

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS ROBERTO FERREIRA

ALGORITMO DE AUTORRECUPERAÇÃO COM CORTE SELETIVO DE CARGA
PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

CURITIBA

2015

LUCAS ROBERTO FERREIRA

ALGORITMO DE AUTORRECUPERAÇÃO COM CORTE SELETIVO DE CARGA
PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração de Sistema de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Coorientadora: Profa. Dra. Thelma S. Piazza Fernandes

CURITIBA

2015

F383a

Ferreira, Lucas Roberto

Algoritmo de autorrecuperação com corte seletivo de carga para redes elétricas inteligentes/ Lucas Roberto Ferreira. – Curitiba, 2015.
142 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

Orientador: Alexandre Rasi Aoki – Co-orientador: Thelma S. Piazza Fernandes.

Bibliografia: p. 131-136.

1. Redes elétricas inteligentes . 2. Algoritmo - Otimização. 3. Eletrônica de potência. I. Universidade Federal do Paraná. II.Aoki, Alexandre Rasi. III. Fernandes, Thelma S. Piazza . IV. Título.

CDD: 621.319

TERMO DE APROVAÇÃO

LUCAS ROBERTO FERREIRA

ALGORITMO DE AUTORRECUPERAÇÃO COM CORTE SELETIVO DE CARGA PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

Orientador – Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR.



Profa. Dra. Thelma S. Piazza Fernandes

Coorientadora – Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR.



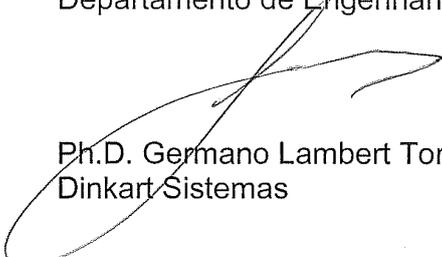
Profa. Dra. Elizete Maria Lourenço

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR.



Prof. Dr. Leandro dos Santos Coelho

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR.



Ph.D. Germano Lambert Torres
Dinkart Sistemas

Curitiba, 26 de Fevereiro de 2015.

RESUMO

Os avanços tecnológicos na área de sistemas de potência possibilitaram a inclusão de um novo conceito no setor elétrico com o qual mudaria da visão tradicional, adotada durante anos, para um novo sistema elétrico. Nesta nova visão, o setor elétrico passa a ser automático, robusto e ativo. Tal conceito é conhecido como redes elétricas inteligentes. Dentro desse conceito se encontram diversas linhas de pesquisas como automação da rede, autorrecuperação, gerenciamento pelo lado da demanda, microrredes, entre outros. Devido ao tema deste trabalho, coloca-se em foco somente as redes elétricas inteligentes para redes de distribuição, as quais em diversos países já são bem difundidas e aplicadas. Entretanto, no Brasil, nota-se que o cenário de redes elétricas inteligentes ainda está no começo, sendo enfocada na automação para em um próximo passo, se desenvolver técnicas de autorrecuperação para tornar o sistema de distribuição mais resiliente a falhas de fornecimento. Sendo assim, este trabalho compreende a elaboração de uma nova metodologia para resolver o problema de autorrecuperação em sistemas de distribuição, considerando o limite regulatório de tempo estabelecido de três minutos e sem extrapolar os limites de fluxo de potência e de perfil de tensão do alimentador. Logo, para se alcançar tais objetivos, decidiu-se realizar inicialmente estudos de técnicas de busca em grafos e de otimização. Em razão disso elaborou-se dois métodos de autorrecuperação com a finalidade de encontrar o melhor chaveamento para recompor o sistema: o primeiro uma adaptação do algoritmo de Dijkstra, e o segundo método, uma nova formulação da função objetivo para ser usada com a otimização por enxame de partículas com representação binária, visando atingir três objetivos: à maximização das cargas; a minimização das perdas sistêmicas; e a minimização do número de chaveamentos. De forma a dar subsídios a esses dois métodos elaborou-se um processador topológico para pré-processar os dados elétricos e o desenvolvimento de um método para isolar o local da falta, retirando os trechos defeituosos do espaço de busca. Além disso, para que a autorrecuperação consiga restabelecer o sistema sem prejudicar os consumidores, considerou-se o método de fluxo de potência ótimo para a aplicação do corte de carga, para que o sistema fique dentro das normas estabelecidas. Assumiu-se como cenário de teste dos métodos, um sistema de distribuição real urbano, com alta concentração de carga, composto por duas subestações e cinco alimentadores. A validação dessas duas técnicas criadas se deu através da avaliação de quatro casos testes, sendo os três primeiros casos, a aplicação de faltas simultâneas e o último caso, a aplicação de três faltas sequenciais. Os dois métodos resolveram o problema de maneira coerente e dentro dos limites estabelecidos, sendo que o método por enxame de partículas binário apresentou melhores resultados nos casos de faltas simultâneas enquanto o método pelo algoritmo de Dijkstra adaptado foi melhor em faltas sequenciais. Outrossim, o corte de carga por meio do fluxo de potência ótimo se mostrou uma ferramenta de auxílio ideal para se trabalhar em conjunto com sistemas de autorrecuperação, por conseguir manter o sistema seguro após o restabelecimento do sistema.

Palavras-chave: Redes Elétricas Inteligentes. Autorrecuperação. Algoritmo de Dijkstra. Otimização por Enxame de Partículas Binário. Fluxo de Potência Ótimo. Corte de Carga.

ABSTRACT

The technological progress in power systems allowed the inclusion of a new concept, changing the traditional view. In this new vision, the power systems would be smart, automatic, robust and active. Therefore, this concept was known as smart grid. Within this concept, there are several researches areas, such as, grid automation, self-healing, demand side management, microgrid, and other. Smart Grids for distribution systems in many countries are already well spread and applied. However in Brazil, it is noted that the scenario is still at an early stage, where the first technology progress is apply automation to control and measure the distribution system and as a next step, the development of self-healing techniques to make the system become more resilient and prevent damages against the final consumers. Therefore, several researches were started in order to resolve the self-healing problem, so, the matter of this work comprehend the formulation of a new methodology to resolve this problem in distribution systems, maintaining it under the limit of three minutes and without exceeding the power flow and voltage constraints of the feeder, avoiding a bad energy supply for the consumers. So, to achieve these objectives, it was decided to conduct an initial study about techniques of search in graph and optimization. By this reason, two self-healing methods were developed to find the best switching to recover the system: the first one is an adaptive Dijkstra algorithm, and the second one is a new objective function to be used with a binary particle swarm optimization. This objective function has three objectives: load maximization; system loss minimization; and switching number minimization. In order to make allowances for these two methods are elaborated a topological processor for pre-processing the electric data and the development of a method to isolate the fault location, removing defective sections of the search space. So, to restore the system with this methodology without damaging the consumers, it was used an optimal power flow to apply the load shedding and maintain the system within the standardized limits. As a test scenario for the methods it has been chosen an urban distribution system with high load density, five feeders and two substations, The methodology validation has been made by the analysis of four case studies. The first three was applied simultaneous faults and the last one was applied three sequential faults. Both methods proposed consistent solutions, regarding the operation limits. Wherein, the binary particle swarm optimization had better results for simultaneous faults, while the adaptive Dijkstra algorithm was better in sequential faults. Furthermore, the load shedding through optimal power flow proved to be a good tool to complement the self-healing, by keeping the system stable after the restoration.

Key words: Smart Grid. Self-Healing. Dijkstra Algorithm. Binary Particle Swarm Optimization. Optimal Power Flow. Load Shedding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – PROJETOS PILOTO EM RELAÇÃO A REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	25
FIGURA 2 – CONCENTRAÇÃO POR REGIÃO DOS INDICADORES DEC E FEC	26
FIGURA 3 – INDICADOR DEC MÉDIO ANUAL.....	27
FIGURA 4 – INDICADOR FEC MÉDIO ANUAL	27
FIGURA 5 – SISTEMA DE AUTORRECUPERAÇÃO PARA CONTROLE DA REDE DE OPERAÇÃO	37
FIGURA 6 – ESTRUTURA DO SISTEMA DE AUTORRECUPERAÇÃO	39
FIGURA 7 – (a) REPRESENTAÇÃO VISUAL DE UM GRAFO DIRIGIDO. (b) REPRESENTAÇÃO VISUAL DE UM GRAFO DIRIGIDO PONDERADO.	42
FIGURA 8 – LISTA DE ADJACÊNCIA	43
FIGURA 9 – LISTA DE ADJACÊNCIA COM PESOS.....	43
FIGURA 10 – FLUXOGRAMA DO BPSO.....	50
FIGURA 11 – EXEMPLO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	66
FIGURA 12 – EXEMPLO GENÉRICO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM DOIS ALIMENTADORES, DOIS DISJUNTORES, QUATRO CI E UMA CR	66
FIGURA 13 – UNIFILAR DA TOPOLOGIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO URBANO	67
FIGURA 14 – APRESENTAÇÃO DAS CARGAS EM MVA DE CADA BLOCO DISTRIBUÍDAS PELO ALIMENTADOR	67
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA GERAL DA METODOLOGIA DE AUTORRECUPERAÇÃO	70
FIGURA 16 – EXEMPLO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO POR UMA REPRESENTAÇÃO EM GRAFO	71
FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO TOPOLÓGICO.....	73
FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DA APLICAÇÃO E ISOLAMENTO DA FALTA.....	74
FIGURA 19 – EXEMPLO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM FALTA POR UMA REPRESENTAÇÃO EM GRAFO	75
FIGURA 20 – FLUXOGRAMA DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O BPSO.....	77
FIGURA 21 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE DIJKSTRA ADAPTADO (ADA) PARA A AUTORRECUPERAÇÃO	79
FIGURA 22 – ORDEM DE ALOCAÇÃO DOS PESOS NAS ARESTAS (CHAVES) ..	80

FIGURA 23 – UNIFILAR DA TOPOLOGIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO URBANO VIA PROGRAMA.....	89
FIGURA 24 – LEGENDA DOS SÍMBOLOS DA REPRESENTAÇÃO TOPOLÓGICA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	89
FIGURA 25 – APRESENTAÇÃO DOS DADOS BRUTOS DO ALIMENTADOR 1 ...	90
FIGURA 26 – SITUAÇÃO USADA COMO EXEMPLO PARA O TESTE DA FUNÇÃO OBJETIVO	91
FIGURA 27 – SITUAÇÃO SEM A APLICAÇÃO DA PARCELA DAS PERDAS.....	93
FIGURA 28 – SITUAÇÃO SEM A APLICAÇÃO DA PARCELA DA QUANTIDADE DE CHAVEAMENTOS.....	93
FIGURA 29 – SITUAÇÃO CONSIDERANDO TODAS AS PARCELAS.....	94
FIGURA 30 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 1 ...	95
FIGURA 31 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 1 (a) POR BPSO E (b) POR ADA	96
FIGURA 32 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 5 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 1 POR BPSO	98
FIGURA 33 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 1 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 1 POR ADA.....	98
FIGURA 34 – COMPARATIVO DO ACUMULADO DE POTÊNCIA APARENTE ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 1 (a) POR BPSO – ALIMENTADOR 5 E (b) POR ADA – ALIMENTADOR 1	100
FIGURA 35 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 2 .	101
FIGURA 36 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 2 (a) POR BPSO E (b) POR ADA	102
FIGURA 37 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 1 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA E DO ALIMENTADOR 2 ANTES (c) E DEPOIS (d) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 2 POR BPSO	104
FIGURA 38 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 2 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 2 POR ADA.....	105
FIGURA 39 – COMPARATIVO DO ACUMULADO DE POTÊNCIA APARENTE ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 2 (a) POR BPSO – ALIMENTADOR 1, (b) POR BPSO – ALIMENTADOR 2 E (c) POR ADA – ALIMENTADOR 2.....	106
FIGURA 40 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 3 .	107

FIGURA 41 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 3 (a) POR BPSO E (b) POR ADA	108
FIGURA 42 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 4 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 3 POR BPSO.....	110
FIGURA 43 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 4 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 3 POR ADA	110
FIGURA 44 – COMPARATIVO DO ACUMULADO DE POTÊNCIA APARENTE ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 3 (a) POR BPSO – ALIMENTADOR 4 E (b) POR ADA – ALIMENTADOR 4.....	111
FIGURA 45 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 4.1	112
FIGURA 46 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 4.1 (a) POR BPSO E (b) POR ADA.....	113
FIGURA 47 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 2 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.1 POR BPSO.....	115
FIGURA 48 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 4.2 CONSIDERANDO O RESULTADO DO BPSO (a) DO ADA (b).....	116
FIGURA 49 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 4.2 (a) POR BPSO E (b) POR ADA.....	117
FIGURA 50 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 2 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.2 POR BPSO.....	119
FIGURA 51 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 2 ANTES (A) E DEPOIS (B) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.2 POR ADA	119
FIGURA 52 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 4.3	120
FIGURA 53 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 4.3 (a) POR BPSO E (b) POR ADA.....	121
FIGURA 54 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 1 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.3 POR BPSO.....	122
FIGURA 55 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 1 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.3 POR ADA	123
FIGURA 56 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 1 POR BPSO, SEM A RESTRIÇÃO DE TEMPO.....	143

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ENTRE A REDE DE DISTRIBUIÇÃO ATUAL E A REDE ELÉTRICA INTELIGENTE.....	34
TABELA 2 – LIMITES DA FAIXA DE TENSÃO DEFINIDOS PELA ANEEL.....	41
TABELA 3 – INICIALIZAÇÃO E PRIMEIRA ITERAÇÃO DO ALGORITMO DE DIJKSTRA.....	47
TABELA 4 – INFORMAÇÕES DE BARRAS E POTÊNCIA INSTALADA NO SISTEMA.....	68
TABELA 5 – INFORMAÇÕES DE FLUXO DE POTÊNCIA E CORRENTE NO SISTEMA.....	68
TABELA 6 – EXEMPLO DO RESULTADO FINAL DO ALGORITMO DE DIJKSTRA.....	82
TABELA 7 – PARAMETRIZAÇÃO DO BPSO.....	87
TABELA 8 – PARAMETRIZAÇÃO DO FPO.....	88
TABELA 9 – COMPARAÇÃO DOS CASOS TESTES PARA A FUNÇÃO OBJETIVO.....	92
TABELA 10 – COMPARAÇÃO DO VALOR DAS PARCELAS DA FUNÇÃO OBJETIVO.....	92
TABELA 11 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 1.....	97
TABELA 12 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 1.....	99
TABELA 13 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 1.....	99
TABELA 14 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 2.....	103
TABELA 15 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 2.....	103
TABELA 16 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 2.....	105
TABELA 17 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 3.....	109
TABELA 18 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 3.....	109

TABELA 19 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 3	111
TABELA 20 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 4.1	114
TABELA 21 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.1.....	114
TABELA 22 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 4.1	115
TABELA 23 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 4.2.....	118
TABELA 24 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.2.....	118
TABELA 25 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 4.2	119
TABELA 26 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 4.3.....	122
TABELA 27 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.3.....	123
TABELA 28 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 4.3.....	123
TABELA 29 – INFORMAÇÕES DO ALIMENTADOR E DO SISTEMA AO QUAL ELE FAZ PARTE	139
TABELA 30 – INFORMAÇÕES DAS CHAVES	139
TABELA 31 – INFORMAÇÕES REFERENTES AOS NÓS IMPORTANTES	139
TABELA 32 – INFORMAÇÕES ELÉTRICAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO, PARTE 1.....	140
TABELA 33 – INFORMAÇÕES ELÉTRICAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO, PARTE 2.....	140
TABELA 34 – TESTES DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA PARA O BPSO ..	141

LISTA DE SIGLAS

ADA	Algoritmo de Dijkstra Adaptado
AMP	Ampacidade
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARD	Automação na Rede de Distribuição
BPSO	Otimização por Enxame de Partículas Binária, do inglês <i>Binary Particle Swarm Optimization</i>
CI	Chave Interna
CR	Chave de Recurso
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DICRI	Duração da Interrupção Individual Ocorrido em dia Crítico por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
GD	Geração Distribuída
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
MT	Média Tensão
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSO	Otimização por Enxame de Partículas, do inglês <i>Particle Swarm Optimization</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
REA	Reativa
REI	Rede Elétrica Inteligente
TL	Tensão de Leitura
TMAE	Tempo Médio de Atendimento a Emergência
TMD	Tempo Médio de Deslocamento
TME	Tempo Médio de Execução
TMP	Tempo Médio de Preparação
TR	Tensão de Referência

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔPd^{max}	Valor máximo de redução de potência ativa
F_{bl}	Conjunto dos blocos com falta
N_{SE}	Conjunto dos vértices que representam as subestações
N_{bl}	Conjunto dos vértices que representam blocos de carga
N_{pf}	Conjunto dos blocos sem os blocos com falta
U_{prior}	Matriz de incidência com a priorização das barras
V^{max}	Limite máximo de tensão nas barras
V^{min}	Limite mínimo de tensão nas barras
a^{max}	Relação máxima de transformação da magnitude de tensão
a^{min}	Relação mínima de transformação da magnitude de tensão
fl^{max}	Vetor do limite máximo de fluxo de potência ativa
l_{normal}	Valor da perda sistêmica do sistema em modo normal
l_{sis}	Perda sistêmica a partir de px
w_{cc}	Peso para minimização do corte de carga
x_{pos}	Posição da partícula
ΔPd	Valor de redução de potência ativa
ΔPd	Valores de redução de potência reativa
Bl_{out}	Conjunto com os blocos a serem recuperados
$Ch_{abertas_{pf}}$	Conjunto das chaves abertas sem as chaves abertas com falta
$Ch_{abertas}$	Conjunto das chaves abertas
$Ch_{fechadas_{pf}}$	Conjunto das chaves fechadas sem as chaves fechadas com falta
$Ch_{fechadas}$	Conjunto das chaves fechadas
Ch_{out-bl}	Conjunto das chaves ligadas aos blocos a serem restabelecidos
Ic	Vetor das barras a serem cortadas
I_{max}	Limite máximo de corrente na saída do alimentador
N	Conjunto de todos os vértices do grafo

P	Injeção de potência ativa
Pd^0	Valores iniciais de potência ativa da carga
Pd	Potência ativa da carga
Pg	Geração de potência ativa
Pr	Precedentes
Q	Injeção de potência reativa
Qd^0	Valores iniciais de potência reativa da carga
Qd	Potência reativa da carga
Qg	Geração de potência reativa
Sd_{tot}	Potência total de um alimentador
Sd	Vetor de potência aparente das barras de um bloco
Um	Matriz de incidência
V	Magnitude de tensão nas barras
W, Wr	Peso das arestas
X	Valor total de potência aparente
Z	Impedância da linha
al	Número referente ao alimentador
$arcos$	Conjunto de todas as arestas do grafo
$ch_{comutadas}$	Quantidade de comutação a partir de px
ch_{tot}	Valor máximo de comutações das chaves
e	Parte real da componente tensão
f	Parte imaginária da componente tensão
fl	Vetor de fluxo de potência ativa
fp	Fator de potência
nb	Número de barras
nc	Número de barras para o corte
px	Partícula que representa o chaveamento
sd_{max}	Valor máximo de potência aparente
sd_{tot-bl}	Total de potência aparente a partir de px
vl	Velocidade da partícula
α	Custo de redução de potência das barras

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	CONTEXTO	24
1.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	25
1.3	OBJETIVOS	28
1.3.1	Objetivo Geral.....	28
1.3.2	Objetivos Específicos	28
1.4	JUSTIFICATIVA	29
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	30
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	33
2.1	REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	33
2.2	AUTORRECUPERAÇÃO	35
2.3	NORMAS E INDICADORES	40
2.3.1	Qualidade da Energia Elétrica	40
2.3.2	Remanejamento de Carga.....	41
2.4	GRAFOS	41
2.4.1	Algoritmo de Busca em Grafos	43
2.4.1.1	Busca em Largura	44
2.4.1.2	Algoritmo de Dijkstra	45
2.5	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS BINÁRIO	47
2.6	FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO	50
2.6.1	Formulação Geral do FPO.....	51
2.6.2	Formulação do FPO para Corte de Carga	53
3	REVISÃO DA LITERATURA	57
3.1	AUTORRECUPERAÇÃO	57
3.2	CORTE DE CARGA APLICADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	59

3.3	APLICAÇÕES DOS ALGORITMOS UTILIZADOS	60
3.3.1	Algoritmo de Dijkstra	60
3.3.2	BPSO	61
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	62
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
4.1	MATERIAIS	65
4.1.1	Dados do Sistema de Distribuição	65
4.1.2	Plataforma Computacional.....	69
4.2	MÉTODOS.....	69
4.2.1	Processamento Topológico.....	72
4.2.2	Aplicação e Isolamento da Falta	74
4.2.3	Autorrecuperação.....	76
4.2.3.1	Formulação da Função Objetivo do BPSO.....	76
4.2.3.2	Algoritmo de Dijkstra Adaptado (ADA) para Autorrecuperação	78
4.2.4	Corte de Carga.....	83
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	84
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
5.1	RESULTADO DO PROCESSAMENTO TOPOLÓGICO.....	88
5.2	TESTES DA FUNÇÃO OBJETIVO DO BPSO.....	91
5.3	FALTAS SIMULTÂNEAS.....	94
5.3.1	Caso 1.....	94
5.3.2	Caso 2.....	100
5.3.3	Caso 3.....	106
5.4	FALTAS SEQUENCIAIS.....	112
5.4.1	Caso 4.....	112
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	123
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	127

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129
REFERÊNCIAS	131
APÊNDICE A – Produção Acadêmica.....	137
APÊNDICE B – Tabela para Inserir as Informações do Alimentador	139
APÊNDICE C – Análise da Função de Transferência para o BPSO	141
APÊNDICE D – Simulação Sem Restrição de Tempo do BPSO para o Caso 1	143

1 INTRODUÇÃO

Desde os anos 2000, um novo conceito começou a ser abordado no setor elétrico, as Redes Elétricas Inteligentes (REI – do inglês, *Smart Grid*), o qual foi introduzido a partir da necessidade de se melhorar a infraestrutura do sistema de potência dos EUA após os apagões que ocorreram, um no final da década de 1990 e o outro no verão de 2003, devido à vulnerabilidade do sistema que acarretou num efeito cascata. Assim, estudos nessa área começaram a ser aprofundados para alcançar o objetivo de tornar esse sistema mais seguro, ágil, robusto e capaz de se adaptar a eventos inesperados, dessa maneira chegou-se a ideia de uma rede elétrica inteligente. Existem diversas definições de REI, sendo de maneira geral, definidas como um sistema que se utiliza de novas ferramentas tecnológicas para controlar, monitorar e gerenciar todo o sistema de potência, de forma eficiente utilizando de técnicas de automação, para passar a rede passiva para uma rede ativa em todos os níveis de tensão (AMIN; WOLLENBERG, 2005; CECATI *et al.* 2010; CARVALLO; COOPER, 2011).

No contexto internacional conforme a *International Energy Agency* (IEA) (2011), países, tais como, China, Estados Unidos, Itália, Japão, Coreia do Sul, Espanha, Alemanha, Reino Unido e França já demonstram o interesse no desenvolvimento de REI, através de projetos pilotos, aplicação de medidores inteligentes e de tecnologias voltadas à energia renovável. No Brasil, alguns projetos pilotos já foram ou estão sendo implementados, como: a Cidade do Futuro da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG); Cidade Inteligente de Búzios da Ampla/Endesa Brasil; *Smart Grid* Light da Light; Programa *Smart Grid* – Projeto Eletropaulo Digital da AES Eletropaulo; InovCity da concessionária Energias de Portugal (EDP) Bandeirante; Cidade Inteligente Aquiraz da Companhia Energética do Ceará (COELCE); Paraná *Smart Grid* da Companhia Paranaense de Energia (COPEL); e Arquipélago de Fernando de Noronha da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE) (PROJETOS..., 2015).

1.1 CONTEXTO

A partir do ano de 2010, o governo passou a dar importância às redes elétricas inteligentes com a portaria de nº 440, de 15 de abril de 2010, através da qual foi criado um Grupo de Trabalho para discussões acerca desse novo conceito (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2010). Atualmente, o Brasil conta com o apoio do Plano de Inovação Tecnológica no Setor Elétrico, que prevê o investimento de R\$ 3 bilhões na área de redes elétricas inteligentes, transmissão de ultra-alta tensão, geração de energia por meio de fontes alternativas, veículos elétricos híbridos e eficiência energética veicular.

Esse apoio é necessário ao Brasil devido à falta de investimentos que não foram efetuados no sistema de distribuição, esse fato é demonstrado através do projeto estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) desenvolvido no Brasil em 2011 com o objetivo de elaborar um plano nacional para a evolução das REI dentro dos próximos vinte anos. Neste estudo, apresentou que o Brasil ainda tem muito a desenvolver no quesito de automação na rede de distribuição (ARD), pois se percebeu que atualmente existem dois níveis de ARD conforme Duarte *et al.* (2013):

- Nível 1: Grau mais baixo de automação e inteligência, e pouca integração dos sistemas de tecnologia da informação (TI). Controle e Supervisão são principalmente para a transmissão e subestação. Medição remota somente para consumidores de alta tensão, grandes consumidores de média tensão (MT) e alguns consumidores rurais.
- Nível 2: Grau um pouco mais elevado de automação e inteligência, sendo dividido em duas vertentes: a primeira que conta com as iniciativas da concessionária em automatizar sua rede de distribuição; a segunda já conta com a utilização de dispositivos, como chaves controladas remotamente e aplicação de ações de autorrecuperação de forma centralizada ou distribuída.

Este P&D também expôs a projeção de se automatizar a rede de distribuição através de implementações de projetos pilotos para testar a aplicação de novas tecnologias, tal pesquisa é demonstrada na FIGURA 1.

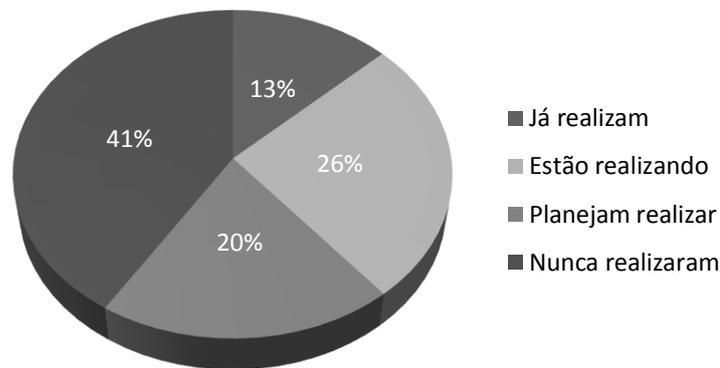


FIGURA 1 – PROJETOS PILOTO EM RELAÇÃO A REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

FONTE: Adaptado de Duarte *et al.* (2013)

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A falta de investimentos suficientes na rede de distribuição ao longo dos anos fez com que problemas começassem a surgir neste ramo do setor elétrico. Um ponto que se destaca é a questão da confiabilidade da rede de distribuição, causando problemas aos consumidores conectados à rede devido às falhas no fornecimento de energia e pela demora em restabelecê-la. Pelo lado da concessionária, esta questão impacta em gastos de compensações financeiras aos consumidores, os quais são calculados a partir dos indicadores de continuidade – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC), conforme o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

Considerando então esses dois indicadores para estudos, a partir da FIGURA 2 verifica-se que, em 2013, a Região Sul apresentou 41% de extrapolação dos limites de DEC e 17% de FEC para as 17 concessionárias de energia; já na Região Sudeste, das 22 concessionárias, 18% apresentaram valores de DEC acima do limite e 9% de FEC; no Centro-Oeste, com cinco concessionárias, quatro apresentaram os indicadores de DEC e FEC acima dos limites; no Nordeste, das 11 concessionárias, 36% delas demonstraram um DEC acima do limite e 18% o FEC; por fim na Região Norte, com oito concessionárias, 63% extrapolaram o DEC e 50% o FEC.

Em valor monetário a compensação em 2013 chegou a R\$ 346 milhões, sendo a CELG-Distribuição (Goiás) a concessionária que apresentou o maior valor de

compensação, reforçando a FIGURA 2 ao qual demonstra que a Região Centro-Oeste concentra o maior número de concessionárias que apresentam os piores índices de continuidade (ANEEL, 2014a; ANEEL, 2014b)

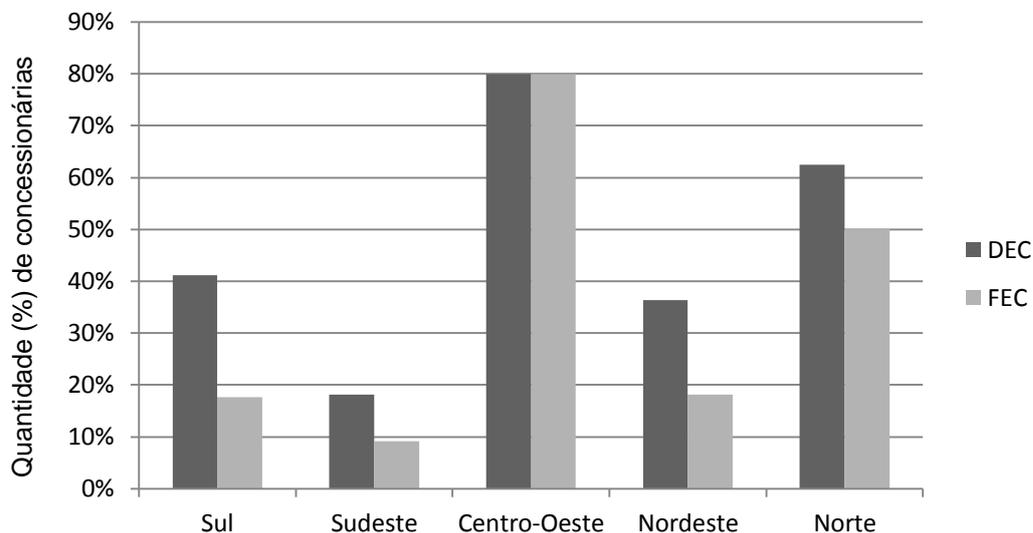


FIGURA 2 – CONCENTRAÇÃO POR REGIÃO DOS INDICADORES DEC E FEC

FONTE: Adaptado de ANEEL (2014b)

Como é somente escolhido um dos índices para o valor de compensação conforme o Módulo 8 do PRODIST, o índice que mais influenciou o gasto com compensações no ano de 2013 e também nos anos anteriores foi o DEC, em que desde 2009, conforme a FIGURA 3 a média do índice, em torno de 18 horas, vem se mantendo constante e acima do limite determinado pela ANEEL de aproximadamente 15 horas. A cada ano esse limite vem diminuindo de forma a forçar as concessionárias a melhorarem seus sistemas de distribuição, porém percebe-se que isso não vem ocorrendo da forma esperada.

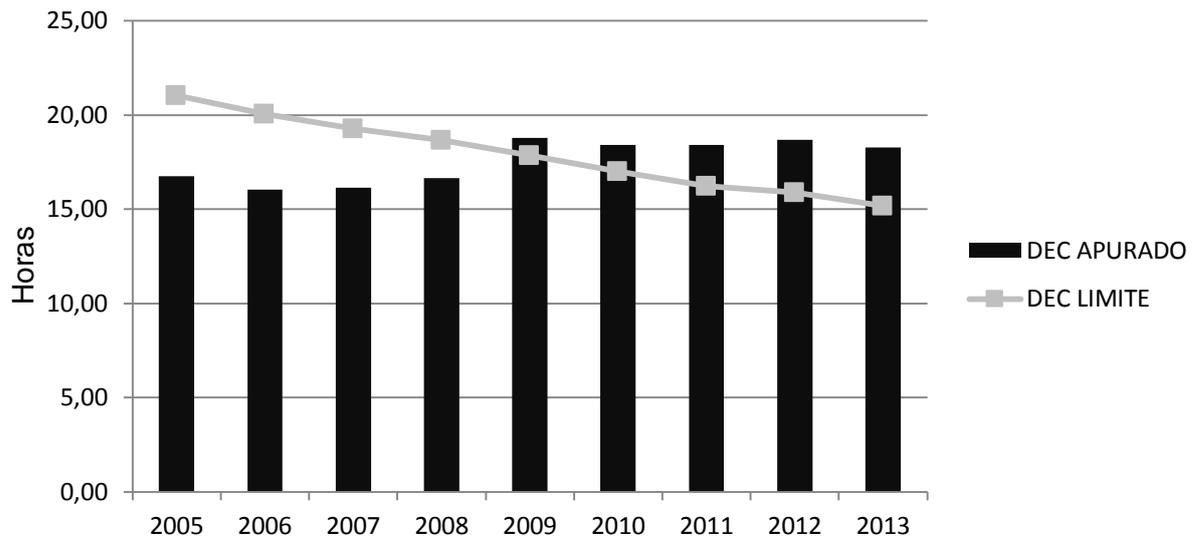


FIGURA 3 – INDICADOR DEC MÉDIO ANUAL

FONTE: Adaptado de ANEEL (2014)

Já o índice FEC, demonstrado na FIGURA 4, se manteve abaixo do limite imposto pela ANEEL e em 2013 houve uma pequena queda no número de interrupções, porém não se pode deixar passar despercebido que a diferença do limite com o valor médio alcançado vem a cada ano diminuindo em comparação aos anos anteriores.

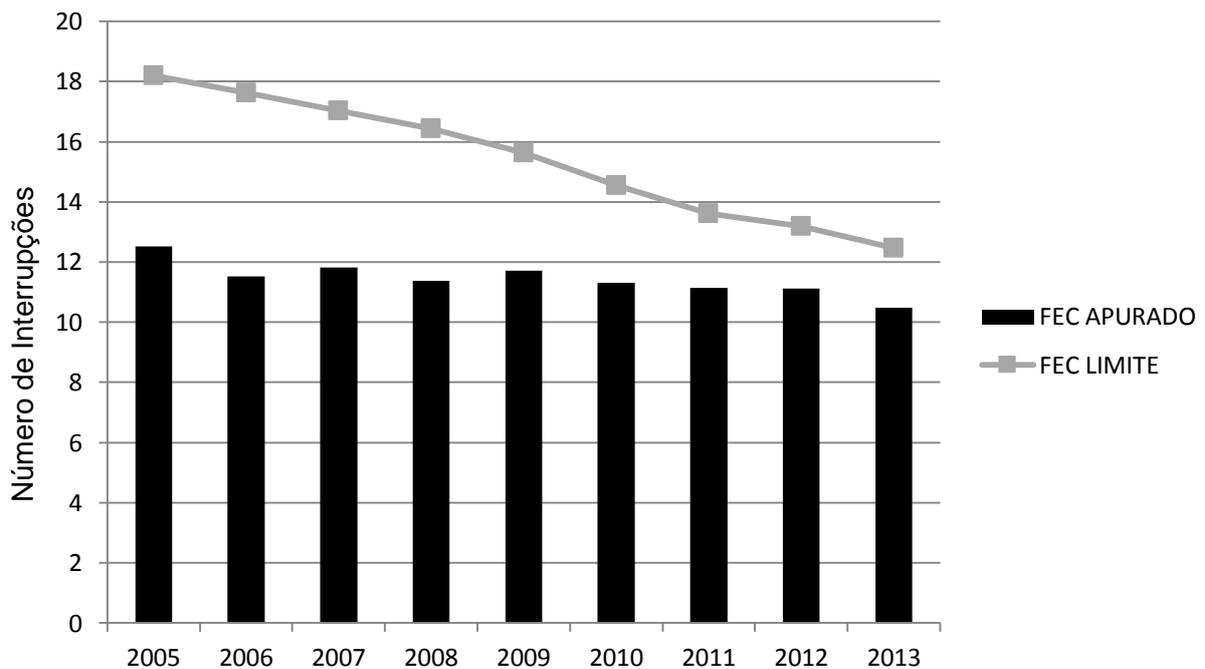


FIGURA 4 – INDICADOR FEC MÉDIO ANUAL

FONTE: Adaptado de ANEEL (2014).

