉	8	9	NA	S ₂₈	27	28	1.094,43
S ₁₀	9	10	63,25	S ₂₉	28	29	957,05
S ₁₁	10	11	116,34	S ₃₀	29	30	399,74
S ₁₂	11	12	214,29	S ₃₁	30	31	232,76
S ₁₃	12	13	144,34	S ₃₂	31	32	NA
S ₁₄	13	14	NA	S ₃₃	7	20	653,39
S ₁₅	14	15	296,92	S ₃₄	8	14	358,38
S ₁₆	15	16	233,52	S ₃₅	11	21	402,44
S ₁₇	16	17	170,21	S ₃₆	17	32	72,14
S ₁₈	1	18	1.481,81	S ₃₇	24	28	NA
S ₁₉	18	19	1.380,41				

De acordo com as análises anteriores, a primeira chave fechada para o restabelecimento do sistema é a de número 37, que está localizada entre as barras 24 e 28. Para que essa chave do sistema não fosse selecionada, todas as linhas entre a barra 24 e a barra 1 (S₂₄, S₂₃, S₂₂ e S₂) tiveram seus limites definidos iguais ao fluxo do caso base. Com essa ação, espera-se que a metodologia indique outra chave para o restabelecimento do sistema. Neste estudo foi definido o limite inferior de tensão de 0,80 p.u.

A Tabela IV.7 apresenta a solução para o problema de restabelecimento via ARESDEE considerando a restrição de fluxo de potência aparente nas linhas a montante da chave S₃₇.

Tabela IV.7- Soluções para o restabelecimento do sistema de 33 barras – Limite potência ativa habilitado.

Metodologia	Proposto (ARESDEE)
Chaveamento	1° - Fechar S ₇ 2° - Fechar S ₉
Carga Restabelecida	100%
Tensão Mínima (p.u.)	0,842 (31)

Pode-se observar que, neste caso, a representação dos limites de fluxo de potência aparente das linhas causa mudança no resultado do problema de restabelecimento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, alterando a sequência ótima das operações de chaveamento. Portanto, os limites reais das linhas do sistema devem ser representados para a determinação de soluções que sejam factíveis, ou seja, para que as operações de chaveamento não causem violações na rede, como por exemplo, cortes de carga indevidos.

IV.2.4 Análise 4 – Consumidores prioritários

Uma vantagem da metodologia proposta é a flexibilidade em relação aos diversos objetivos que um programa de restabelecimento pode contemplar. Para exemplificar esta flexibilidade propõe-se neste item avaliar a influência de consumidores prioritários no restabelecimento de sistemas de distribuição de energia elétrica. Esses consumidores são caracterizados no Módulo 1 dos Procedimentos de Distribuição da ANEEL (PRODIST) como de vital importância para a sociedade, como por exemplo, unidades operacionais de segurança pública (hospitais, polícia militar, polícia civil, corpo de bombeiros e defesa civil). De acordo com (MIU *et al.*, 1998), os consumidores prioritários e consumidores que possuem contratos de energia confiável com a concessionária devem ter prioridade no restabelecimento da energia elétrica.

Para que essa nuance proposta acima seja considerada, a função objetivo apresentada inicialmente na equação (III.31) deve ser modificada para que esses consumidores sejam priorizados. Para isso, a variável de restabelecimento de carga associado à carga prioritária deve ser ponderado por um valor numérico elevado, para que este consumidor tenha prioridade sobre os demais. Esse valor deve ser escolhido de tal forma que ela seja maior que o somatório das demais cargas consideradas não prioritárias. Após uma análise de sensibilidade, foi adotado um valor numérico 100. Na

Equação (IV.1) pode ser vista essa alteração na função objetivo do problema de Fluxo de Potência Ótimo.

$$Max\ FOB = \sum_{k \in \Omega_{r_n}} (\gamma_k Pl_k) + \sum_{k \in \Omega_{r_p}} (\gamma_k Pl_k 100) \quad (IV.1)$$

Onde:

- Ω_{r_n} Representa o conjunto de barras na área desenergizada não prioritários
- Ω_{r_p} Representa o conjunto de barras na área desenergizada prioritários
- γ_k Representa o percentual de carga restabelecida associado às barras da área desenergizada do sistema;
- Pl_k Representa a carga ativa na barra k

No sistema de 33 barras foi considerada para fins de simulação a existência de consumidores prioritários na barra 9. Nesse estudo foi arbitrado o limite inferior de tensão das barras de 0,90 p.u.

A Tabela IV.8 apresenta a solução do problema de restabelecimento considerando a presença de consumidores prioritários no sistema. Pode-se notar que o resultado apresentado é igual ao obtido na Análise-2 do problema, porém com a sequência de chaveamento inversa.

Tabela IV.8- Solução para o sistema de 33 barras – Consumidores prioritários

Metodologia	Proposto (ARESDEE)
Chaveamento	1° - Fechar S ₉ 2° - Fechar S ₃₇
Carga Restabelecida	100 %
Tensão Mínima (p.u.)	0,928 (6)

Conforme pode ser observado na Figura IV.9, o primeiro chaveamento (S₉) restabelece uma parcela menor de carga do sistema, porém restaura a carga para o consumidor prioritário. Com o fechamento da segunda chave (S₃₇) o sistema é completamente restabelecido. Portanto, para a correta representação do restabelecimento de sistemas reais, a existência de consumidores prioritários deve ser considerada.

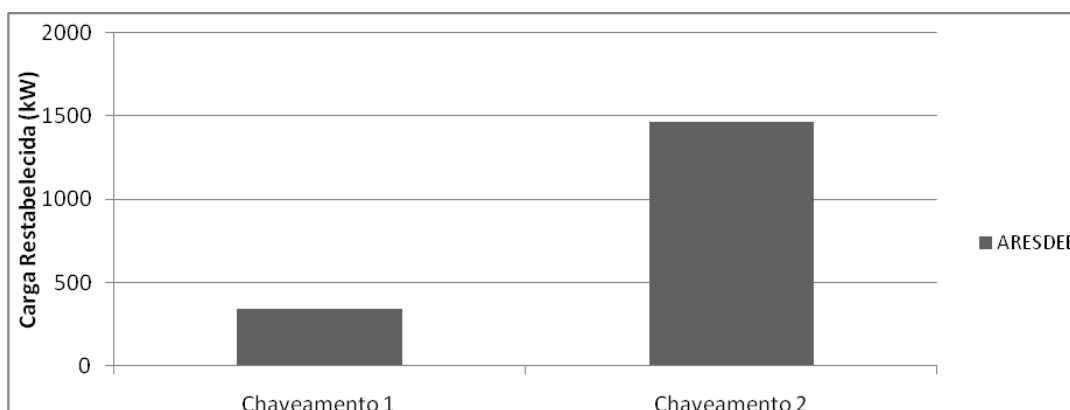


Figura IV.9 - Carga Restabelecida, sistema 33 barras, com consumidores prioritários

IV.3 Caso-2: Sistema de 476 Barras

Este caso tem como objetivo validar a metodologia proposta nesta tese para o restabelecimento de SDEE real de médio porte. Para tanto, testou-se um sistema de distribuição real de 476 barras apresentado pela primeira vez em (GOMES *et al.*, 2006).

Este sistema contém dois alimentadores aéreos urbanos de 13,8 kV, sendo:

- (i) Alimentador-1: 257 barras, carga ativa de 7.723 kW e carga reativa de 3.015 kVAr;
- (ii) Alimentador-2: 218 barras, carga ativa de 1.287 kW e carga reativa de 485 kVAr.

Como pode ser visto na Figura IV.10, o sistema tem quatro chaves de interconexão (NA): S_{10643} , S_{5380} , S_{1167} e S_{10647} . Estes dispositivos de chaveamento juntamente com as chaves de seccionamento normalmente fechadas (NF) totalizam 22 circuitos manobráveis. A Figura IV.10 também apresenta um diagrama simplificado deste sistema, onde as chaves aparecem circuladas.

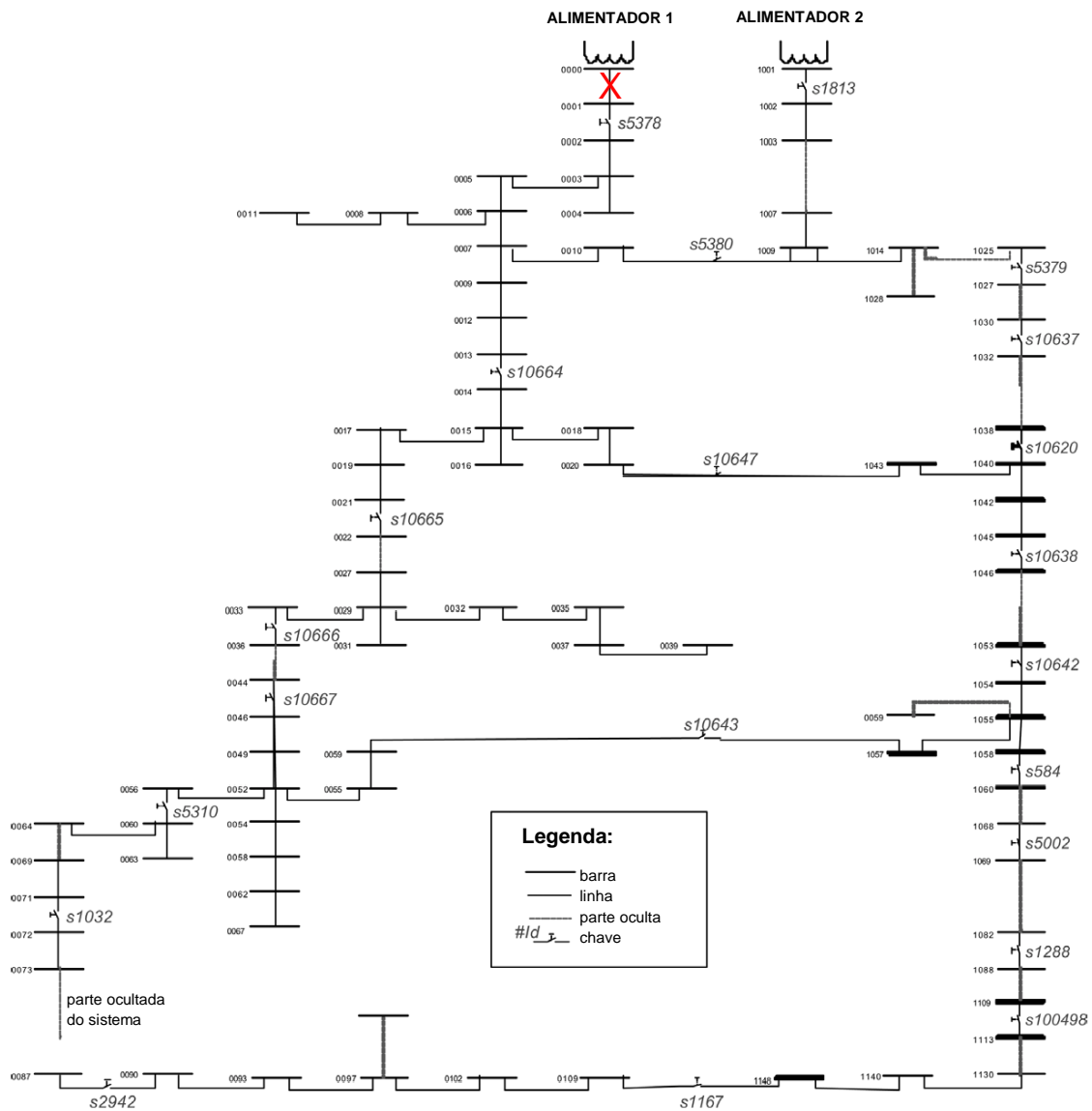


Figura IV.10- Diagrama unifilar do sistema de 476 barras (GOMES *et al.*, 2006).