A partir de tais problemas, soluções como o de automação na rede de distribuição em conjunto com técnicas de inteligência computacional poderão fornecer melhorias significantes, como controle e monitoramento em tempo real da rede, transformação da rede passiva para uma rede ativa através, por exemplo, da inserção de gerações distribuídas (GD), do gerenciamento pelo lado da demanda, melhorias na qualidade de energia distribuída e também na confiabilidade da distribuição de energia para que se mantenham os padrões estabelecidos pela ANEEL.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram separados em dois, sendo o primeiro o objetivo geral para que se possa ver a temática ao qual o trabalho proposto está atrelado e o segundo os objetivos específicos que detalham de forma sucinta o que trabalho apresenta.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é minimizar o impacto de falhas de fornecimento de energia elétrica nas redes elétricas inteligentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Levantar premissas e requisitos acerca do problema de autorrecuperação;
- b) Analisar métodos da teoria dos grafos, tanto para a modelagem do sistema de distribuição, quanto como ferramenta para a resolução do problema de chaveamento;
- c) Avaliar a aplicação do método de Fluxo de Potência Ótimo para a realização de corte de carga;

- d) Desenvolver uma metodologia que possa realizar a autorrecuperação de uma rede de distribuição radial, a partir da aplicação do método de busca escolhido em conjunto com o corte de carga através do fluxo de potência ótimo, considerando múltiplas falhas em múltiplos alimentadores interconectados;
- e) Validar e testar a metodologia desenvolvida para os estudos de caso.

1.4 JUSTIFICATIVA

Conforme relatado, os gastos relacionados às multas sobre os indicadores DEC e FEC se tornaram altos para a concessionária de energia. Então, a modernização da rede de distribuição se torna viável ao ponto de além de resolver um caso específico à concessionária possibilita para ela mesma um maior gerenciamento da rede de distribuição e dos consumidores.

Dentro dessa ARD abre-se um leque de sistemas, ou conceitos, a serem explorados, e um desses sistemas é o da autorrecuperação (do inglês, *Self-Healing*) do sistema de distribuição. Ela utiliza novas tecnologias implantadas durante a automação na distribuição para contribuir no momento em que a rede de distribuição passe por uma falha e necessite encontrar uma solução para identificar e isolar o local do problema, e por fim recuperar o sistema de forma autônoma, fornecendo, no menor tempo possível, energia de qualidade para o maior número de cargas e conseqüentemente diminuindo os indicadores DEC e FEC.

Porém uma ação de autorrecuperação não realizada corretamente e sem o auxílio de outras técnicas pode levar o sistema a um estado mais crítico do que apresentado após a falha, qual seja, a sobrecarga em alimentadores devido à reconfiguração do sistema pela autorrecuperação. Então, como forma de dar mais robustez a metodologia de autorrecuperação usa-se de uma técnica conhecida como corte de carga para servir como uma ferramenta de auxílio, que, para quando apresentada essa situação crítica o corte de carga possa atuar conduzindo o sistema para uma situação normal e segura. Essa integração da função de autorrecuperação com o corte de carga pode ser observada em Amin (2001), o qual relata que um corte

de 0,4% do total de carga por 30 minutos poderia ter evitado o apagão de 1996, ocorrido no sistema de potência norte americano.

Sendo assim, este trabalho tenta apresentar uma metodologia simples, inteligente e de rápida resolução para a realização da autorrecuperação do sistema de distribuição e a utilização de uma técnica de corte de carga para deixar o sistema de distribuição seguro e fornecendo energia com qualidade.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura deste documento contempla a separação do conteúdo em seis capítulos, onde se tem no primeiro capítulo a introdução sobre o assunto principal deste trabalho em conjunto com os objetivos que devem ser seguidos para alcançar os resultados esperados. No segundo capítulo são apresentados os conceitos e teorias sobre as redes elétricas inteligentes, a autorrecuperação, as normas e indicadores referente à qualidade de energia, a criação de grafos e algoritmos de busca, a otimização por enxame de partículas, e fluxo de potência ótimo com o foco em corte de carga.

No terceiro capítulo são apresentadas as pesquisas mais recentes sobre os temas pertinentes deste trabalho, em que se discorre sobre os artigos publicados na área de autorrecuperação, corte de carga, algoritmo de busca Dijkstra e otimização por enxame de partículas binário, além de apresentar o diferencial deste trabalho com os demais apresentados.

Depois de apresentado a parte teórica do trabalho, o capítulo quatro aborda os materiais e métodos empregados, sendo que na parte de materiais é descrito o sistema de distribuição usado para validar a metodologia, a plataforma computacional e os *softwares* utilizados para realizar os testes. No item métodos é apresentado o desenvolvimento da metodologia para a autorrecuperação em conjunto com o processamento topológico.

Após a apresentação da metodologia, o capítulo cinco relata os resultados referente ao processamento topológico, da função objetivo para a otimização por enxame de partículas binário e de quatro casos analisados para validar a metodologia, sendo três deles com faltas simultâneas e um deles com faltas sequências. Por fim,

no capítulo seis se apresentam as conclusões pertinentes aos objetivos que se almejavam alcançar e as sugestões para trabalhos futuros que podem ser seguidos a partir da continuidade deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos teóricos dos assuntos mais pertinentes neste trabalho, tais como, redes elétricas inteligentes, autorrecuperação, normas e indicadores, teoria de grafos, otimização por exame de partículas binário e fluxo de potência ótimo.

2.1 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Massoud Amin, em 2005, citou pela primeira vez o conceito de Redes Elétricas Inteligentes (REI), no qual discute sobre elementos de uma “rede elétrica inteligente” para a transmissão com o objetivo de tornar a rede segura, ágil e robusta diante de novas ameaças e condições inesperadas (AMIN; WOLLENBERG, 2005).

Em 2006, a comissão europeia publicou na RTD info, uma pesquisa denominada Plataforma Tecnológica Europeia de Redes Elétricas Inteligentes, que se iniciou em 2005 com a finalidade de criar uma visão de Redes Elétricas Inteligentes para o sistema de potência europeu para 2020, sendo que tal visão deveria considerar a segurança no fornecimento de energia, a redução de emissões de gases poluentes, a inserção de fontes renováveis de energia, a interoperabilidade entre as redes de energia europeia, o gerenciamento pelo lado da demanda, entre outros pontos (COMMISSION, 2006).

A comparação entre a tecnologia atual das redes elétricas e o conceito das redes elétricas inteligentes pode ser observada na TABELA 1. Destaca-se que esta comparação é pertinente ao conceito idealizado das redes elétricas inteligentes, o qual atualmente não é completamente viável do ponto de vista técnico-econômico. Outro aspecto que merece destaque é que muitos conceitos visualizados para as redes elétricas inteligentes tratam-se de conceitos já existentes na tecnologia atual das redes elétricas, porém apresentados com uma nova abordagem tecnológica.

TABELA 1 – COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ENTRE A REDE DE DISTRIBUIÇÃO ATUAL E A REDE ELÉTRICA INTELIGENTE

Características	Rede Atual	Rede Elétrica Inteligente
Topologia	Baixas rotas alternativas, operação radial e fluxo de potência em uma direção	Muitas rotas alternativas, fluxo de potência bidirecional e consideração de malha e ilhamento
Observabilidade e Controlabilidade da Rede	Baixa observabilidade (poucos pontos de medição), medidor de energia sem comunicação, controle lento e poucos dispositivos controláveis	Alta observabilidade, medição de energia com comunicação bidirecional e controle em tempo real através de IEDs ¹
Geração de Energia	Dominado pela geração central e muitos obstáculos para a inserção da geração distribuída	Geração central integrada com fontes de energia distribuída
Armazenamento Estático de Energia	Sem armazenamento distribuído	Alta difusão de armazenamento distribuído
Armazenamento Móvel de Energia	Sem veículos elétricos	Alta difusão de veículos elétricos
Novos produtos, serviços e mercados	Limitado, pobre integração com mercado de energia e oportunidade limitada para consumidores	Boa integração do mercado e crescimento de novos mercados de energia para consumidores
Qualidade da Energia Elétrica (QEE)	Foco nas interrupções e resposta lenta para questões sobre a qualidade de energia	Qualidade da energia é uma prioridade e com uma variedade de opções de qualidade/preço
Recuperação do sistema	Manual e baseado na experiência, conhecimento e intuição dos operadores, resposta para prevenir menos danos e foco na proteção de ativos seguindo uma falta	Automaticamente detecta e responde a problemas, foco na prevenção e minimização de impactos ao consumidor
Consumidores	Desinformados, não participativos e com pouco controle	Informados e envolvidos em relação à resposta a demanda, análise do consumo em tempo real e com geração própria

FONTE: Adaptado de Commission (2006); Momoh (2012); Oualmakran *et al.* (2012)

¹ Dispositivo Eletrônico Inteligente (do inglês, *Intelligent Electronic Device* - IED) é um dispositivo que executa uma ou mais das seguintes funções: proteção; monitoramento; medição; armazenamento; controle e comunicação (Ekanayake *et al.*, 2012).

De forma resumida as redes elétricas inteligentes representam uma automação na rede elétrica a partir da integração de novas tecnologias desenvolvidas, tais como o *Advanced Distributed Management System*, de fontes de energia renováveis, de sistemas de armazenamento móveis e estáticos, para que essa integração possa alcançar um mesmo objetivo, que é de fortalecer a rede elétrica para disponibilizar a energia com as qualidades exigidas, uma geração de energia menos poluente ao meio ambiente (exemplo painéis fotovoltaicos e geradores eólicos) e estimular a troca de combustível fóssil por baterias.

2.2 AUTORRECUPERAÇÃO

O conceito de um sistema elétrico autorrecuperável, conforme entendido nas REI, teve início em 1998, como parte do programa *Government-Industry Collaborative University Research* (GICUR), sendo um trabalho do CIN/SI iniciado em 1998 e executado pela união da *Electric Power Research Institute* (EPRI) e o *U.S. Department of Defense* (DoD). O programa teve como objetivo o desenvolvimento de novas ferramentas e técnicas que englobariam grandes infraestruturas para se “autorrecuperar” em resposta a ameaças, falhas de materiais e outros desestabilizadores (AMIN, 1998; AMIN, 2000). Os primeiros desenvolvimentos foram focados na rede de transmissão e utilizando os métodos de multiagentes para se resolver o problema da autorrecuperação (AMIN, 2001).

A autorrecuperação é considerada como uma das principais funcionalidades das redes elétricas inteligentes, e tem como base filosófica o conceito desenhado em 1998. A fundamentação conceitual de autorrecuperação iniciou-se a partir do sistema de controle de voo inteligente desenvolvido pela Universidade de Washington com o objetivo de ajudar numa resposta ao piloto em situações críticas que possam ocorrer ao avião como condições de falha ou danos repentinos no avião (AMIN; WOLLENBERG, 2005).

A terminologia “autorrecuperação” como uma tradução do inglês de *Self-Healing* foi citada inicialmente em Falcão (2009), que aborda uma introdução inicial sobre os conceitos de REI e microrredes.

De forma geral, conforme Amin (1998), a autorrecuperação é um sistema que utiliza de informações, detecções, controle e tecnologias de comunicação para

permitir lidar com imprevistos operacionais na rede de distribuição e minimizar os impactos adversos. Em complemento com a definição citada, a *International Energy Agency* (2011) coloca como autorrecuperação a melhoria da confiabilidade da rede e a rapidez de resposta quando ocorre uma falha na rede de distribuição, isolando o local da falta e reduzindo o período de falta em toda a rede. Os benefícios da aplicação do conceito de autorrecuperação em sistemas elétricos incluem (OUALMAKRAN *et al.*, 2012):

- Rápida restauração do sistema ao modo operativo;
- Restauração de maior quantidade de cargas;
- Menor necessidade de enviar equipes de campo para reconfigurar a rede.

Ressalta-se que um sistema de autorrecuperação e um sistema de reconfiguração da rede elétrica têm objetivos de aplicações diferentes, sendo de maneira resumida, a autorrecuperação aplicada à operação da rede e a reconfiguração aplicada ao planejamento da rede.

Uma abordagem diferenciada para um sistema de autorrecuperação é discutida em Jia *et al.* (2011) e em Liu *et al.* (2012), a qual utiliza conceitos parecidos com os dos estados da operação para o sistema de potência apresentados por Fink e Carlsen (1978). Segundo Fink e Carlsen (1978) com o objetivo de manter a geração e a demanda sob controle e dentro dos limites estabelecidos são apresentados cinco estados de operação: estado normal de operação; estado de alerta; estado de emergência; estado extremo; e estado de restauração. Agora, considerando uma rede de distribuição automatizada e de acordo com a abordagem de autorrecuperação baseada em Liu *et al.* (2012) os estados de operação presentes na rede de distribuição são:

- Estado de emergência – a rede de distribuição está em estado crítico a partir de uma falta, estabelecendo então um perfil de tensão fora dos limites, um sistema sobrecarregado, e a necessidade do relé atuar imediatamente para evitar um cascadeamento de faltas;
- Estado de recuperação – é realizado um controle de emergência para que o sistema se aproxime dos limites desejados e saia do estado que possa ocasionar deterioração da rede;
- Estado de alerta – a rede se encontra num estado anormal, com possível sobrecarga, entretanto são aceitáveis os limites para tal situação;

- Estado normal inseguro – a rede de distribuição opera dentro dos limites, porém ainda apresenta algum tipo de perigo não evidenciado onde o sistema possa voltar a um estado anormal de operação;
- Estado normal e seguro – quando a rede de distribuição não apresenta perigos e o efeito da causa do problema está completamente controlado.

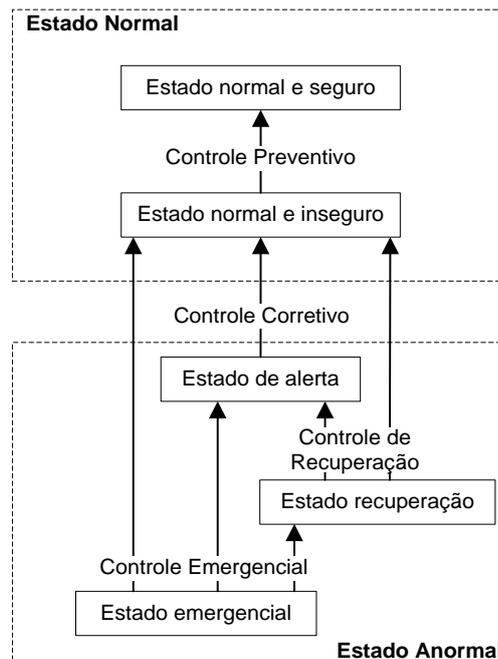


FIGURA 5 – SISTEMA DE AUTORRECUPERAÇÃO PARA CONTROLE DA REDE DE OPERAÇÃO
 FONTE: Adaptado de Liu *et al.* (2012)

Para ocorrer à mudança de estado para outro é necessário então à execução de um subcontrole. Neste caso, como é apresentado cinco estados, necessita-se de até quatro subcontroles para que o sistema saia do estado de emergência e volte a operar num estado normal e seguro, conforme apresentado na FIGURA 5, sendo eles:

- Controle de Emergência – ações a serem tomadas neste controle devem ser rápidas e considerar: o isolamento da falta e das microrredes, a desconexão das gerações distribuídas e o corte de blocos de carga. Estas ações podem levar o sistema a um estado recuperado, de alerta ou normal inseguro.
- Controle de recuperação – recuperar o sistema de maneira a restabelecer as possíveis cargas que não estão no mesmo local da falta. Essa ação pode levar ao estado de alerta ou diretamente para o normal e inseguro;

- Controle Corretivo – realizar ações para controlar a qualidade da energia elétrica (QEE) no que se refere à tensão e também para diminuir os estresses nos equipamentos, como ajustar os *taps* dos transformadores e reguladores de tensão, chavear banco de capacitores ou *Flexible AC Transmission System* (FACTS), entre outras ações conforme o nível de automação apresentado na rede de distribuição;
- Controle Preventivo – de maneira a minimizar os impactos para o consumidor através de instabilidades que podem aparecer na rede e iniciar uma nova falha no sistema, tomam-se então como ações: atualizar o sistema de proteção da rede de distribuição, checar e reparar o sistema secundário, alterar a fonte de energia, e tomar as mesmas ações apresentadas no controle corretivo, porém com o foco nos consumidores.

Conforme já citado anteriormente, porém, de maneira simples, no primeiro capítulo, o sistema de autorrecuperação está relacionado diretamente à automação na rede de distribuição, tal relacionamento pode ser verificado em Jia *et al.* (2011) e demonstrado através da pirâmide da FIGURA 6, em que se tem na base, a primeira camada, representando os equipamentos que compõem a rede elétrica. Na segunda camada, tem-se a parte da comunicação, como suporte para realização do controle e monitoramento da rede, e no ápice, terceira camada, o gerenciamento da rede para a realização da autorrecuperação.

A base do sistema é composta pela parte física da rede, religadores inteligentes, equipamentos de proteção e controle, geração distribuída e microrredes. A camada de suporte corresponde à parte da comunicação que deve ser realizada de maneira bidirecional, de alta velocidade e segura para se evitar invasões no sistema de comunicação, a partir disso é possível então monitorar a rede para evitar expansões de acidentes e analisar os distúrbios que possam ocorrer nela. A camada de gerenciamento corresponde ao monitoramento, avaliação, pré-advertência, tomada de decisão e controle, ao qual dão suporte para a realização da autorrecuperação do sistema.

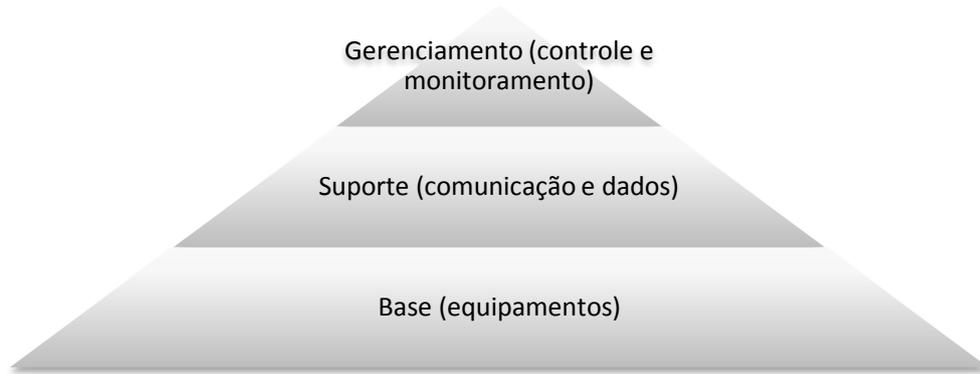


FIGURA 6 – ESTRUTURA DO SISTEMA DE AUTORRECUPERAÇÃO

FONTE: Adaptado de Jia *et al.* (2011)

Dos conceitos e definições apresentados nesta subseção, viu-se a importância da utilização de um sistema de autorrecuperação, mesmo do mais simples sistema a um mais completo. E nota-se também o relacionamento direto com uma rede de distribuição automatizada, pois é a partir de equipamentos instalados na rede que é possível de realizarem as ações de identificar e isolar a falta para então efetuar a autorrecuperação.

Nota-se que, para obter tais benefícios da autorrecuperação deve-se investir no desenvolvimento de uma metodologia que precise de velocidade e qualidade na solução do problema, portanto, tem-se um leque de possibilidades para a aplicação de diversos tipos de técnicas para resolver a autorrecuperação. Sendo assim, este trabalho enfoca na apresentação de uma nova metodologia de autorrecuperação baseada em teoria dos grafos, bem como apresenta uma metodologia baseada no método de otimização por enxame de partículas binário, e essas duas técnicas trabalham em conjunto com o fluxo de potência ótimo para realizar o corte de carga.

2.3 NORMAS E INDICADORES

Nesta subsecção serão tratados os assuntos de normas e indicadores referentes à qualidade de energia, ao qual a concessionária deve respeitar e monitorar de forma a garantir a entrega eficiente para os consumidores.

2.3.1 Qualidade da Energia Elétrica

O Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) se refere à QEE, o qual foi criado a partir da Resolução de Nº 395 no ano de 2009. Conforme apresentado no Módulo 8, a verificação da QEE na rede de distribuição é realizada através dos indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica, e estão listados a seguir:

- Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC);
- Frequência de Interrupção individual por Unidade Consumidora (FIC);
- Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC);
- Duração da Interrupção Individual Ocorrido em dia Crítico por Unidade Consumidora (DICRI);
- Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC);
- Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC).

E os indicadores de tempo de atendimento às ocorrências emergenciais:

- Tempo Médio de Preparação (TMP);
- Tempo Médio de Deslocamento (TMD);
- Tempo Médio de Execução (TME);
- Tempo Médio de Atendimento a Emergência (TMAE).

Outro ponto importante a ser considerado para a autorrecuperação e citado pelo Módulo 8, são os limites da faixa de tensão nominal, que se estabelecem para as tensões maiores de 1kV e inferior a 69kV, conforme apresentado na TABELA 2.

TABELA 2 – LIMITES DA FAIXA DE TENSÃO DEFINIDOS PELA ANEEL

Tensão de Atendimento	Faixa de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão de referência (TR)
Adequada	$0,93 * TR \leq TL \leq 1,05 * TR$
Precária	$0,90 * TR \leq TL < 0,93 * TR$
Crítica	$TL < 0,90 * TR$ ou $TL > 1,05 * TR$

FONTE: Adaptado de Modulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica (2014)

2.3.2 Remanejamento de Carga

Devido ao presente trabalho propor remanejamento de carga com a finalidade de melhorar os indicadores supracitados, portanto, a Resolução de Nº 414, seção XII Art. 46, permite realizar manobras para o remanejamento de carga, desde que feito de maneira automática e ressalta que se deve manter a qualidade de energia entregue aos consumidores remanejados.

Portanto, a implementação de um sistema de autorrecuperação no sistema de distribuição demonstra vantagens que estão associadas à redução das multas por DEC ou FEC, e TMAE. Além do mais, as normas apresentadas através das resoluções citadas neste capítulo servem além da motivação e justificativa para o desenvolvimento deste trabalho, mas também como restrições dos problemas a serem solucionados, para que então o resultado final da autorrecuperação seja um sistema de distribuição dentro dos padrões estabelecidos para a QEE.

2.4 GRAFOS

As definições apresentadas nesta subseção foram obtidas através das referências de Scheinerman (2006), Cormen *et al.* (2012) e Cormen (2014).

A teoria dos grafos teve início com Leonhard Euler em 1735, onde ele apresentava uma solução para o problema das sete pontes de Königsberg, que tinha como objetivo saber se era possível passear pela cidade e voltar ao ponto de partida atravessando somente uma vez cada ponte.

Ao passar dos anos a definição matemática de grafo pode ser representado como um par $G = (N, E)$, onde N é um conjunto finito que contém os nós² (vértices) do grafo e E é um conjunto de subconjuntos de dois elementos, $\{u, v\}$, de N , que formam as arestas do grafo, a representação visual de um grafo pode ser vista na FIGURA 7a.

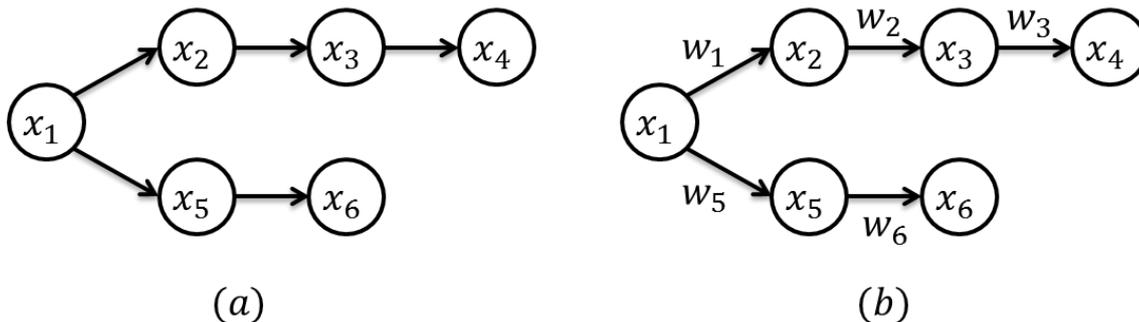


FIGURA 7 – (a) REPRESENTAÇÃO VISUAL DE UM GRAFO DIRIGIDO. (b) REPRESENTAÇÃO VISUAL DE UM GRAFO DIRIGIDO PONDERADO.

FONTE: O autor (2015)

A representação dos conjuntos conforme o exemplo da FIGURA 7a seria, portanto, para o conjunto dos vértices $N = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$, para o conjunto das arestas $E = \{\{x_1, x_2\}, \{x_2, x_3\}, \{x_3, x_4\}, \{x_1, x_5\}, \{x_5, x_6\}\}$ e para o conjunto do grafo $G = (N, E) = (\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{\{x_1, x_2\}, \{x_2, x_3\}, \{x_3, x_4\}, \{x_1, x_5\}, \{x_5, x_6\}\})$.

Este trabalho utiliza o método do caminho mínimo chamado de método de Dijkstra, a ser descrito na próxima seção, que requer o uso de um grafo dirigido ponderado e da lista de adjacência para estruturar os dados de um grafo num programa computacional. Logo, além das definições de um grafo é necessário entender sobre um grafo dirigido, que é um par ordenado (u, v) , indicando que uma seta (aresta dirigida) saí de u e entra em v . E a ponderação de um grafo se dá quando é associado um valor qualquer, chamado de peso, a uma aresta, sendo que tal valor pode ser representado por uma função.

A lista de adjacência consiste num arranjo de tamanho igual ao número de vértices ($|N|$), sendo que para cada vértice $u \in N$, a lista de adjacência contém todos

² É utilizada a denotação NÓ e a letra N como representação de um VÉRTICE em vez da própria denominação e a letra V, uma vez que em sistemas elétricos de potência a letra V, representa a tensão.

os demais vértices que formem uma aresta partindo de u , ou seja, $(u, v) \in E$. O exemplo da FIGURA 8 está relacionado com o grafo da FIGURA 7a.

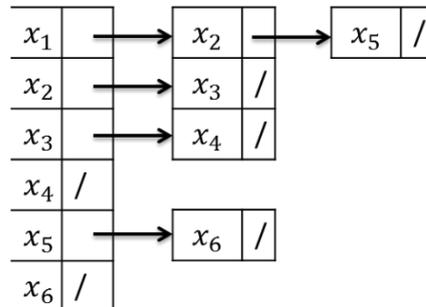


FIGURA 8 – LISTA DE ADJACÊNCIA

FONTE: O autor (2015)

Entretanto para o método relatado neste trabalho é necessário à consideração do peso associado a cada aresta do grafo na lista de adjacência, a FIGURA 9 apresenta um exemplo da lista de adjacência com pesos a partir do grafo da FIGURA 7b.

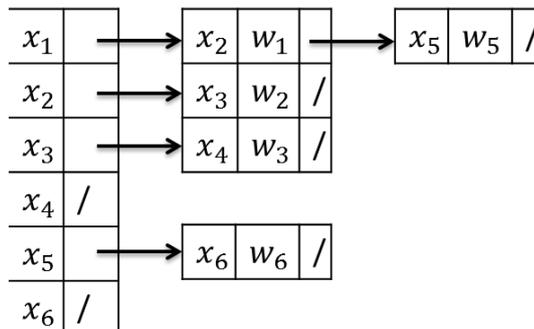


FIGURA 9 – LISTA DE ADJACÊNCIA COM PESOS

FONTE: O autor (2015)

2.4.1 Algoritmo de Busca em Grafos

A seguir serão demonstrados dois algoritmos para realizar busca em grafos e que foram utilizados para este trabalho devido à facilidade de implementação e adaptabilidade a metodologia desenvolvida. O primeiro algoritmo a ser apresentado é a busca em largura e o segundo algoritmo é o de Dijkstra.

2.4.1.1 Busca em Largura

Conforme Cormen *et al.* (2012) o algoritmo de busca em largura foi proposto por Edward F. Moore em 1959, com o título “*The shortest path through a maze*”. Esse algoritmo tem como objetivo o de realizar a busca em largura de um grafo, $G = (N, E)$, é a partir de uma fonte s , para determinar todos os menores caminhos que partem da fonte para os demais vértices do grafo, sendo possível realizar a busca em grafos tanto dirigidos quanto não dirigidos (CORMEN *et al.*, 2012).

O procedimento para realizar a busca em largura é mostrado no pseudocódigo 1. Onde as entradas G e s representam, respectivamente, a lista de adjacência do grafo e a fonte. As cores relacionadas ao atributo cor , representam: se um vértice ainda não foi analisado (branco); se ele é adjacente ao vértice em análise (cinza); ou se o vértice em análise já listou todos os vértices adjacentes (preto). A lista Q é manipulada de maneira que o primeiro valor que entra deve ser o primeiro valor a sair. O atributo d está relacionado com a distância entre dois vértices. E o atributo π relaciona o precedente do vértice.

A primeira parte do algoritmo, compreendido pelas linhas 3-6, preenche todos os vértices de branco, coloca as distâncias como infinitas e o pai de todo vértice como NIL ³. As linhas entre 7-9 preenchem os valores iniciais para o vértice da fonte, e as linhas 10-11 iniciam a fila de vértices ao qual será utilizada para a análise a partir da linha 12, que itera enquanto houver vértices cinza. A linha 13 remove o primeiro valor de Q e armazena em u . Das linhas 14-19 são analisados os vértices adjacentes a u , pinta-os de cinza e coloca-os na fila. Quando todos os vértices adjacentes forem pintados de cinza o vértice u recebe a cor preta, linha 20.

³ Termo em computação de quando um ponteiro não aponta a nenhum objeto.

Pseudocódigo 1 Algoritmo de Busca em Largura

```

1  Entradas:  $G, s$ 
2  Saídas:  $u, v$ 
3  para cada vértice  $u \in N[G] - \{s\}$  faça
4       $u.cor = branco$ 
5       $u.d = \infty$ 
6       $u.\pi = NIL$ 
7   $s.cor = cinza$ 
8   $s.d = 0$ 
9   $s.\pi = NIL$ 
10  $Q = \emptyset$ 
11  $Enfileirar(Q, s)$ 
12 enquanto  $Q \neq \emptyset$  faça
13      $u = remove(Q, 1)$ 
14     para cada vértice  $v = Adj[u]$  faça
15         se  $v.cor == branco$  faça
16              $v.cor = cinza$ 
17              $v.d = u.d + 1$ 
18              $v.\pi = u$ 
19              $Enfileirar(Q, v)$ 
20      $u.cor = preto$ 

```

FONTE: Adaptado de Cormen *et al.* (2012)

2.4.1.2 Algoritmo de Dijkstra

O algoritmo para resolver o problema do caminho mínimo de Dijkstra foi desenvolvido em 1956 por Edsger Wybe Dijkstra, em apenas 20 minutos, após um passeio cansativo no *shopping* com sua noiva, eles pararam para tomar café, enquanto isso ele pensava um maneira de determinar qual seria o menor caminho para viajar entre Rotterdam e Groningen (MISA, 2010).

Porém a publicação do algoritmo foi ocorrer somente em 1959 na *Numerische Mathematik* (DIJKSTRA, 1959). Tal algoritmo tem como objetivo encontrar o menor

caminho a partir de uma única fonte em um grafo dirigido ponderado, e tendo como restrição que os pesos não fossem negativos, ou seja, $w(u, v) \geq 0$ para cada aresta $(u, v) \in E$ (CORMEN *et al.*, 2012). O pseudocódigo 2 apresenta de forma reduzida o algoritmo de Dijkstra.

São consideradas as seguintes informações iniciais, G os dados do grafo, w o peso de cada aresta e s o ponto inicial (fonte).

Pseudocódigo 2 Algoritmo Dijkstra – para caminho mínimo de fonte única

```

1  Entradas:  $G, w, s$ 
2  Saídas:  $S, v$ 
3  para cada vértice  $v \in N[G]$  faça
4       $v.d = \infty$ 
5       $v.\pi = NIL$ 
6   $s.d = 0$ 
7   $S = \emptyset$ 
8   $Q_v = N[G]$ 
9  enquanto  $Q_v \neq \emptyset$  faça
10      $u = \text{remove\_min}(Q_v)$ 
11      $S = S \cup \{u\}$ 
12     para cada vértice  $v \in G.Adj[u]$  faça
13         se  $v.d > u.d + w(u, v)$  faça
14              $v.d = u.d + w(u, v)$ 
15              $v.\pi = u$ 

```

FONTE: adaptado de Cormen *et al.* (2012).

A inicialização do algoritmo de Dijkstra é dada a partir da linha 3 até 6, onde a variável $v.d$ relaciona a distância acumulada da fonte até o vértice e recebe em todas as suas posições iniciais o valor *infinito*, $v.\pi$ relaciona o predecessor de v e que se inicializa com valores nulos. Na linha 6 é sempre inicializada a distância acumulada no vértice da fonte com o valor de zero.

O conjunto S contém os vértices predecessores do menor caminho e iniciado vazio. O conjunto Q_v representa uma fila de prioridade mínima de vértices.

Dentro do **enquanto**, na linha 9, encontra-se o vértice com menor valor do conjunto Q_v e armazena-o em u , depois de armazenado remove-se essa posição de Q_v . Realiza-se a união, u em S para manter o vértice invariante. Nas linhas de 13 a 15 é realizado um relaxamento de cada aresta que saem de u , permitindo a melhoria do menor caminho até v . As duas primeiras iterações do algoritmo de Dijkstra podem ser visualizadas através da TABELA 3, que considera o grafo da FIGURA 7b e o valor do peso $w_1 < w_5$.

TABELA 3 – INICIALIZAÇÃO E PRIMEIRA ITERAÇÃO DO ALGORITMO DE DIJKSTRA

Inicialização						
Vértices (N)	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
Estimativas (Et)	0	∞	∞	∞	∞	∞
Precedentes (S)	-	-	-	-	-	-
Primeira Iteração						
Vértices (N)	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
Estimativas (Et)	0	w_1	∞	∞	w_5	∞
Precedentes (S)	x_1	x_1	-	-	x_1	-
Segunda Iteração						
Vértices (N)	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
Estimativas (Et)	0	w_1	$w_1 + w_2$	∞	w_5	∞
Precedentes (S)	x_1	x_1	x_2	-	x_1	-

FONTE: O autor (2015)

2.5 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS BINÁRIO

São apresentadas nesta seção definições sobre metaheurística, inteligência de enxame e otimização de enxame de partículas na versão binária.

Em Blum e Roli (2003) são abordadas definições de metaheurística a partir de vários autores, logo a metaheurística pode ser definida como um conjunto de estratégias que guiam o processo de busca, de modo a explorar de forma eficiente o espaço de busca para determinar uma solução ótima, ou próxima da ótima, evitando as armadilhas que possam surgir no espaço de busca através de mecanismos

incorporados na metaheurística. Os algoritmos pertencentes a essa área são estocásticos, geralmente não determinísticos, consideram desde um simples procedimento de busca até complexos processos de aprendizagem e não existe uma classe de problema de otimização específica para ser resolvida.

Já a inteligência de enxame, de forma resumida, abrange a troca de informações entre os indivíduos a partir das experiências próprias, fornecendo informações suficientes para que o grupo se adapte após mudanças no ambiente, e assim, percorrer as melhores regiões no espaço de busca. Então, para um método ser classificado como uma inteligência de enxame é necessário estar contido dentro de cinco princípios definidos por Millonas (1994):

- a) Proximidade: ter capacidade de interagir para maximizar um grupo em alcançar o objetivo;
- b) Qualidade: ser capaz de avaliar seu próprio comportamento para determinar o melhor;
- c) Diversidade: permitir ao grupo reações inesperadas num ambiente;
- d) Estabilidade: saber em que momento o grupo deve realizar uma mudança de comportamento;
- e) Adaptabilidade: fazer com que o grupo se adapte após uma mudança de ambiente.

Definidos os conceitos estruturais, a otimização utilizada neste trabalho teve o desenvolvimento iniciado a partir das análises dos estudos de comportamento de bando de pássaros, em especial os estudos de Reynolds (1987) e de Heppner e Grenander (1990), em que Reynolds tinha o foco na estética da coreografia de bandos de pássaros, enquanto Heppner e Grenander tinham o interesse em saber como os bandos de pássaros conseguiam voar sincronizados após mudanças repentinas, se espalhando e reagrupando depois. Assim, Kennedy e Eberhart apresentaram a primeira definição de PSO através dos artigos Kennedy e Eberhart (1995), e, Eberhart e Kennedy (1995), sendo que durante as pesquisas o termo bando foi trocado para enxame, pois a técnica criada se encaixava nas definições estabelecidas por Millonas (1994).

Além do PSO existem diversas técnicas de inteligência de enxame, tais como *firefly algorithm*, colônia de bactérias, colônia de formigas, *bat algorithm*, *Grey wolf optimizer*, entre outras técnicas.

Sintetizando o funcionamento do PSO, ele consiste numa dada população de partículas, cada uma dessas partículas irá percorrer o espaço de busca, realizando mudanças de posição e tendo suas velocidades atualizadas dinamicamente, através da consulta de experiências individuais e coletiva de todo o enxame. Sendo que a cada iteração a melhor posição encontrada pelo enxame e a melhor posição das partículas são armazenadas, com a finalidade de atualizar a velocidade e a posição para a próxima iteração, além de determinar a melhor solução (SHI; EBERHART, 1999).

No início, o PSO foi formulado para trabalhar com números contínuos, então Kennedy e Eberhart (1997) propuseram o primeiro modelo discreto (binário) da técnica, o qual utiliza uma função transferência para converter a velocidade da partícula em intervalos de probabilidade. Com o passar do tempo o BPSO sofreu alterações, com modificações na função de transferência e nas regras de atualização da posição. Algumas modificações são apresentadas por Mirjalili e Lewis (2013), que compara a formulação de oito funções de transferência para realizar a conversão binária-real, sendo que duas já haviam sido propostas por outros pesquisadores e outras seis foram formulações novas da função de transferência. Estas oito funções são separadas em dois grupos, em que quatro apresentam graficamente a forma S e as outras quatro apresentam a forma de V para a curva da função de conversão discreta-contínua.

Em Lee e El-Sharkawi (2008) são apresentadas outras variações da otimização por enxame de partículas, que além da variação por representação binária são apresentados variações para o trabalho com programação não linear inteira mista, uma variação no cálculo da velocidade da partícula em que se adiciona um fator de restrição para o controle da convergência, PSOs híbridos que utilizam de outras técnicas ou seus conceitos de elaboração para alterar o PSO original, um modelo de PSO que troca o $gBest$ pelo $lBest$, que é um vetor com os resultados dos melhores vizinhos da partícula, e outras variações como o PSO adaptativo e evolucionário.

O fluxograma da FIGURA 10 foi elaborado conforme o algoritmo disponível para ambiente Matlab em Mirjalili (2013). O cálculo da velocidade da partícula é apresentado em (2.1), e serve como entrada para a função de transferência, que neste trabalho é utilizada a S1 e apresentada em (2.2), então a partir do valor da função de transferência é obtida a posição da partícula (2.3).

$$vl_k(i + 1) = w \times vl_k(i) + c_1 \times rand \times (pBest_k - x_k(i) + c_2 \times rand \times (gBest - x_k(i)) \quad (2.1)$$

$$T(vl_k(i + 1)) = \frac{1}{1 + e^{-2vl_k(i+1)}} \quad (2.2)$$

$$x_{pos} \begin{cases} 0, rand > T(vl_k(i)) \\ 1, rand < T(vl_k(i)) \end{cases} \quad (2.3)$$

onde vl é a velocidade da partícula k na iteração i , w é o peso de inércia, c_1 e c_2 são os coeficientes de aceleração, $rand$ é um número aleatório entre 0 e 1, $pBest$ é o melhor valor obtido pela partícula, $gBest$ é a melhor partícula que o enxame obteve, T é a probabilidade num intervalo de 0 a 1 a partir da velocidade da partícula e x_{pos} indica a posição da partícula.

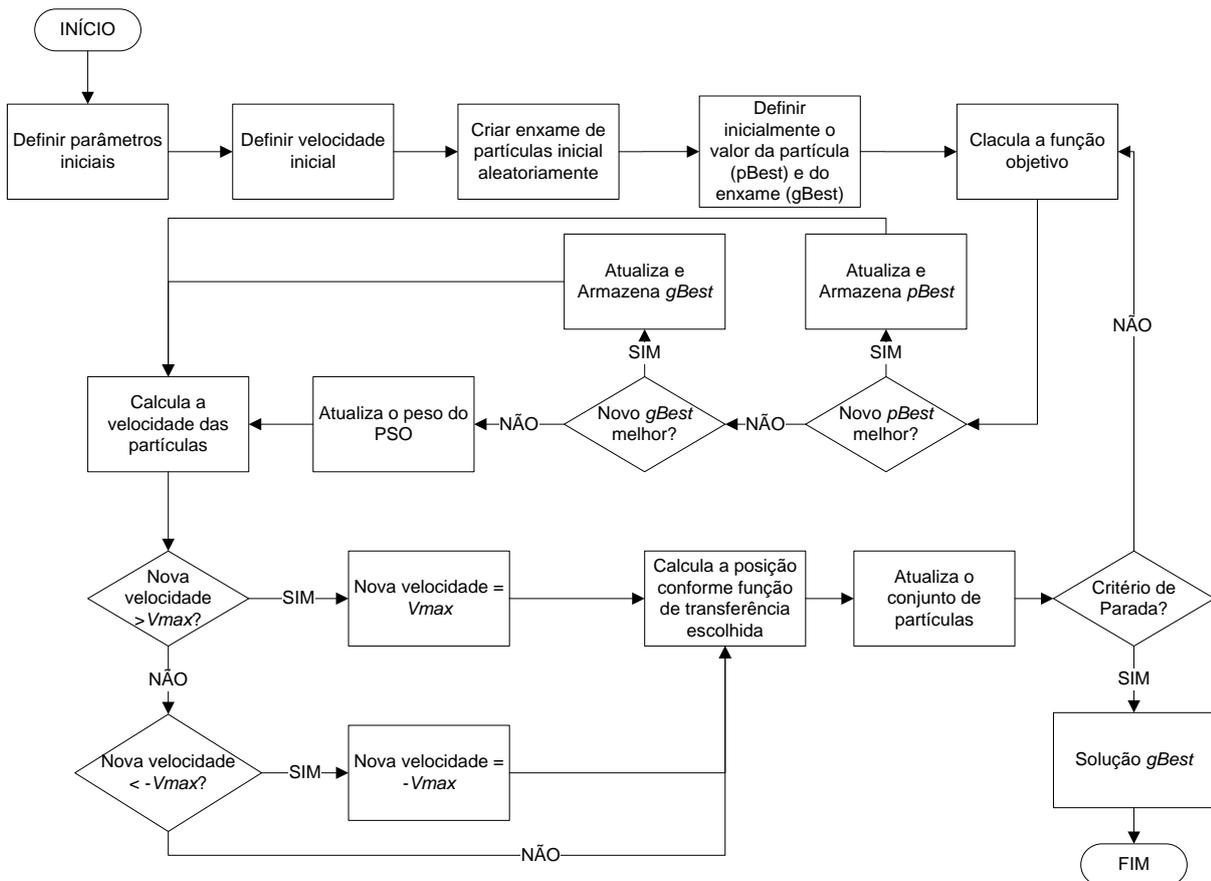


FIGURA 10 – FLUXOGRAMA DO BPSO.

FONTE: Adaptado de Mirjalili (2013)

2.6 FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Antes de ser considerado um problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO), os estudos iniciais tinham como objetivo resolver o problema de despacho econômico, sendo o método incremental uma das técnicas mais relevantes para resolver o problema de despacho econômico (HAPP, 1977). Então em 1962, J. Carpentier apresentou uma formulação matemática consistente para se resolver o problema do custo de produção de energia, considerando as equações de balanço de potência ativa e reativa como restrições de igualdade e as limitações físicas dos equipamentos como restrições de desigualdade (CARPENTIER, 1962 *apud* CARPENTIER, 1979).

Esta formulação é baseada no teorema de Kuhn e Tucker de programação não linear, onde se tem agora as restrições de igualdade, representando o balanço de potência ativa e reativa, e as restrições de desigualdade, que representam as restrições dos equipamentos. Entretanto a primeira solução eficiente para resolver o problema do FPO foi através do método do gradiente conforme Huneault e Galiana (1991), que citam também as duas vertentes resultante, uma é realizada por J. Carpentier em 1968 e em 1972, que resolve o FPO pelo método primal. E a outra vertente é apresentada por Dommel e Tinney em 1968 que resolve o problema por um método iterativo baseado na direção do vetor gradiente.

Ao passar dos anos, métodos para resolver de forma melhor o problema de FPO foram sendo apresentados, sendo um método de grande importância para esta área, o método dos Pontos Interiores para solução numérica em problemas de otimização, que foi proposto por Karmarkar (1984) e tinha como motivação apresentar um método melhor que o método Simplex criado por Dantzig em 1941.

Com o passar dos anos, várias versões foram sendo criadas, até que em 1987, Megiddo propôs a inclusão de uma função de barreira logarítmica para penalizar a função objetivo com a finalidade de manter a busca dentro domínio factível de solução (MEGIDDO, 1987). Em 1987 e com Megiddo ainda, ele propôs as primeiras contribuições para uma versão primal-dual, para que então em 1989 Kojima, Mizuno e Yoshise apresentam o algoritmo Primal-Dual dos Pontos Interiores (WRIGHT, 1997).

2.6.1 Formulação Geral do FPO

De maneira simplificada o FPO tem como objetivo maximizar ou minimizar um índice de desempenho, atendendo simultaneamente a um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade, a partir do ajuste de variáveis, tais como: magnitudes de tensão e potência ativa gerada. A formulação geral do FPO é apresentada da seguinte forma:

$$\min f(x) \quad (2.4)$$

sujeito

$$g(x) = 0 \quad (2.5)$$

$$h^{min} \leq h(x) \leq h^{max} \quad (2.6)$$

onde:

x – vetor de variáveis de otimização do sistema, considerando $x_{min} \leq x \leq x_{max}$;

$f(x)$ – função objetivo a ser otimizada;

$g(x)$ – vetor de restrições de igualdade;

$h(x)$ – vetor de restrições de desigualdade.

As restrições (2.5) e (2.6) podem representar, respectivamente, a injeção de potência nas barras, descritas pelas equações de Kirchhoff para nós e ramos, e os limites de potência ativa e reativa de cada unidade geradora.

E para resolver esse problema de otimização utiliza-se do Método dos Pontos Interiores versão Primal-Dual, que consiste em transformar as restrições de desigualdade em restrições de igualdade por meio da adição de variáveis de folga, associando-se uma função barreira logarítmica à função objetivo. Com isso, constrói-se uma função lagrangeana estendida somente com restrições de igualdade e aplicam-se as condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) a esta função. As condições de otimalidade formam um sistema de equações não lineares, resolvido pelo Método de Newton.

Algumas aplicações do FPO utilizando o método dos pontos interiores versão primal-dual podem ser vistas em: Granville (1994), que utiliza o método para resolver o problema de despacho ótimo de reativo, um dos casos particulares do FPO, conseguindo provar que o método é muito efetivo para aplicar em problemas de FPO;

Jabr *et al.* (2002), que utiliza o método para resolver o fluxo de potência ótimo para o despacho econômico, com duas alterações para acelerar a convergência: uma é um filtro para guiar a escolha do tamanho do passo e a outra é uma busca em alteradas direções, a fim de, evitar a convergência em um estado estacionário.

De forma resumida o FPO pode ser usado para resolver diversos problemas como a minimização de custos de combustíveis; minimização de perdas; minimização dos desvios, no qual, em situações de contingências, deve-se encontrar o ponto ótimo para o sistema ficar próximo do sistema normal; minimização das violações, em que, nas situações de contingência, deve-se achar o ponto ótimo de operação somente; minimização do corte de carga; e maximização da capacidade de carga (HUNEAULT; GALIANA, 1991).

2.6.2 Formulação do FPO para Corte de Carga

Um dos primeiros trabalhos baseado em corte de carga é apresentado em Hajdu *et al.* (1968), que aplica o corte de carga para situações de emergências no sistema de transmissão. A metodologia foi criada através do método de Newton-Raphson, para calcular o fluxo de potência, e das condições de otimalidade de KKT, para a otimização.

Para o trabalho aqui proposto, é realizado o corte de carga através do FPO e a modelagem base é descrita em Fernandes *et al.* (2008), em que se utiliza a representação retangular dos fasores (e, f) de tensão para o balanço de potência ativa e reativa, sendo (2.7) a primeira consideração da função objetivo do problema para minimização do corte de carga,

$$FO_{cc} = \alpha \times \Delta Pd \quad (2.7)$$

onde α é o custo de redução de potência das barras e representa um vetor ($1 \times nc$), com nc sendo o número de barras a serem cortadas. E ΔPd contém os valores de redução a serem minimizados, com tamanho ($nc \times 1$). O vetor ΔPd deve ser considerado no balanço de potência após definido os valores de redução, conforme as equações (2.8) e (2.9), tal que

$$P(e, f) = Pg - Pd(\Delta Pd) \quad (2.8)$$

$$Q(e, f) = Qg - Qd(\Delta Pd) \quad (2.9)$$

onde

$$Pd(\Delta Pd) = Pd^0 - Um \times \Delta Pd \quad (2.10)$$

$$Qd(\Delta Pd) = Qd^0 - Um \times \Delta Qd \quad (2.11)$$

Admitindo e como a parte real da componente da tensão, f a parte imaginária da componente da tensão, P e Q são as injeções de potência, Pg e Qg são as gerações de potência, Pd e Qd são as potências das cargas, Pd^0 e Qd^0 valores iniciais de carga, considerando sempre P como potência ativa e Q como potência reativa, e Um é a matriz de incidência de dimensão $(nb \times nc)$, elaborada conforme (2.12) e (2.13), a fim de indicar quais barras devem ser cortadas.

$$Um = [Um_{ij}] \quad (2.12)$$

$$Um_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = Ic(j) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.13)$$

A variável Ic é um vetor que contém as barras a serem cortadas, de dimensão $(nc \times 1)$. Conforme a formulação, o corte é realizado na potência ativa, e o corte para a potência reativa é realizada mantendo o fator de potência fp da carga original, e apresentado em (2.14).

$$\Delta Qd = diag[tg(fp)] \times \Delta Pd \quad (2.14)$$

Finalmente a formulação da função objetivo para a minimização de corte de carga é dado em (2.15). No qual w_{cc} peso para minimização do corte e $Uprior$ é uma matriz de incidência para priorização de barras a serem cortadas.

$$minFO_{cc} = w_{cc} \times \alpha \times Uprior \times \Delta Pd \quad (2.15)$$

sujeito:

$$Pg - Pd(\Delta Pd) = P(e, f) \quad (2.16)$$

$$Qg - Qd(\Delta Pd) = Q(e, f) \quad (2.17)$$

$$Pg^{min} \leq Pg \leq Pg^{max} \quad (2.18)$$

$$Qg^{min} \leq Qg \leq Qg^{max} \quad (2.19)$$

$$-fl^{max} \leq fl(e, f) \leq fl^{max} \quad (2.20)$$

$$V^{min} \leq V(e, f) \leq V^{max} \quad (2.21)$$

$$\Delta Pd \leq \Delta Pd^{max} \quad (2.22)$$

Onde as equações (2.16) e (2.17) representam as equações de balanço de potência, (2.18) e (2.19) os limites de geração de potência, (2.20) e (2.21) corresponde aos limites de fluxo de potência ativa e magnitude de tensão respectivamente e (2.22) representa o limite de corte de carga.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os trabalhos publicados mais atuais que contemplem os métodos que resolvam o problema de autorrecuperação, aplicações do método de corte de carga incluindo quais os métodos utilizados para se realizar o corte e problemas solucionados com o algoritmo de Dijkstra e com otimização binária por enxame de partículas. Com isso, a seção de considerações finais do capítulo apresenta o diferencial deste trabalho em relação aos apresentados na revisão.

3.1 AUTORRECUPERAÇÃO

Atualmente existe uma grande gama de artigos relacionados com metodologias para autorrecuperação, dentre eles serão citados alguns dos mais recentes trabalhos nessa área, em que Podmore e Robinson (2010) tem como mote ajudar na elaboração de uma metodologia de autorrecuperação através de etapas para a integração dos controles de geração, transmissão, distribuição e eletrodomésticos dos consumidores. O artigo fala também na introdução sobre um sistema de autorrecuperação em conjunto com o corte de carga, onde se considera o corte nas cargas menos prioritárias para evitar um cascadeamento de falhas e também restaurar o sistema a um estado aceitável de qualidade de energia ao consumidor.

Em Li *et al.* (2010) o objetivo é realizar a ação de autorrecuperação evitando a propagação de distúrbios na rede e o desbalanço entre geração e demanda que possa ocorrer após a ação tomada através da minimização da potência ativa e reativa. Representa-se a rede de distribuição por um grafo ponderado e utiliza-se do método de particionamento de grafos, para dividir a área do grafo em outras áreas menores a partir da minimização das potências ativa e reativa. O artigo conclui que uma ação de corte carga complementaria o método utilizado para tornar o sistema ainda mais robusto e minimizar os efeitos que poderia desencadear um cascadeamento de falhas.

O artigo apresentado em Botea *et al.* (2012) utiliza-se da teoria dos grafos para a modelagem do sistema de distribuição, para que seja possível a utilização do algoritmo de busca informada A^* , porém com modificações na heurística do algoritmo.

Leva-se em consideração, na heurística, a maximização das cargas não isoladas e que apresentam falta de energia, e a otimização do custo da comutação das chaves a serem utilizadas para a ação de autorrecuperação.

O problema de autorrecuperação é resolvido em Zidan e El-saadany (2012) pelo método de multiagentes, no qual são criadas as camadas, chamadas de zona e alimentador, para a troca de informações. A primeira camada é a zona, que realiza o monitoramento, cálculos simples e ações de controle. Na segunda camada, o alimentador, atribui-se a parte da negociação. Tal metodologia tem como restrições os limites de tensão, os limites de corrente na linha e mantimento da topologia radial.

Um sistema multiagente foi construído em Liu *et al.* (2012) para resolver o problema de autorrecuperação, baseado nos cinco estados de operação (emergência; restaurativo; alerta; insegurança; seguro) e nos quatro subcontroles (emergência; restaurativo; corretivo; preventivo). Os agentes criados estão separados em três camadas de atuação, a primeira camada é a de resposta, a segunda camada é a de coordenação e a terceira camada é a de organização.

A metodologia desenvolvida em Arefifar *et al.* (2013) apresenta dois estágios, sendo o primeiro estágio o de planejamento, em que se obtém a melhor configuração das microrredes num sistema de distribuição. O segundo estágio é o da operação, que depois de adequado o sistema em microrredes, pode-se encontrar a melhor alternativa de resolver o problema de autorrecuperação, a partir das restrições estabelecidas e incluídas no método de busca tabu, que são a de auto-adequação das microrredes após a falta, a de minimização das perdas e a da maximização das cargas. O método para resolver o problema de autorrecuperação engloba encontrar, além da nova configuração, também o melhor corte de carga para o sistema e a melhor configuração dos despachos das gerações distribuídas espalhadas pelo sistema.

Por fim, em Li *et al.* (2014) aplica um método de busca em grafos chamado de árvore geradora mínima para determinar a melhor configuração depois de uma falta ocorrida no sistema, sendo que a metodologia também considera a influência das microrredes existentes no sistema. A metodologia visa minimizar o número de chaveamentos e reestabelecer as cargas sem ultrapassar os limites estabelecidos de corrente e tensão.

3.2 CORTE DE CARGA APLICADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

São listados alguns trabalhos que apresentam a modelagem do corte de carga para resolver problemas de frequências e tensões baixas em sistemas de potência, para regular a geração com a demanda ou para evitar um cacateamento de falhas após uma situação de contingência. Em Aponte e Nelson (2006) aborda uma metodologia que combina programação matemática não linear e diferenciação discreta das equações do sistema de potência para estimar o valor ótimo de corte de carga a ser realizado e também em que momento efetuar o corte. Sendo que tal metodologia contempla as restrições de fluxo nas linhas, tensão, ângulo e corte de carga.

Já em Lopes *et al.* (2006) é apresentado o corte de carga para viabilizar a estabilidade quando uma microrrede está operando de modo ilhado. O método usado para realizar o corte de carga, primeiramente realiza a modelagem das cargas, e partir das cargas modeladas é analisado o desvio da amplitude da frequência para determinar o valor a ser cortado, neste método também se considera a priorização de carga. Em Solanki *et al.* (2007) é proposto um método multiagente para resolver o problema de autorrecuperação, onde o corte de carga é estabelecido através da lógica aplicada no agente referente às cargas, através dos chaveamentos das cargas.

A abordagem apresentada em Faranda *et al.* (2007) considera um corte de carga no nível de consumidor, em que os eletrodomésticos podem ser cortados de maneira que o sistema mantenha sua operação, no artigo é citado que quanto maior o número de participantes, menor é o impacto do corte em cada casa para a compensação de geração e demanda. Em Fernandes *et al.* (2008) é utilizado o método de FPO para realizar o corte de carga, considerando o relaxamento das restrições, e com o objetivo de minimizar o corte para restabelecer o equilíbrio de operação do sistema. A formulação do FPO também inclui uma priorização das barras a serem cortadas, a fim de evitar cortar hospitais e indústrias. A aplicação de Ghaleh *et al.* (2011) é baseada em sistemas de transmissão onde os distúrbios de frequência e tensão são mais frequentes de ocasionar instabilidade no sistema, portanto a partir destes dois itens é realizada uma metodologia que combina frequência e tensão para ser aplicado nas curvas de proteção de um relé com a finalidade de proteger o sistema.

Por fim Tang *et al.* (2013) aborda um algoritmo centralizado para o corte de carga adaptativo, baseado em frequências e tensões baixas, providenciadas a partir de equipamentos de medição fasorial, com o diferencial de considerar tanto a potência ativa, quanto a potência reativa para a estratégia do corte de carga. A técnica consiste em utilizar um sistema de frequência de resposta de baixa ordem em conjunto com modelos de cargas dependente de tensão, com o objetivo de determinar o total da diferença da potência ativa e conseqüentemente o total de potência reativa para ser cortada.

3.3 APLICAÇÕES DOS ALGORITMOS UTILIZADOS

Nesta seção são apresentados alguns trabalhos realizados considerando o algoritmo de Dijkstra e otimização por enxame de partículas binário na área elétrica e em outras áreas.

3.3.1 Algoritmo de Dijkstra

O algoritmo de busca em grafo Dijkstra pode ser visto em diversas aplicações como na área de neuroimagem através do artigo Prasad *et al.* (2014), que discorre do uso da técnica para encontrar o menor caminho entre dois pontos do grafo, representado por um ROI atlas, para determinar a região de substância branca do cérebro. Na robótica, Alvarez-Santos *et al.* (2014) discute sobre o uso do algoritmo para determinar a melhor rota do robô entre dois pontos através de um mapa de custos como representação de um grafo. Na área de comunicação em Chow *et al.* (2004) apresenta uma metodologia de proteção de redes *mesh* de rápida restauração com o uso do algoritmo. E na área de geociência em Pan *et al.* (2014) utiliza-se do algoritmo de Dijkstra para encontrar a linha de junção final das regiões candidatas a partir do mosaico de ortoimagens de uma área geográfica.

Então, na área de sistemas elétricos de potência, Li *et al.* (2013) propõem um método que encontre o melhor caminho para se construir uma linha de transmissão, considerando um equilíbrio da distância da linha e da incidência de raios. O algoritmo de Dijkstra então encontra a melhor rota entre dois pontos fornecidos pelos nós de raio.

Em Arefifar *et al.* (2013), é utilizado o algoritmo de Dijkstra como ferramenta de auxílio na elaboração da resolução do problema de autorrecuperação e no planejamento de microrredes. Sendo, o primeiro para determinar se todos os conjuntos de microrredes não contêm uma barra repetida e a segunda aplicação, é para verificar se as microrredes, que não apresentam alguma falta, estão conectadas como uma árvore para a configuração selecionada e também se existe ou não laço no sistema recuperado.

Em Ergun *et al.* (2014) é proposto uma metodologia de investimento para construção de sistemas de transmissão baseado na região em que será construído, pois a área a ser usada pode conter certas restrições que devem ser levadas em conta quando construído um sistema de transmissão, como a emissão de campos eletromagnéticos, impactos visuais e impactos ambientais. Então através das técnicas de programação linear inteira e do algoritmo de Dijkstra é possível determinar a melhor topologia do sistema, a rota da linha e a tecnologia a ser aplicada.

3.3.2 BPSO

Como apresentado anteriormente, nesta subseção também são comentadas algumas aplicações do BPSO em sistemas de potência e em outras áreas de pesquisa.

Na área de sistemas de potência têm-se que em Pedrasa *et al.* (2009) mostra o uso da otimização por enxame de partículas binário para realizar o agendamento das cargas interruptivas durante 16 horas, admitindo uma partícula como uma matriz, composta por linhas – as cargas – e as colunas – as horas. Dessa forma o valor 1 na matriz representa a redução da carga naquele horário. O objetivo, então, é alcançar uma redução de carga para satisfazer os limites de operação, considerando, na função objetivo, a redução das cargas disponíveis, a partir da minimização do total de remuneração para os consumidores e a minimização da frequência de interrupções impostas para eles.

Outra abordagem é apresentada em Jeong *et al.* (2010), em que se propõem uma modelagem por otimização por enxame de partículas binário e inspirada em computação quântica, para ser aplicados em problemas de despacho ótimo de energia, com 100 unidades geradoras em 24 horas. Já em Soroudi e Afrasiab (2012) o BPSO é usado para encontrar a fronteira de Pareto para determinar o melhor

resultado do modelo estocástico dinâmico multiobjetivo proposto para resolver o problema de integração de geração distribuída nas redes de distribuição.

Em Amanulla *et al.* (2012), o objetivo é apresentar uma metodologia de reconfiguração do sistema de distribuição no qual se considera a segurança e perdas de potência da rede. Neste caso, o método BPSO é utilizado para determinar a melhor configuração de chaveamentos da rede para maximizar a confiabilidade dos pontos de carga e minimizar as perdas do sistema. Para Suresh e Kumarappan (2013) é aplicado uma técnica conhecida como otimização por enxame de partículas binário melhorada, onde se tem nesta versão, uma forma padrão na equação de atualização da posição da partícula, em que se torna possível obter melhores resultados para o problema de agendamento de manutenção dos geradores.

E ainda, verificou-se a utilização da técnica BPSO em outras aplicações, tais como: reconhecimento de faces (M.U. *et al.*, 2012); determinação das regras de associação em mineração de dados (SARATH; RAVI, 2013); e criação de um mapa de entropia de uma imagem para a identificação do ouvido (GANESH *et al.*, 2014).

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Recentes estudos mostram que apesar de ainda utilizar sistemas multiagentes na solução do problema de autorrecuperação, existem também outras formas de resolver este problema e que se mostraram eficientes na solução, tais como, busca informada e busca em grafos, que exige a modelagem do sistema de distribuição em grafos para a utilização destes métodos.

A partir da pesquisa bibliográfica apresentada, o foco deste trabalho está dentro da linha de pesquisa seguida atualmente no assunto de autorrecuperação, onde se utilizam de técnicas baseadas em teoria dos grafos em conjunto com algum método para realizar o corte de carga, a fim de se obter um sistema seguro e de qualidade para situações de contingências.

Assim, o presente trabalho apresenta como diferencial uma adaptação do algoritmo de busca em grafo a partir de uma única fonte para encontrar a melhor configuração do sistema após uma falha. E caso o sistema não esteja dentro da região viável, um corte de carga é realizado através do FPO, a fim de adequar o sistema e deixá-lo dentro dos limites estabelecidos. Essa ação de corte de carga pode evitar a

geração de um problema maior que seria o cascadeamento de falhas, no qual o sistema não conseguiria suportar as novas cargas reestabelecidas e desligaria os alimentadores que serviram como caminho para recuperar o sistema.

Outra maneira de se resolver o problema de autorrecuperação é através da técnica de otimização conhecida como BPSO, onde se desenvolveu, neste trabalho, uma função objetivo para ser integrada a otimização. Além de resolver o problema proposto, tal técnica também servirá como base de comparação qualitativa com o método de busca em grafo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais usados para a construção e validação do sistema e também será apresentada de forma detalhada a elaboração da metodologia para solucionar o problema de autorrecuperação.

4.1 MATERIAIS

Para a construção e validação da metodologia elaborada utilizaram-se os materiais apresentados a seguir, sendo primeiro apresentados os dados do sistema de distribuição para as análises de resultados e, em seguida, as ferramentas computacionais usadas para o desenvolvimento, e também em que plataforma computacional realizaram-se os testes de validação.

4.1.1 Dados do Sistema de Distribuição

Para a concretização dos testes e validação da metodologia desenvolvida para solucionar o problema de autorrecuperação utilizaram-se dos dados de um sistema de distribuição real, que contempla cinco alimentadores urbanos interconectados e com alta concentração de carga. Antes de apresentar o sistema utilizado para os estudos, é descrito a seguir como foi realizada a representação de um sistema de distribuição, num sistema unifilar em forma de grafo.

Uma representação simples de um sistema de distribuição pode ser contemplada na FIGURA 11, onde é apresentada uma subestação, dois alimentadores com suas respectivas barras de carga, quatro chaves seccionadoras telecomandadas normalmente fechadas e uma chave de recurso telecomandada normalmente aberta. A partir da FIGURA 11, uma representação geral do unifilar de uma topologia baseada em grafos é apresentada na FIGURA 12, em que a linha contínua azul representa uma chave seccionadora telecomandada (chamadas, aqui, de Chaves Internas (CI)) ou um disjuntor (reliador automático), de estado fechado. As chaves de recurso (CR) telecomandadas, de estado aberto, são apresentadas por uma linha preta pontilhada.

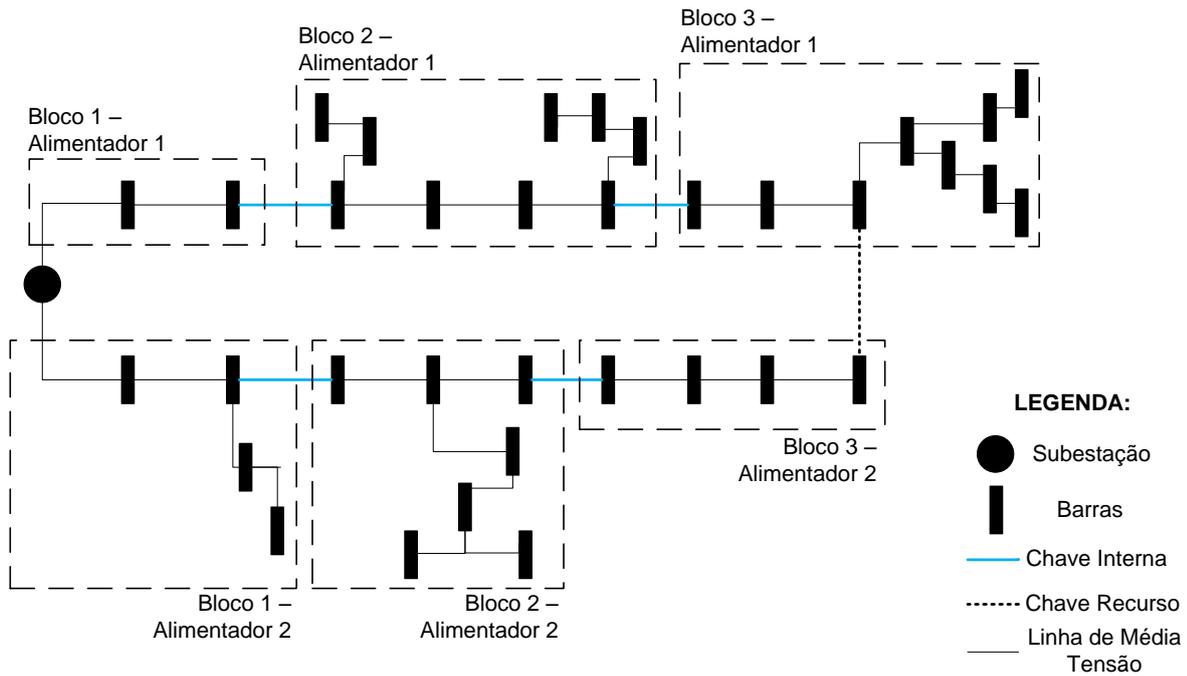


FIGURA 11 – EXEMPLO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO
 FONTE: O autor (2015)

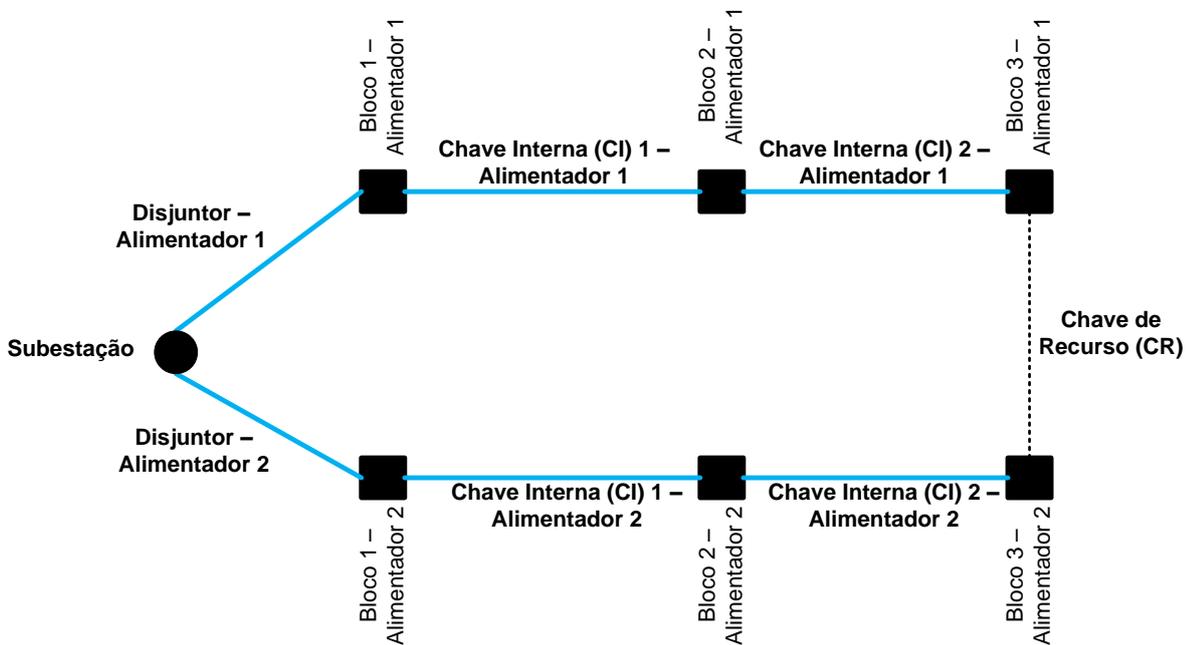


FIGURA 12 – EXEMPLO GENÉRICO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM DOIS ALIMENTADORES, DOIS DISJUNTORES, QUATRO CI E UMA CR
 FONTE: O autor (2015)

Em paralelo com a teoria dos grafos, os dois tipos de chaves representam as arestas e, as subestações e os blocos de carga, no qual contém o conjunto de barras de carga, chaves manuais, reguladores de tensão, banco de capacitores e as linhas de MT, são os nós (vértices) do grafo.

Assim, a representação unifilar da topologia do sistema de distribuição real é apresentada na FIGURA 13.