IV.3.1 Análise-1:

Esta análise consiste na consideração de um defeito permanente na saída do alimentador 1, entre as barras 000 e 001, deixando todo o circuito sem alimentação. As cargas localizadas nas barras números 4, 9, 10, 11, 16, 17, 20, 31, 52, 59, 66, 67, 70, 91, 93, 97, 99, 112, 117, 124, 141, 143, 149, 153, 160, 171 e 213, ficam sem energia, conforme poder ser visto na Figura IV.10. Neste estudo, os limites de tensão considerados são de 0,90 p.u. e 1,05 p.u.

Na Tabela IV.9 são apresentadas as soluções da metodologia proposta (ARESDEE) e do fechamento manual das outras chaves de interconexão. A

metodologia proposta indica o fechamento da chave S_{5380} , restabelecendo 100% da carga não suprida do sistema.

Tabela IV.9- Solução para o sistema de 476 barras – Limite mínimo de tensão 0,90 p.u.

Metodologia	Proposto (ARESDEE)	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Chaveamento	Fechar S_{5380}	Fechar S_{10647}	Fechar S_{10643}	Fechar S_{1167}
Carga Restabelecida	100 %	100 %	100%	66 %
Tensão Mínima (p.u.)	0,937 (257)	0,917 (195)	0,902 (213)	0,90 (66)

As metodologias denominadas “Solução 1”, “Solução 2” e “Solução 3” foram obtidas fechando manualmente as demais chaves normalmente abertas (NA) do sistema que não foram utilizadas na solução proposta pelo ARESDEE. Nota-se que as “Solução 1” e “Solução 2” restabelecem também 100% da carga, porém com níveis de tensão mínima inferiores aos apresentados pelo ARESDEE. A “Solução 3” apresenta uma solução inferior a todas as demais soluções, pois consegue restabelecer apenas 66 % da carga não suprida e com tensão mínima de 0,90 p.u. na barra número 66.

IV.3.2 Análise-2:

Nesta análise o limite de tensão mínimo do sistema é elevado a para 0,95 p.u. de forma a se avaliar o comportamento da metodologia proposta sob essas condições. O defeito é aplicado na saída do alimentador 1, entre as barras números 000 e 001, no mesmo ponto considerado na Análise-1. Além da execução do algoritmo proposto, também foi executado um algoritmo denominado “Força Bruta”. Esse algoritmo varre todo o espaço de busca do problema, testando todas as opções de configurações de chaveamento.

Conforme mostrado na Tabela IV.10 o método proposto consegue restabelecer 90% da carga fechando-se primeiramente a chave S_{5380} e em seguida a chave S_{1167} . O fechamento dessas duas chaves causa a formação de um laço no sistema. Na sequência, a chave S_{2942} é aberta, desfazendo-se esse laço. A tensão mínima de 0,95 p.u. é encontrada na barra número 213. Apesar de haver outras duas chaves normalmente abertas no sistema (S_{10643} e S_{10647}), a metodologia indica, através dos seus índices, que

o fechamento dessas não aumenta a carga restabelecida no sistema. Além disso, foi verificado que a resposta apresentada pelo ARESDEE é igual a resposta do método “Força Bruta”, comprovando a eficiência da metodologia proposta.

Tabela IV.10- Solução para o sistema de 476 barras – Limite mínimo de tensão 0,95 p.u.

Metodologia	Proposto (ARESDEE)	“Força Bruta”
Chaveamento	1° - Fechar S ₅₃₈₀ 2° - Fechar S ₁₁₆₇ 3° - Abrir S ₂₉₄₂	1° - Fechar S ₅₃₈₀ 2° - Fechar S ₁₁₆₇ 3° - Abrir S ₂₉₄₂
Carga Restabelecida	90 %	90%
Tensão Mínima (p.u.)	0,95 (213)	0,95 (213)

IV.4 Desempenho Computacional

Conforme apresentado por Pérez-Guerreiro *et al.* (2008), o restabelecimento de sistemas de distribuição é um problema de operação em tempo real, sendo desejado que uma solução seja obtida, no máximo, na escala dos minutos.

A Tabela IV.11 apresenta os tempos computacionais médios para a solução do problema utilizando a metodologia proposta. Para os sistemas testados, o problema de reconfiguração da rede foi resolvido em tempos inferiores a 4 segundos. Tendo em vista os tempos de execução do algoritmo, pode-se concluir que o método proposto se mostra promissor para utilização na operação em tempo real de sistemas elétricos de distribuição.

Tabela IV.11- Tempos computacionais médios

Sistema	Limite inferior de tensão (pu)	Tempo (s)
16 barras (Cinvalar <i>et al.</i> , 1988)	0,90	0,219
33 barras (Baran e Wu, 1989)	0,80	0,552
	0,85	0,552
	0,90	0,552
	0,93	0,625
476 barras	0,90	3,1
	0,95	3,6

IV.5 Conclusões

Foram apresentados nesse capítulo os resultados da aplicação do algoritmo de restabelecimento de sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE). Para esses estudos, foi utilizado um sistema conhecido da literatura de 33 barras e um sistema real de médio porte de 476 barras.

De acordo com os estudos, pode-se verificar a importância da consideração da sequência de chaveamento no resultado final do problema de restabelecimento. Metodologias que não consideram essa questão podem conduzir a respostas finais de restabelecimento iguais, não garantindo, no entanto, respostas intermediárias satisfatórias. Supondo, por exemplo, um sistema no qual o deslocamento entre as chaves demore 30 minutos. No caso de 33 barras apresentado na análise 2, caso a sequência fosse invertida, 76,45% da carga iriam ficar desalimentados durante 30 minutos a mais que o necessário. Além disso, a concessionária de energia deixaria de faturar um maior bloco de carga durante esse período.

Além disso, foi verificada através das demais análises que a representação de todas as nuances dos sistemas reais, tais como, limites de tensão mínimos admissíveis, limites de fluxo de potência nas linhas e consumidores prioritários alteram a resposta fornecida pela metodologia. Como pode ser visto neste capítulo, a metodologia proposta para o restabelecimento de SDEE está preparada para representar todas essas características dos sistemas reais encontrados nas concessionárias de energia elétrica.

Os resultados obtidos para os sistemas simulados se mostram superiores aos encontrados na literatura. O método proposto apresenta como vantagem adicional a solução do problema com menor esforço computacional em relação a metodologias que analisam diversas alternativas de configuração de rede devido ao reduzido número de execuções de FPO, favorecendo a aplicação do mesmo na operação de sistemas de grande porte. Além disso, os tempos computacionais do algoritmo desenvolvido se mostram promissores para aplicação da ferramenta na operação de SDEE em tempo real.

Capítulo V

Conclusões

V.1 Considerações Finais

Esta tese apresentou uma metodologia para o restabelecimento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) após a ocorrência de um ou mais defeitos na rede. A principal contribuição do método é restabelecer ao máximo as cargas afetadas pelo defeito, considerando as restrições operacionais e os percentuais de carga restabelecida dentro da formulação do problema de otimização. Com isso obteve-se uma sequência viável de operação de chaveamento com desempenho computacional adequado.

O algoritmo proposto para o restabelecimento de SDEE (ARESDEE) é baseado em Fluxo de Potência Ótimo (FPO) resolvido pelo método de pontos interiores (MPI). A análise da topologia da rede é feita pelo ARESDEE utilizando a Teoria de Grafos. Com isso é possível identificar as barras ilhadas do sistema, laços e circuitos entre as chaves e a subestação. Para contornar o problema das variáveis discretas, as chaves do sistema são modeladas como funções contínuas, do tipo sigmoide (OLIVEIRA *et al.*, 2005), (GOMES *et al.*, 2006), (SILVA JUNIOR *et al.*, 2008a), (SILVA JUNIOR *et al.*, 2008b), (OLIVEIRA *et al.*, 2010), (SILVA JUNIOR *et al.*, 2011) e (NASCIMENTO *et al.*, 2011). A escolha da chave a ser fechada no sistema é baseada em um índice obtido através dos resultados do FPO. O restabelecimento do SDEE é obtido passo a passo, de forma que a cada operação de chaveamento é apresentada uma configuração do sistema que atende as restrições de limites de corrente e tensão, restabelecendo o máximo de carga possível, incluindo os consumidores prioritários. Ao final do processo de solução do problema, é apresentada ao operador do sistema elétrico uma sequência viável e segura de operação das chaves. Visto que procedimentos heurísticos são utilizados no processo de obtenção das chaves, não se pode garantir o ótimo global em todos os casos, contudo, as soluções obtidas pelo método são de boa qualidade quando comparadas com outras metodologias encontradas na literatura. A implementação

computacional do algoritmo foi realizada em linguagem C++ utilizando-se modelagem orientada a objetos (MOO).

A metodologia proposta foi validada utilizando-se sistemas referenciados na literatura técnica e um sistema real de distribuição. Dessa forma, conclui-se que a metodologia para o restabelecimento de SDEE apresentada nessa tese mostrou-se uma ferramenta computacional eficiente. Uma consideração importante a ser feita é que a maioria dos trabalhos apresentados na literatura apresenta como resultado somente a configuração final do sistema. A metodologia proposta resolve o problema passo a passo, apresentando um plano de restabelecimento viável a cada operação de chaveamento. Devido ao número reduzido de execuções de FPO, o método proposto apresenta como vantagem adicional a solução do problema com menor esforço computacional com relação a metodologias que analisam diversas opções de configurações de rede (ex. Algoritmo Genético), mostrando-se ser uma ferramenta promissora para aplicação na operação de sistemas de distribuição.