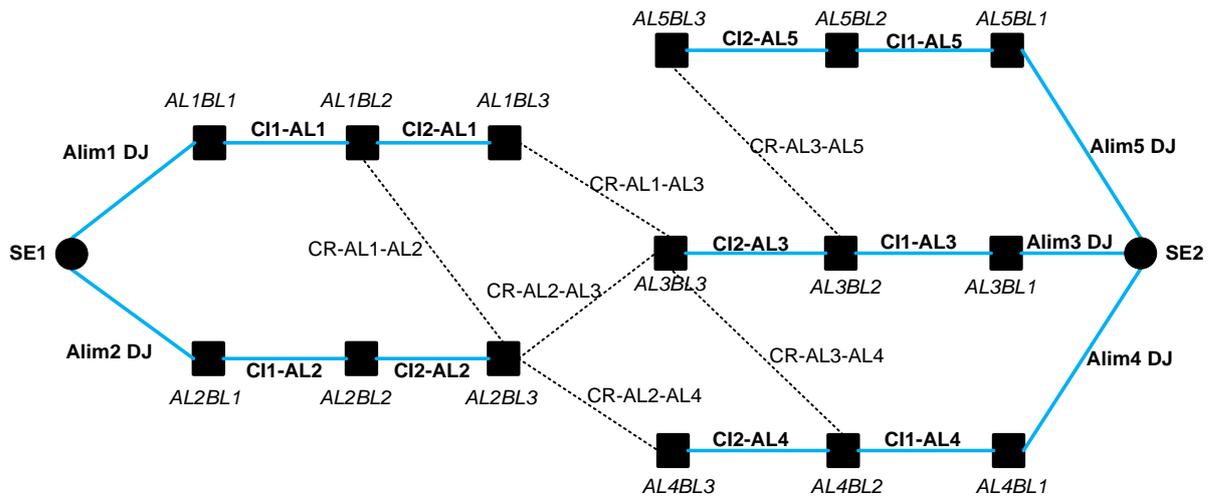


FIGURA 13 – UNIFILAR DA TOPOLOGIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO URBANO
FONTE: O autor (2015)

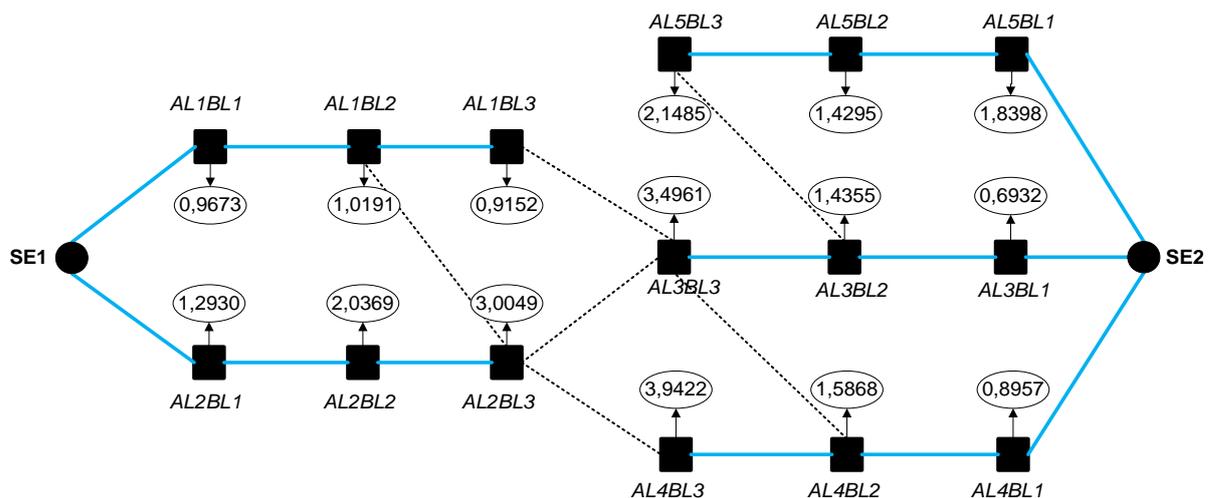


FIGURA 14 – APRESENTAÇÃO DAS CARGAS EM MVA DE CADA BLOCO DISTRIBUÍDAS PELO ALIMENTADOR
FONTE: O autor (2015)

Cada alimentador, chave e disjuntor são representados por um nome genérico e as informações básicas do sistema são apresentadas na TABELA 4 e na TABELA 5. As informações da quantidade total de potência aparente em MVA de cada bloco podem ser visualizadas na FIGURA 14.

TABELA 4 – INFORMAÇÕES DE BARRAS E POTÊNCIA INSTALADA NO SISTEMA

Nome	Nº de Barras	Total de Potência Ativa [MW]	Total de Potência. Reativa [Mvar]	Total de Potência Aparente [MVA]
Alim1	52	2,3191	1,7391	2,8967
Alim2	103	5,0408	3,7807	6,2870
Alim3	100	4,4788	3,3586	5,5868
Alim4	137	5,1181	3,8390	6,3788
Alim5	101	4,3219	3,2417	5,3898

FONTE: O autor (2015)

TABELA 5 – INFORMAÇÕES DE FLUXO DE POTÊNCIA E CORRENTE NO SISTEMA

Nome	Fluxo de Potência na 1ª linha [MVA]	Perdas [MVA]	Corrente na 1ª barra [A]
Alim1	2,9291	0,0323	130,08
Alim2	6,4301	0,1431	285,57
Alim3	5,7777	0,1909	256,59
Alim4	6,7247	0,3459	298,65
Alim5	5,5240	0,1341	245,32

FONTE: O autor (2015)

A nomenclatura usada para a apresentação da topologia consiste em:

- **SEZ** – é uma subestação, com **Z** sendo um código único para cada subestação.
- **AL_xBL_w** – é um bloco de carga, sendo **x** o alimentador ao qual pertence esse bloco e **w** o código único de cada bloco.
- **AlimXDJ** – é um disjuntor, e o **X** representa o alimentador do qual ele faz parte;
- **CIY-ALX** – é uma chave interna, com **Y** sendo um código único da chave, **X** o alimentador ao qual a chave pertence;

- CR-ALX1-ALX2 – é uma chave de recurso, sendo **X1** e **X2** os alimentadores de fronteira que a chave de recurso conecta, considerando sempre **X1** ≠ **X2** e **X1** > **X2**.

Para os códigos descritos, foram utilizados números sequenciais, iniciados em um e indo até o número total daquele item analisado.

4.1.2 Plataforma Computacional

Nesta subseção será apresentada a plataforma computacional utilizada para a realização dos testes e os *softwares* usados como ferramenta de apoio para a elaboração do presente trabalho.

Então, para a realização dos testes da metodologia desenvolvida utilizou-se um computador de mesa com o sistema operacional Windows 7 Professional 64bits e a seguinte configuração de *hardware*: processador Intel Core i5 de 2,80 GHz; memória ram de 4 GB; e disco rígido de 500 GB.

Toda a metodologia foi desenvolvida na ferramenta computacional MATLAB (*MATrix LABoratory*) da *Mathworks*, com o auxílio do programa OPENDSS para o cálculo do fluxo de potência. O OPENDSS trata-se de uma ferramenta de simulação de sistemas de potência voltada para sistemas de distribuição que realiza o cálculo de fluxo de potência de maneira rápida através de dois métodos que se mostraram confiáveis, sendo eles: injeção de corrente e Newton para o método iterativo. É possível também utilizar o método direto para o cálculo numérico se necessário (Dugan, 2013). As informações brutas do sistema foram armazenadas através do programa Microsoft Office Excel.

4.2 MÉTODOS

Nesta seção será abordada a metodologia desenvolvida para resolver o problema de autorrecuperação no sistema de distribuição. Conforme a FIGURA 15 a metodologia consiste em quatro seções, o processamento topológico do sistema de distribuição, a aplicação e isolamento da falta, a própria autorrecuperação e, por fim, o corte de carga se houver a necessidade de se realizar.

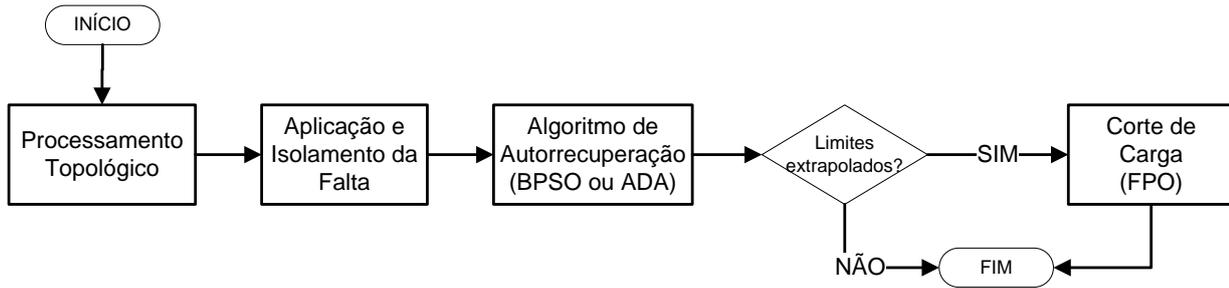


FIGURA 15 – FLUXOGRAMA GERAL DA METODOLOGIA DE AUTORRECUPERAÇÃO

FONTE: O autor (2015)

O primeiro processo, denominado Processamento Topológico, tem como objetivo pegar os dados elétricos da concessionária (dados de barras e linhas de todos os alimentadores) e converter em uma estrutura de dados computacional de uma topologia em forma de grafo (onde o conjunto de arestas engloba chaves e disjuntores; e o conjunto dos nós (vértices) engloba blocos de carga e subestações), para que os demais processos operem sobre esta estrutura de dados de grafo.

O processo Aplicação e Isolamento da Falta analisa o local que ocorreu a falta e, a partir do grafo e dos conjuntos montados anteriormente, cria os conjuntos de arestas e vértices em falta e desenergizados.

O processo Algoritmo de Autorrecuperação compreende os dois métodos desenvolvidos para a autorrecuperação, o Algoritmo de Dijkstra Adaptado (ADA) e o BPSO. Ambas as técnicas utilizam os dados (conjuntos) processados anteriormente, para realizar as mudanças necessárias nos conjuntos (chaveamentos), devolvendo como resultado os novos conjuntos de chaves abertas e fechadas e os vértices que continuam sem energia e os que foram recuperados.

Em seguida, é possível determinar se houve ou não extrapolação dos limites das grandezas elétricas e, se necessário, realizar o corte de carga através do FPO. O FPO determina a quantidade de cargas e em quais barras elas serão cortadas para que o sistema se recupere e não entre em emergência.

A FIGURA 16 apresenta o exemplo de um sistema de distribuição por representação em grafo para facilitar a explanação da metodologia desenvolvida nas próximas subseções. Ressalta-se que as arestas bidirecionais e ponderadas são utilizadas, somente, no algoritmo de Dijkstra, pois o algoritmo de autorrecuperação por BPSO só utiliza um grafo simples.

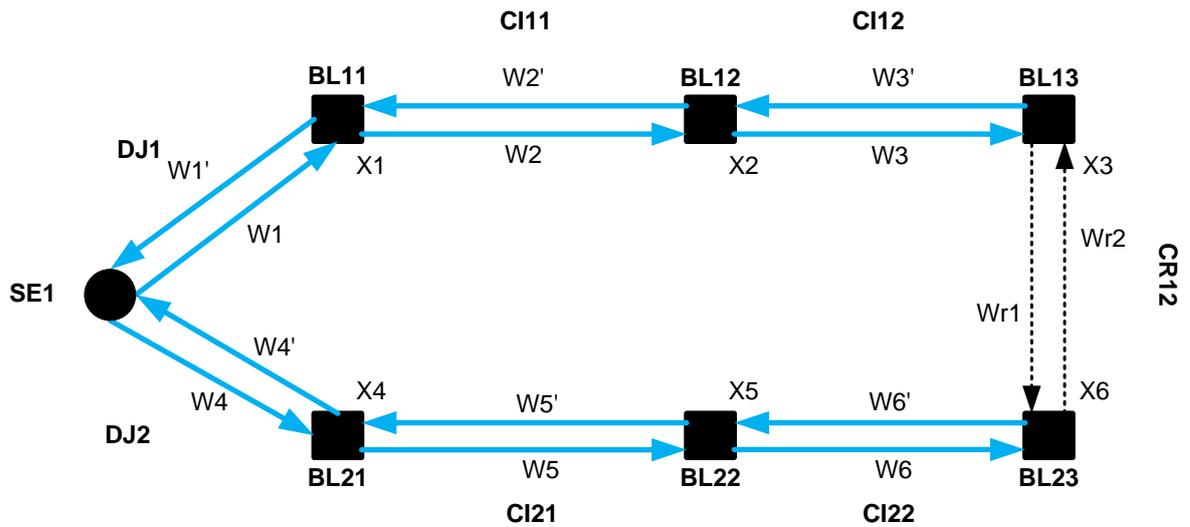


FIGURA 16 – EXEMPLO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO POR UMA REPRESENTAÇÃO EM GRAFO

FONTE: O autor (2015)

A partir do exemplo da FIGURA 16, a equação (4.1) representa o conjunto completo dos nós presentes no grafo, (4.2) o conjunto, somente, dos nós que representam as subestações, (4.3) o conjunto que representa os blocos de carga do sistema, (4.4) o conjunto de todas as arestas (chaves) no grafo, (4.5) o conjunto das chaves fechadas e (4.6) o conjunto das chaves abertas.

$$N = N_{bl} \cup N_{SE} \quad (4.1)$$

$$N_{SE} = \{SE1\} \quad (4.2)$$

$$N_{bl} = \{BL11, BL12, BL13, BL21, BL22, BL23\} \quad (4.3)$$

$$Ch = Ch_{fechadas} \cup Ch_{abertas} \quad (4.4)$$

$Ch_{fechados}$

$$= \{(SE1, BL11), (BL11, SE1), (BL11, BL12), (BL12, BL11), (BL12, BL13), (BL13, BL12), (SE1, BL21), (BL21, SE1), (BL21, BL22), (BL22, BL21), (BL22, BL23), (BL23, VL22)\} \quad (4.5)$$

$$Ch_{abertas} = \{(BL13, BL23), (BL23, BL13)\} \quad (4.6)$$

onde

N – conjunto com todos os nós (blocos de carga e subestações);

N_{SE} – conjunto de nós referentes às subestações;

N_{bl} – conjunto de nós referentes aos blocos;

Ch - conjunto com todas as arestas do sistema (disjuntores, CI e CR);

$Ch_{fechadas}$ – conjunto das arestas que representam as chaves fechadas;

$Ch_{abertas}$ – conjunto das arestas que representam as chaves abertas.

A equação (4.7) representa em X_i o valor total de potência aparente, Sd , atrelado ao bloco em análise i , e nb é o número total de barras presentes no bloco em análise. O peso atrelado a cada aresta é definido através de uma função peso $W, W_r: \text{arcos} \rightarrow \mathbb{R}^+$, e será detalhada na subseção 4.2.3.2.

$$X_i = \sum_i^{nb} Sd(i) \quad (4.7)$$

4.2.1 Processamento Topológico

O objetivo desta seção da metodologia é criar uma estrutura de dados a partir das informações de entrada padronizadas para a ferramenta e apresentada no APÊNDICE B. De maneira resumida, trata-se da separação dos dados importantes, tais como carga, chaves normalmente abertas, chaves normalmente fechadas, banco de capacitores, mudanças do tipo de cabeamento, geração distribuída, reguladores de tensão e o de-para⁴ do sistema, com a finalidade de facilitar nos quesitos como na construção do grafo para representar o sistema de distribuição de forma reduzida, na utilização dos algoritmos de grafo e na entrada de dados tanto no OPENDSS quanto no algoritmo de FPO para o corte de carga, que nestes dois últimos casos utilizam a base de dados completa do sistema para os cálculos.

⁴ Com referência a um grafo direcionado, o de-para aqui descrito, refere ao conjunto de arestas de um grafo, mais informações sobre grafo ver a seção 2.4.

A FIGURA 17 apresenta o fluxograma do processamento topológico, sendo a primeira etapa a leitura da base de dados (retirar as informações armazenadas no MS Excel para serem inseridas no Matlab), em seguida é realizado um filtro para retirar os ramais que não apresentam cargas e unir trechos que não apresentam barras ou nós importantes para diminuir o de-para do sistema. Neste trabalho considera-se como barra um nó com presença de carga e os demais itens, tais como, bifurcações, banco de capacitor, regulador de tensão, mudança do tipo de cabo e geração distribuída, são considerados nós importantes. Esse filtro é necessário, pois a base de dados fornecida pela concessionária de energia pode apresentar muitos nós no conjunto de-para sem conter informações relevantes para o caso de autorrecuperação, logo esses nós podem ser unificados sem alterar a topologia.

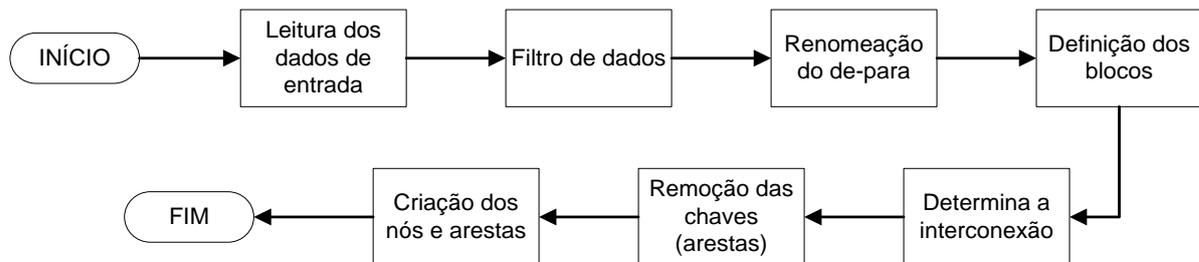


FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO TOPOLÓGICO

FONTE: O autor (2015)

O próximo passo, então, é renomear os nós do conjunto de-para de todo o sistema, de forma que o resultado contenha somente um nome para cada nó. Outro procedimento realizado em seguida pelo processamento topológico é a separação das barras, relacionando nós com a potência instalada, em conjuntos particionados, chamados de conjuntos de blocos, ou somente blocos. Estes blocos são limitados pelas CIs e disjuntores, ou seja, quando os dois vértices do par ordenado do conjunto completo de-para estão contidos entre duas CIs, ou entre um disjuntor e uma CI, salva-se o nó-para e sua potência no conjunto bloco em questão. A transformação das barras do sistema em blocos para a elaboração do grafo pode ser vista de forma gráfica na FIGURA 11, a qual apresenta de forma genérica um sistema de distribuição real, e na FIGURA 16 a representação do mesmo sistema, só que, na forma de grafos direcionados.

Após a separação em blocos, o processamento topológico encontra os pontos de interconexão entre os alimentadores do sistema de distribuição, para ter

conhecimento de qual alimentador tem fronteira com o outro (chave normalmente aberta). Por fim, deve-se retirar da tabela do de-para, as chaves internas (CI) e as chaves de recurso (CR), e montar uma tabela separada, com as chaves que estão fechadas e que estão abertas. Desta maneira é possível montar de forma automática a topologia do sistema em forma de grafo.

4.2.2 Aplicação e Isolamento da Falta

Essa seção da metodologia apresenta de que forma é isolada a falta depois de ser aplicada. De maneira sucinta o fluxograma da FIGURA 18 apresenta a sequência lógica da ideia para encontrar o espaço de busca, no qual servirá como entrada de dados para o algoritmo de autorrecuperação.

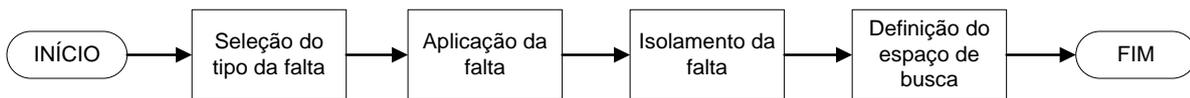


FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DA APLICAÇÃO E ISOLAMENTO DA FALTA

FONTE: O autor (2015)

Considera-se *a priori* que a identificação da falta será realizada pelos equipamentos instalados na rede, e repassada para o algoritmo a localização exata do bloco que apresentou a falta, logo, ela sempre será atrelada a um nó do grafo, F_{bl} . A FIGURA 19 mostra o local que ocorreu a falta, no nó BL11. Então com o local da falta definido, retiram-se todas as chaves que tiveram um nó com falta, tanto no conjunto dos $Ch_{fechadas}$ quanto do conjunto dos $Ch_{abertas}$. Portanto, não serão incluídos no espaço de busca essas chaves. Com isso, bloqueia-se um possível restabelecimento do local da falta, conforme as equações (4.8), (4.9) e (4.10).

$$N_{pf} = N - F_{bl} \quad (4.8)$$

$$Ch_{fechadas_{pf}} = \{(u, v) \in Ch_{fechadas} \mid u \in N_{pf} \wedge v \in N_{pf}\} \quad (4.9)$$

$$Ch_{abertas_{pf}} = \{(u, v) \in Ch_{abertas} \mid u \in N_{pf} \wedge v \in N_{pf}\} \quad (4.10)$$

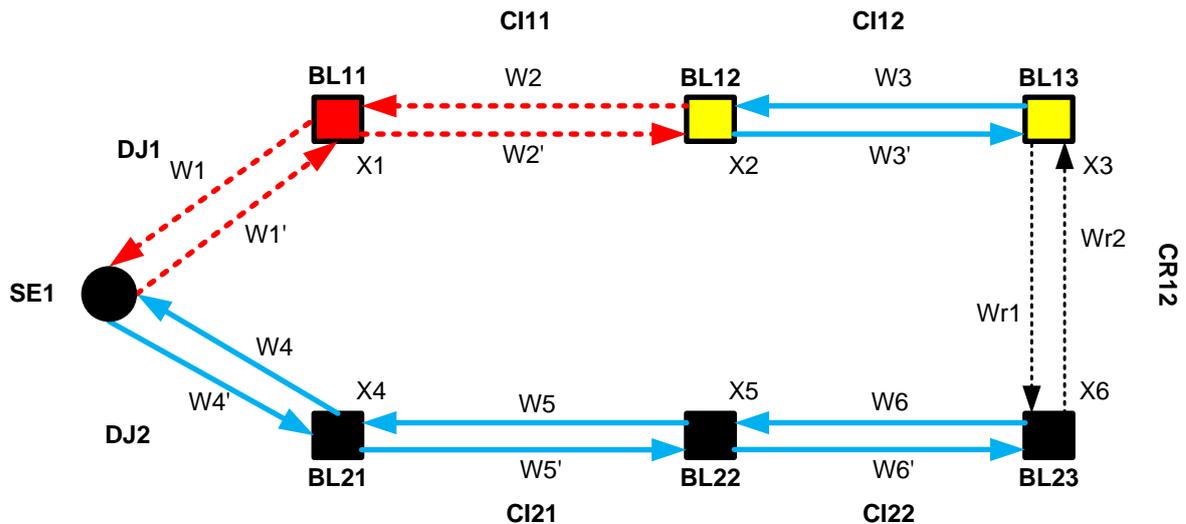


FIGURA 19 – EXEMPLO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM FALTA POR UMA REPRESENTAÇÃO EM GRAFO

FONTE: O autor (2015)

Além de determinar quais serão as chaves que poderão ser manipuladas no algoritmo de autorrecuperação, também é necessário estabelecer quais são os blocos que ficaram sem energia após a localização da falta, apresentados pelos blocos em amarelo da FIGURA 19. Não é possível realizar uma simples análise da ordem numérica sequencial dos blocos, pois uma vez que o sistema seja modificado, em caso de faltas sequenciais, não se sabe mais por qual alimentador o bloco está sendo alimentado.

Portanto, para determinar quais blocos foram desenergizados após a falta – conjunto dos blocos a serem recuperados, Bl_{out} , – realiza-se uma verificação de todos os caminhos existentes iniciados do nó referente à subestação através do método de busca em largura. Com isso verifica-se para cada nó, se esse nó pertence a alguns dos caminhos existentes, caso não pertença é porque o caminho até esse nó não existe mais.

A determinação do espaço de busca é utilizada para os dois métodos de autorrecuperação – BPSO e ADA, porém o conjunto Bl_{out} é somente adotado em ADA.

4.2.3 Autorrecuperação

A resolução do problema de autorrecuperação compreende o desenvolvimento de dois métodos para se encontrar a solução. O primeiro método desenvolvido é através de uma meta-heurística, conhecida como otimização por enxame de partículas binário (BPSO). E o outro método desenvolvido consiste numa adaptação de um algoritmo de busca em grafos, conhecido como algoritmo de Dijkstra – ADA.

4.2.3.1 Formulação da Função Objetivo do BPSO

No início do desenvolvimento da pesquisa formulou-se uma função objetivo para ser utilizada na otimização por Algoritmos Genéticos com representação binária para resolver o problema de autorrecuperação, conforme o trabalho próprio, apresentado em Ferreira *et al.* (2013). Entretanto, no decorrer da pesquisa aplicou-se outra técnica de otimização, e que foi apresentado em Ferreira *et al.* (2014), neste artigo, de própria autoria, é utilizado o mesmo método metaheurístico que apresentado neste trabalho, o BPSO, ao qual se mostrou mais eficaz no quesito de tempo computacional, mantendo, portanto, a utilização desta técnica para este trabalho, com modificações na escolha da função de transferência e na formulação da função objetivo. Sendo assim, para este trabalho utilizou-se da função S1 da família *S-Shaped* do algoritmo elaborado por Mirjalili e Lewis (2013). Os testes das funções de transferência encontram-se no APÊNDICE C.

O fluxograma da FIGURA 20 mostra os passos realizados dentro da função objetivo construída para o BPSO. Inicia-se, a partir de uma determinada partícula px^5 , uma busca em largura adaptada para a verificação de laço ou paralelismo, em outras palavras, evitar anel e interligação de subestações do presente chaveamento através de verificação dos nós com o caminho já salvo, resumindo, caso não encontrado um nó igual, salva-se esse nó no caminho, caso contrário, se o nó existe é porque a busca entrou num loop, ou se encontrou um nó de subestação é porque conectou duas subestações.

⁵ px representa o conjunto das posições das chaves dentro do espaço de busca.

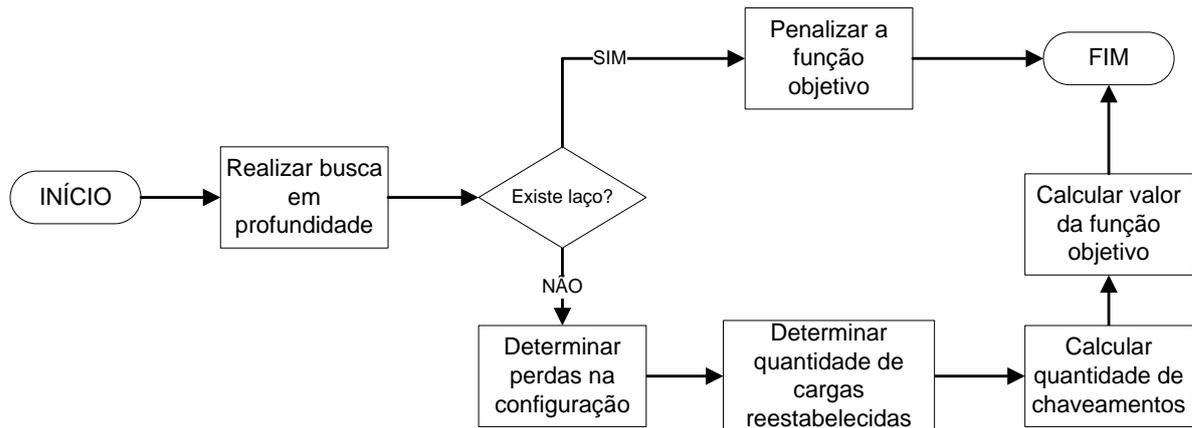


FIGURA 20 – FLUXOGRAMA DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O BPSO

FONTE: O autor (2015)

Caso exista uma das duas comparações (laço ou paralelismo), a função objetivo deve ser penalizada, ou seja, conforme Coello Coello (2002), a partir do valor da função objetivo adiciona-se ou subtrai-se um determinado valor baseado na quantidade de violações ocorridas na presente solução, ao qual pode ser por uma função ou por um determinado valor fixo. E conforme Coello Coello (2002) existem sete alternativas para penalizar um indivíduo (partícula), sendo utilizada neste trabalho a alternativa conhecida como “pena de morte”, em que se rejeitam os indivíduos não coerentes para o problema, sem a necessidade de calcular outra função para determinar o valor de penalidade da função objetivo. E por fim, após a penalização, finaliza-se a análise.

Além da verificação de laço ou paralelismo, a busca em largura adaptada também devolve como resultado todos os caminhos que são iniciados nos nós das subestações presentes no espaço de busca, para que seja possível determinar todos os blocos que estão sendo alimentados por alguma fonte de energia. Por fim, determinam-se as três principais variáveis para a função objetivo:

- As perdas sistêmicas a partir do OPENDSS – l_{sis} ;
- A soma de todos os blocos de cargas que contém a presença de uma alimentação – sd_{tot-bl} ;
- A quantidade de comutação das chaves entre px e o estado normal do sistema – $ch_{comutadas}$.

Com isso, se têm todos os dados possíveis para o cálculo da função objetivo do BPSO dada pela equação (4.11), que é composta por três parcelas, $P1$ para a

maximização de cargas, $P2$ para a minimização das perdas sistêmicas e $P3$ para minimização da quantidade de chaveamentos.

$$FO_{BPSO} = P1 + P2 + P3 \quad (4.11)$$

$$P1 = \frac{sd_{max}}{(sd_{tot-bl} + 1)} \quad (4.12)$$

$$P2 = \frac{l_{sis}}{l_{normal}} \quad (4.13)$$

$$P3 = \frac{ch_{comutadas}}{ch_{tot}} \quad (4.14)$$

A função objetivo foi pensada de maneira que a prioridade seja a maximização das cargas (4.12), pois seus resultados sempre serão maiores ou iguais a um. A parcela que representa o total de chaves comutadas (4.14), tem seus valores entre zero e um, sendo a segunda priorização da função objetivo. Já a parcela da perda sistêmica (4.13) tem como resposta valores extremamente pequenos, para que essa parcela representasse um ajuste fino do sistema, no qual, serviria para justificar uma configuração de chaveamento ou outra quando já estabilizado as parcelas de maximização de carga e comutação das chaves.

4.2.3.2 Algoritmo de Dijkstra Adaptado (ADA) para Autorrecuperação

A autorrecuperação por algoritmo de Dijkstra adaptado (ADA) tem como objetivo, com base nos blocos desenergizados, selecionar um bloco por vez para encontrar o menor caminho até uma subestação, deve-se considerar que esse novo caminho não poderá conter laço (manter o sistema radial) ou paralelismo entre subestações (não conectar duas subestações). O fluxograma do algoritmo proposto para realizar a autorrecuperação tem como base uma adaptação do método de busca em grafos conhecido como algoritmo de Dijkstra e é apresentado na FIGURA 21.

A partir dos dados separados pelo Processamento Topológico e manipulados na seção de aplicação e isolamento da falta para determinar o espaço de busca e os

blocos sem energia, tem-se então, como entrada de dados dessa seção: o conjunto $Ch_{fechadas_{pf}}$, referente às chaves fechadas do pós-falta; o conjunto $Ch_{abertas_{pf}}$, que corresponde às chaves abertas do pós-falta; o conjunto Bl_{out} ; que são os nós da representação em grafos referente aos blocos de carga que não estão sendo energizados; e a estrutura simplificada de dados do sistema.

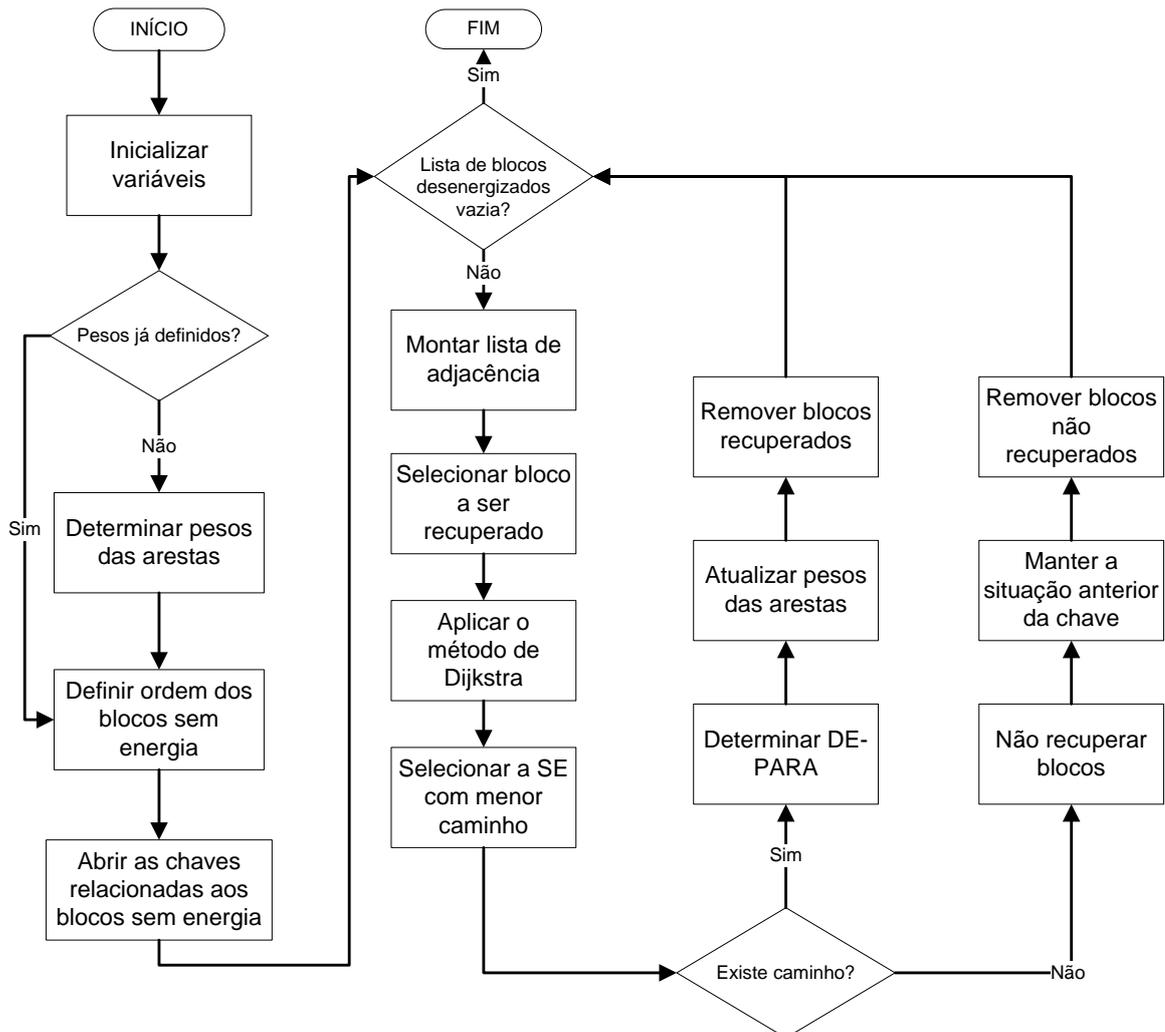


FIGURA 21 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE DIJKSTRA ADAPTADO (ADA) PARA A AUTORRECUPERAÇÃO

FONTE: O autor (2015)

O primeiro passo a ser realizado no algoritmo é a definição do peso que cada chave (aresta) deverá assumir. Para as chaves normalmente abertas e considerando que seja a primeira iteração do problema, ou seja, a análise da primeira falta, essas chaves recebem o valor de zero para o peso em ambos os sentidos. Para as demais

arestas o peso, W_j ou W_j' , está diretamente ligado com o somatório total dos blocos de cargas a frente da chave, conforme a formulação a seguir:

$$Sd_{tot}(a) = \sum_{j=1}^{nbl} X(j) \quad (4.15)$$

$$W_{narc} = \sum_{k=v}^{nbl} X(k) \quad (4.16)$$

$$W'_{narc} = Sd_{tot}(al) - W_{narc} \quad (4.17)$$

onde Sd_{tot} é a potência aparente total do alimentador, al , em análise; nbl é o número total de blocos do alimentador; $narc$ é a metade do número de chaves do sistema após a falta; e v representa a segunda posição do par ordenado da aresta em análise.

Como se determinou inicialmente que a busca partirá do bloco desenergizado, o peso atrelado à aresta deve ser pensado de maneira inversa a busca feita, conforme a FIGURA 22. E como já citado anteriormente, todas as chaves normalmente abertas na primeira iteração contêm pesos zerados, portanto, quando BL4 segue para BL3, esse peso é zero, e do BL3 para o BL2, o peso que ele deve contabilizar é a carga somente de BL3, X_3 , e não a soma dos blocos de carga X_1 e X_2 , devido ao fluxo normal do sistema, em que a chave está monitorando toda a carga à jusante, não olhando para a carga a montante. Resumindo, como a busca e o fluxo sempre têm os seus sentidos opostos, o sentido da aresta é o mesmo sentido da busca e o cálculo do peso é no sentido do fluxo.