V.2 Propostas de Desenvolvimentos Futuros

Seguindo a linha de pesquisa desenvolvida nesta tese e tendo em vista os resultados obtidos, alguns tópicos tornam-se promissores para propostas de trabalhos futuros:

- Representação do chaveamento de capacitores no plano de restabelecimento;
- Representação de reguladores de tensão no plano de restabelecimento;
- Representação de Geração Distribuída (GD) no sistema, prevendo inclusive operação em modo “ilha” e seguindo os procedimentos previstos no IEEE 1547 (*Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*);
- Consideração da tensão da subestação variável dentro dos limites especificados;
- Consideração do corte de carga de consumidores fora da área afetada pelo defeito;

- Consideração de modelos de cargas variáveis com a tensão. Dessa forma, abaixando-se a tensão na subestação é possível aliviar a carga em alguns alimentadores;
- Determinação de locais para instalação de chaves visando a obtenção de planos de restabelecimento satisfatórios;
- Utilização de Fluxo de Potência Ótimo Trifásico na resolução de sistemas de distribuição desbalanceados;
- Aplicação da representação dos limites de tensão nas barras e fluxo nas linhas na modelagem do FPO nos problemas reconfiguração para mínimas perdas e *Unit Commitment*.

Referências Bibliográficas

- ADIBI, M. *et al.*, 1987, “Power System Restoration - A Task Force Report”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.2, n.2 (May), pp. 271-277.
- ADIBI, M. M., 2008, “Power System Restoration Methodologies & Implementation Strategies - Topic 2: Major Power System Disturbances and Restoration Issues”.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). *Nota técnica n° 0022/2011 SRD/ANEEL*. Brasília, 2011. Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em: 11 nov. 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 1 – Introdução*. Brasília, 2011. Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em: 11 nov. 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade do serviço*. Brasília, 2011. Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em: 11 nov. 2011.
- AGOSTINI M. N., DECKER I. C., SILVA A. S., 2000, “Desenvolvimento e Implementação de uma Base Computacional Orientada a objetos para aplicações em sistemas de energia elétrica”. In: *XIII Congresso Brasileiro de Automática*, Florianópolis, Brasil.
- AOKI, K. *et al.*, 1989, “A new algorithm for service restoration in distribution systems”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.4, n.3(Jul), pp. 1832-1839.
- ARAUJO, L. R., (2000) “Técnicas de Programação Esparsa Utilizando Modelagem Orientada a Objetos”, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Dezembro.
- ARAUJO, L. R., GARCIA, P. A. N., PEREIRA J. L. R. *et al.*, , 2002, “Modelagem Orientada a Objetos Aplicada Na Solução de Programas de Distribuição”. In: *XIV Congresso Brasileiro de Automática*, Natal, Brasil.
- BALABANIAN, N., BICKART, T., 1981, *Linear Network Theory*. Matrix Publishers, Inc., Beaverton, Oregon.

- BARAN, M. E., WU, F. F., 1989, “Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing”, *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 4, n. 2 (Apr), pp. 1401-1407.
- BAXEVANOS, I. S., LABRIDIS, D. P., (2007a), “Implementing Multiagent Systems Technology for Power Distribution Network Control and Protection Management”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1(Jan), pp. 433 - 443
- BAXEVANOS, I. S., LABRIDIS, D. P., (2007b), “Software Agents Situated in Primary Distribution Networks: A Cooperative System for Fault and Power Restoration Management”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 4(Oct), pp. 2378 – 2385
- BORGES, T. T., (2006), “Utilização de *OpenGL* e linguagem orientada a objetos para o desenvolvimento de um pacote gráfico para análise de redes”. Dissertação de M.Sc., UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil.
- BRETAS, N. G., DELBEM, A. C. B., CARVALHO A., 2001, “Representação por cadeias de grafo para AG aplicados ao restabelecimento ótimo em sistemas de distribuição radiais.”. *Revista Controle e Automação SBA*, v.12, n.1(Jan-Abr), pp. 42-51.
- BROWN, R.E.; HANSON, A.P., 2001, “Impact of two-stage service restoration on distribution reliability”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.16, n.4 (Nov), pp. 624-629.
- BRYSON, W. C., HAYWARD, A. P., 1940, “Restoration of Service on a Metropolitan Power System”. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 59, n.10 (Oct), pp. 563 – 570.
- CARVALHO, P. M. S., CARVALHO, F. J. D., FERREIRA, L. A. F., (2007), “Dynamic Restoration of Large-Scale Distribution Network Contingencies: Crew Dispatch Assessment”. In: *IEEE Lausanne Power Tech*, pp. 1453 – 1457, Lausanne, Switzerland, Jul.
- CELIK, M.K., 1999, “Integration of advanced applications for distribution automation”. In: *IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting*, v.1, pp. 366 – 369, New York, Feb.

- CELLI, G., PILO, F., PISANO, G., ALLEGRANZA *et al.*, 2004, “Meshed vs. radial MV distribution network in presence of large amount of DG”. In: *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, v.2, pp. 709 – 714, New York, NY, USA, Oct.
- CHAO-MING HUANG, YANN-CHANG HUANG, 2010, “An Enhanced Differential Evolution Approach to Service Restoration of Distribution Systems”. In: *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1 – 4, Chengdu, China, Mar.
- CHAVALI, S., PAHWA, A., DAS, S., 2002, “A genetic algorithm approach for optimal distribution feeder restoration during cold load pickup”. In: *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*, v.2, pp. 1816 – 1819, Honolulu, Hawaii, May.
- CHEN, C., LIN, C., TSAI, H., 2002, “A rule-based expert system with colored Petri net models for distribution system service restoration”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.17, n.4(Oct), pp. 1073 – 1080.
- CIVANLAR, S., GRAINGER, J. J., YIN, H., *et al.*, 1988, “Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction”, *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 3, n. 3 (Jul), pp. 1217-1223.
- DELBEM, A. C. B., BRETAS, N. G., CARVALHO, A., 2000, “Algoritmo de Busca com Heurísticas Fuzzy para Restabelecimento de Energia em Sistemas Radiais de Distribuição”. *Revista Controle e Automação SBA*, v.11, n.1(Jan-Abr), pp. 55-60.
- DORIGO M., 1992, “Optimization, Learning and Natural Algorithms”. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milano, Italy.
- DUQUE, O., MORINIGO, D., 2006, “Load restoration in electric distribution networks using a metaheuristic technique”. In: *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, pp. 1040 – 1043, Malaga, May.
- ESQUIVEL C. F., *et al.*, 1998, “Efficient Object Oriented Power Systems Software for the Analysis of Large-scale Networks Containing FACTS-Controlled Branches”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 13, n. 2(May), pp. 464-472.

- FUKUYAMA, Y., CHIANG, H., 1995, “A parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems”. In: *International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium*, v.1, pp. 275 – 282, Yokohama, Mar.
- GARCIA, V. J., BERNARDON, D. P., FERREIRA *et al.*, (2009), “On the efficiency of an alternative codification for multiobjective service restoration in electric distribution networks”. In: *Proceedings of the 44th Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1-5, Glasgow, Scotland, Sep.
- GOMES, F. V., 2005a, Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Utilizando Técnicas de Otimização Contínua e Heurística para Minimização de Custos. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GOMES, F. V., CARNEIRO JUNIOR, S., PEREIRA, J. L. R., *et al.*, 2005b, “A new distribution system reconfiguration approach using optimal power flow technique and sensitivity analysis for loss reduction”. In: *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, v. 1, pp. 897-901, San Francisco, CA, USA, Jun.
- GOMES, F. V., CARNEIRO JUNIOR, S., PEREIRA, J. L. R., *et al.*, 2005c, “A New Heuristic Reconfiguration Algorithm for Large Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 3 (Aug), pp. 1373-1378.
- GOMES, F. V., CARNEIRO JUNIOR, S., PEREIRA, J. L. R., *et al.*, 2006, “A New Distribution System Reconfiguration Approach Using Optimal Power Flow and Sensitivity Analysis for Loss Reduction”, *IEEE Trans. Power Systems*, v. 21, n. 4 (Nov), pp. 1616-1623.
- GOMES, P. 2008, “Segurança Elétrica do SIN”. In: Tutorial sobre recomposição de sistemas, CEPEL, Rio de Janeiro. 1 CD ROM.
- GRANVILLE, S., 1994, “Optimal Reactive Dispatch through Interior Point Methods”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 1 (Feb), pp. 136-146.
- HAYKIN, S., 2002, “*Neural Networks: A Comprehensive Foundation*”, 2 ed. Ontario, Prentice Hall.
- HSU, Y., HUANG, H. M., Kuo, H. C., PENG *et al.*, 1992, “Distribution system service restoration using a heuristic search approach”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.7, n.2 (Apr), pp. 734 – 740.

- HSU, Y., HUANG, H., 1995, "Distribution system service restoration using the artificial neural network approach and pattern recognition method". *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, v. 142, n.3 (May), pp. 251 – 256.
- HSU, Y., KUO, H., 1994, "A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n.2 (Apr), pp. 948 – 953.
- HUANG XIANCHAO, ZHANG LIZI, TAYLOR, G. A., 2010, "Service restoration of distribution system with Distributed Generation". In: *International Conference on Power System Technology*, pp. 1 – 5, Hangzhou, China, Mar.
- HUANG Y.-C., CHEN S.-J., HUANG C.-M., 2011, "Evolving radial basic function neural network for fast restoration of distribution systems". In: *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 401 – 406, Beijing, China, Jun.
- HUANG, C., 2003, "Multiobjective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks". *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, n.2 (May), pp. 867 - 874
- INAGAKI, J., NAKAJIMA, J., HASEYAMA, M., 2006, "A Multi-objective Service Restoration Method for Power Distribution Systems". In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, v.3, pp.1784-1787, Pusan, KOREA, Jun.
- KAEWMANEE, J., SIRISUMRANNUKUL, S., (2011), "Multiobjective service restoration in distribution system using fuzzy decision algorithm and node-depth encoding". In: *8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 893 – 896, Isan, Thailand.
- KALANTAR, M., DASHTI, R., DASHTI, R., 2006, "Combination of network reconfiguration and capacitor placement for loss reduction in distribution system with based genetic algorithm". In: *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference (UPEC '06)*, v. 1, pp. 308-312, Newcastle upon Tyne, UK, Sep.
- KARMAKAR, N. K., 1991, "Computational Results of an Interior Point Algorithm for Large Scale Linear Programming", *Mathematical Programming*, 52, pp. 555-586.

- KENNEDY, J. e EBERHART, R. C., 1995, “Particle swarm optimization”. In: *IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, Piscataway, NJ., Dec.
- KHALID, A. R., AHMAD, S., SHAKIL, A. *et al.*, (2008), “A comprehensive power restoration approach using rule-based method for 11kV distribution network”. In: *IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, Johor Bahru, Malaysia , Dec.
- KLEINBERG, M. R., MIU, K., HSIAO-DONG CHIANG, (2011), “Improving Service Restoration of Power Distribution Systems Through Load Curtailment of In-Service Customers”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.26, n.3 (Aug), pp. 1110 - 1117
- KUMAR, V., GUPTA, R. K. H. C. I., GUPTA, H. O., 2006, “Stepwise Restoration of Power Distribution Network under Cold Load Pickup”. In: *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1-5, New Delhi, Dec.
- KUMAR, V., KUMAR, H. C. R., GUPTA, I. *et al.*, 2010, “DG Integrated Approach for Service Restoration Under Cold Load Pickup”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.25, n.1(Jan.), pp. 398 – 406.
- KUMAR, Y., DAS, B., SHARMA, J., 2006, “Genetic algorithm for supply restoration in distribution system with priority customers”. In: *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, pp 1-7, Stockholm, Jun.
- KUO, H., HSU, Y., 1993, “Distribution system load estimation and service restoration using a fuzzy set approach”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 4 (Oct), pp. 1950 – 1957.
- LEE, M.-S., LIM, J.-T., 2004, “Restoration strategy for power distribution networks using optimal supervisory control”. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, v. 151, n. 3(May), pp. 367 - 372
- LEI, J. *et al*, 2000, “Network reconfiguration in unbalanced distribution systems for service restoration and loss reduction”. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, v.4, pp. 2345 – 2350, Singapore, Jan.
- LI, X. D., XU, Y. Q., ZHANG, L., 2009, “Distribution service restoration with DGs based on multi-agent immune algorithm”. In: *2nd International Conference on*

Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS), v. 1, pp. 1-4, Shenzhen, China, Dec.

- LIM, I. H., KIM, Y. I., LIM, H. T., *et al.*, 2008, “Distributed Restoration system applying Multi-Agent in distribution automation system”. In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp.1 – 7, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, Jul.
- LIM, S. *et al.*, 2006a , “Service Restoration Methodology for Multiple Fault Case in Distribution Systems”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.21, n.4 (Nov), pp. 1638 – 1644.
- LIM, S. *et al.*, 2006b, “Restoration Index in Distribution Systems and Its Application to System Operation”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.21, n.4 (Nov), pp.1966 – 1971.
- LIN, C.-H., CHUANG, H-J, CHEN, C.-S. *et al.*, 2009, “Fault detection, isolation and restoration using a multiagent-based Distribution Automation System”. In: *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 2528 – 2533, Xi’an, China.
- LIN, W.-M., CHIN, H.-C., 1998, “A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 3 (Jul), pp. 870-875.
- LIN, Z., WEN, F., 2007, “Power System Restoration in Restructured Power Industry”. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1 – 6, Tampa, Florida, Jun.
- LIU, C.-C., LEE, S.J., VENKATA, S.S., 1998, “An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.3, n.2 (May), pp. 619 – 626.
- LO, Y. L., WANG, C. H., LU, C. N. (2009), “A Multi-Agent Based Service Restoration in Distribution Network with Distributed Generations”. In: *15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, pp. 1 - 5 , Curitiba, Brazil, Nov.
- LU, Z., TAO, L., XIALING, X., YUE B., 2010, “On service restoration considering frequency property of distributed generation”. In: *China International Conference on Electricity Distribution*, pp.1-6, JiangSu NanJing, China, Sep.

- LUAN, W. P., IRVING, M.R., DANIEL, J.S., 2002, "Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks". In: *Proceedings of the IEE Generation, Transmission and Distribution*, v. 149, n. 2, pp. 145-151, Mar.
- MANJUNATH, K., MOHAN, M. R., 2007, "A New Hybrid Multi-Objective restoration Technique for Electric Power Distribution Systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 29, pp. 51-64.
- MANZONI A., SILVA A. S., DECKER I. C., 1999, "Power Systems Dynamic Simulation Using Object-Oriented Programming". *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 1(Feb.), pp. 249-255.
- MARTÍN, J. A., GIL, A. J., 2008, "A new heuristic approach for distribution systems loss reduction", *Electrical Power and Energy Systems*, v. 78, pp. 1953-1958
- MARTINS, V. F., BORGES, C. L. T., 2011, "Active Distribution Network Integrated Planning Incorporating Distributed Generation and Load Response Uncertainties". *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 4(Nov.), pp. 2164 - 2172
- MATHIAS-NETO, W. P., LEÃO, F. B., MANTOVANI, J. R. S., 2010, "Distribution system restoration in a DG environment using a heuristic constructive multi-start algorithm". In: *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp. 86 – 91, São Paulo, Brazil, Nov.
- MEKIC, F., WANG Z., DONDE, V., YANG F. *et al.*, 2009, "Distributed automation for back-feed network power restoration". In: *62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, pp. 1-7, College Station, Texas, USA, Mar.
- MIU, K. N., CHIANG, H., YUAN, B., DARLING, G., 1998, "Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints". *IEEE Transactions on Power Systems*, v.13, n. 3 (Aug), pp. 789 – 795.
- MIU, K. N., HSIAO-DONG CHIANG, MCNULTY, R. J., 2000, "Multi-tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks". *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n.3 (Jul), pp. 1001 – 1007.
- MOMOH, J.A., CAVEN, A.C., 2003, "Distribution system reconfiguration scheme using integer interior point programming technique". In: *IEEE PES Transmission*

and Distribution Conference and Exposition, v.1, pp. 234 – 241, Dallas, Texas, Sep.

MONTICELLI A., 1993, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. 2ª edição, São Paulo, editora Edgard Blucher.

MORELATO, A.L., MONTICELLI, A.J., 1989, “Heuristic search approach to distribution system restoration”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.4, n. 4 (Oct), pp. 2235 – 2241.

MORI, H., FURUTA, A., 2005, “A new approach of hierarchical optimization to distribution system service restoration”. In: *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, v. 5, pp. 4751 – 4754, kobe, Japan, May.

MORI, H., MUROI, T., (2011), “Application of probabilistic Tabu Search to distribution system service restoration”. In: *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 1037 – 1040, Paris, France, Jun.

MUN, K. J., PARK, J. H., KIN, H., SEO, J., 2001, “Development of real-time-service restoration system for distribution automation system”. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, v.3, pp. 1514 – 1519, Pusan, Korea, Jun.

NASCIMENTO, F. R. , SILVA JUNIOR, I. C. , OLIVEIRA, E. J. *et al.*, “Thermal Unit Commitment using improved Ant Colony Optimization Algorithm via Lagrange Multipliers”. In: *IEEE Powertech, 2011, Trondheim*.

NEYER F. A., WU F. F., 1990, “Object-Oriented Programming for Flexible Software: Example of Load Flow”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 5, n. 3(Aug.), pp. 689–696.

OLIVEIRA, E. J., SILVA JUNIOR, I. C., PEREIRA, J. L. R., *et al.*, 2005, “Transmission System Expansion Planning Using a Sigmoid Function to Handle Integer Investment Variables”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 1, n. 1 (Aug), pp. 1616-1621.

OLIVEIRA, L. W. , CARNEIRO JUNIOR, S., OLIVEIRA, E. J. *et al.* , 2010, “Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for energy losses minimization”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, V. 32, pp. 840-848.

- OLIVEIRA, L. W., 2009, “Reconfiguração e alocação ótima de capacitores em sistemas de distribuição”. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PEPONIS, G., PAPADOPOULOS, M., 1995, “Reconfiguration of radial distribution networks: application of heuristic methods on large-scale networks”. In: *Proceedings of the IEE Generation, Transmission and Distribution*, v. 142, n. 6, pp. 631-638, Nov.
- PÉREZ-GUERRERO, R. E., HEYDT, G. T., 2008a, “Viewing the Distribution Restoration Problem as the Dual of the Unit Commitment Problem”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, n.2 (May), pp. 807 – 808.
- PÉREZ-GUERRERO, R. E., HEYDT, G. T., 2008b, “Distribution System Restoration via Subgradient-Based Lagrangian Relaxation”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, n.3 (Aug.), pp. 1162 - 1169.
- PHAM, T. T. H., BESANGER, Y., HADJSAID, N., 2009, “New Challenges in Power System Restoration With Large Scale of Dispersed Generation Insertion”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 1(Feb.), pp.398 – 406.
- POPOVIC, D.S., POPOVIC, Z.N., 2004, “A risk management procedure for supply restoration in distribution networks”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.19, n.1(Feb), pp. 221 – 228.
- RODRIGUEZ, J. R. A., VARGAS, A., 2005, “Fuzzy-heuristic methodology to estimate the load restoration time in MV networks”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.20, n.2(May), pp.1095 – 1102.
- SANTOS, A., DELBEM, A., BRETAS, N.G., 2008, “A Multiobjective Evolutionary Algorithm with Node-Depth Encoding for Energy Restoration”. In: *Fourth International Conference on Natural Computation*, 6 pp., Jinan, Shandong, China, Out.
- SARMA, N.D.R. *et al.*, 1994, “A new network reconfiguration technique for service restoration in distribution networks”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.9, n. 4(Oct), pp. 1936 – 1942,
- SCHMIDT, H. P., 2005, *Reconfiguração de Redes de Distribuição Através de Programação Não linear Inteira Mista*. Tese de Livre-Docência, Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

- SERAPIÃO, A. B. S., 2009, “Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral”. *Revista Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 20, n. 3(Sep), pp. 271-304
- SHENG SIQING, MA ZHIGANG, WU JING *et al.*, (2009), “Distribution Network Fault Restoration Based on Improved Adaptive Genetic Algorithm”. In: *Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, v. 1, pp. 318 – 321, Changsha, Hunan, China, Oct.
- SHIRMOHAMMADI, D., 1992, “Service restoration in distribution networks via network reconfiguration”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.7, n.2 (Apr), pp. 952 – 958.
- SILVA JUNIOR, I. C., NASCIMENTO, F. R., OLIVEIRA, E. J. *et al.*, 2011, “Programação Diária da Operação de Sistemas Termoeletrônicos de Geração Utilizando Otimização Bio-inspirada em colônia de Formigas”. *Revista Controle & Automação (Impresso)*.
- SILVA JUNIOR, I. C., CARNEIRO JUNIOR, S., OLIVEIRA, E. J., *et al.*, 2008a, “A Heuristic Constructive Algorithm for Capacitor Placement on Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*.
- SILVA JUNIOR, I. C., CARNEIRO JUNIOR, S., OLIVEIRA, E. J., *et al.*, 2008b, “A Lagrangian Multiplier Based Sensitive Index to Determine the Unit Commitment of Thermal Units”, *Electrical Power and Energy Systems*, v. 30, pp. 504-510.
- SOLANKI, J. M., KHUSHALANI, S., SCHULZ, N. N., (2007), “A Multi-Agent Solution to Distribution Systems Restoration”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n.3(Aug), pp. 1026 - 1034
- TAYLOR, T., LUBKEMAN, D., 1989, “Applications of Knowledge-Based Programming to Power Engineering Problems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 4, n. 1 (Feb), pp. 345-352.
- TEO, C. Y., GOOI, H., B., 1998, “Artificial intelligence in diagnosis and supply restoration for a distribution network”. *IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution*, v. 145, n. 4(Jul.), pp. 444 – 450
- TOMIM, M. A., 2004, *Análise de Estabilidade em Regime Permanente de Sistemas Elétricos Susceptíveis a Ressonância Subsíncrona*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.