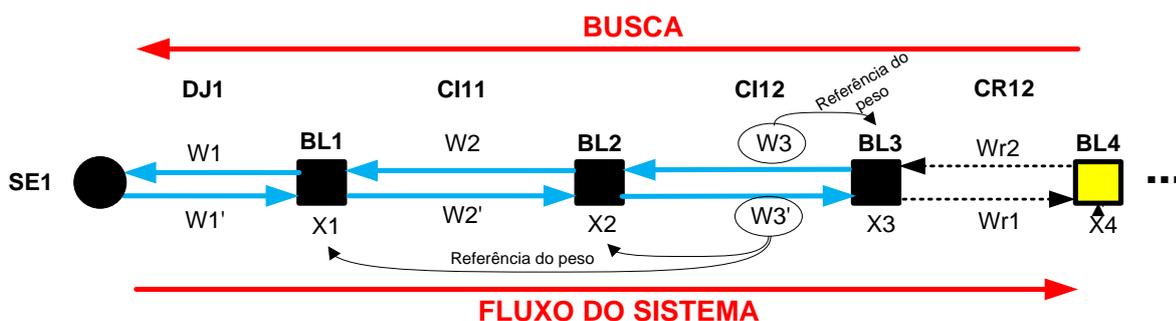


FIGURA 22 – ORDEM DE ALOCAÇÃO DOS PESOS NAS ARESTAS (CHAVES)

FONTE: O autor (2015)

Em seguida deve-se definir a ordem em que serão recuperados os blocos que estão sem energia. A ordem de recuperação é fundamental para o problema por causa dos poucos caminhos que cada busca pode encontrar, devido às restrições de laço e paralelismo impostas para o problema. Portanto em (4.18) é realizado um ordenamento de modo decrescente do Bl_{out} a partir do conjunto X_{c-bl} , que contém o total de carga relacionado a cada bloco, para, então, se restabelecer primeiro os blocos com grande concentração de carga.

$$Bl'_{out} = ordenar(Bl_{out}, X_{c-bl}) \quad (4.18)$$

A busca a ser executada para este caso tem como objetivo determinar o menor caminho independentemente do número e de quais chaveamentos realizar, portanto, todas as chaves que estão ligadas aos blocos sem energia e ditos como chaves fechadas, devem ser retiradas do conjunto $Ch_{fechadas_{pf}}$, conforme demonstrado nas equações (4.19) e (4.20).

$$Ch_{out-bl} = \{(u, v) \in Ch_{fechadas_{pf}} \mid u \in Bl'_{out} \vee v \in Bl'_{out}\} \quad (4.19)$$

$$Ch'_{fechadas_{pf}} = Ch_{fechadas_{pf}} - Ch_{out-bl} \quad (4.20)$$

Seguindo adiante, conforme a subseção 2.4, sobre grafos, monta-se a lista de adjacência para as variáveis iniciais que compõem o grafo em questão com os pesos calculados anteriormente. Por seguinte, seleciona-se o primeiro valor do conjunto Bl'_{out} como sendo o ponto de partida (fonte) para o algoritmo de Dijkstra, detalhado na subseção 2.4.1.2. Como o algoritmo de Dijkstra encontra o menor caminho para os demais nós a partir do ponto de partida, o resultado final de uma análise, considerando o exemplo da FIGURA 16, é a TABELA 6, contendo as estimativas (E_t) relacionadas aos precedentes (S) de cada nó (N). Com isso, deve-se selecionar qual o menor caminho entre as subestações presentes no sistema em análise.

TABELA 6 – EXEMPLO DO RESULTADO FINAL DO ALGORITMO DE DIJKSTRA

Resultado Final						
Nó (N)	$SE1$	$BL12$	$BL13$	$BL21$	$BL22$	$BL23$
Estimativas (Et)	$W3' + Wr1 + W6$ $+ W5 + W4$	0	$W3'$	$W3' + Wr1$ $+ W6 + W5$	$W3' + Wr1$ $+ W6$	$W3'$ $+ Wr1$
Precedentes (S)	$BL21$	$BL12$	$BL12$	$BL22$	$BL23$	$BL13$

FONTE: O autor (2015)

Se existir um caminho entre o ponto de partida até uma subestação, monta-se o de-para final para ser incluído no conjunto $Ch'_{fechados_{pf}}$. A montagem do de-para deve evitar o laço ou paralelismo entre subestações, então conforme a linha 13 do Pseudocódigo 3, quando encontrado um vértice que já pertença ao par ordenado do conjunto $Ch'_{fechados_{pf}}$, deve-se parar a análise e desconsiderar o restante das chaves que não foram inclusas em $Ch'_{fechados_{pf}}$.

Por fim, após a nova configuração do sistema, atualizam-se os pesos de cada aresta, considerando os novos blocos assumidos, e analisam-se quais blocos foram recuperados para serem retirados do conjunto Bl_{out-bl} , pois numa iteração é possível encontrar um caminho que recupere outros blocos que estão desenergizados além do bloco selecionado para a autorrecuperação.

Agora, caso não exista um caminho definido do bloco a ser recuperado até uma subestação, mantém-se o bloco no mesmo estado (sem restabelecimento), volta-se o posicionamento das chaves conectadas a esse bloco, e remova-o da análise.

Pseudocódigo 3 Montagem do de-para

```

1  Entradas:  $N, Q, S, N_{SE}, Bl_{out}, Ch'_{fechadas_{pf}}$ 
2  Saídas:  $Ch_{fechadas_{rec}}$ 
3  [ $pontoInicialSE, indiceMin$ ] =  $\min(Q(N \in nósSE))$ 
4   $i = 1$ 
5  enquanto  $S(indiceMin) \neq Bl_{out}(1)$  faça
6       $caminho(i) = V(indiceMin)$ 
7       $i = i + 1$ 
8       $caminho(i) = S(indiceMin)$ 
9       $indiceMin = S(indiceMin) == V$ 
10 fim
11 para cada posição  $k$  de  $caminho - 1$  faça
12      $dePara = [dePara; caminho(k) \ caminho(k + 1)]$ 
13     se  $caminho(k + 1) \in Ch'_{fechadas_{pf}}$ 
14         pare
15     fim
16 fim
17  $Ch_{fechadas_{rec}} = Ch'_{fechadas_{pf}} \cup dePara$ 

```

FONTE: o autor, 2014.

4.2.4 Corte de Carga

O corte de carga, praticado nesta metodologia, considera uma modificação nas restrições conforme a formulação na subseção 2.6.2, onde é adicionada a restrição (4.21) que monitora a corrente na saída do alimentador, para não ultrapassar o limite de corrente imposto por I_{max} , e assim evitar danos aos equipamentos presentes na rede.

$$\left[\text{real} \left(\frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \right) \right]^2 + \left[\text{imag} \left(\frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \right) \right]^2 \leq I_{max_{ij}}^2 \quad (4.21)$$

Desta forma, houve a necessidade de tal formulação devido ao máximo de corrente que um cabo possa suportar ou um máximo de potência que uma subestação

possa fornecer para o alimentador. Sendo que a primeira parte da inequação representa a corrente aparente monitorada, e devido à representação do fasor tensão na forma retangular, foi necessário elevá-la ao quadrado para se ter o módulo do número.

A formulação consiste em monitorar a corrente entre as barras i e j , que neste caso somente será o fluxo da subestação para a primeira barra, através da formulação retangular usada, com isso tanto a parte real quanto a parte imaginária tem a corrente descrita como a diferença de tensão, $V_i - V_j$, sobre a impedância da linha Z_{ij} .

As seleções das barras a serem cortadas sempre serão referentes às barras que estão para serem recuperadas, nunca sendo cortada uma barra do alimentador que serve como base do reestabelecimento dos blocos que ficaram sem energia.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A metodologia apresentada neste trabalho compreende o desenvolvimento de um processador topológico, que possa converter os dados elétricos de uma rede de distribuição em dados computacionais, em especial, num formato de grafo e conjuntos, ou seja, transforma os dados complexos da topologia de um sistema de distribuição numa estrutura de dados simples para a utilização, selecionando, somente, os dados importantes nos métodos de autorrecuperação. E ainda, o processador topológico pré-processa os dados completos do sistema para deixá-los numa forma organizada para que o restante da metodologia não precise processar os dados e organiza-los toda vez que ocorrer uma análise, diminuindo então o tempo total de processamento da metodologia.

Outro ponto de desenvolvimento a ser considerado é o algoritmo de isolamento da falta, que a partir do ponto selecionado manualmente de ocorrência da falta, retira o elemento (bloco) que apresentou a falta dos conjuntos dos nós e encontra dentro dos conjuntos das arestas (chaves) o nó defeituoso nos pares ordenados. Dessa forma, permite o isolamento do local da falta, pois se retira o bloco com a falta e as chaves conectadas a ele do espaço de busca.

E como assunto principal deste trabalho, desenvolveram-se dois métodos de autorrecuperação para o restabelecimento do sistema após uma falha no sistema. No primeiro método elaborou-se uma função objetivo para ser usada em conjunto com a

técnica de otimização BPSO, que considera a análise da maximização da carga, minimização da perda sistêmica e dos chaveamentos, e quando apresentado anel ou conexão entre duas subestações é penalizada a função objetivo do chaveamento fornecido pela técnica.

O segundo método desenvolvido para a autorrecuperação utiliza um algoritmo de busca em grafo, que neste caso é adotado o algoritmo de Dijkstra, para encontrar um caminho do bloco sem energia e que poderia ser restabelecido até uma subestação, tomando como menor caminho aquele que apresenta o menor carregamento, ou seja, que a soma das cargas dos blocos neste caminho seja a menor. O método também evita fechamento da topologia em anel e a ligação entre duas subestações.

E para o trabalho em conjunto com os métodos de autorrecuperação quando extrapolado os limites de corrente e tensão, foi utilizado o método de FPO de Fernandes *et al.* (2008) para realizar o corte de carga e aliviar o sistema. Para isto foi incluída uma restrição de corrente, sendo que tal restrição deve monitorar a saída do alimentador para que o somatório das cargas mais as perdas não ultrapasse o máximo permitido de fluxo de potência para aquele alimentador.

Ressalta-se que para a metodologia desenvolvida é necessário à utilização tanto dos dados completos do sistema de distribuição para as análises elétricas quanto os dados simplificados do processador topológico para realizar a autorrecuperação.

Para a comprovação da metodologia desenvolvida, são selecionados como pontos interessantes de análises:

- Os casos onde os nós (blocos de carga) apresentam a conexão com várias chaves de recurso fornecendo, então, diversos caminhos para restabelecer o sistema;
- As faltas que necessitam manipular diversas chaves para determinar o melhor caminho de restabelecimento do sistema visando o maior número de cargas;
- Os caminhos que compreendem o restabelecimento de blocos que concentrem uma grande quantidade de carga para que seja ativado o corte de carga.

Então, para isso, contou-se com um sistema urbano real que se mostrou capaz de cobrir as análises necessárias para comprovar o desenvolvimento da

metodologia apresentada, pois tal sistema compreende duas subestações como fontes de energia, cinco alimentadores interconectados e 21 chaves manobráveis.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Consideram-se dois modos de testes para validar a metodologia desenvolvida, em que no primeiro modo aplicam-se diversas faltas simultâneas, ou seja, faltas que possam ocorrer ao mesmo tempo e em diversos pontos no sistema de distribuição; no segundo modo aplicam-se faltas sequenciais que possam ocorrer no sistema de distribuição, onde o resultado de um sistema recuperado da primeira falta seria o “modo normal” para a aplicação da segunda falta.

Os resultados descritos neste capítulo compreendem a utilização do método iterativo por injeção de corrente do OPENDSS para o cálculo do fluxo de potência do sistema analisado. Os parâmetros utilizados no BPSO para determinar o melhor chaveamento são descritos na TABELA 7, sendo que o número de iterações e de partículas foi determinado para que o BPSO encontre uma solução dentro do tempo de três minutos (através da realização de cinco experimentos variando o número de iterações entre 40 e 50 e o número de partículas entre 15 e 40). Destaca-se que o BPSO terá como resultado o melhor chaveamento dentro do prazo de três minutos, sendo como característica de uma parada antecipada devido à restrição de tempo. A escolha da função de transferência foi resultante das simulações do APÊNDICE C. E os demais valores de parametrização da TABELA 7 foram os mesmos usados no artigo de própria autoria Ferreira *et al.* (2014).

A dimensão do problema varia conforme o número de chaves possíveis para a manipulação, e a dimensão máxima, sendo, dois elevado à soma das chaves normalmente abertas com as normalmente fechadas, para este caso seria, $2^{(6 + 15)} = 2097152$ combinações. A partícula é representada por 0 ou 1, que significa respectivamente, chave aberta ou chave fechada.

Os parâmetros do FPO para o corte de carga são descritos na TABELA 8 e foram determinados de forma empírica. Para a execução do FPO os limites a serem impostos para máximo e mínimo de corte são respectivamente zero e o valor de potência atrelada à barra, os limites de tensão são referentes às normas estabelecidas pela ANEEL e descritas na TABELA 2, e a corrente máxima I_{max} de cada alimentador foi de 404,145 A, que representa um fluxo de potência máximo possível na saída da subestação em cada alimentador de 9,1 MVA, considerando a tensão base de 13 kV.

TABELA 7 – PARAMETRIZAÇÃO DO BPSO

Parâmetro	Valor
Função de transferência	S1 – equação (2.2)
Número de iterações	40
Número de partículas	15
Peso máximo de inércia	0,9
Peso mínimo de inércia	0,4
c_1 (parâmetro cognitivo)	2
c_2 (parâmetro social)	2
Velocidade máxima da partícula	6

FONTE: O autor (2015)

TABELA 8 – PARAMETRIZAÇÃO DO FPO

Parâmetro	Valor
Tolerância	0,001
Número máximo de iterações	400
Parâmetro barreira inicial	0,01
Fator de aceleração	50
Peso para minimização das perdas	1
Peso para realizar o corte de carga (w_{cc})	2

FONTE: O autor (2015)

5.1 RESULTADO DO PROCESSAMENTO TOPOLÓGICO

O programa desenvolvido apresenta automaticamente o resultado da topologia final, entretanto, a imagem criada automaticamente pode dificultar a visualização dos nomes das chaves, logo de maneira a facilitar o entendimento é possível verificar os nomes da FIGURA 23, com os da FIGURA 13, feita manualmente. O tempo de conversão dos dados brutos do sistema de distribuição, apresentado na FIGURA 25, para uma estrutura de dados, é na média de 6,5 segundos.

Os diversos símbolos apresentados durante os testes estão descritos na FIGURA 24, e consistem em:

- a) Três tipos de arestas: vermelha com traço-ponto representa as chaves que foram abertas para poder isolar a falta; azuis e contínuos representam

as chaves fechadas; e as arestas pretas tracejadas estão relacionadas com as chaves abertas;

- b) Três tipos de blocos de carga: vermelho – bloco com falta; amarelo – bloco desenergizado; e preto – bloco com alimentação normal;
- c) O círculo em preto representa a subestação.

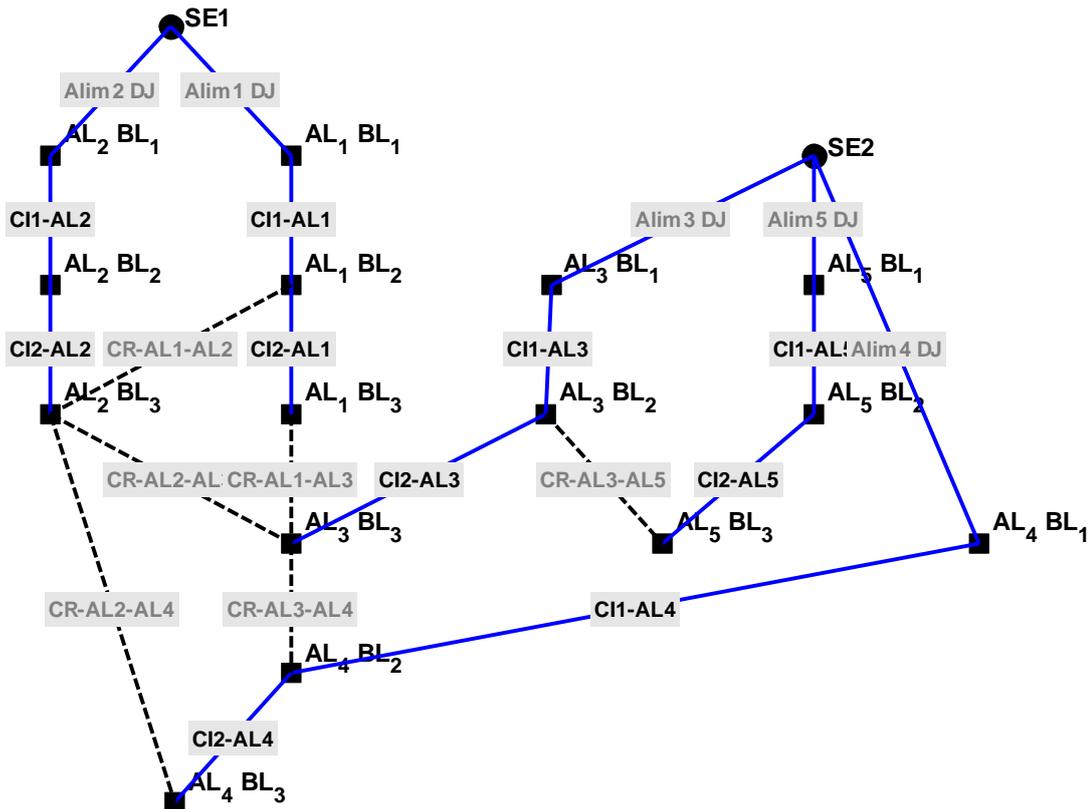


FIGURA 23 – UNIFILAR DA TOPOLOGIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO URBANO VIA PROGRAMA

FONTE: O autor (2015)



FIGURA 24 – LEGENDA DOS SÍMBOLOS DA REPRESENTAÇÃO TOPOLÓGICA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

FONTE: O autor (2015)

DE	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	PARA	COMP [km]	RES [ohm/km]	REA [ohm/km]	POT ATIVA A [kW]	POT ATIVA B [kW]	POT ATIVA C [kW]	POT REA A [kvar]	POT REA B [kvar]	POT REA C [kvar]	Consumidores	AMP [A]	Tap	Shunt	
1		2	0,07521	0,124	0,112	0							325,3	1	0
2		21	0,22609	0,122607457	0,144807378	0							325,3	1	0
21		28	0,03986	0,103728299	0,136292524	0							505	1	0
28		32	0,01361	0,509	0,172	226,2344							183,8	1	0
32		42	0,02124	0,176	0,25	0			172,5057862				505	1	0
42		45	0,02954	0,176	0,25	50,90274			38,81380188				505	1	0
45		49	0,24563	0,176	0,25	135,74064			103,5034717				505	1	0
49		55	0,29042	0,176	0,270781489	50,90274			38,81380188				505	1	0
55		57	0,1883	0,176	0,384	50,90274			38,81380188				538	1	0
57		58	0,10677	0,176	0,384	0			0				538	1	0
58		59	0,04753	0,176	0,384	101,80548			77,62760377				538	1	0
59		62	0,03832	0,176	0,384	0			0				538	1	0
62		64	0,0001	0,0001	0,0001	0			0				505	1	0
64		65	0,07745	0,176	0,25	0			0				505	1	0
65		66	0,01984	0,176	0,25	13,574064			10,35034717				505	1	0
66		67	0,02872	0,176	0,25	0			0				505	1	0
67		70	0,03541	0,176	0,25	0			0				505	1	0
70		71	0,04552	0,176	0,25	33,93516			25,87586792				505	1	0
71		72	0,00913	0,176	0,25	13,574064			10,35034717				505	1	0
72		73	0,02893	0,176	0,25	0			0				505	1	0
73		75	0,0001	0,0001	0,0001	0			0				505	1	0
75		76	0,04131	0,176	0,25	33,93516			25,87586792				505	1	0
76		77	0,03139	0,176	0,25	0			0				505	1	0

FIGURA 25 – APRESENTAÇÃO DOS DADOS BRUTOS DO ALIMENTADOR 1

FONTE: O autor (2015)

5.2 TESTES DA FUNÇÃO OBJETIVO DO BPSO

Para alcançar à formulação da função objetivo, proposta em (4.11), realizaram-se três testes para analisar as influências que cada conjunto de parcelas tem na função objetivo. Como o objetivo principal da metodologia é a maximização das cargas, considerou-se, então, a influência das duas outras parcelas combinadas com a maximização de carga. Sendo que, para o primeiro teste, avaliou-se as parcelas $P1$ e $P3$, respectivamente, maximização de carga (4.12) e minimização de chaveamentos (4.14), desconsiderando a influência das perdas sistêmicas. O segundo teste avaliou $P1$ e $P2$, respectivamente, a maximização de carga (4.12) e minimização das perdas sistêmicas (4.13), sem o uso da parcela de quantidade de chaveamentos realizados. Por fim a análise do resultado quando considerado as três parcelas da função objetivo.

Os testes foram realizados a partir das faltas simultâneas aplicadas em AL1BL1 e AL4BL1 e o sistema pós-falta pode ser observado na FIGURA 26, onde se tem quatro blocos a serem recuperados, AL1BL2, AL1BL3, AL4BL2 e AL4BL3.

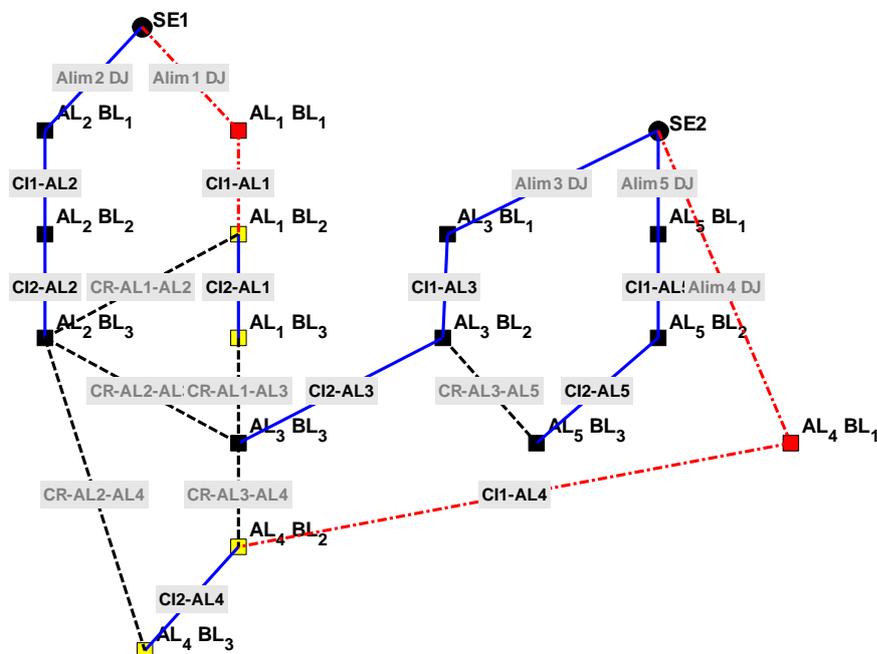


FIGURA 26 – SITUAÇÃO USADA COMO EXEMPLO PARA O TESTE DA FUNÇÃO OBJETIVO

FONTE: O autor (2015)

O resultado sem *P2* apresenta uma quantidade de chaveamentos menor, porém com o maior valor da perda sistêmica. No caso onde a quantidade de chaveamentos não é levada em consideração, sem *P3*, o resultado é um maior número de chaveamentos com a uma menor perda sistêmica. E o caso completo mantém o número de chaveamentos igual ao caso sem *P2*, entretanto, através de um chaveamento diferente, de modo a minimizar a perda sistêmica, os valores são apresentados na TABELA 9.

TABELA 9 – COMPARAÇÃO DOS CASOS TESTES PARA A FUNÇÃO OBJETIVO

Caso	Blocos reestabelecidos	Quantidade de chaveamentos	Perda Sistêmica [MVA]
Sem <i>P2</i>	4	2	1,3687
Sem <i>P3</i>	4	4	1,2211
Completo	4	2	1,3255

FONTE: O autor (2015)

Devido a todos os blocos de carga serem restabelecidos, o valor da parcela *P1* apresentado na TABELA 10 não variou em nenhum dos casos, sendo, portanto, a diferença do valor final da função objetivo dado pelas parcelas *P2* e *P3*. Assim, quando considerada a parcela *P3*, ela apresentou o mesmo valor de 0,1176470588, pois é realizada a mesma quantidade de chaveamentos nos casos completo e sem *P2*. Para a parcela *P2* é possível notar a diferença dos valores dessa parcela quando observado a configuração de todo o sistema a partir do resultado dos chaveamentos, onde se tem um menor valor de perdas sistêmicas quando se realiza mais chaveamento.

Os valores destacados em vermelho da TABELA 10 representam os valores da respectiva parcela não considerada naquela análise depois de encontrado o resultado final. Observa-se que as duas parcelas obtiveram um valor elevado comparado com as outras análises. E ainda, as FIGURAS 27, 28 e 29 demonstram visualmente a forma topológica que cada resultado alcançou, sendo respectivamente a maximização das cargas sem as perdas, a maximização das cargas sem a quantidade de chaveamentos e o completo, com maximização de cargas, perdas sistêmicas e quantidade de chaveamento. Nota-se que a influência de cada parcela da função objetivo muda a forma da topologia do sistema após a autorrecuperação. Devido a esses fatores, tanto numérico quanto topologicamente, considerou-se, no final, a utilização das três parcelas para compor a função objetivo.

TABELA 10 – COMPARAÇÃO DO VALOR DAS PARCELAS DA FUNÇÃO OBJETIVO

Caso	Valor de P1	Valor de P2	Valor de P3	Valor Total
Sem P2	0,9999999597	1,9100330176e ⁻⁶	0,1176470588	1,1176470185
Sem P3	0,9999999597	1,7039995083e ⁻⁶	0,2352941176	1,0000016637
Completo	0,9999999597	1,8497893939e ⁻⁶	0,1176470588	1,1176488683

FONTE: O autor (2015)

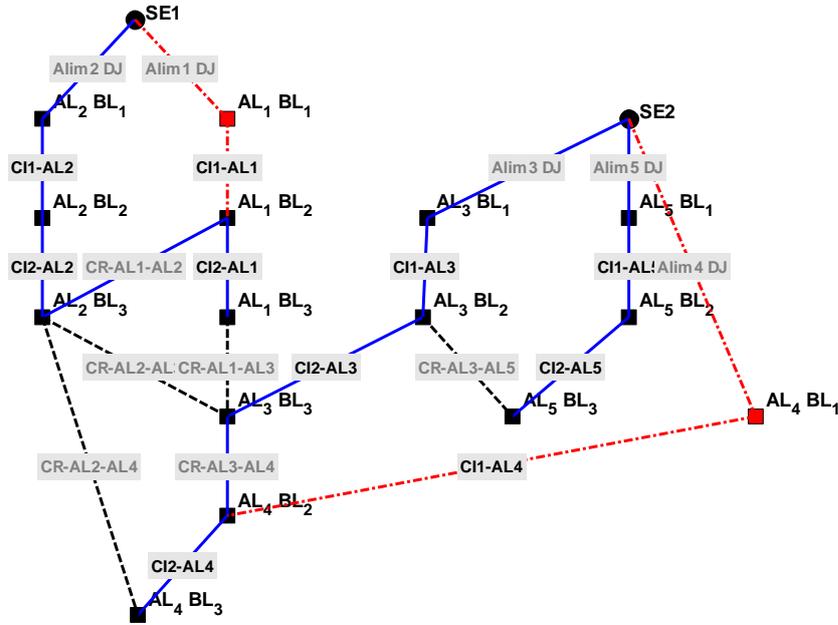


FIGURA 27 – SITUAÇÃO SEM A APLICAÇÃO DA PARCELA DAS PERDAS

FONTE: O autor (2015)

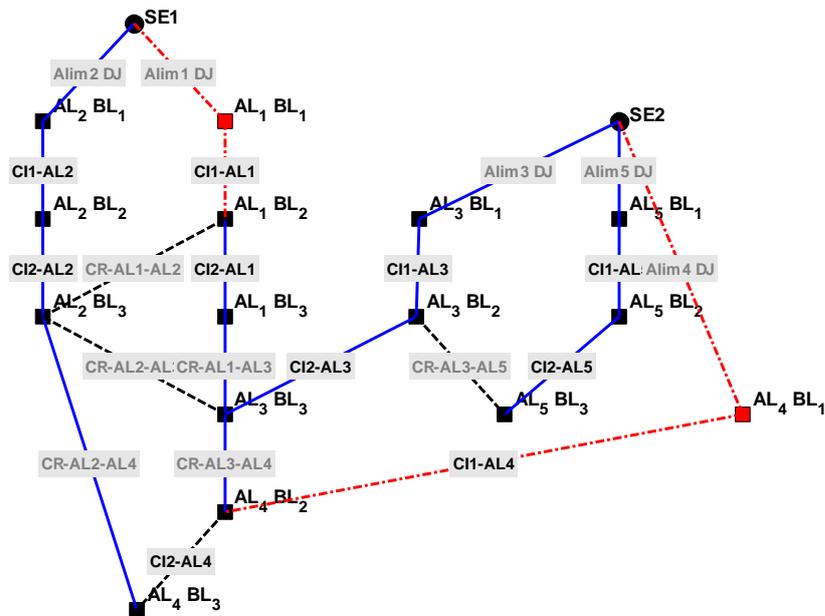


FIGURA 28 – SITUAÇÃO SEM A APLICAÇÃO DA PARCELA DA QUANTIDADE DE CHAVEAMENTOS

FONTE: O autor (2015)

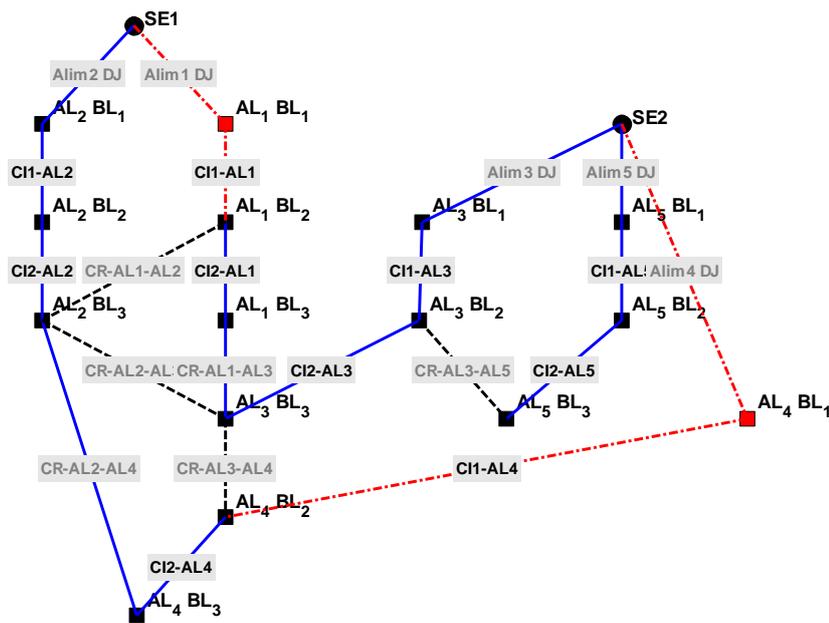


FIGURA 29 – SITUAÇÃO CONSIDERANDO TODAS AS PARCELAS
 FONTE: O autor (2015)

5.3 FALTAS SIMULTÂNEAS

Para a validação dos resultados por faltas simultâneas foram testados três casos com aspectos diferentes, em que no primeiro caso são aplicadas duas faltas em alimentadores com subestações diferentes, no segundo caso é a perda de uma subestação inteira e no terceiro caso é a falta no primeiro bloco de quatro alimentadores, no qual deixa somente um alimentador como recurso para a autorrecuperação.

5.3.1 Caso 1

Para o primeiro caso a ser analisado considera-se a aplicação de duas faltas simultâneas em alimentadores distintos. Assim, uma falta é aplicada no alimentador 2, no primeiro bloco – AL2BL1 – e a segunda falta é aplicada no alimentador 3 e também no primeiro bloco – AL3BL1. O sistema pós-falta pode ser visualizado na FIGURA 30, em que os retângulos em vermelho representam os locais onde ocorreu a falta, os blocos em amarelo são os locais a serem recuperados e os blocos em preto, estão no modo normal, ou seja, não sofreram interferência da falta.

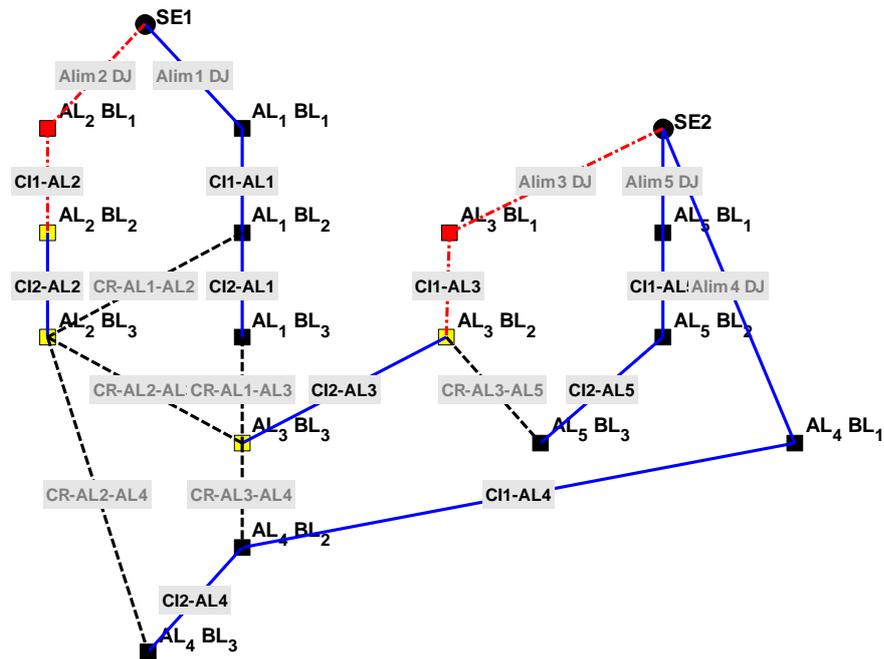
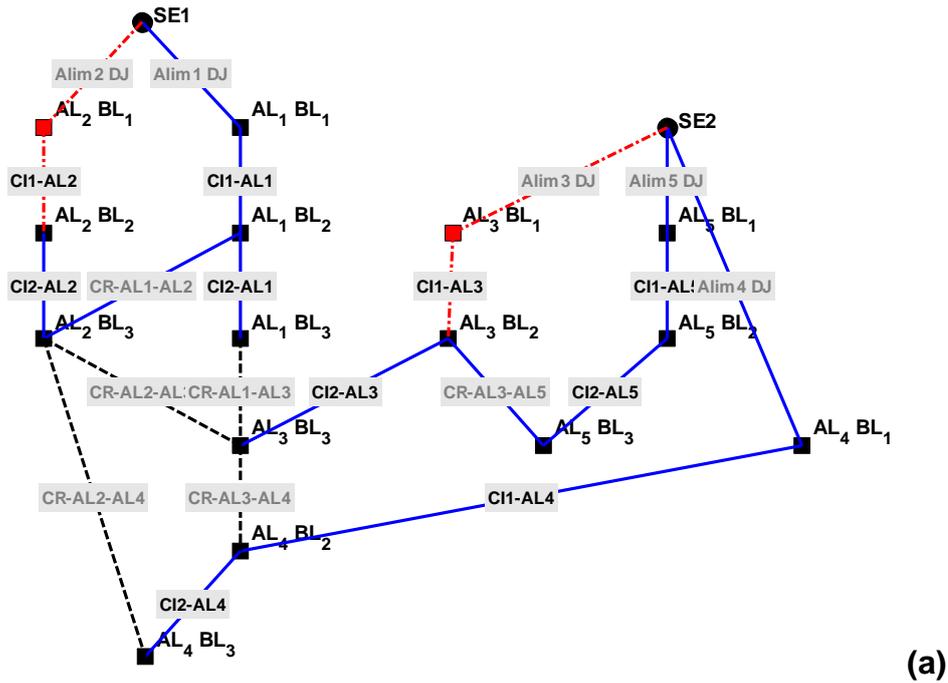


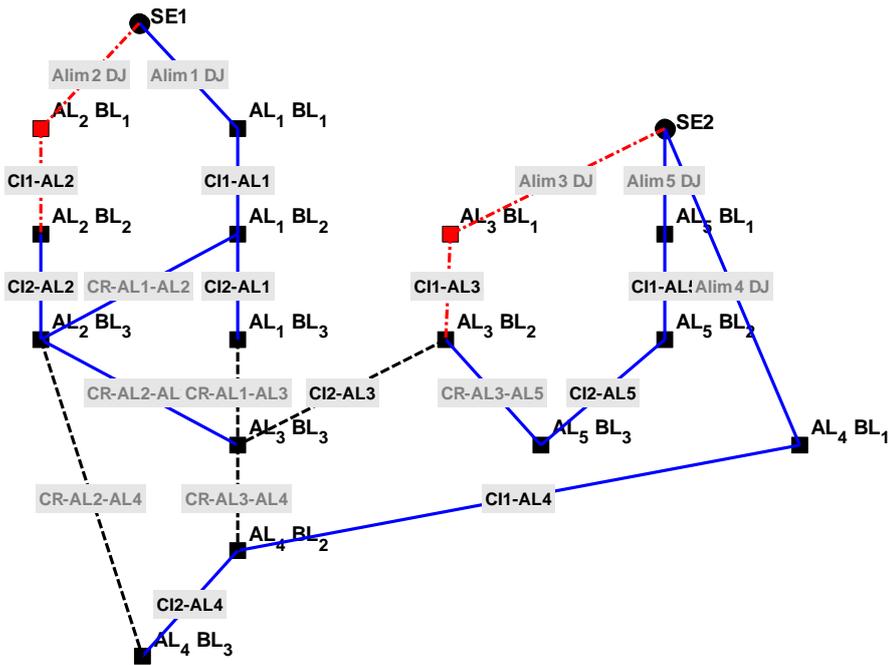
FIGURA 30 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 1

FONTE: O autor (2015)

A autorrecuperação do sistema, pelos métodos BPSO (a) e ADA (b), pode ser visualizada na FIGURA 31. O resultado se deu através dos alimentadores 1 e 5, porém cada método apresentou uma configuração de chaveamento diferente para restabelecer todos os blocos que eram necessários. Sendo que, para o BPSO o alimentador 5 recuperou os blocos do alimentador 3 e o alimentador 1 recuperou os blocos do alimentador 2, FIGURA 31a. Já para o ADA, somente o segundo bloco do alimentador 3 foi restabelecido pelo alimentador 5, os demais blocos foram restabelecidos pelo alimentador 1, FIGURA 31b. Dessa maneira, para o BPSO foram realizados dois chaveamentos, enquanto para o ADA foram realizados quatro chaveamentos.