- TOUNE, S., FUDO, H., GENJI, T., FUKUYAMA, Y., NAKANISHI, Y., 2002, “Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.17, n. 1(Jan), pp. 173 – 181.
- TROVATO, M., DELVECHIO, G., BUALOTI, R., 1999, “A fuzzy reasoning approach for distribution automation”. In: *International Conference on Electric Power Engineering*, pp. 249, Budapest, Sep.
- TSAI, M., (2008), “Development of an Object-Oriented Service Restoration Expert System With Load Variations”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, n.1 (Feb.), pp. 219 - 225.
- TSAI, M., WU, W., 2002, “Development of an object-oriented expert system for multi-period load transfer”. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific*, v.2, pp. 1170 – 1174, Yokohama, Japan , Oct.
- UÇAK, C., PAHWA, A., 1994, “An analytical approach for step-by-step restoration of distribution systems following extended outages”. *Power IEEE Transactions on Delivery*, v.9, n.3 (Jul), pp. 1717 – 1723.
- WEN-HUI CHEN, 2010, “Quantitative Decision-Making Model for Distribution System Restoration”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.25, n.1 (Jan), pp. 313 – 321.
- WRIGHT, J. S., 1997, “Primal-Dual Interior Point Methods”, *Society for Industrial and Applied Mathematics – SIAM*, pp. 21-45.
- YAN YI-XIONG, WANG YAN, SHI YONG-SHENG, (2011), “The Research on Fault Restoration Considering Distributed Generation Based Particle Swarm Optimization”. In: *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1 – 4, Wuhan, China, Mar.
- YANG ZHEN-HONG, YANG CHUANG-YE, 2009, “Fast Restoration Algorithm for Generatrix Voltage Loss of Distribution Network in the Malfunction State”. In: *International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, v.2 , pp. 411 - 414 , Wuhan, Hubei, China, Apr.
- YE TIAN, JUNHUI XIN, ZHI DU, TAO LIN, JIAN CAO, 2010, “On the strategy of distribution system service restoration considering distributed generation”. In: *China International Conference on Electricity Distribution*, pp. 1-5, Nanjing, China, Mar.

- YE TIAN, TAO LIN, MAN ZHANG, XIALING XU, 2009, “A new strategy of distribution system service restoration using distributed generation”. In: *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, pp. 1 - 5 , Nanjing, China, Apr.
- ZHENYUAN WANG, DONDE, V., FANG YANG, STOUPIS, J., 2009, “A deterministic analysis method for back-feed power restoration of distribution networks”. In: *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1 – 6, Calgary, Alberta, Canada, Jul.
- ZHIGANG LU, YING WEN, LIJUN YANG, (2009), “An Improved ACO Algorithm for Service Restoration in Power Distribution Systems”. In: *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-4, Wuhan, China, Mar.
- ZHOU E. Z., 1996, “Object-Oriented Programming, C++ and Power System Simulation”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 1 (Feb.), pp. 206-215.
- ZHU, H.-B., JIANG, H.-S., ZHANG F.-G., 2010, “Based on the integration of the genetic principle of ant colony algorithm for distribution network restoration applications”. In: *China International Conference on Electricity Distribution*, pp. 1-4, Nanjing, China, Mar.
- ZIDAN, A., EL-SAADANY, E. F., 2011, “Service restoration in balanced and unbalanced distribution systems with high DG penetration”. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, Detroit, Michigan, USA, Jul.

Apêndice A

Teoria de Grafos

Neste apêndice são apresentados alguns conceitos básicos da Teoria de Grafos necessários para o entendimento do assunto e sua utilização na análise de redes elétricas.

A.1 Grafo

Um grafo $G = (V, E)$ é um conjunto V de pontos, chamados vértices, conectados por E linhas, chamadas de arestas (*edges* em inglês). Um grafo pode ser dirigido ou não dirigido. Em um grafo dirigido, a ordem entre os vértices de uma aresta (v, w) é importante. Esta aresta é diferente da aresta (w, v) e é representada com uma flecha de v para w . No caso do estudo da topologia da rede pode utilizar somente grafos não orientados. Na Figura A.1 as arestas são representadas pelos números sublinhados.

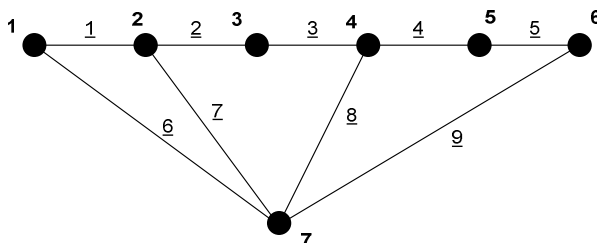


Figura A.1 – Exemplo de grafo não orientado

A.2 Árvore

Outro conceito importante no estudo da teoria de grafos é da Árvore. Segundo (BALABANIAN e BICKART, 1981), árvore é um subgrafo conectado, ou seja, um subconjunto de vértices e arestas de um grafo conectado, que não forma caminhos fechados. O termo conectado significa que há pelo menos um caminho entre quaisquer dois vértices do grafo.

Para as arestas componentes das árvores dá-se o nome ramos, enquanto que as outras não pertencentes à árvore em questão receberão o nome elos. Por exemplo, na Figura A.2(a) as arestas 1, 3, 5, 6, 8 e 9 compõe uma árvore e, por isto, são chamadas de ramos. Ao passo que as arestas 2, 4 e 7 são denominadas elos.

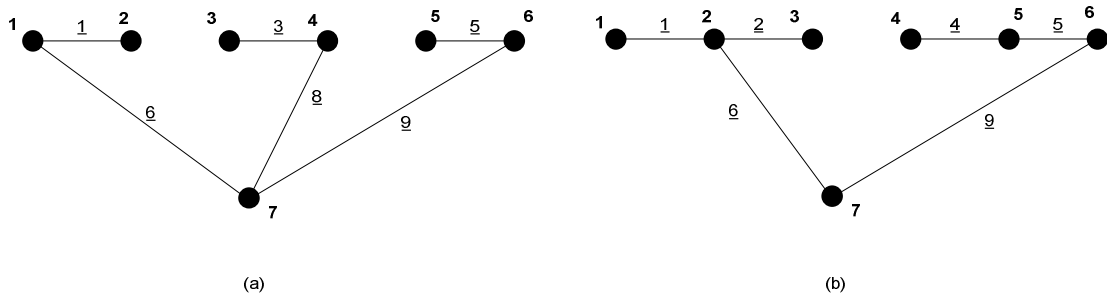


Figura A.2 – Exemplos de árvores associadas ao grafo da Figura A.1

A.3 Matriz Incidência

A matriz de incidência completa é uma forma compacta de se definir um grafo com n vértices e m arestas, contendo informações acerca da orientação das arestas e quais vértices estas conectam (BALABANIAN e BICKART, 1981). Os elementos desta matriz $A_a = [a_{ij}]$ são definidos como:

- $a_{ij} = 1$ se a aresta j estiver saindo do vértice i ;
- $a_{ij} = -1$ se a aresta j estiver entrando no vértice i ;
- $a_{ij} = 0$ se a aresta j não incidir sobre o vértice i .

No entanto, verifica-se que a soma de todas as linhas de A_a resulta em uma linha nula. Esta característica é comum a todos os grafos já que cada coluna possui apenas dois elementos não-nulos, 1 e -1 . Isto se traduz em uma dependência entre as linhas da matriz A_a , que pode ser eliminada retirando-se a linha referente a um nó de referência. Após esta eliminação, a matriz A_f gerada é chamada matriz de incidência (ou matriz de incidência reduzida).

Outra representação para a matriz de incidência, útil na análise de circuitos elétricos, pode ser obtida considerando uma árvore específica. Esta forma é apresentada

por $A_f = [A_r \ A_e]$ onde A_r é uma matriz quadrada cujas colunas correspondem aos ramos da árvore, A_e uma matriz que por sua vez tem colunas correspondentes aos elos.

A.4 Matriz de Circuitos ou Malhas

A matriz de circuitos ou malhas expressa de que forma malhas ou circuitos fechados são constituídos pelas arestas de um determinado grafo. Recordando que uma árvore é um subgrafo conectado no qual não se encontram circuitos, sabe-se que se um elo for adicionado à árvore, um único circuito será formado (BALABANIAN e BICKART, 1981). Este circuito, formado pela adição de um elo à árvore, é chamado circuito fundamental.

Na matriz de circuitos fundamentais $B_f = [b_{ij}]$, os elementos b_{ij} são definidos por:

- $b_{ij} = 1$ se a aresta j estiver no circuito i e, suas orientações coincidirem;
- $b_{ij} = -1$ se a aresta j estiver no circuito i e, suas orientações não coincidirem;
- $b_{ij} = 0$ se a aresta j não estiver no circuito i .

A matriz de circuitos fundamentais pode ser representada por duas submatrizes $B_f = [B_r \ B_e]$. A submatriz B_r corresponde aos ramos, enquanto B_e correspondente aos elos.

Apêndice B

Resolução do problema de Fluxo de Potência Ótimo

As Equações (B.1)(B.4) a seguir apresentam a estrutura matricial de solução do problema de FPO para o sistema de duas barras da Figura B.1, considerando uma carga a ser restabelecida na barra m . Portanto, associa-se a as carga da barra m uma variável γ_m de percentual de carga restabelecida.