(a)



(b)

FIGURA 31 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 1 (a) POR BPSO E (b) POR ADA
 FONTE: O autor (2015)

O tempo de processamento de cada etapa da metodologia desenvolvida pode ser observado na TABELA 11. A comparação quantitativa entre os dois métodos não é possível devido a um método ser baseado numa meta-heurística (BPSO) e o outro num algoritmo de busca em grafos (ADA). Mesmo o corte de carga sendo realizado da mesma maneira para os dois métodos, o que influencia no tempo de

processamento dessa etapa é o número de vezes que é chamado o FPO para o corte de carga, a quantidade de barras que está servindo de entrada para realizar o cálculo do fluxo e do corte, lembrando que, o cálculo do fluxo é feito em todo o alimentador e o corte somente nas barras dos blocos que foram agregados, e, a dificuldade em adaptar o sistema para a convergência do FPO.

Logo, para esse caso, o tempo maior do corte de carga para o resultado da autorrecuperação por BPSO se deu devido à dificuldade de convergir o FPO para a solução final, pois o resultado da autorrecuperação apresentava um perfil de tensão pior que no caso da autorrecuperação por ADA e precisava trazer o sistema ao modo normal e seguro com uma menor quantidade de barras para realizar o corte, dessa maneira, a convergência do FPO para o BPSO se deu através de 358 iterações, enquanto por ADA foi de 150 iterações.

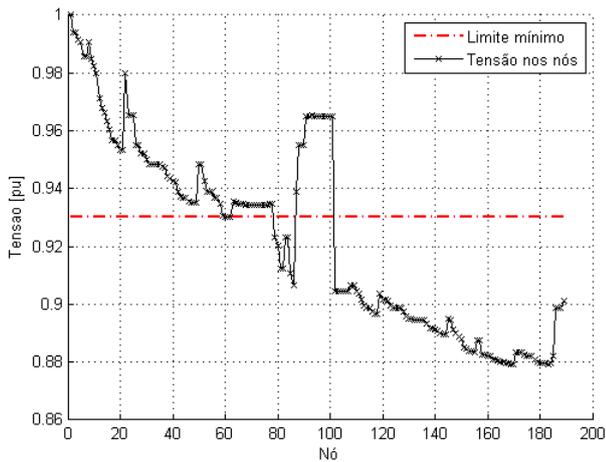
TABELA 11 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 1

Método	Isolar a falta [s]	Autorrecuperação [s]	Corte de carga [s]	Total* [s]
BPSO	0,0031	129,7992	29,8082	157,4971
ADA	0,0028	0,0185	13,0624	19,4891

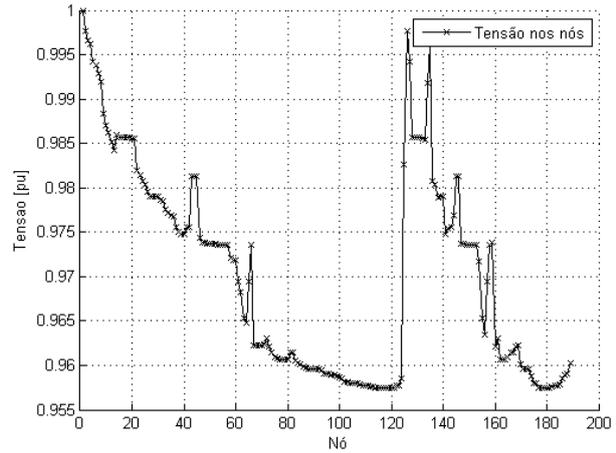
*o total do processamento da metodologia leva em conta o tempo de 6,4053s do processamento da topologia

FONTE: O autor (2015)

Não se apresentou a necessidade de se realizar o corte de carga no alimentador 1, para a autorrecuperação por BPSO, devido a não existir a extrapolação dos limites de corrente e tensão. Entretanto, o alimentador 5, conforme a FIGURA 32a, apresentou extrapolação nos limites de tensão, e conseqüentemente a necessidade de se realizar o corte de carga. Da mesma maneira é analisada para a autorrecuperação por ADA, só que neste caso o alimentador 5 não apresentou extrapolação dos limites de tensão, mas sim o alimentador 1, conforme a FIGURA 33a.



(a)

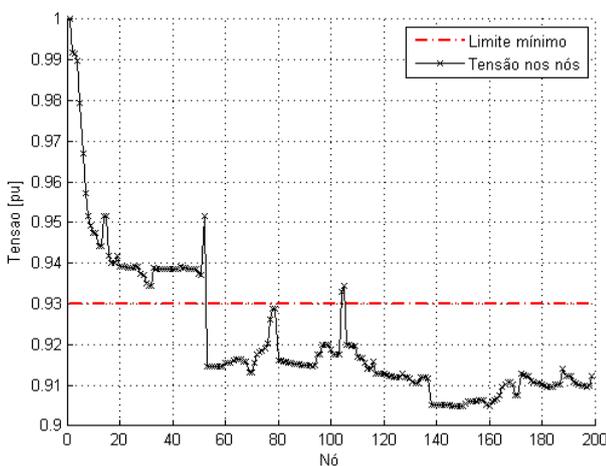


(b)

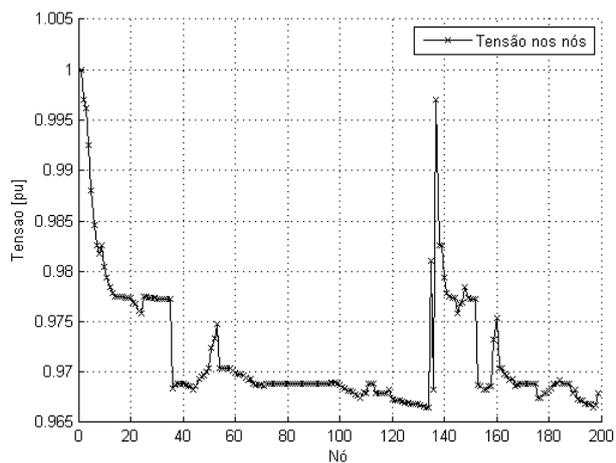
FIGURA 32 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 5 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 1 POR BPSO

FONTE: O autor (2015)

Os dois métodos de autorrecuperação para o caso 1 conseguiram restabelecer o sistema e, através do corte de carga, coloca-lo dentro dos padrões estabelecidos como normais e seguro, o novo perfil de tensão é apresentado pela FIGURA 32b para o BPSO e pela FIGURA 33b para o ADA.



(a)



(b)

FIGURA 33 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 1 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 1 POR ADA

FONTE: O autor (2015)

E para o caso da corrente, que limita o fluxo de potência na saída da subestação para um alimentador, pode ser visualizada na TABELA 12, em que a corrente e o fluxo de potência que estava acima do estipulado, consegue permanecer exatamente no valor estabelecido como limite.

TABELA 12 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 1

Método	Alimentador que restabeleceu o circuito	Sem Corte			Com Corte	
		Corrente [A]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]
BPSO	5	497,538	10,307	11,202	8,839	9,1
ADA	1	549,171	11,399	12,365	8,851	9,1

FONTE: O autor (2015)

Uma análise por carga pode ser feita na TABELA 13, em que se demonstra o total de cargas antes de aplicado a falta, em que se considera os cinco alimentadores, com um total de 26,704 MVA. Os blocos que necessitam ser restabelecidos apresentam um total de 9,973 MVA. Assim, como resultado o sistema restaurado pelo método BPSO apresenta um total de potência instalada de 23,208 MVA em comparação a 22,130 MVA pelo ADA. Isso demonstra um ganho de 1,078 MVA pela configuração final dada pelo BPSO, e conseqüentemente perdas sistêmicas maiores.

TABELA 13 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 1

Método	Sistema pré-falta [MVA]	Blocos não energizados [MVA]	Sistema restaurado com corte de carga[MVA]	Perdas sistêmicas [MVA]
BPSO	26,704	9,973	23,208	1,714
ADA			22,130	1,620

FONTE: O autor (2015)

O acúmulo acentuado e sem diferença das áreas no início da FIGURA 34a e da FIGURA 34b estão relacionado com o alimentador base usado para restabelecer os blocos do sistema, devido a essas barras não poderem ser cortadas, portanto, não se apresenta diferença entre a área acumulada sem corte de carga com a área acumulada após o corte de carga.

Na FIGURA 34 é possível notar a pequena diferença entre o acumulado de potência aparente antes e depois do corte de carga, onde estabeleceu um corte 14,240% para o BPSO no alimentador 5 e 22,354% para o ADA no alimentador 1.

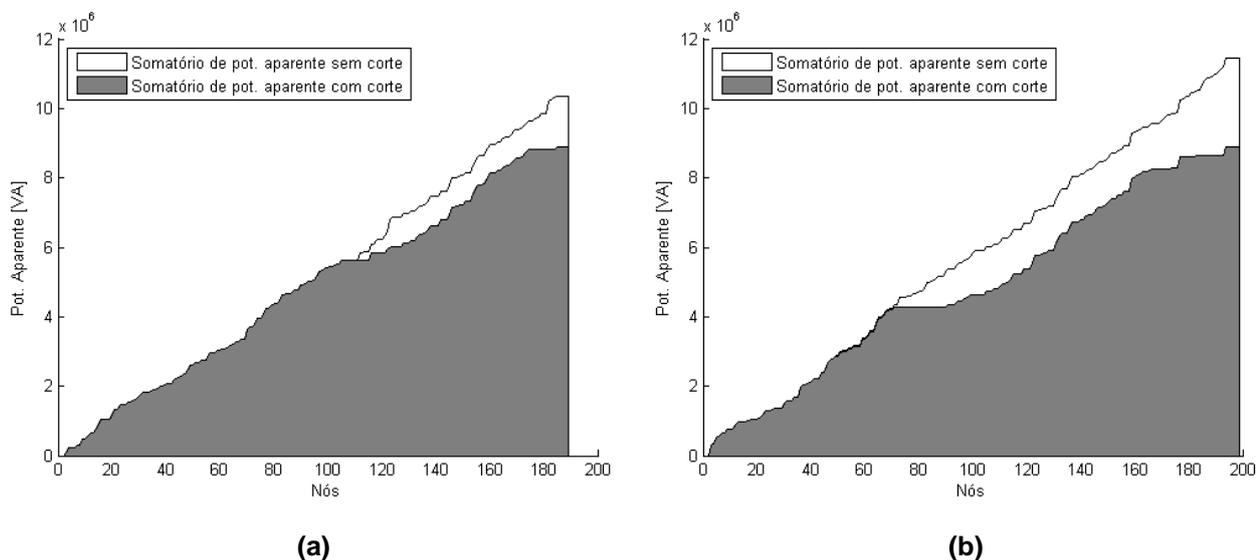


FIGURA 34 – COMPARATIVO DO ACUMULADO DE POTÊNCIA APARENTE ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 1 (a) POR BPSO – ALIMENTADOR 5 E (b) POR ADA – ALIMENTADOR 1

FONTE: O autor (2015)

5.3.2 Caso 2

Para o caso 2 aplicou-se a falta na subestação SE2, com a intenção de analisar como serão os chaveamentos resultantes a partir dos demais alimentadores que não apresentaram nenhuma falta. O sistema pós-falta é demonstrado na FIGURA 35, onde se tem novos blocos para serem recuperados e a subestação SE2 isolada.

Da mesma maneira que no caso 1, os dois métodos de autorrecuperação apresentaram chaveamentos diferentes para recuperar o sistema. Em ambos os casos todos os blocos foram restabelecidos, sendo que no caso com BPSO os blocos do alimentador 4 foram restabelecidos pelo alimentador 2 e os blocos dos alimentadores 3 e 5 foram pelo alimentador 1. Na autorrecuperação por ADA o alimentador 2 reestabeleceu todos os blocos dos alimentadores 3, 4 e 5, isso se deu devido a seleção dos blocos a serem recuperados. Ou seja, como o método inicia-se com o bloco de maior carga, neste caso o bloco AL4BL3, o menor caminho seria através de CR-AL2-AL4 e depois CR-AL1-AL2, entretanto, como já existe uma chave

fechada que faz ligação com a SE1, deve-se, então, parar o caminho até o ponto AL2BL3, para não fechar um laço entre os alimentadores 1 e 2.

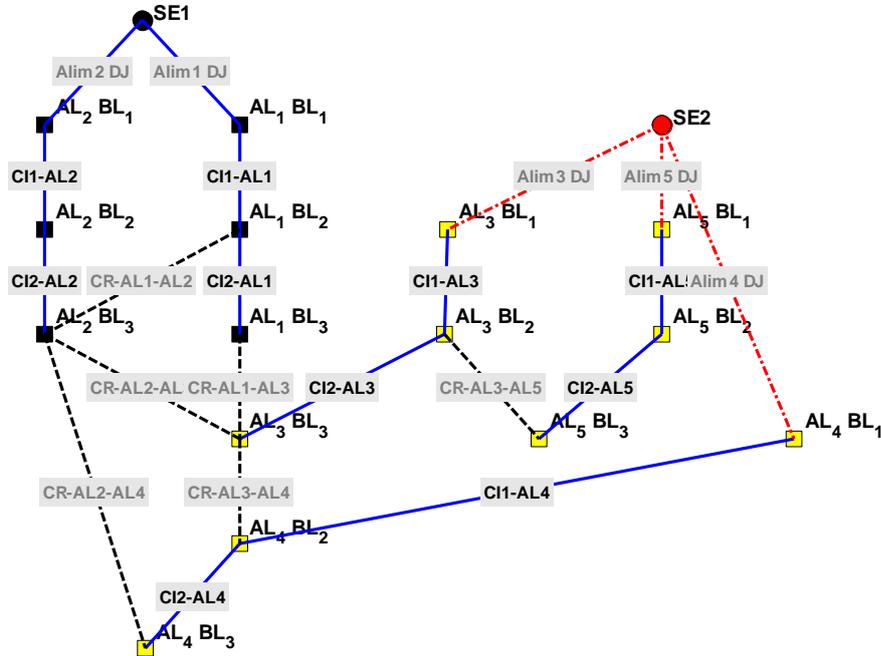


FIGURA 35 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 2

FONTE: O autor (2015)

O próximo bloco a ser reestabelecido é o AL3BL3, o menor caminho seria as chaves na sequência CR-AL2-AL3 e CR-AL1-AL2, porém como ocorrido no caso anterior, finaliza-se o caminho no bloco AL2BL3, onde já tem uma aresta que faz a ligação com a SE1. Os demais blocos vão se encaixando no sistema de forma a sempre evitar o laço ou paralelismo, por isso, o alimentador 1 acabou não adquirindo nenhum bloco para ser restabelecido. Dessa forma, o ADA realizou cinco chaveamentos, enquanto o BPSO somente comutou três chaves para recuperar os blocos do sistema.

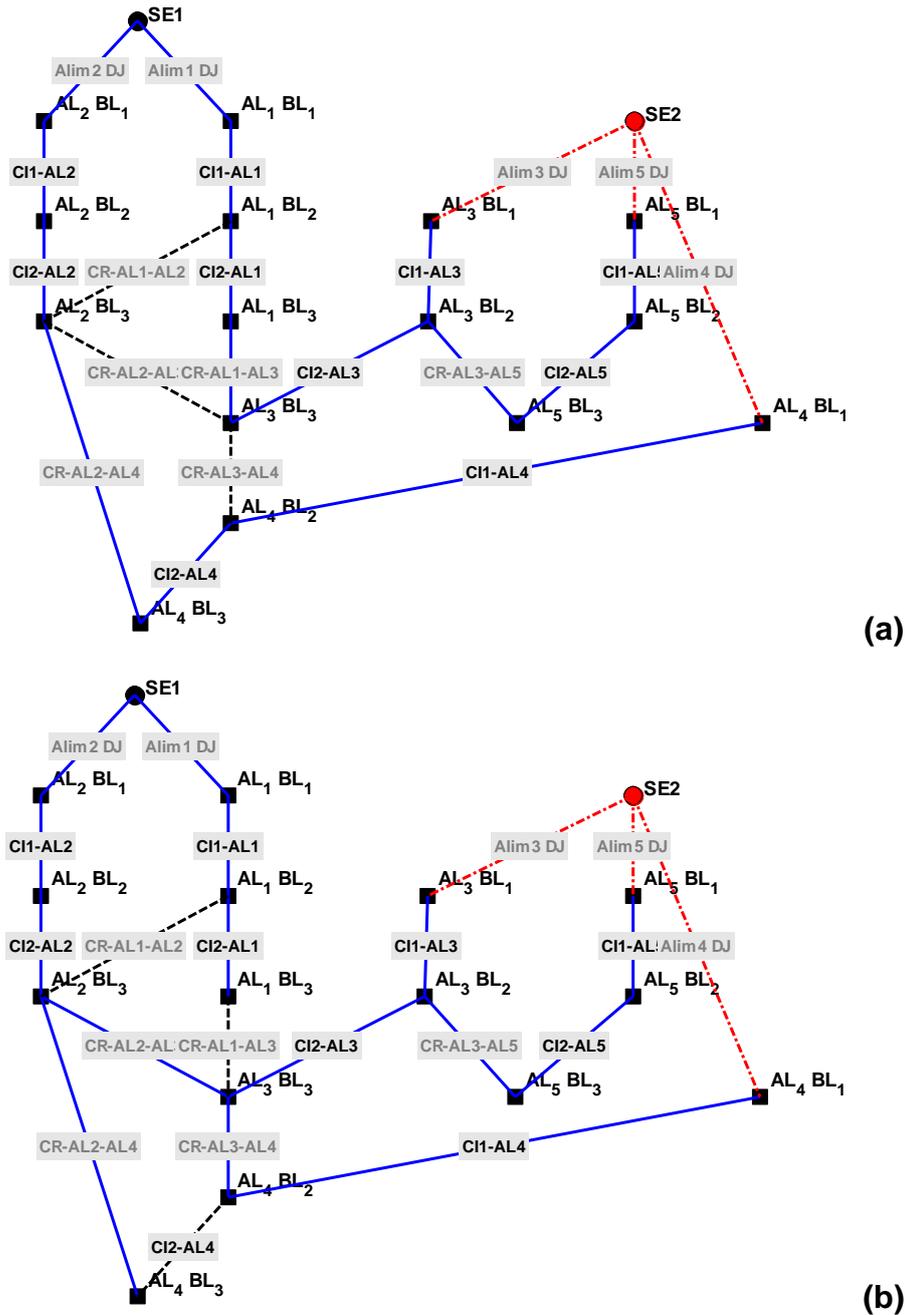


FIGURA 36 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 2 (a) POR BPSO E (b) POR ADA
 FONTE: O autor (2015)

Os tempos de processamento podem ser visualizados na TABELA 14, que neste caso o tempo despendido pelo corte de carga é muito maior para o método ADA devido a quantidade de barras e pelo perfil e o tempo para convergir o sistema, mesmo que para o caso do BPSO tenha sido necessário a realização do corte de carga em dois alimentadores.

TABELA 14 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 2

Método	Isolar a falta [s]	Autorrecuperação [s]	Corte de carga [s]	Total* [s]
BPSO	0,0399	117,9326	32,1598	156,5378
ADA	0,0019	0,0686	56,4734	62,9494

*o total do processamento da metodologia leva em conta o tempo de 6,4053s do processamento da topologia

FONTE: O autor (2015)

O resultado do BPSO apresentou sobrecarregamento nos alimentadores 1 e 2, e conseqüentemente extrapolação nos limites de corrente, TABELA 15, e da tensão nas FIGURAS 37a e 37c. Para o ADA somente ocorreu extrapolação dos limites no alimentador 2, por somente ele ter sido utilizado para recuperar os demais blocos, FIGURA 38a.

Mais uma vez o corte de carga se mostrou eficiente para que o sistema recuperado voltasse dentro dos limites estabelecidos, conforme as FIGURAS 37b, 37d e 38b. Em todos os alimentadores que necessitaram do corte de carga, o fluxo de potência ficou dentro do limite estipulado de 9.1 MVA, sendo que para isso necessitou de um corte de 36,363% para o alimentador 1 e de 29,721% para o alimentador 2 no caso da autorrecuperação por BPSO. Por ADA o corte estabelecido foi de 62,267%, conforme os dados da TABELA 15.

TABELA 15 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 2

Método	Alimentador que restabeleceu o circuito	Sem Corte			Com Corte	
		Corrente [A]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]
BPSO	1	698,247	13,899	15,722	8,845	9,1
	2	606,226	12,699	13,650	8,924	9,1
ADA	2	1394,123	23,699	31,391	8,942	9,1

FONTE: O autor (2015)

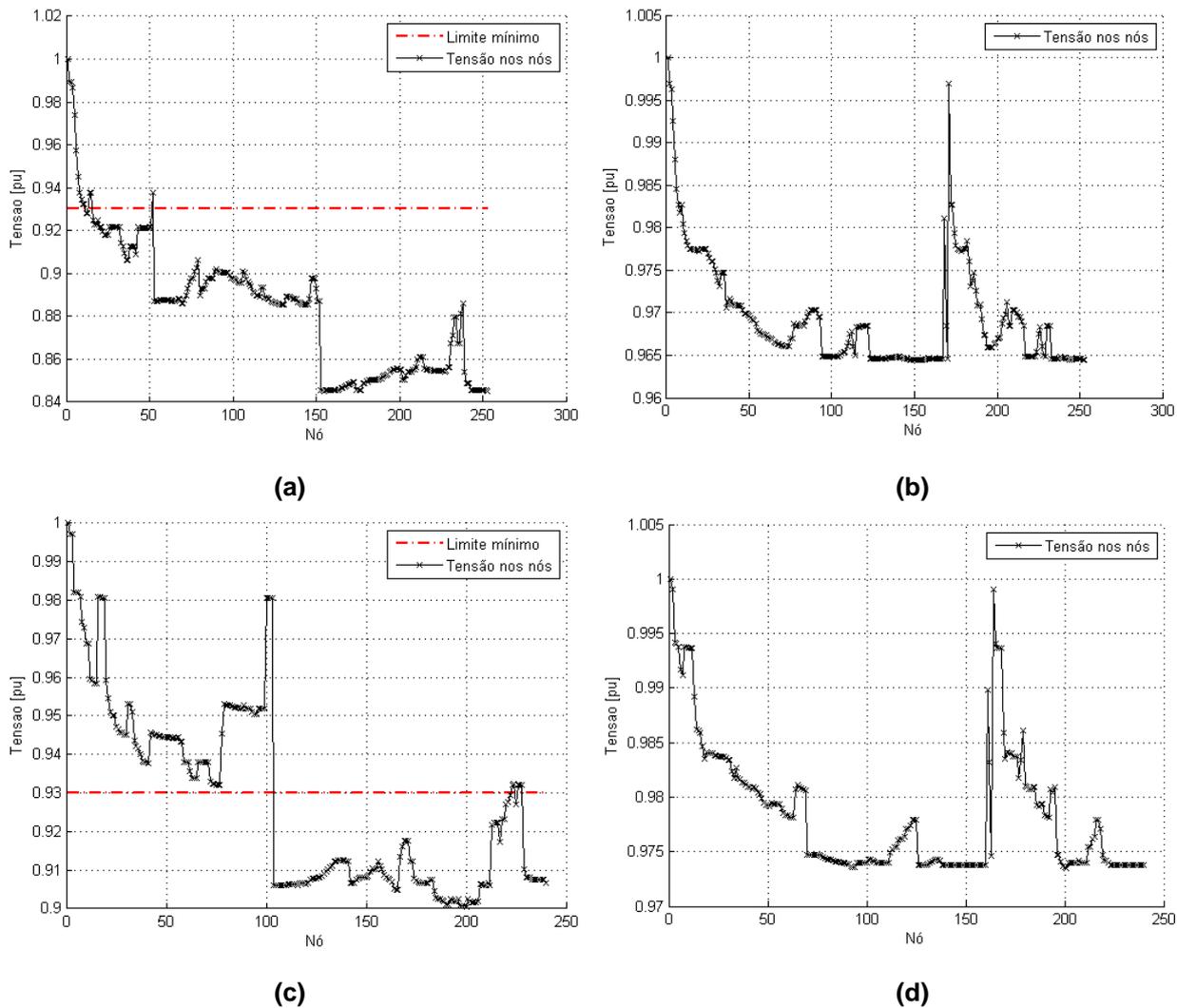


FIGURA 37 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 1 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA E DO ALIMENTADOR 2 ANTES (c) E DEPOIS (d) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 2 POR BPSO

FONTE: O autor (2015)

Como esperado em razão do chaveamento de cada método, de acordo com a TABELA 16 a autorrecuperação por ADA se apresentou muito mais ineficiente neste caso por ter restabelecido o sistema com somente um alimentador, além de apresentar também as maiores perdas, logo o melhor chaveamento foi por BPSO, que conseguiu recuperar 33,348% a mais de carga com 40,965% a menos de perda sistêmica.

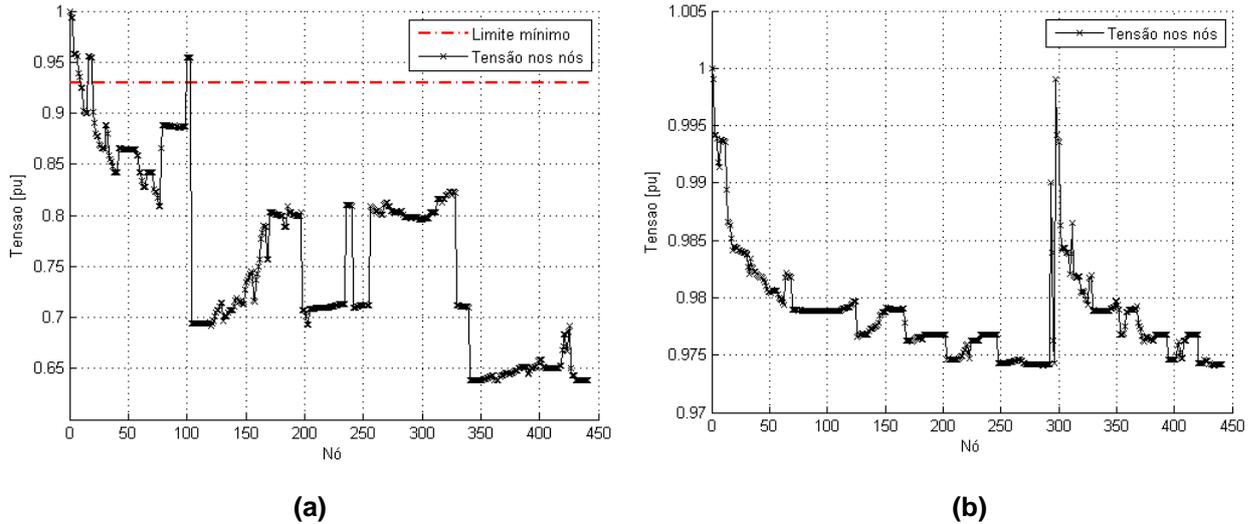


FIGURA 38 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 2 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 2 POR ADA.

FONTE: O autor (2015)

TABELA 16 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 2

Método	Sistema pré-falta [MVA]	Blocos não energizados [MVA]	Sistema restaurado com corte de carga [MVA]	Perdas sistêmicas [MVA]
BPSO	26,704	17,467	17,770	2,766
ADA			11,844	4,683

FONTE: O autor (2015)

A diferença entre os chaveamentos também é demonstrada no corte de carga, pois se realizou um corte de 8,8287 MVA das cargas restauradas por BPSO e um corte de 14,7573 MVA por ADA. De forma visual pode-se notar a grande diferença das áreas apresentadas na FIGURA 39, em que o alimentador 2, mais sobrecarregado, necessitou realizar um maior corte.

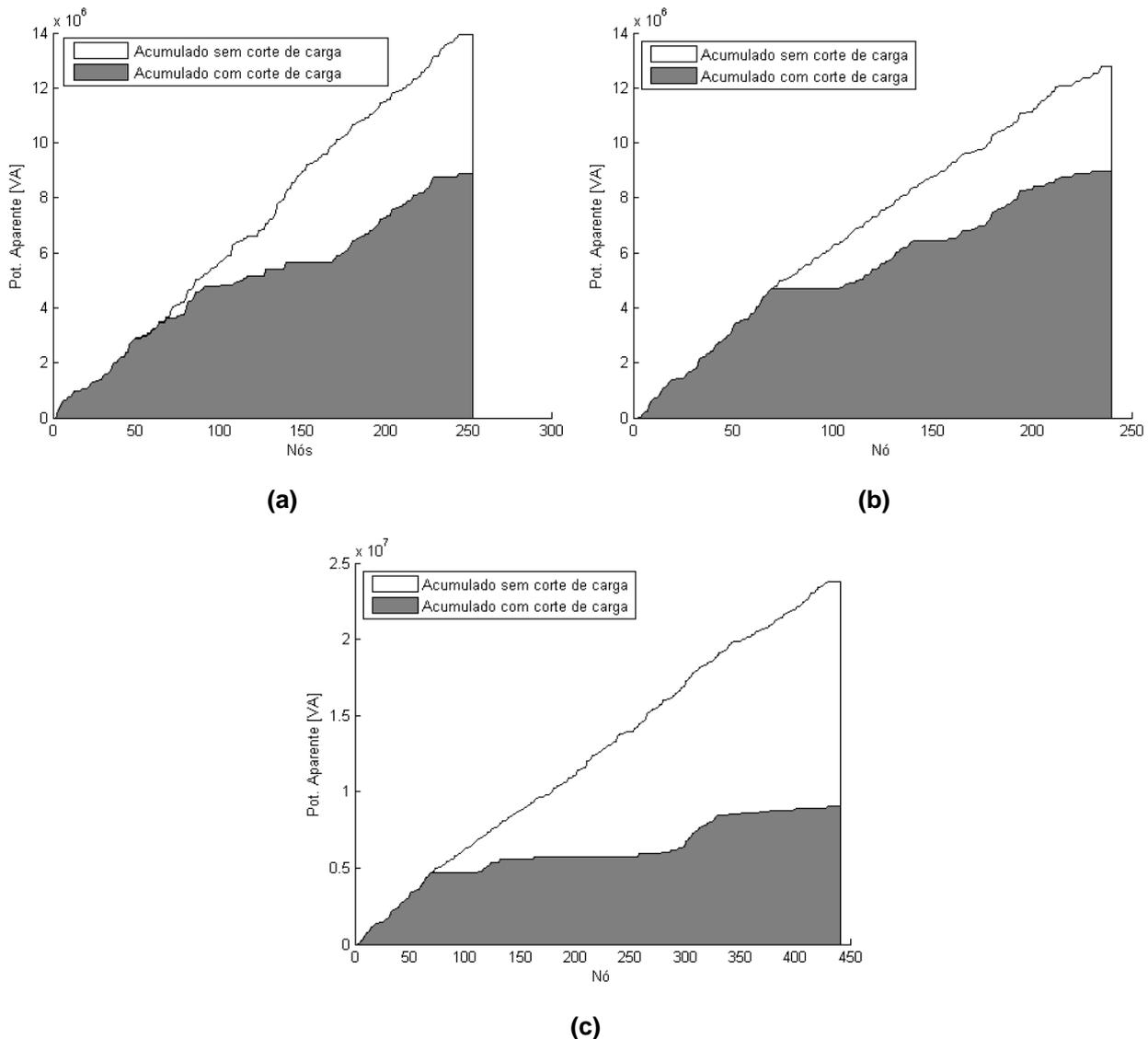


FIGURA 39 – COMPARATIVO DO ACUMULADO DE POTÊNCIA APARENTE ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 2 (a) POR BPSO – ALIMENTADOR 1, (b) POR BPSO – ALIMENTADOR 2 E (c) POR ADA – ALIMENTADOR 2
 FONTE: O autor (2015)

5.3.3 Caso 3

O caso 3 explora uma situação crítica que o sistema poderia assumir, onde o primeiro bloco dos alimentadores 1,2,3 e 5 sofressem uma falta e o alimentador que apresenta uma maior concentração de carga tivesse que ser usado para reestabelecer o sistema, neste caso o alimentador 4. O pós-falta do sistema pode ser visualizado na FIGURA 40, onde se apresenta em vermelho os blocos AL1BL1, AL2BL1, AL3BL1 e AL5BL1 a falta e em amarelo os blocos que devem ser reestabelecidos.

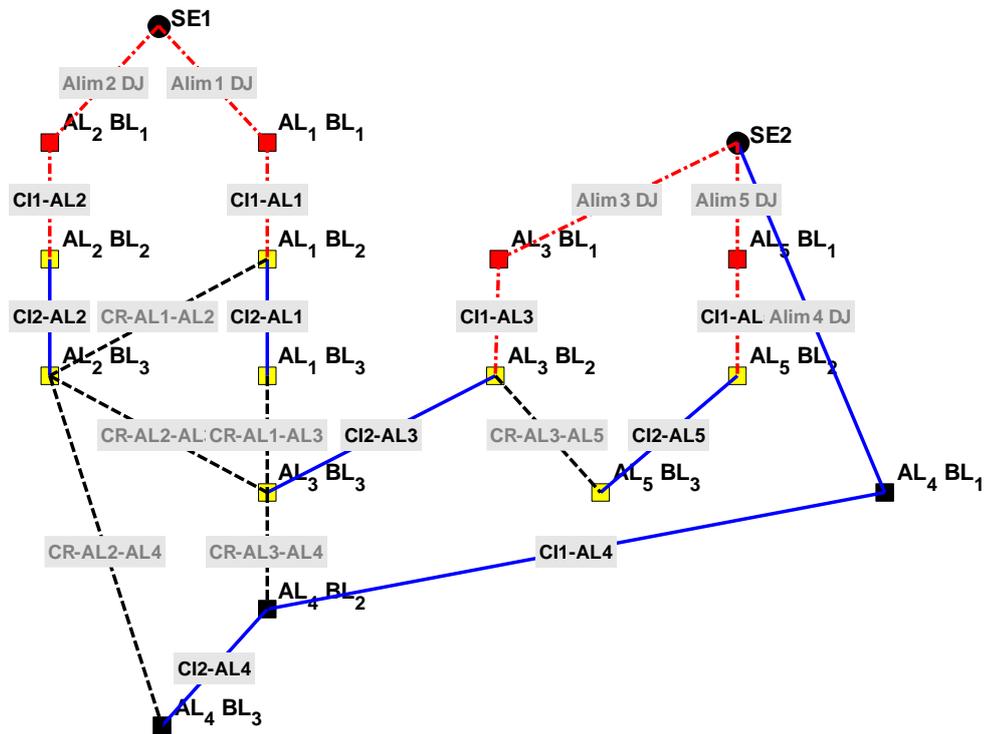


FIGURA 40 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 3

FONTE: O autor (2015)

A autorrecuperação por BPSO se mostrou mais eficiente em número de chaveamentos realizados para restabelecer os blocos sem energia, onde com apenas quatro chaveamentos pode suprir os oito blocos, já por ADA foram necessários seis chaveamentos para restabelecer a mesma quantidade de blocos, a diferença entre os chaveamentos é explicitada na FIGURA 41.

A quantidade de chaveamentos dada por ADA pode ser explicada através dos primeiros blocos a serem restabelecidos AL3BL3 (3,4961 MVA) e AL2BL3 (3,0049 MVA). Para o primeiro bloco, o menor caminho é através de CR-AL3-AL4 de valor zero e para-se a análise neste ponto devido à próxima chave estar fechada. Para o próximo bloco, poderia ser restabelecido através de CR-AL2-AL4 ou CR-AL2-AL3 + CR-AL3-AL4, como valor do peso em CR-AL2-AL4 é maior (3,9422) contra (3,4961 + 0), opta-se, então, pelo caminho que utiliza as chaves CR-AL2-AL3 + CR-AL3-AL4. A partir disso os demais blocos se encaixam a base montada por AL2BL3 e AL3BL3.

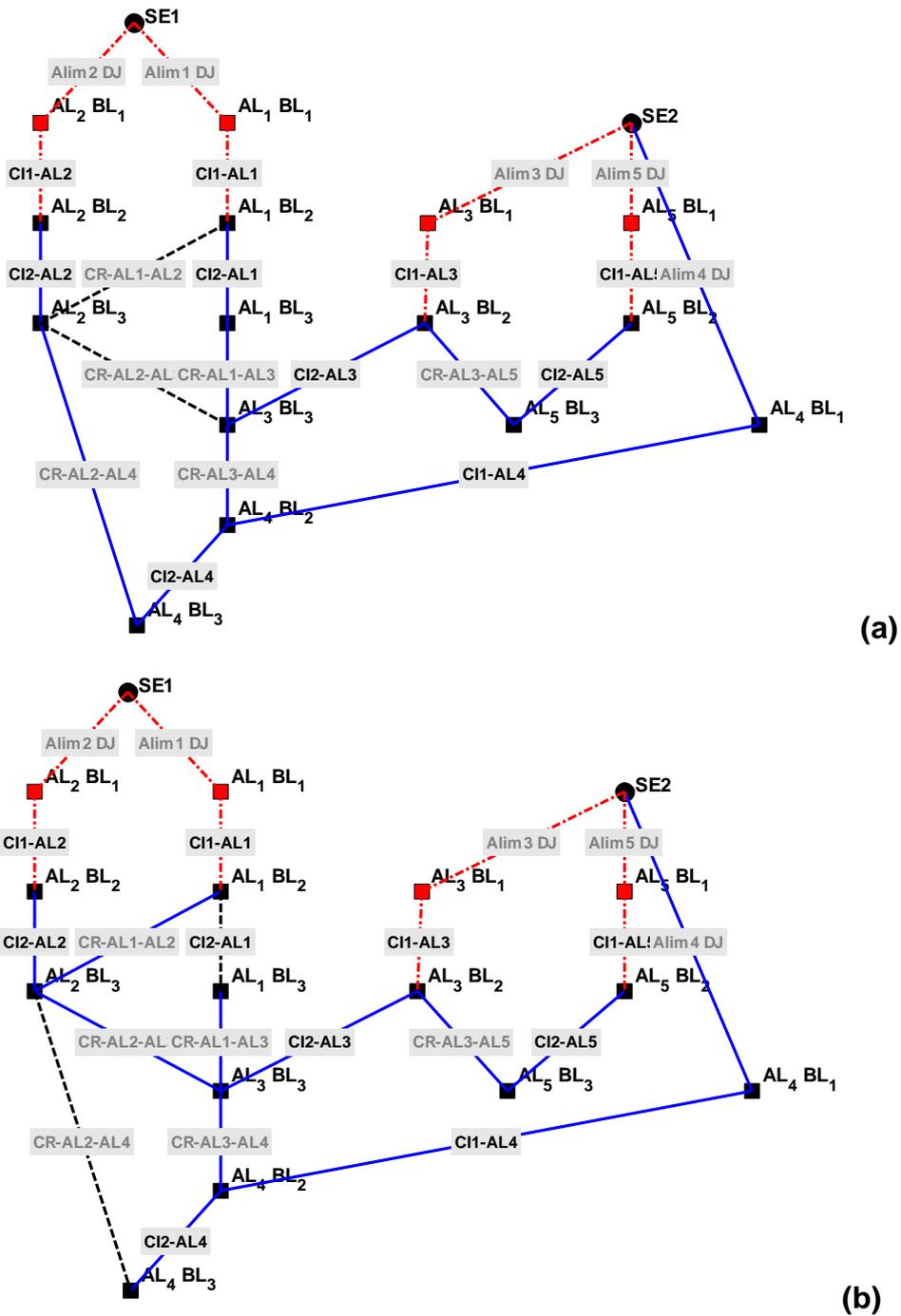


FIGURA 41 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 3 (a) POR BPSO E (b) POR ADA
 FONTE: O autor (2015)

Os tempos de processamento de cada etapa são apresentados na TABELA 17, e reforça que a diferença entre os tempos para a autorrecuperação é devido à diferença dos métodos para encontrar a solução, logo impossibilitando de fazer comparações, entretanto para o corte de carga é possível à comparação, por somente os dados de entrada serem diferentes. Portanto como o corte de carga neste caso

contém o mesmo número de barras, a diferença do chaveamento entre os métodos influenciou na convergência do FPO, pois a solução por ADA apresentou um sistema muito mais crítico do que pelo BPSO.

TABELA 17 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 3

Método	Isolar a falta [s]	Autorrecuperação [s]	Corte de carga [s]	Total* [s]
BPSO	0,0020	126,8788	38,6307	171,9170
ADA	0,0020	0,3193	41,3485	48,0752

*o total do processamento da metodologia leva em conta o tempo de 6,4053s do processamento da topologia

FONTE: O autor (2015)

Como esperado nos dois casos houve a extrapolação dos limites, conforme demonstrado nas FIGURAS 42a e 43a para a tensão, e de corrente na TABELA 18. O perfil de tensão mostrou um maior afundamento comparado com os casos anteriores, mas que ficou dentro dos limites após o corte de carga, tanto para o limite de fluxo, TABELA 18, quanto para o limite de tensão nas FIGURAS 42b e 43b. Sendo que o corte de carga necessário, para deixar o sistema no modo normal e seguro, tece um percentual aproximado em ambos os casos, sendo de 59,641% para o método BPSO e 59,631% para o ADA.

TABELA 18 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 3

Método	Alimentador que restabeleceu o circuito	Sem Corte			Com Corte	
		Corrente [A]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]
BPSO	4	1257,699	21,816	28,319	8,804	9,1
ADA	4	1326,933	21,816	29,878	8,806	9,1

FONTE: O autor (2015)

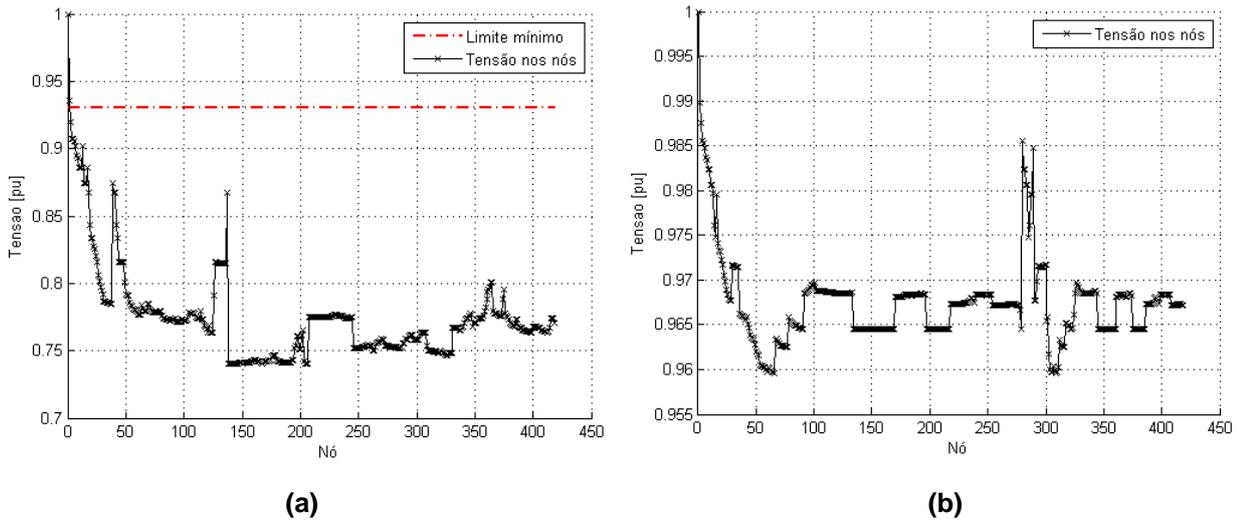


FIGURA 42 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 4 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 3 POR BPSO
 FONTE: O autor (2015)

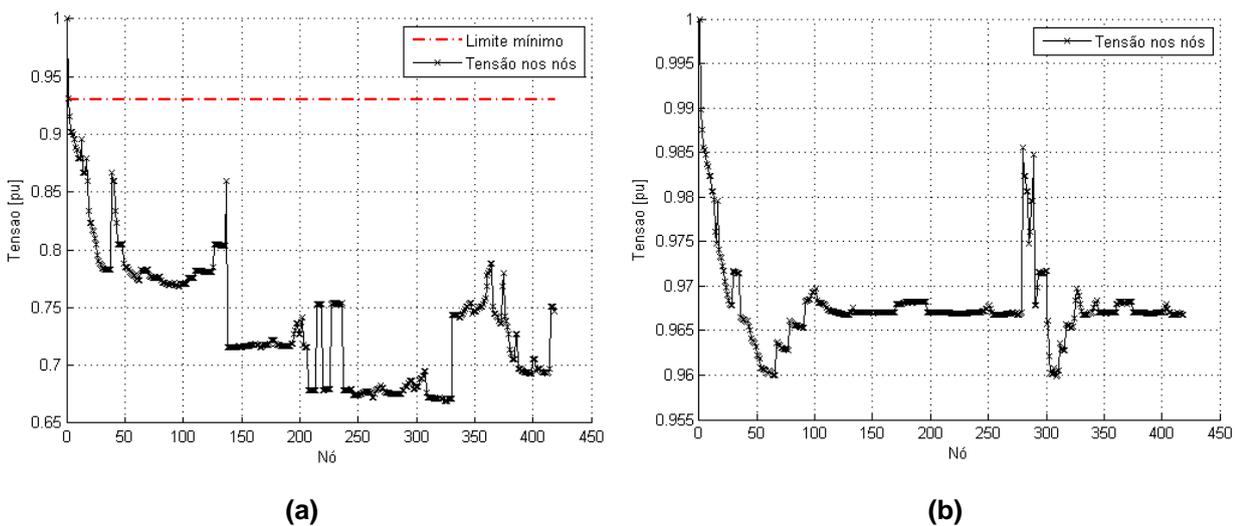


FIGURA 43 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 4 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 3 POR ADA
 FONTE: O autor (2015)

Como neste teste somente existia um alimentador para ser usado no restabelecimento dos blocos, os dois sistemas apresentaram valores próximos da carga recuperada e das perdas, ver TABELA 19, sendo o motivo desse diferencial a configuração das chaves que cada método estabeleceu.

TABELA 19 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 3

Método	Sistema pré-falta [MVA]	Blocos não energizados [MVA]	Sistema restaurado com corte de carga [MVA]	Perdas sistêmicas [MVA]
BPSO	26,704	15,486	8,804	4,209
ADA			8,806	4,587

FONTE: O autor (2015)

A numeração das barras normalmente é feita utilizando-se uma numeração menor para as barras mais próximas da subestação e aumentando-se a numeração conforme se distancia da subestação. Os dois gráficos da FIGURA 44 mostram que existe um aumento no acúmulo de potência nas barras com um nó de maior numeração (destacadas em vermelho), devido a consideração da minimização das perdas pelo corte de carga. Os blocos mais próximos do alimentador 4 que foram restabelecidos, como AL3BL3 e AL2BL3 (numeração maior – destacadas em vermelho), tiveram as barras mantidas, enquanto os blocos mais longe do alimentador 4, tiveram suas barras cortadas (destacadas em azul).

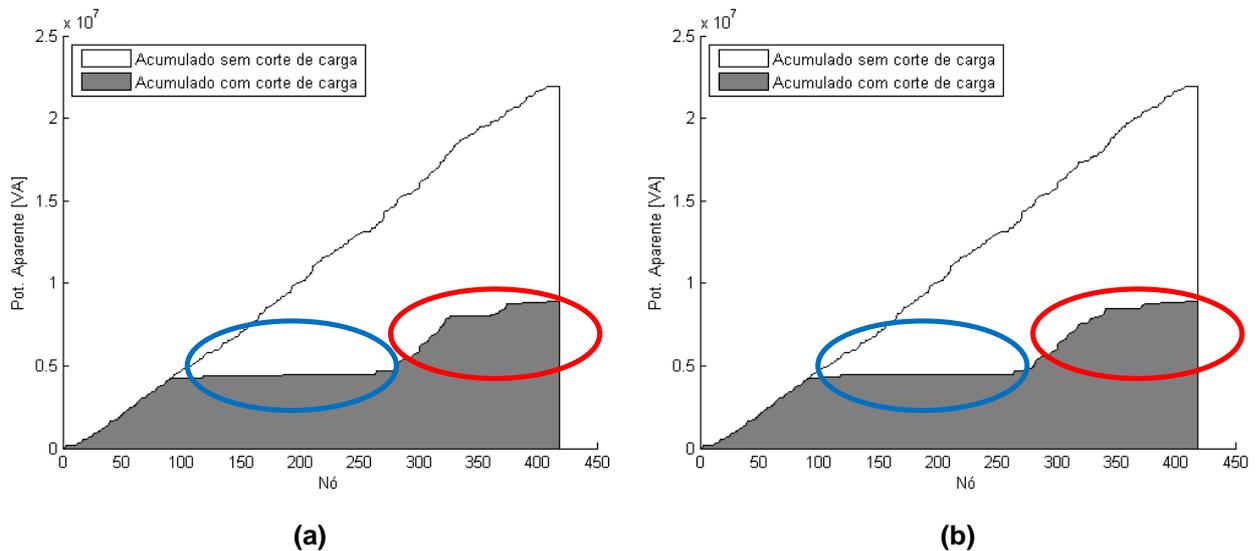


FIGURA 44 – COMPARATIVO DO ACUMULADO DE POTÊNCIA APARENTE ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 3 (a) POR BPSO – ALIMENTADOR 4 E (b) POR ADA – ALIMENTADOR 4

FONTE: O autor (2015)

5.4 FALTAS SEQUENCIAIS

Uma falta é tida como sequencial quando do sistema em modo normal aplica-se uma falta, realiza-se a autorrecuperação e após o sistema recuperado (normal recuperado), ocorre uma nova falta, sendo então, que a topologia de partida para a segunda autorrecuperação é o sistema normal recuperado da primeira falta, portanto, o pós-falta de um método pode ser diferente do outro método de autorrecuperação. Para esse caso testa-se um caso com três faltas, presentes em alimentadores diferentes.

5.4.1 Caso 4

Neste caso a primeira falta é aplicada arbitrariamente no alimentador cinco no segundo bloco AL5BL2, como resultado do sistema pós-falta, o primeiro bloco permanece em situação normal e o terceiro bloco apresenta falta de energia, desencadeando a necessidade de ser recuperado, conforme a FIGURA 45.

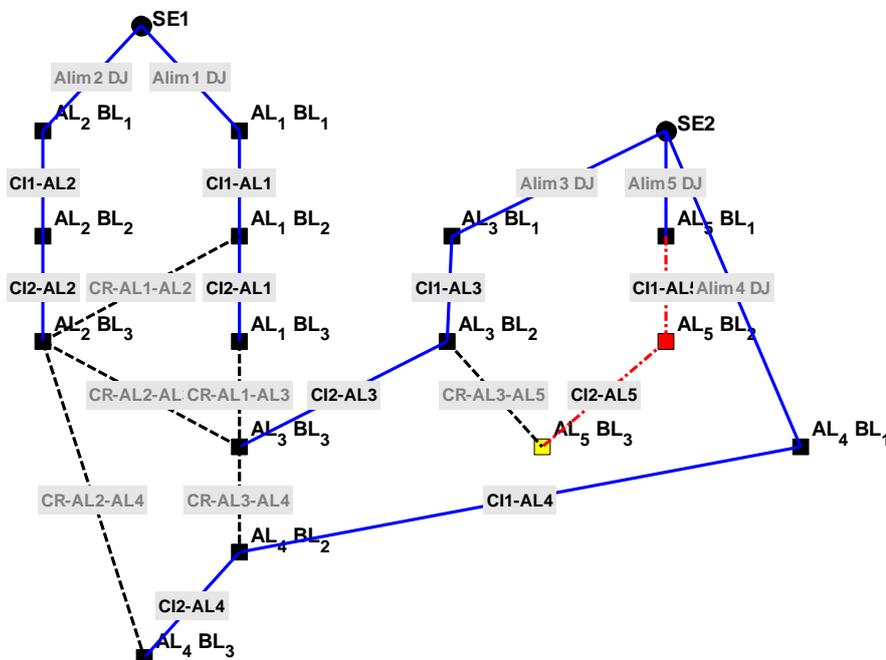
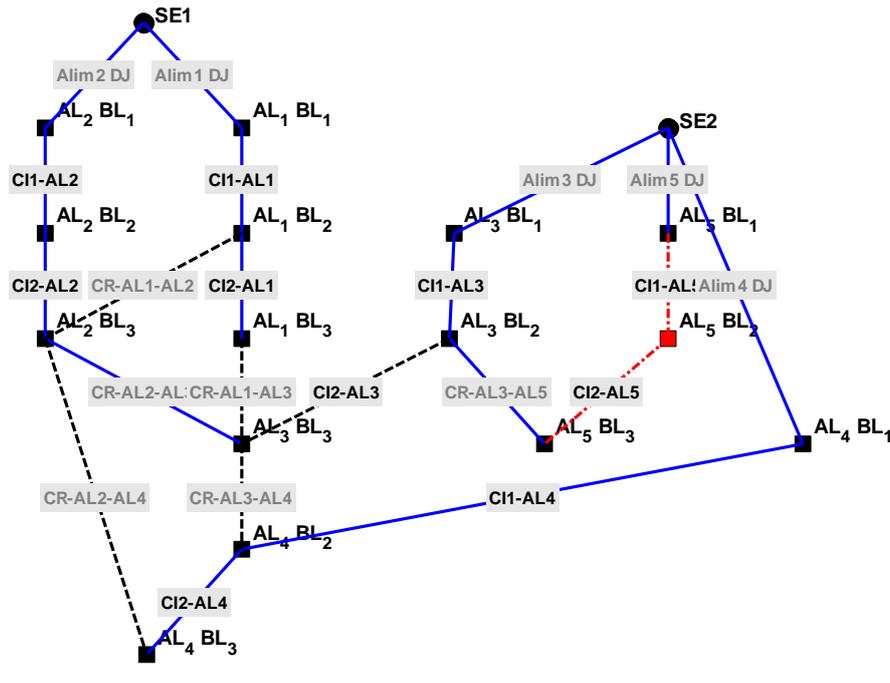


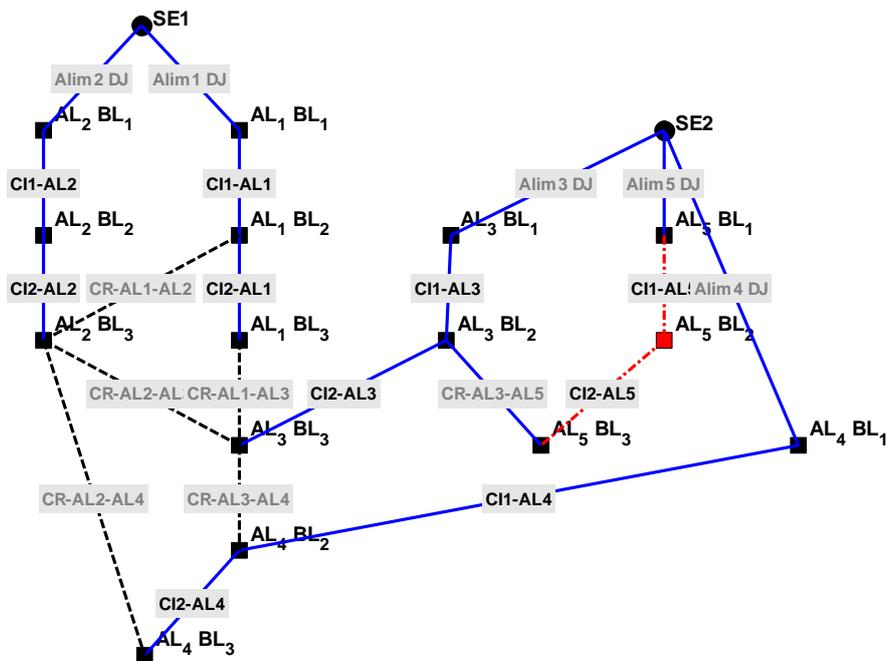
FIGURA 45 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 4.1

FONTE: O autor (2015)

A autorrecuperação para esse caso se mostrou mais eficiente com o método de ADA, onde solucionou o problema com um único chaveamento, CR-AL3-AL5. Já o método BPSO acabou utilizando de três chaveamentos para a autorrecuperação CR-AL3-AL5, CR-AL2-AL3 e CI2-AL3, pelo motivo do BPSO não ter alcançado um ótimo ideal para resolver o caso dentro dos três minutos.



(a)



(b)

FIGURA 46 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 4.1 (a) POR BPSO E (b) POR ADA

FONTE: O autor (2015)

Os tempos de processamento mostrados na TABELA 20 apresentam o que já vinha sendo visto nos casos de faltas simultâneas, em que a autorrecuperação por uma meta-heurística dispense muito mais tempo do que por uma técnica de busca em grafo. E neste caso o corte de carga é somente considerado pelo método BPSO que necessitou realizar um corte em virtude do chaveamento final.

TABELA 20 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 4.1

Método	Isolar a falta [s]	Autorrecuperação [s]	Corte de carga [s]	Total* [s]
BPSO	0,0047	106,8474	5,1286	118,3862
ADA	0,0042	0,0128	-	6,5224

*o total do processamento da metodologia leva em conta o tempo de 6,4053s do processamento da topologia

FONTE: O autor (2015)

A autorrecuperação para esse caso se mostrou mais eficiente com o método de ADA que não necessitou da realização do corte de carga. Uma vez que, o método BPSO necessitou realizar o corte de carga para o alimentador 2, tal necessidade é devido a somente ter extrapolado o limite de corrente conforme a TABELA 21, já que o limite de tensão não foi ultrapassado, conforme apresentado na FIGURA 47a. A diferença percebida entre as imagens da FIGURA 47 é devido a dois fatores, um é a nomeação dos nós para o fluxo apresentado em (a) ser diferente do apresentado em (b), pelo motivo de adaptação na entrada de dados de um método para o outro, o outro motivo é pelo fato de ter havido o corte de carga para se adequar o fluxo de potência dentro dos limites.

TABELA 21 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.1

Método	Alimentador que restabeleceu o circuito	Sem Corte			Com Corte	
		Corrente [A]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]
BPSO	2	453,8639	9,7930	10,2195	8,9333	9,1
ADA	-	-	-	-	-	-

FONTE: O autor (2015)

Outra comparação que mostra a eficiência do chaveamento fornecido pelo método ADA para esse caso, é que foi possível restabelecer 0,908 MVA a mais que pelo método BPSO e também com menores perdas, conforme a TABELA 22.

TABELA 22 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 4.1

Método	Sistema pré-falta [MVA]	Blocos não energizados [MVA]	Sistema restaurado com corte de carga [MVA]	Perdas sistêmicas [MVA]
BPSO	26,704	2,148	24,377	0,943
ADA			25,275	0,865

FONTES: O autor (2015)

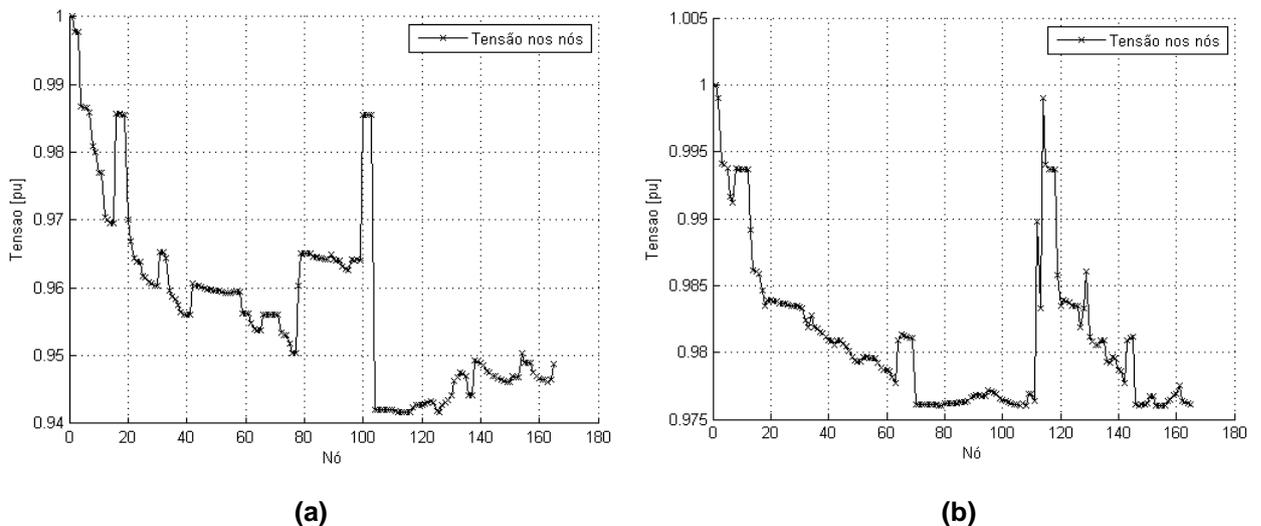
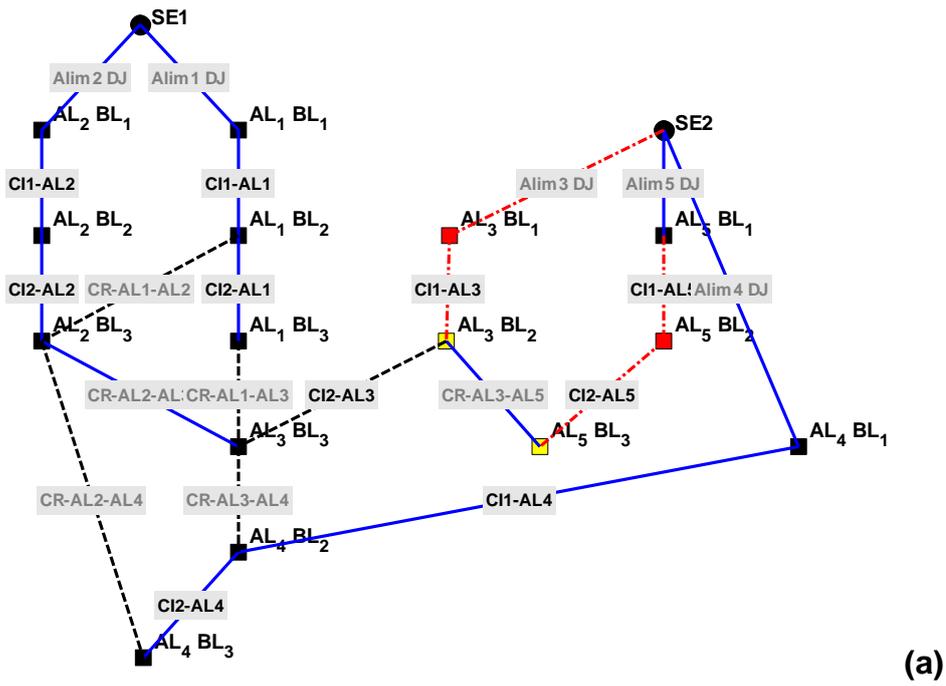


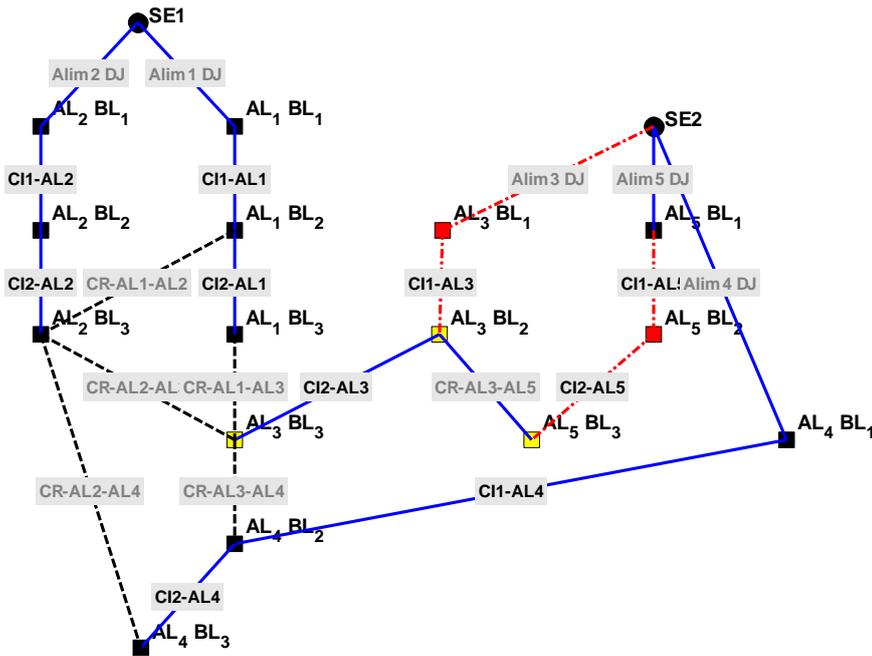
FIGURA 47 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 2 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.1 POR BPSO

FONTES: O autor (2015)

Como o sistema recuperado em cada método apresentou uma topologia diferente, a FIGURA 48 apresenta os dois sistemas pós-falta, em que o sistema recuperado por BPSO apresenta dois blocos sem energia AL3BL2 e AL5BL3, e no ADA existe a presença de três blocos AL3BL2, AL3BL3 e AL5BL2 para serem restabelecidos.



(a)



(b)

FIGURA 48 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 4.2 CONSIDERANDO O RESULTADO DO BPSO (a) DO ADA (b)

FONTE: O autor (2015)

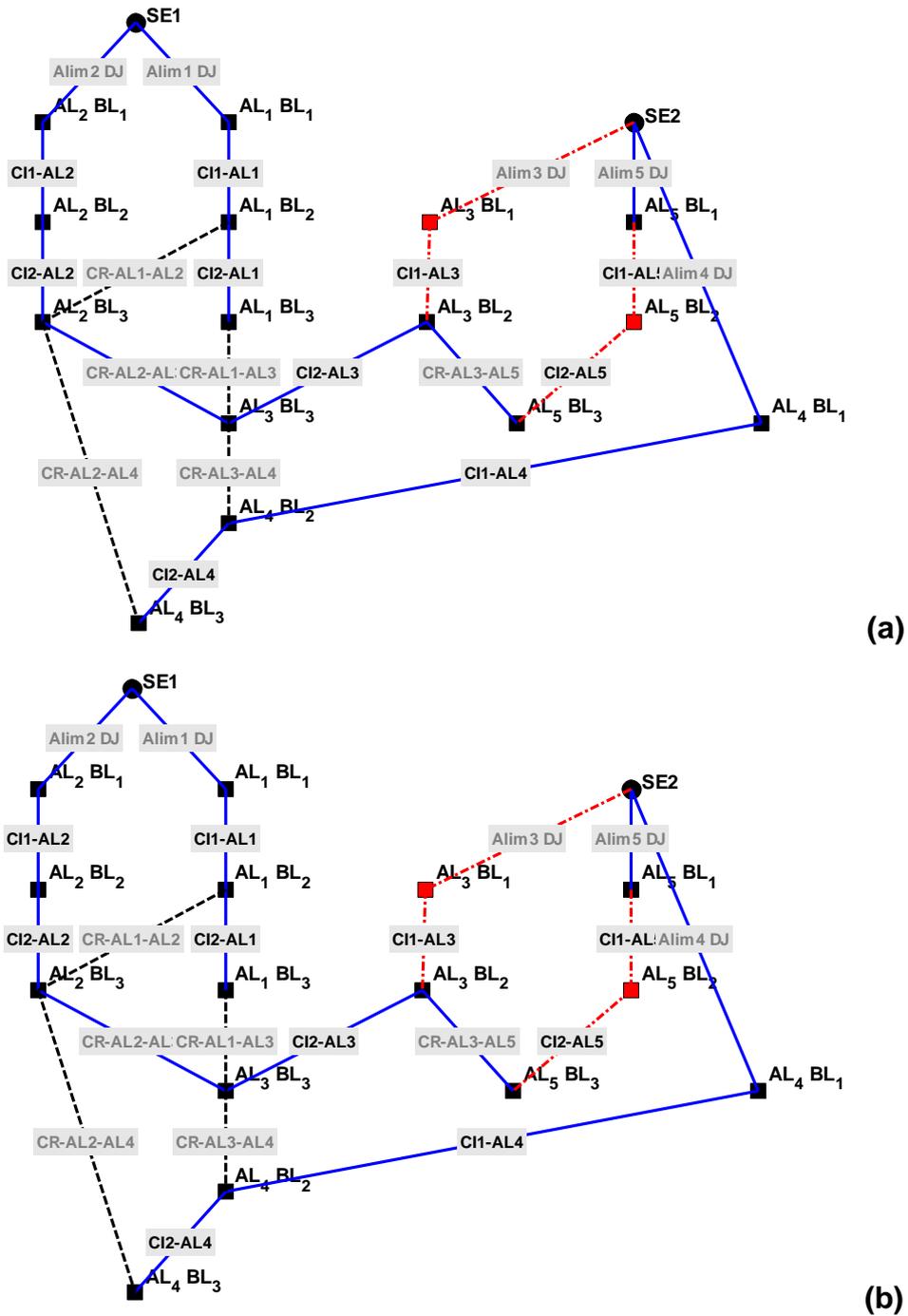


FIGURA 49 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 4.2 (a) POR BPSO E (b) POR ADA.

FONTE: O autor (2015)

Para os dois casos o sistema recuperado obteve a mesma resposta, conforme a FIGURA 49, em que o alimentador 2 recupera os blocos que apresentaram falta de energia. Em ambos os métodos somente foi necessário à comutação de uma chave, sendo CI2-AL3 para o BPSO e CR-AL2-AL3 para o ADA.

Os tempos de processamento podem ser visualizados na TABELA 23, em que os dois tempos para o corte de carga se mantiveram próximos devido ao sistema

recuperado fornecer a mesma resposta, a pequena variação se deu pelo processamento do computador em cada momento.