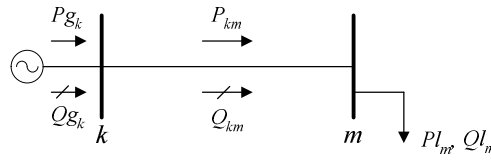


Figura B.1 – Sistema exemplo de 2 barras

$$H \cdot \Delta_z = G_z \quad (B.1)$$

$$H = \begin{matrix} & P g_k & Q g_k & \theta_k & \lambda p_k & V_k & \lambda q_k & \theta_m & \lambda p_m & V_m & \lambda q_m & x_{km} & \gamma_m \\ \begin{matrix} P g_k \\ Q g_k \\ \theta_k \\ \lambda p_k \\ V_k \\ \lambda q_k \\ \theta_m \\ \lambda p_m \\ V_m \\ \lambda q_m \\ x_{km} \\ \gamma_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1} & & & h_{1,4} & & & & & & & & & \\ & h_{1,2} & & & & h_{2,6} & & & & & & & \\ & & h_{3,3} & h_{3,4} & h_{3,5} & h_{3,6} & h_{3,7} & h_{3,8} & h_{3,9} & h_{3,10} & h_{3,11} & & \\ h_{4,1} & & h_{4,3} & & h_{4,5} & & h_{4,7} & & h_{4,9} & & h_{4,11} & & \\ & & h_{5,3} & h_{5,4} & h_{5,5} & h_{5,6} & h_{5,7} & h_{5,8} & h_{5,9} & h_{5,10} & h_{5,11} & & \\ & h_{6,2} & h_{6,3} & & h_{6,5} & & h_{6,7} & & h_{6,9} & & h_{6,11} & & \\ & & h_{7,3} & h_{7,4} & h_{7,5} & h_{7,6} & h_{7,8} & h_{7,8} & h_{7,9} & h_{7,10} & h_{7,11} & & \\ & & h_{8,3} & & h_{8,5} & & h_{8,7} & & h_{8,9} & & h_{8,11} & h_{8,12} \\ & & h_{9,3} & h_{9,4} & h_{9,5} & h_{9,6} & h_{9,7} & h_{9,8} & h_{9,9} & h_{9,10} & h_{9,11} & & \\ & & h_{10,3} & & h_{10,5} & & h_{10,7} & & h_{10,9} & & h_{10,11} & h_{10,12} \\ & & h_{11,3} & h_{11,4} & h_{11,5} & h_{11,6} & h_{11,7} & h_{11,8} & h_{11,9} & h_{11,10} & h_{11,11} & & \\ & & & & & & & h_{12,8} & & h_{12,10} & & & h_{12,12} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (B.2)$$

$$\Delta_z^T = \left[\Delta_{P g_k} \mid \Delta_{Q g_k} \mid \Delta_{\theta_k} \mid \Delta_{\lambda p_k} \mid \Delta_{V_k} \mid \Delta_{\lambda q_k} \mid \Delta_{\theta_m} \mid \Delta_{\lambda p_m} \mid \Delta_{V_m} \mid \Delta_{\lambda q_m} \mid \Delta_{x_{km}} \mid \Delta_{\gamma_m} \right] \quad (B.3)$$

$$G_z^T = \left[g_1 \mid g_2 \mid g_3 \mid g_4 \mid g_5 \mid g_6 \mid g_7 \mid g_8 \mid g_9 \mid g_{10} \mid g_{11} \mid g_{12} \right] \quad (B.4)$$

Onde:

- H Representa a matriz hessiana de solução do problema de FPO, incluindo a hessiana W e o jacobiano J da função lagrangeana (III.51)
- Δ_z Representa o vetor independente para as variáveis de otimização do problema;
- G_z Representa o vetor gradiente de solução.

Na Equação B.2, os elementos h_{v_1,v_2} representam as derivadas de segunda ordem da função lagrangeana (L) em relação às variáveis associadas às linhas v_1 e v_2 da matriz H , ou seja, $h_{v_1,v_2} = \frac{\partial^2 L}{\partial v_1 \partial v_2}$. Adicionalmente, cada elemento do tipo $h_{v,v}$ também inclui as contribuições do método de pontos interiores para a variável associada à linha/coluna v , caso esta variável apresente restrições de canalização.

Cada elemento g_v do vetor gradiente inclui a derivada de primeira ordem da função lagrangeana (L) em relação à variável associada à linha v $\left(\frac{\partial L}{\partial v}\right)$, juntamente com a contribuição do método de pontos interiores caso esta variável tenha restrições de canalização.

Serão apresentados a seguir os elementos do vetor gradiente (G_z) associados à modelagem das chaves manobráveis do sistema de distribuição.

$$g_{11} = \frac{\partial L}{\partial x_{km}} + MPIG_{x_{km}} =$$

$$\left\{ \lambda p_k \cdot \left[V_k^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \sen \theta_{km} \right] + \right.$$

$$\lambda q_k \cdot \left[-V_k^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \cos \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \sen \theta_{km} \right] +$$

$$\lambda p_m \cdot \left[V_m^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos \theta_{km} + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \sen \theta_{km} \right] +$$

$$\left. \lambda q_m \cdot \left[-V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \cos \theta_{km} + V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \sen \theta_{km} \right] \right\} \cdot \frac{\partial CH_{km}}{\partial x_{km}} +$$

$MPIG_{x_{km}}$

$$\frac{\partial CH_{km}}{\partial x_{km}} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot e^{\alpha \cdot x_{km}}}{(e^{\alpha \cdot x_{km}} + 1)^2}$$

$$MPIG_{x_{km}} = \frac{\mu}{sl_{x_{km}}} - \frac{\mu}{su_{x_{km}}}$$

Onde:

- $MPIG_{x_{km}}$ Representa a contribuição do método de pontos interiores para a variável x_{km} no vetor gradiente (G_z);
- $sl_{x_{km}}, su_{x_{km}}$ Representam as variáveis de folga associadas às restrições de limite inferior e superior para a variável x_{km} , respectivamente.

Os elementos do vetor gradiente (G_z) associados à modelagem da carga a ser restabelecida são apresentados a seguir:

$$g_{12} = \frac{\partial L}{\partial \gamma_m} + MPIG_{\gamma_m} = (1 + \lambda p_m) Pl_m + \lambda q_m Ql_m + MPIG_{\gamma_m} \quad (B.8)$$

$$MPIG_{\alpha_m} = \frac{\mu}{sl_{\gamma_m}} - \frac{\mu}{su_{\gamma_m}} \quad (B.9)$$

Onde:

$MPIG_{\gamma_m}$ Representa a contribuição do método de pontos interiores para a variável γ_m no vetor gradiente (G_z);

$sl_{\gamma_m}, su_{\gamma_m}$ Representam as variáveis de folga associadas às restrições de limite inferior e superior para a variável α_m , respectivamente.

As demais derivadas do vetor gradiente ($g_1 - g_{10}$) podem ser obtidas em (GOMES, 2005).

Os elementos da matriz hessiana (H) associados à modelagem das chaves manobráveis no problema de FPO são apresentados a seguir:

$$h_{11,3} = \frac{\partial^2 L}{\partial x_{km} \partial \theta_k} = \{ \lambda p_k \cdot [V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km}] + \lambda q_k \cdot [-V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km}] + \lambda p_m \cdot [V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km}] + \lambda q_m \cdot [-V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} + V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km}] \} \cdot \frac{\partial CH_{km}}{\partial x_{km}} \quad (B.10)$$

$$h_{11,4} = \frac{\partial^2 L}{\partial x_{km} \partial \lambda p_k} = (V_k^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot \frac{\partial CH_{km}}{\partial x_{km}} \quad (B.11)$$

$$h_{11,5} = \frac{\partial^2 L}{\partial x_{km} \partial V_k} = \{ \lambda p_k \cdot [2 \cdot V_k \cdot g_{km} - V_m \cdot g_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} - V_m \cdot b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] + \lambda q_k \cdot [-2 \cdot V_k \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_m \cdot b_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} - V_m \cdot g_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] + \lambda p_m \cdot [-V_m \cdot g_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} + V_m \cdot b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] + \lambda q_m \cdot [V_m \cdot b_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} + V_m \cdot g_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] \} \cdot \frac{\partial CH_{km}}{\partial x_{km}} \quad (B.12)$$

$$h_{11,6} = \frac{\partial^2 L}{\partial x_{km} \partial \lambda q_k} = [-V_k^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] \cdot \frac{\partial CH_{km}}{\partial x_{km}} \quad (B.13)$$

$$h_{11,7} = \frac{\partial^2 L}{\partial x_{km} \partial \theta_m} = - \frac{\partial^2 L}{\partial x_{km} \partial \theta_k} \quad (B.14)$$

$$h_{11,8} = \frac{\partial^2 L}{\partial x_{km} \partial \lambda p_m} = (V_m^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot \frac{\partial CH_{km}}{\partial x_{km}} \quad (B.15)$$

$$\begin{aligned}
h_{11,9} = \frac{\partial^2 L}{\partial x_{km} \partial V_m} = & \left\{ \lambda p_k \cdot [-V_k \cdot g_{km} \cdot \cos \theta_{km} - V_k \cdot b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] + \right. \\
& \lambda q_k \cdot [V_k \cdot b_{km} \cdot \cos \theta_{km} - V_k \cdot g_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] + \\
& \lambda p_m \cdot [2 \cdot V_m \cdot g_{km} - V_k \cdot g_{km} \cdot \cos \theta_{km} + V_k \cdot b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] + \\
& \left. \lambda q_m \cdot [-2 \cdot V_m \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k \cdot b_{km} \cdot \cos \theta_{km} + V_k \cdot g_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] \right\} \cdot \frac{\partial CH_{km}}{\partial x_{km}}
\end{aligned} \tag{B.16}$$

$$\begin{aligned}
h_{11,10} = \frac{\partial^2 L}{\partial x_{km} \partial \lambda q_m} = & \left[-V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \cos \theta_{km} + \right. \\
& \left. V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} \right] \cdot \frac{\partial CH_{km}}{\partial x_{km}}
\end{aligned} \tag{B.17}$$

$$\begin{aligned}
h_{11,11} = \frac{\partial^2 L}{\partial x_{km}^2} + MPIH_{x_{km}} = & \\
\left\{ \lambda p_k \cdot [V_k^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] + \right. \\
\lambda q_k \cdot [-V_k^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \cos \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] + \\
\lambda p_m \cdot [V_m^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos \theta_{km} + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] + \\
\left. \lambda q_m \cdot [-V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \cos \theta_{km} + V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}] \right\} \cdot \frac{\partial CH_{km}^2}{\partial x_{km}^2} +
\end{aligned} \tag{B.18}$$

$$\begin{aligned}
MPIH_{x_{km}} \\
\frac{\partial CH_{km}^2}{\partial x_{km}^2} = \frac{2 \cdot \alpha^2 \cdot e^{\alpha \cdot x_{km}} \cdot (1 - e^{2 \cdot \alpha \cdot x_{km}})}{(e^{\alpha \cdot x_{km}} + 1)^4}
\end{aligned} \tag{B.19}$$

$$MPIH_{x_{km}} = \frac{\pi l_{x_{km}}}{s l_{x_{km}}} - \frac{\pi u_{x_{km}}}{s u_{x_{km}}} \tag{B.20}$$

Onde:

$MPIH_{x_{km}}$ Representa a contribuição do método de pontos interiores para a variável x_{km} na matriz hessiana (H);

$\pi l_{x_{km}}, \pi u_{x_{km}}$ Representam os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de limite inferior e superior para a variável x_{km} , respectivamente.

Os elementos da matriz hessiana (H) associados a carga a ser restabelecida no problema de FPO são apresentados a seguir:

$$\begin{aligned}
h_{12,8} = \frac{\partial^2 L}{\partial \gamma_m \partial \lambda p_m} = P l_m \\
h_{12,20} = \frac{\partial^2 L}{\partial \gamma_m \partial \lambda q_m} = Q l_m \\
h_{11,11} = \frac{\partial^2 L}{\partial \gamma_m^2} + MPIH_{\gamma_m} = 0 + MPIH_{\gamma_m}
\end{aligned} \tag{B.21}$$

$$MPIH_{\alpha_m} = \frac{\pi l_{\gamma_m}}{s l_{\gamma_m}} - \frac{\pi u_{\gamma_m}}{s u_{\gamma_m}} \quad (B.22)$$

Onde:

- $MPIH_{\gamma_m}$ Representa a contribuição do método de pontos interiores para a variável γ_m na matriz hessiana (H);
- $\pi l_{\gamma_m}, \pi u_{\gamma_m}$ Representam os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de limite inferior e superior para a variável γ_m , respectivamente.

Os demais elementos da matriz hessiana, Equação B.2, podem ser obtidos em (GOMES, 2005).

Neste sistema exemplo de duas barras, o vetor de variáveis de otimização \bar{z} pode ser dividido nos vetores \bar{z}_1 e \bar{z}_2 , em que \bar{z}_1 contém as variáveis primais e duais associadas ao estado do sistema ($\{\theta, \lambda_p, V, \lambda_q\} \in \bar{z}_1$) e \bar{z}_2 comporta as variáveis de controle ($\{Pg, Qg, x, \alpha\} \in \bar{z}_2$). Para a modelagem de outros tipos de controle, como por exemplo, a geração de potência reativa através de bancos de capacitores, a estrutura matricial de solução do problema de FPO via método de pontos interiores pode ser generalizada como:

$$\begin{matrix} \bar{\theta} & \bar{\lambda}_p & \bar{V} & \bar{\lambda}_q & \bar{z}_2 \\ \bar{\theta} \\ \bar{\lambda}_p \\ \bar{V} \\ \bar{\lambda}_q \\ \bar{z}_2 \end{matrix} \begin{bmatrix} W_{\bar{\theta}\bar{\theta}} & J_{\bar{\theta}\bar{\lambda}_p} & W_{\bar{\theta}\bar{V}} & J_{\bar{\theta}\bar{\lambda}_q} & W_{\bar{z}_2\bar{\theta}} \\ J_{\bar{\theta}\bar{\lambda}_p} & & J_{\bar{V}\bar{\lambda}_p} & & J_{\bar{z}_2\bar{\lambda}_p} \\ W_{\bar{\theta}\bar{V}} & J_{\bar{V}\bar{\lambda}_p} & W_{\bar{V}\bar{V}} & J_{\bar{V}\bar{\lambda}_q} & W_{\bar{z}_2\bar{V}} \\ J_{\bar{\theta}\bar{\lambda}_q} & & J_{\bar{V}\bar{\lambda}_q} & & J_{\bar{z}_2\bar{\lambda}_q} \\ W_{\bar{z}_2\bar{\theta}} & J_{\bar{z}_2\bar{\lambda}_p} & W_{\bar{z}_2\bar{V}} & J_{\bar{z}_2\bar{\lambda}_q} & W_{\bar{z}_2\bar{z}_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta_{\bar{\theta}} \\ \Delta_{\bar{\lambda}_p} \\ \Delta_{\bar{V}} \\ \Delta_{\bar{\lambda}_q} \\ \Delta_{\bar{z}_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{\bar{\theta}} \\ G_{\bar{\lambda}_p} \\ G_{\bar{V}} \\ G_{\bar{\lambda}_q} \\ G_{\bar{z}_2} \end{bmatrix} \quad (B.23)$$

De acordo com a modelagem do problema de FPO proposto para o restabelecimento de sistemas de distribuição, os valores de posição das chaves (CH_{km}) são otimizados no intervalo contínuo $[0,1]$. No entanto, as chaves podem ter apenas dois valores: 0 (chave aberta) e 1 (chave fechada), o que requer uma estratégia para definição dos estados destes dispositivos.

Apêndice C

Modelagem Computacional

C.1 Introdução

Para a obtenção de planos de restabelecimento de sistemas de distribuição de energia elétrica seguros e confiáveis, é necessário a utilização de programas computacionais. Um correto aproveitamento das informações obtidas, assim como uma completa exploração das ferramentas está diretamente ligado a implementação computacional (GOMES, 2005). Os conceitos de Modelagem Orientada a Objetos (MOO) vêm cada vez mais sendo aplicados no desenvolvimento de ferramentas computacionais para sistemas de potência e apresentando excelentes resultados (NEYER E WU, 1990; ZHOU, 1996; ESQUIVEL *et. al.*, 1998; MANZONI *et. al.*, 1998; AGOSTINI *et. al.*, 2002; ARAUJO *et. al.*, 2002). A MOO permite combinar a estrutura de dados com os diversos modelos dos componentes de uma rede elétrica. Assim, o programa é organizado em vários objetos separados que incorporam tanto a estrutura de dados quanto o comportamento destes.

A implementação computacional deste trabalho foi feita utilizando como base uma plataforma em MOO desenvolvida no Laboratório de Sistemas de Potência da UFJF (LABSPOT). Utilizando essa plataforma, diversos trabalhos foram desenvolvidos, merecendo destaque (ARAUJO, 2000; ARAUJO *et al.*, 2002; GOMES, 2005a ; BORGES, 2006). Nesta plataforma, diversos elementos já haviam sido implementados, bastando fazer algumas adaptações para a representação dos modelos utilizados no problema de restabelecimento dos sistemas de distribuição, aproveitando assim as características de modularidade do MOO.

C.2 Classes dos Componentes da Rede

Essas classes são responsáveis por armazenar os dados dos elementos dos sistemas elétricos bem como sua conexão com os demais elementos da rede. O diagrama de classes desenvolvido nessa plataforma pode ser observado na Figura C.1.

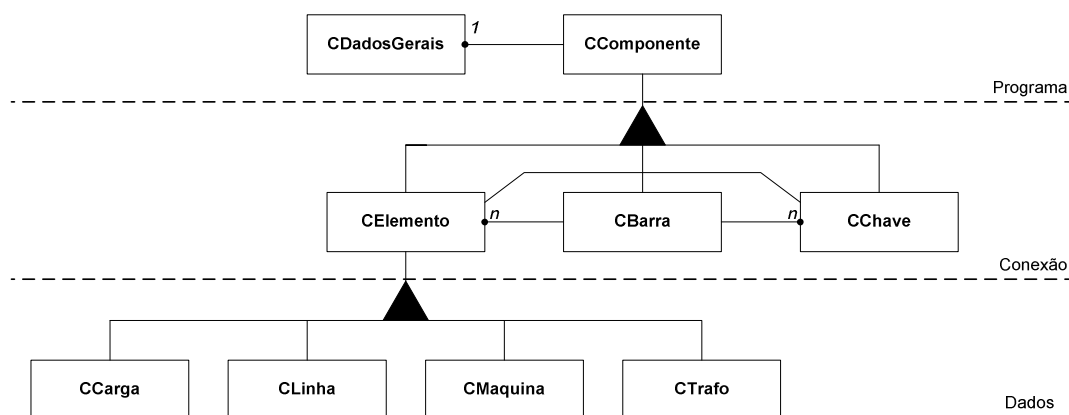


Figura C.1 - Diagrama de classes dos componentes da rede

Classe CDadosGerais

A classe CDadosGerais serve para armazenar dados e funções que devem estar disponíveis a todos equipamentos da rede, mas não pertencem ao equipamento ou a rede, como por exemplo, a potência base do sistema ou o número de iterações.

Classe CComponente

Tem como objetivo compatibilizar a passagem de dados entre funções. A partir dessa classe, todos demais classes de componentes da rede (barras, linhas, transformadores) são derivadas.

Classe CElemento

A classe CElemento representa de forma genérica os equipamentos e suas conexões com os demais elementos de um sistema elétrico, independentemente do número de conexões e da natureza do equipamento.

Classe CBarra

A classe CBarra armazena todas as informações relativas às barras e todas as posições de memória dos componentes conectados a ela. O armazenamento das posições de memória é realizado através de listas encadeadas de ponteiros. Uma característica importante é que uma barra pode estar associada a vários elementos ou chaves.

Classe CChave

Esta classe tem como objetivo representar os dispositivos usados para manobra e proteção dos circuitos elétricos.

Classe CLinha

Esta classe armazena todos os dados relevantes para a representação de uma linha de transmissão ou um alimentador de sistemas de distribuição para as diversas metodologias implementadas na aplicação

Classe CCarga

Representa as cargas do sistema, pode armazenar os dados em forma de potência para um fluxo de potência ou fluxo de potência ótimo, como também em valores de resistência e impedância corrigidos pela tensão para a análise harmônica.

Classe CMaquina

Representa as máquinas do sistema. São modeladas nesta classe as subestações e geradores distribuídos ao longo do sistema.

Classe CTrafo

A classe CTrafo representa os transformadores de 2 e 3 enrolamentos. Esta classe também pode representar as diversas conexões entre primário e secundário, estrela-delta, por exemplo.

C.3 Modelagem do Sistema Elétrico

Na seção anterior apresentou-se a estrutura de classes dos componentes de um sistema de potência. Contudo, para realizar qualquer tipo de cálculo deve-se ainda instanciar e conectar os objetos de tal forma que uma rede seja totalmente caracterizada. Para isso, criou-se uma classe denominada CRede. Esta classe possui como objetivo a montagem topológica da rede assim como a manutenção desta (abertura de chaves, retirada de equipamentos, etc.). É importante ressaltar que nenhuma tarefa relacionada às aplicações é realizada por esta classe.

A Figura C.2 ilustra a associação entre as classes CRede e CComponente. Como pode ser visto, são classes agregadas e a condição mínima para criação de uma rede é a existência de pelo menos três objetos.

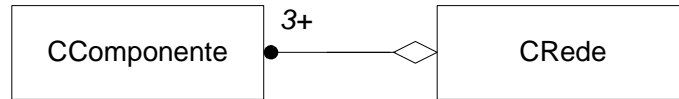


Figura C.2 - Associação das classes CComponente e CRede

C.4 Funcionamento do Modelo Proposto

Considere o sistema mostrado na Figura C.3. Este sistema é composto por três barras, um gerador, uma linha, um transformador e duas cargas.

Primeiramente objetos são armazenados em listas encadeadas segundo suas propriedades, ou seja, segundo as classes CBarra e CElemento. A Figura C.4 ilustra o armazenamento dos objetos.

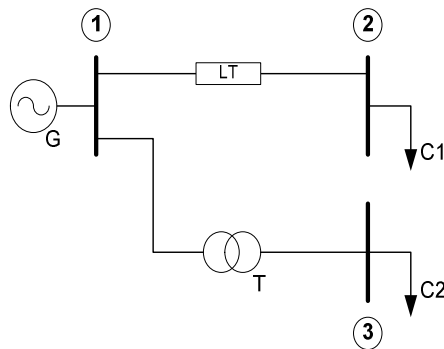


Figura C.3 - Sistema exemplo três barras

Posteriormente a classe CRede conecta os objetos conforme a topologia do sistema e obedecendo as associações definidas na Figura C.1. A Figura C.5 ilustra este procedimento. É importante ressaltar que as ligações mostradas na Figura C.4 e Figura C.5 existem simultaneamente. As ligações da Figura C.5 determinam a conectividade do sistema.

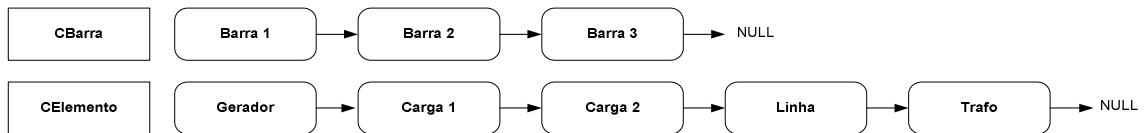


Figura C.4 - Listas de objetos

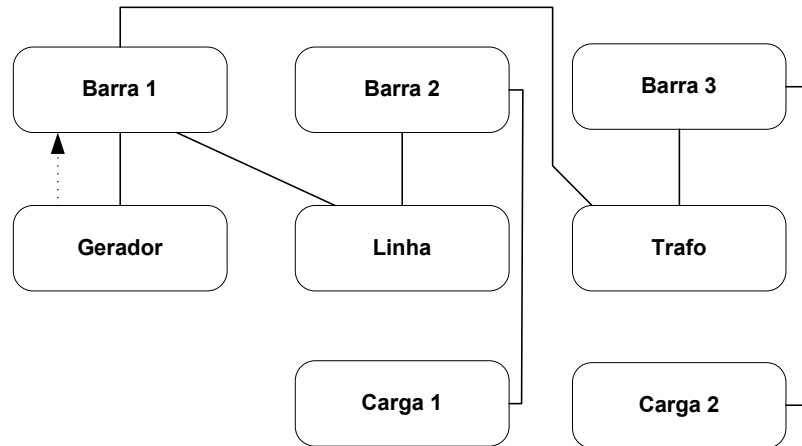


Figura C.5 - Estrutura topológica

Percebe-se que na classe *CRede* e nas classes agregadas não existem referências aos aplicativos. Os métodos matemáticos relativos a cada aplicação são acessados através de ponteiros. Assim sendo, um componente é instanciado uma única vez sendo a modelagem acessada pelos aplicativos através de parâmetros de funções.

C.5 Implementação da Metodologia de Restabelecimento

Até a presente seção foi apresentada a estrutura de classes relativa à montagem e ao armazenamento de uma rede elétrica. Esta estrutura deve atender a qualquer aplicativo sem que nenhuma mudança estrutural no código seja realizada.

No presente trabalho, incorporou-se à plataforma existente o Algoritmo de Restabelecimento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (ARESDEE). Para tanto, criou-se a classe CARESDEE. A Figura C.6 mostra a estrutura de classes do aplicativo após a incorporação da nova classe.

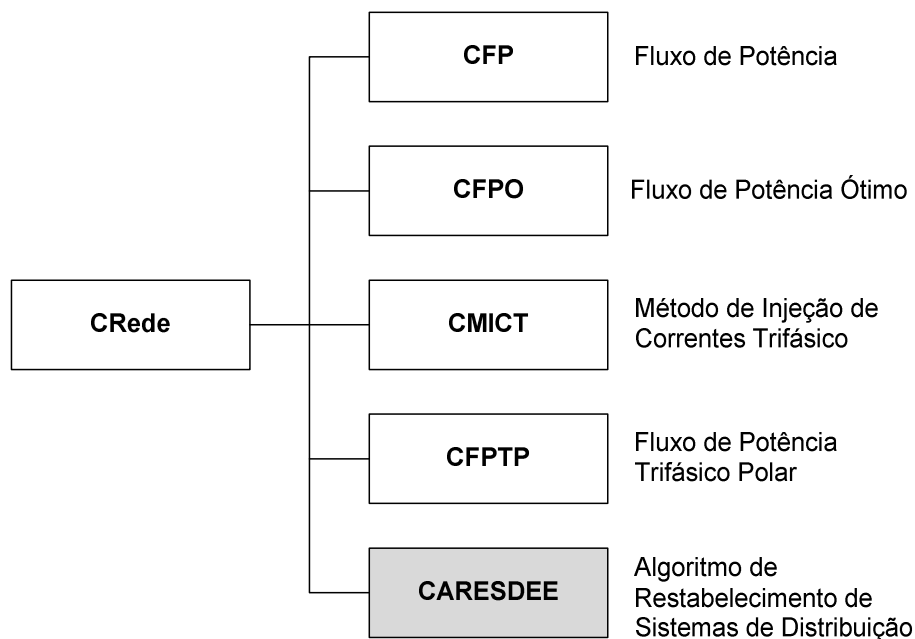


Figura C.6 - Metodologias implementadas

Como pode ser visto, as classes relativas aos métodos são agregadas à classe CRede. Dessa forma, qualquer aplicativo pode acessar uma rede obtendo a modelagem matemática pertinente ao mesmo.

É importante ressaltar que qualquer aplicativo poderá interagir com a classe CRede através da inclusão/retirada de equipamentos, mudança de estado dos equipamentos de controle, etc. Com isso, cada modificação realizada por um aplicativo é novamente validada e disponibilizada imediatamente para os demais métodos.

Na classe chamada CARESDEE, o método proposto no Capítulo III para solução do problema de restabelecimento dos sistemas de distribuição foi implementado.

Após a modelagem das classes para representação dos elementos da rede e resolução do problema de restabelecimento de sistemas de distribuição, a estrutura final da aplicação desenvolvida é dada na Figura C.7.

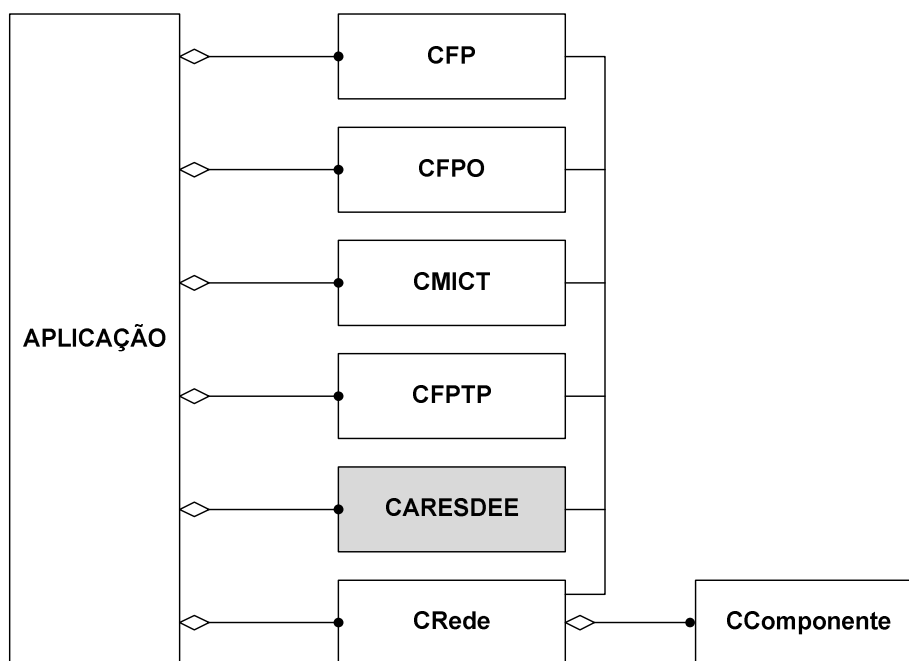


Figura C.7 - Estrutura de classes com novas metodologias agregadas

Como pode ser visto, a estrutura desenvolvida é modular, pois cada módulo (CRede, CComponente, CARESDEE) foi desenvolvido em um bloco separado. Esta modularidade permite que vários grupos trabalhem na mesma aplicação independentemente, permitindo um ganho de tempo no desenvolvimento do aplicativo. Além disso, a estrutura permite a inclusão de novas metodologias de análise de rede (Fluxo de Potência Harmônico, Estabilidade Transitória, Cálculo de Perdas, etc.) sem que seja necessário modificar a base desenvolvida anteriormente. Para tanto basta agregar na aplicação as novas metodologias e comunicá-las com a classe CRede.

C.6 Conclusões

A utilização de Modelagem Orientada a Objetos (MOO) para a implementação da metodologia proposta neste trabalho apresentou bons resultados. A maior vantagem da utilização da MOO foi o reaproveitamento de código, pois com a base computacional dos equipamentos e da rede prontas, foi necessário apenas implementar a classe responsável pela metodologia de restabelecimento (CARESDEE). Além disso, a modularidade da plataforma desenvolvida permite que várias metodologias sejam desenvolvidas sob uma mesma rede, permitindo novas implementações sem alteração na estrutura principal.