TABELA 23 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 4.2

Método	Isolar a falta [s]	Autorrecuperação [s]	Corte de carga [s]	Total* [s]
BPSO	0,0041	114,7910	15,9785	137,1789
ADA	0,0033	0,0159	15,1616	21,5861

*o total do processamento da metodologia leva em conta o tempo de 6,4053s do processamento da topologia

FONTE: O autor (2015)

Como a autorrecuperação do sistema foi obtida de maneira igual para os dois casos, percebe que os dois sistemas obtiveram os mesmos dados de carga restabelecida e de fluxo antes e depois do corte, ver TABELA 24, sendo aplicado então um corte de 33,133% no alimentador 2. E em ambos os casos o perfil de tensão também são iguais, conforme as FIGURAS 50 e 51.

TABELA 24 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.2

Método	Alimentador que restabeleceu o circuito	Sem Corte			Com Corte	
		Corrente [A]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]
BPSO	2	646,2947	13,3545	14,5524	8,9297	9,1
ADA	2	646,2947	13,3545	14,5524	8,9297	9,1

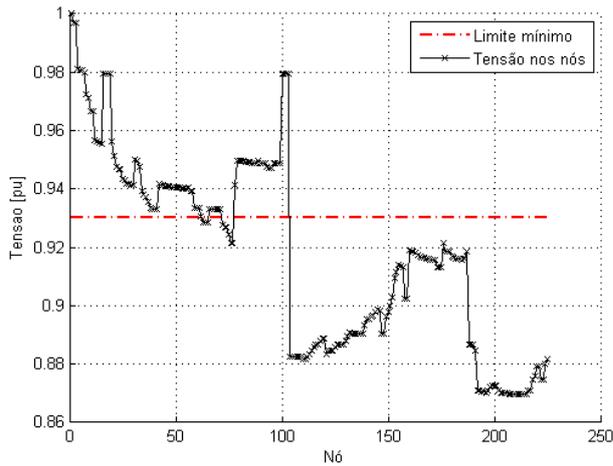
FONTE: O autor (2015)

Pelo fato de ter ocorrido o mesmo chaveamento pelos dois métodos, os resultados foram os mesmos para o total de carga energizada e de perda sistêmica, de acordo com a TABELA 25, ocorrendo somente à diferença nos blocos que ficaram sem energia pela segunda falta, pois devido à configuração diferenciada do sistema recuperado da primeira falta, o número de blocos sem energia foi diferente neste caso.

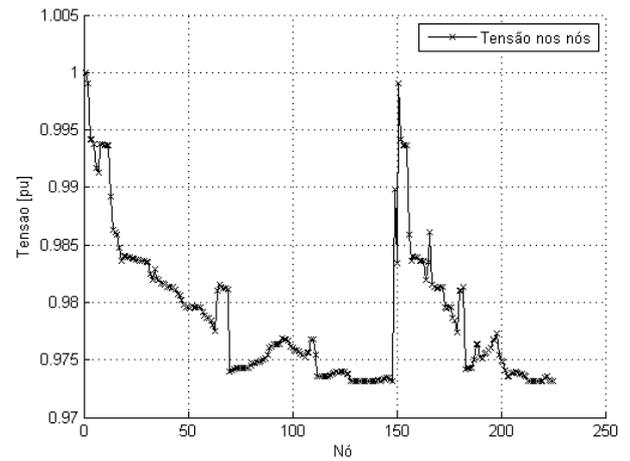
TABELA 25 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 4.2

Método	Sistema pré-falta [MVA]	Blocos não energizados [MVA]	Sistema restaurado com corte de carga[MVA]	Perdas sistêmicas [MVA]
BPSO	26,704	3,584	20,096	1,680
ADA		7,080	20,096	1,680

FONTE: O autor (2015)



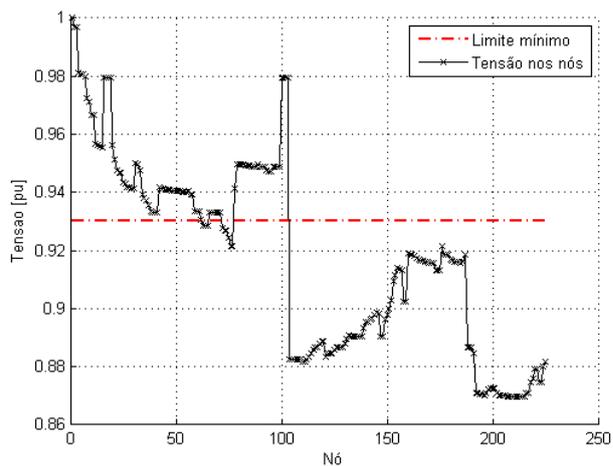
(a)



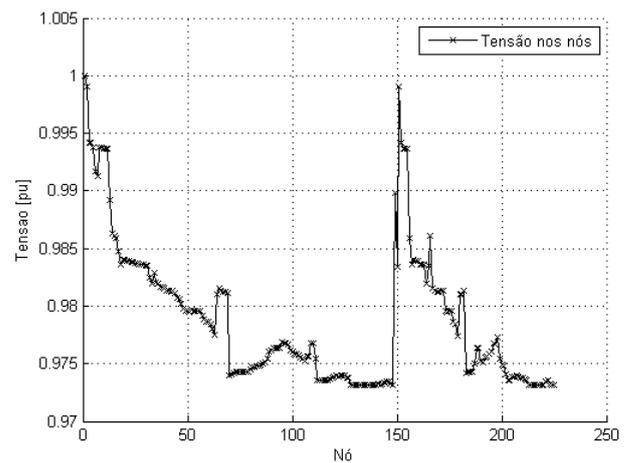
(b)

FIGURA 50 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 2 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.2 POR BPSO

FONTE: O autor (2015)



(a)



(b)

FIGURA 51 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 2 ANTES (A) E DEPOIS (B) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.2 POR ADA

FONTE: O autor (2015)

A última falta sequencial aplicada ao sistema é localizada no segundo bloco do alimentador 2, no qual todos os blocos, antes recuperados, voltam ao estado de serem restabelecidos, junto com o bloco AL2BL3.

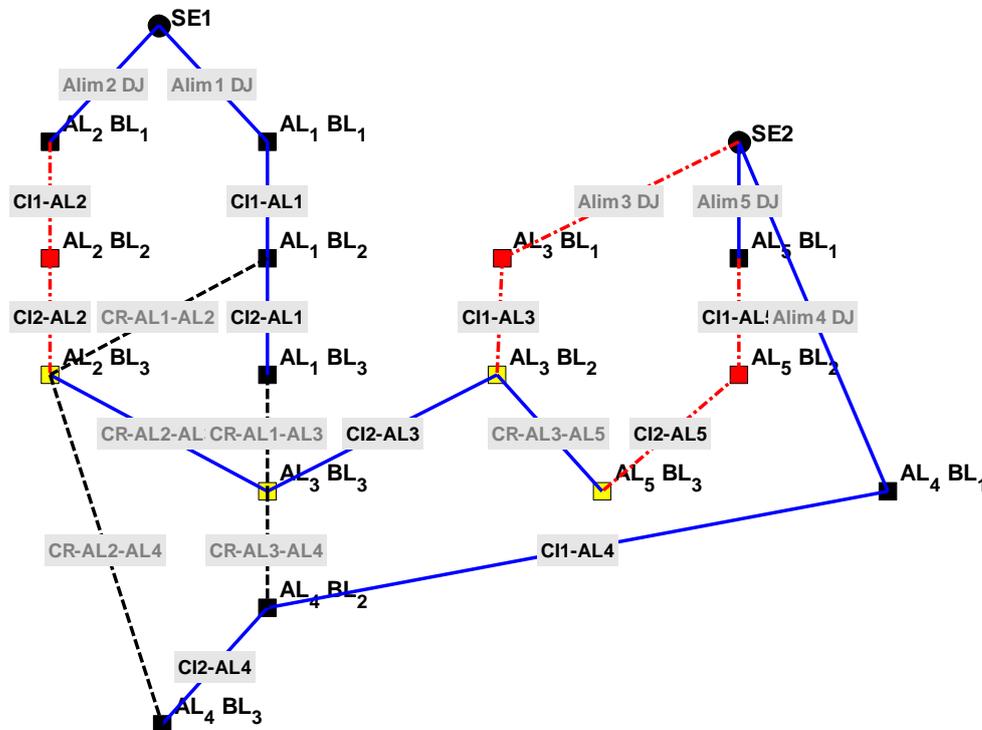
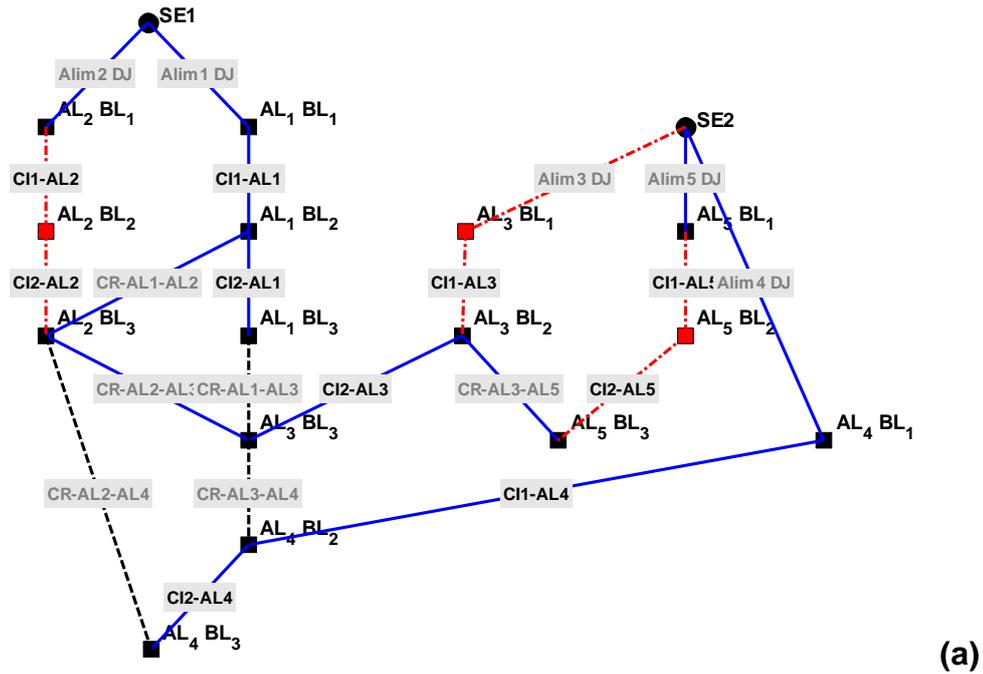


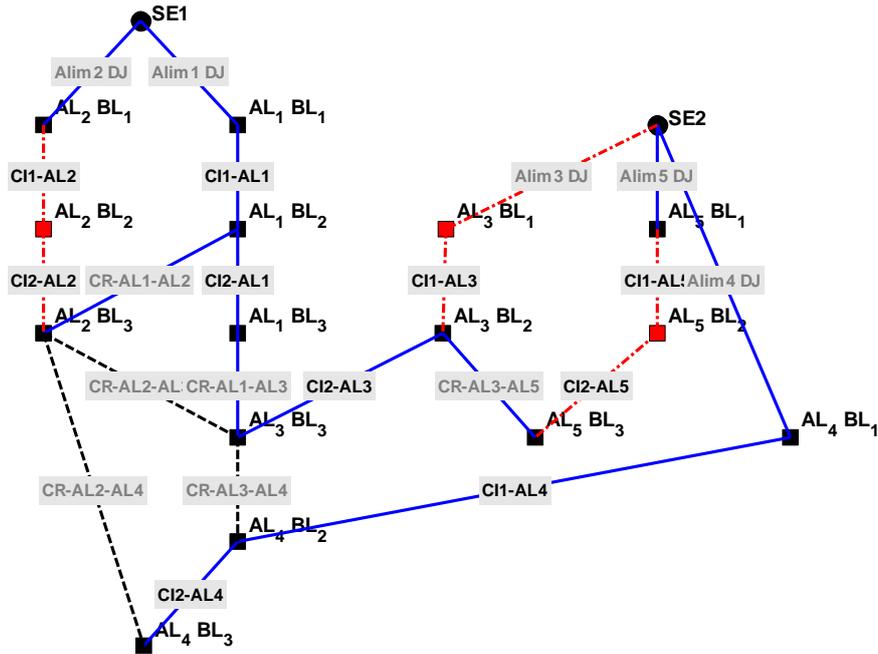
FIGURA 52 – PÓS-FALTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O CASO 4.3

FONTE: O autor (2015)

Desta vez o sistema recuperado se mostrou diferente para os métodos aplicados, o método por BPSO tentou manter os chaveamentos antes realizados e conseguiu recuperar o sistema com um só chaveamento através da chave (aresta) CR-AL1-AL2. Agora o método por ADA optou por um chaveamento diferente do anterior, isso devido à metodologia construída que abre todas as chaves que fazem fronteira com os blocos a serem restabelecido. Então, para a autorrecuperação por ADA realizou-se três chaveamentos, fechou-se as chaves CR-AL1-AL2 e CR-AL1-AL3 e abriu a chave CR-AL2-AL3, pois se julgou mais atraente, ou seja, apresentou o menor caminho por meio da chave CR-AL1-AL3 para restabelecer o bloco AL3BL3, o primeiro bloco a ser analisado. Na sequência o bloco AL2BL3 determina que o menor caminho seja através da chave CR-AL1-AL2, conseqüentemente os demais blocos se unem no ponto AL3BL3 que já tem ligação com o alimentador 1.



(a)



(b)

FIGURA 53 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 4.3 (a) POR BPSO E (b) POR ADA

FONTE: O autor (2015)

Como o alimentador 1 foi a base para a recuperação do sistema, necessitou-se a utilização do corte de carga para que o sistema volta-se aos padrões de corrente e tensão estabelecidos, pois conforme as FIGURAS 54a e 55a, os limites em ambos os casos foram ultrapassados e puderam voltar ao normal pelo corte de carga, conforme as FIGURAS 54b e 55b.

TABELA 26 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO CASO 4.3

Método	Isolar a falta [s]	Autorrecuperação [s]	Corte de carga [s]	Total* [s]
BPSO	0,0032	116,9696	20,2856	143,6637
ADA	0,0039	0,0188	15,5369	21,9649

*o total do processamento da metodologia leva em conta o tempo de 6,4053s do processamento da topologia

FONTE: O autor (2015)

Nota-se que neste caso o chaveamento se mostrou mais eficiente por ADA de novo, onde pode se obter um leve acréscimo de carga, de acordo com a TABELA 27, devido a ter menos perdas no sistema. O método BPSO não optou por uma escolha parecida com o do ADA, pelo motivo da chave CR-AL2-AL3 estar fechada anteriormente, então o BPSO escolheu manter essa chave em estado fechado e restaurar o sistema através da chave CR-AL1-AL2. Entretanto poderia ser restabelecido o sistema pela chave CR-AL1-AL3 em vez da chave CR-AL1-AL2, que representaria uma perda sistêmica menor, com 1,907 MVA contra 1,913 MVA. Não houve tal escolha, devido ao BPSO ter de ser parametrizado para uma convergência em três minutos, ao qual nem sempre é possível encontrar o ótimo dentro desse tempo estabelecido.

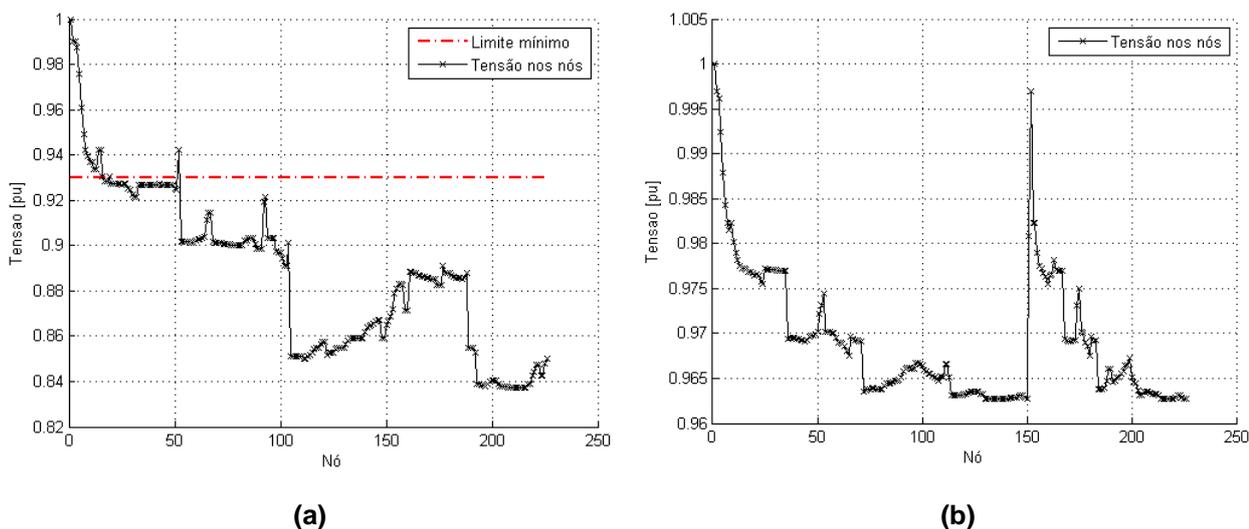


FIGURA 54 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 1 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.3 POR BPSO

FONTE: O autor (2015)

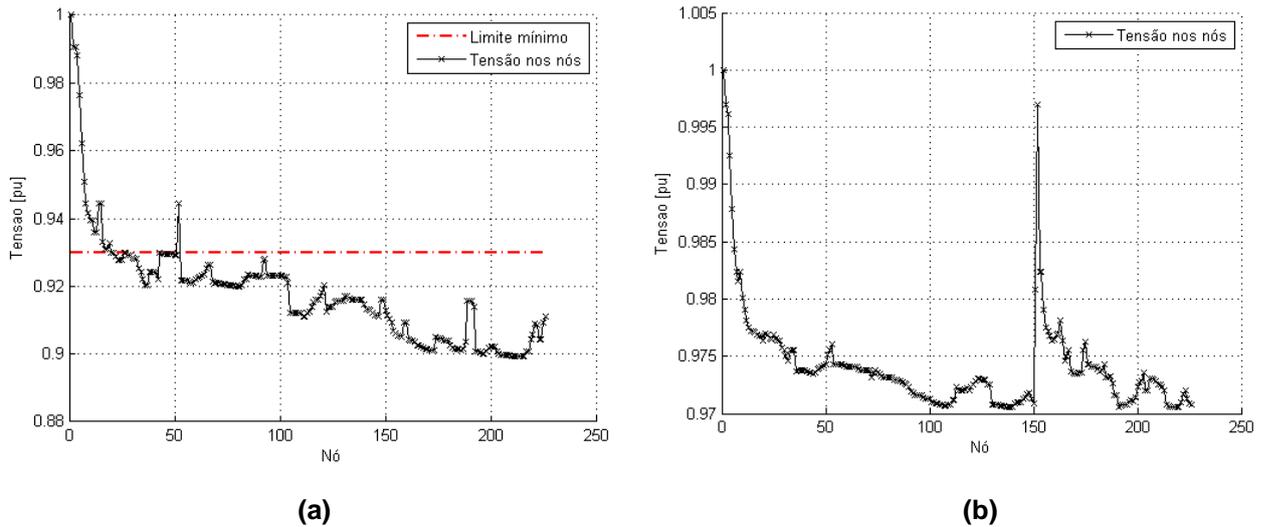


FIGURA 55 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR 1 ANTES (a) E DEPOIS (b) DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.3 POR ADA

FONTE: O autor (2015)

TABELA 27 – INFORMAÇÕES ANTES E DEPOIS DO CORTE DE CARGA PARA O CASO 4.3

Método	Alimentador que restabeleceu o circuito	Sem Corte			Com Corte	
		Corrente [A]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]	Potência Aparente [MVA]	Fluxo de Potência [MVA]
BPSO	1	649,2437	12,9561	14,6188	8,8406	9,1
ADA	1	627,0023	12,9561	14,1180	8,8759	9,1

FONTE: O autor (2015)

O método ADA também se mostrou eficiente através dos resultados apresentados na TABELA 28, em que se atingiu um resultado parecido na quantidade de carga restabelecida, porém com 0,326 MVA a menos de perdas sistêmicas.

TABELA 28 – INFORMAÇÕES GERAIS DE CARGAS E PERDAS DO SISTEMA PARA O CASO 4.3

Método	Sistema pré-falta [MVA]	Blocos não energizados [MVA]	Sistema restaurado com corte de carga [MVA]	Perdas sistêmicas [MVA]
BPSO	26,704	10,081	17,105	1,913
ADA			17,140	1,587

FONTE: O autor (2015)

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Nesta seção são apresentados os principais resultados obtidos e escolhidos para compor essa dissertação, e as considerações finais da utilização de cada técnica conforme a aplicação nos casos estudados.

O método por BPSO foi mais eficiente nas análises com faltas simultâneas, pois manipula uma quantidade maior de chaves, distribuindo melhor os blocos de carga para os alimentadores que servem como base para o restabelecimento. No entanto, o BPSO pode não apresentar boas soluções devido à restrição de tempo limite imposta, como apresentado na solução da primeira falta do caso 4. Além de que, em algumas simulações o tempo total de processamento por BPSO ficou muito próximo do limite de 180 segundos, no qual impossibilitaria a realização de uma manobra em campo dentro do tempo estabelecido.

Destaca-se ainda que, mesmo que o BPSO não apresente o melhor resultado, as respostas obtidas com a parametrização dos três minutos foram coerentes. A comparação entre a utilização do número de partículas e de iterações restrita ao tempo e outra que extrapola o tempo máximo para a convergência é apresentada no APÊNDICE D, em que se percebe que os resultados não têm uma grande diferença, sendo somente melhorada a parcela referente às perdas sistêmicas.

Já o método para autorrecuperação por ADA se mostrou mais eficiente na solução com faltas sequenciais quando comparado ao BPSO. Observa-se que nas faltas sequencias sempre se trabalha com um falta por vez, com isso, diminui-se o espaço de busca, ou seja, a quantidade de blocos a serem restabelecidos é menor e geralmente segue-se uma linha lógica para restabelecer o sistema a partir de um número menor de comutações das chaves. No entanto, quando se têm faltas simultâneas o sistema a ser recuperado se torna mais complexo, tendo que trabalhar com uma quantidade maior de blocos, barras e chaves para encontrar a solução do problema.

Como uma ferramenta de auxílio para o algoritmo de autorrecuperação, o corte de carga através do FPO se mostrou importante, pelo fato do algoritmo de autorrecuperação se preocupar somente em recuperar todas as barras sem a necessidade de considerar os limites das grandezas elétricas, passando para o corte de carga a parte de recolocar o sistema dentro dos padrões estabelecidos em normas.

De maneira geral, os dois métodos se propuseram a resolver o problema de faltas simultâneas e sequencias de forma coerente com o que era esperado, onde se

encontrou em todos os casos um possível chaveamento para se restabelecer todos os blocos que apresentaram a falta, considerando as particularidades de cada método em razão de serem desenvolvidos a partir de conceitos diferentes.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A partir dos estudos das normas estabelecidas no Brasil pela ANEEL verificaram-se os requisitos para o bom funcionamento de um sistema de autorrecuperação, sendo eles, o tempo limite de três minutos para que um sistema se recupere após uma falta e não contabilize valores aos indicadores DEC e FEC e a não violação dos limites mínimo e máximo de tensão, 0,93 p.u. e 1,05 p.u., respectivamente, garantindo, assim, a qualidade do fornecimento de energia. Com isso, colocou-se como requisito prioritário que um sistema de autorrecuperação resolva o problema em menos de três minutos, para ter aplicabilidade na automação de redes, e dentro dos limites técnicos. Em vista disso, realizaram-se estudos em teoria dos grafos para permitir a realização da modelagem de um sistema de distribuição na forma de grafo e também permitir o conhecimento das técnicas de busca em grafos para serem aplicadas na busca de chaveamentos para satisfazer o problema de autorrecuperação. Assim, neste trabalho o algoritmo de Dijkstra é utilizado para proceder à busca no grafo representativo do sistema de distribuição. Uma vez que estes algoritmos de busca se mostram eficientes no quesito de custo computacional, torna-se interessante a sua consideração para o problema de autorrecuperação.

O desenvolvimento da autorrecuperação pelo método ADA desconsidera tanto a verificação das perdas quanto da análise da quantidade de chaveamentos realizados, considerando somente o objetivo de recuperar os blocos desenergizados. Portanto, o resultado final dos testes realizados conteve muitos chaveamentos que não necessitariam ocorrer para o restabelecimento do fornecimento de energia. Porém, por outra vertente, o método se mostrou rápido e eficiente em conseguir recuperar todos os blocos, podendo fornecer uma boa margem de tempo na realização do corte de carga e no envio de sinais para os dispositivos quando integrado a um sistema de distribuição real.

Já a função objetivo desenvolvida para o método BPSO considerou como requisitos: a maximização de cargas, a minimização das perdas do sistema e a quantidade de chaveamentos. Com isso, obtiveram-se resultados elétricos mais eficientes e dentro também do limite de tempo de três minutos a partir da parametrização inicial do BPSO. Entretanto, algumas das análises apresentadas nos

casos de estudo não alcançaram o melhor resultado possível, devido ao fato do número de iterações e partículas terem sido insuficientes para chegar a um resultado ótimo, como na aplicação da primeira falta do Caso 4, onde se mostrou dois chaveamentos desnecessários, em que se abriu a CI2-AL3 e fechou a CR-AL2-AL3, caso não houvesse o limite de iterações seria possível encontrar uma melhor resposta para o problema apresentado. Assim sendo, essa ação de autorrecuperação levou o alimentador 2 a obter o terceiro bloco do alimentador 3 e, conseqüentemente, a realizar um corte de carga para aliviar o alimentador 2.

A formulação do FPO para realizar o corte de carga se mostrou eficiente quando operado em conjunto com um sistema de autorrecuperação, além de fornecer a possibilidade de adaptar novas restrições a partir da formulação inicial, que neste caso foi a inclusão da restrição de corrente máxima na saída da subestação. A partir disto, nota-se que os resultados se mostraram interessantes quando recuperado um sistema que apresenta sobrecargas e/ou problemas no perfil de tensão, onde antes não havia fornecimento ideal de energia aos consumidores. Destarte, o corte de carga conseguiu estabilizar o sistema e deixá-lo dentro dos padrões estabelecidos para a operação após a ação de autorrecuperação. Outro ponto importante no FPO a ser considerado foi a possibilidade de selecionar quais barras deveriam ser cortadas, pois não se pode cortar as barras do alimentador base da restauração, somente as barras dos blocos que estão para serem recuperados. Ressalta-se que a maioria das barras cortadas está presente nas pontas dos alimentadores, uma vez que a formulação é baseada em minimizar as perdas, logo, é possível o restabelecimento de um número maior de cargas quando se tem menores perdas. Essa formulação do FPO também permite barras prioritárias se necessário, quando conhecido os consumidores conectados a barra, podendo priorizar um hospital que está na ponta de um bloco, por exemplo, que possivelmente seria cortado.

Por fim, os dois métodos de busca se provaram eficazes no objetivo de se restabelecer todos os blocos possíveis de serem recuperados. O corte de carga se mostrou uma ferramenta importante para trabalhar em conjunto com um sistema de autorrecuperação, visando garantir que em momentos de extrapolação de limites técnicos o corte de carga atuará para aliviar o sistema e deixá-lo dentro dos padrões estabelecidos, fornecendo energia de qualidade para os consumidores após o sistema sofrer uma falha. Como diferencial de cada método, a solução por BPSO se mostrou mais eficiente qualitativamente em situações que necessitavam restabelecer muitos

blocos, por apresentar melhores chaveamentos para recuperar o sistema devido ao fato de ser uma metaheurística. Ou seja, são testadas diversas combinações de chaveamentos para se encontrar o resultado, contudo com um tempo próximo do limite máximo de três minutos. O ADA, por sua vez, apresentou um tempo médio de processamento 118,7877 segundos menor para resolver o problema, devido ao fato de ser uma técnica de busca em grafo, não sendo um método iterativo. Com a utilização do ADA poderia ser considerado sistemas maiores do que o apresentado nesse trabalho, que ainda seria possível restabelecer o sistema dentro dos três minutos com tempo suficiente para realizar o corte de carga e enviar as informações aos determinados equipamentos como: chaves, transformadores inteligentes e medidores inteligentes.

O ADA apresentou melhores resultados, de maneira qualitativa, para as situações que envolviam uma menor quantidade de blocos a serem restabelecidos, ou seja, quando há a aplicação de uma falta somente, como em faltas sequencias, em que o espaço de busca é menor.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os trabalhos futuros é interessante a análise através de outras técnicas para resolver o problema de autorrecuperação como os algoritmos de árvores geradoras mínimas, busca por A* e métodos que considerem uma lógica de controle distribuído. Também é possível formular o problema para ser resolvido com a programação linear, entretanto, deverá ser feita uma adaptação para transformar em uma programação inteira e existirão demasiadas restrições a serem satisfeitas o que acarretará uma demora na convergência do algoritmo para determinar a solução.

Um aspecto importante a ser considerado nas próximas formulações para a autorrecuperação é a inclusão da geração distribuída, já que ao longo dos próximos anos é prevista uma inserção dessa tecnologia no sistema de distribuição brasileiro.

No ramo da otimização vários trabalhos poderiam ser desenvolvidos, como: uma abordagem de otimização multiobjetivo para a função objetivo utilizada no BPSO; uma análise aprofundada da comparação de técnicas metaheurísticas com a utilizada neste trabalho, a partir de técnicas de significância, tais como, teste de Wilcoxon e o teste t de Student; a utilização de um BPSO adaptativo para resolver o problema de

autorrecuperação; a elaboração de um BPSO híbrido, onde se possa mesclar a resposta do ADA como uma entrada inicial para o BPSO, ou outra técnica de otimização.

Em relação ao FPO para corte de carga, é interessante que a formulação seja realizada no nível de seção de barras, de modo a analisar o sistema como um todo, não necessitando executar um fluxo para cada alimentador. Dessa maneira o próprio estado da chave indicaria a topologia do sistema e, com isso, acarretaria num aumento da eficiência do processamento no FPO para o corte de carga em conjunto com algoritmos de autorrecuperação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Aprova a Revisão 1 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. 2009. Resolução ANEEL No 395.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. 2010. Resolução ANEEL No 414.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. 2012. PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.
- ALVAREZ-SANTOS, V.; CANEDO-RODRIGUEZ, A.; IGLESIAS, R.; et al. Route Learning and Reproduction in a Tour-Guide Robot. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 63, p. 206–213, 2014.
- AMANULLA, B.; CHAKRABARTI, S.; SINGH, S. N. Reconfiguration of Power Distribution Systems Considering Reliability and Power Loss. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 2, p. 918–926, 2012.
- AMIN, M. Toward a Secure and Smart Self-Healing Grid, 1998.
- AMIN, M. Toward Self-Healing Infrastructure Systems. **IEEE Computer Society**, v. 33, n. 8, p. 44–53, 2000.
- AMIN, M. Toward Self-Healing Energy Infrastructure Systems. **IEEE Computer Applications in Power**, v. 14, n. 1, p. 20–28, 2001.
- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B.F. Toward a Smart Grid. **IEEE Power & Energy Magazine**, v. 3, n. 5, p. 34–41, 2005.
- ANEEL, (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). Falta de energia gera R\$ 346 milhões de compensações aos consumidores em 2013. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=7903&id_area=90>. Acesso em: 20/5/2014a.
- ANEEL, Indicadores Coletivos de Continuidade. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=80>. Acesso em: 15/4/2014b.
- APONTE, E. E.; NELSON, J. K. Time Optimal Load Shedding for Distributed Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 1, p. 269–277, 2006.
- AREFIFAR, S. A.; MOHAMED, Y. A. I.; EL-FOULY, T. H. M. Comprehensive Operational Planning Framework for Self-Healing Control Actions in Smart Distribution Grids. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 4, p. 4192–4200, 2013.

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. **ACM Computing Surveys**, v. 35, n. 3, p. 268–308, 2003.

BOTEA, A.; RINTANEN, J.; BANERJEE, D. Optimal Reconfiguration for Supply Restoration With Informed A* Search. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 2, p. 583–593, 2012.

CARPENTIER, J. Optimal power flows. **IPC Business Press**, v. 1, n. 1, p. 3–15, 1979.

CARVALLO, A.; COOPER, J. **The Advanced Smart Grid - Edge Power Driving Sustainability**. Artech House, 2011.

CECATI, C.; MOKRYANI, G.; PICCOLO, A.; SIANO, P. An Overview on the Smart Grid Concept. IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale. **Proceedings**. Grendale, USA, p.3322–3327, 2010.

CHOW, T. Y.; CHUDAK, F.; FFRENCH, A. M. Fast Optical Layer Mesh Protection Using Pre-Cross-Connected Trails. **IEEE Transactions on Networking**, v. 12, n. 3, p. 539–548, 2004.

COELLO COELLO, C. A. Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 191, p. 1245–1287, 2002.

COMMISSION, E. European Technology Platform SmartGrids. Office for Official Publications of the European Communities, 2006.

CORMEN, T. H. **Desmistificando Algoritmos**. Rio de Janeiro: Elsevier Ltd, 2014.

CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Algoritmos - Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Elsevier Ltd, 2012.

DIJKSTRA, E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. **Numerische Mathematik**, v. 271, p. 269–271, 1959.

DUARTE, D. P.; KAGAN, N.; GOUVÊA, M. R.; LABRONICI, J.; MAIA F. C.; BARRETO, A. Diagnosis Of Advanced Distribution Automation In The Brazilian Electric Sector Distribution. 22 nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm. **Proceedings**. Stockholm, Sweden, n. 0801, p. 10–13, 2013.

DUGAN, R. C. Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS). , 2013. EPRI.

EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. **MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science**, p. 39–43, 1995.

EKANAYAKE, J.; LIYANAGE, K.; WU, J.; YOKOYAMA, A.; JENKINS, N. **Smart Grid - Technology and Applications**. John Wiley & Sons, 2012.

ERGUN, H.; RAWN, B.; BELMANS, R.; HERTEM, D. VAN. Technology and Topology Optimization for Multizonal Transmission Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 29, n. 5, p. 2469–2477, 2014.

FALCÃO, D. M. Smart Grids e Microredes: o Futuro já é Presente. Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos. Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

FARANDA, R.; PIEVATOLO, A.; TIRONI, E. Load Shedding : A New Proposal. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 22, n. 4, p. 2086–2093, 2007.

FERNANDES, T. S. P.; LENZI, J. R.; MIKILITA, M. A. Load Shedding Strategies Using Optimal Load Flow With Relaxation of Restrictions. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 23, n. 2, p. 712–718, 2008.

FERREIRA, L. R.; SIEBERT, L. C.; AOKI, A. R.; FERNANDES, T. S. P. Load Shedding Through Optimal Power Flow to Support Self-Healing Actions in Distribution Feeders. 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition - Latin America. Medellín. **Anais**. Medellín, Colombia, 2014.

FERREIRA, L. R.; SIEBERT, L. C.; AYALA, H.; AOKI, A. R.; DIREITO, L. C. M. Solução do problema de self-healing para redes de distribuição radiais através de otimização via algoritmo genético. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza, Brasil, 2013.

FINK, L. H.; CARLSEN, K. Operating under stress and strain. **IEEE Spectrum**, v. 15, n. 3, p. 48–53, 1978.

GANESH, M. R.; KRISHNA, R.; MANIKANTAN, K.; RAMACHANDRAN, S. Entropy based Binary Particle Swarm Optimization and classification for ear detection. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 27, p. 115–128, 2014. Elsevier.

GHALEH, A. P.; SANAYE-PASAND, M.; SAFFARIAN, A. Power system stability enhancement using a new combinational load-shedding algorithm. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 5, n. 5, p. 551, 2011.

GRANVILLE, S. Optimal Reactive Dispatch through Interior Point Methods. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 1, p. 136–146, 1994.

HAJDU, L. P.; PESCHON, J.; TINNEY, W. F.; PIERCY, D. S. Optimum Load-Shedding Policy for Power Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 3, p. 784–795, 1968.

HAPP, H. H. Optimal Power Dispatch - A Comprehensive Survey. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-96, n. 3, 1977.

HEPPNER, F.; GRENANDER, U. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. **The ubiquity of chaos**. p.233–238. American Association for the Advancement of Science; Washington, DC (USA). 1990

HUNEAULT, M.; GALIANA, F. D. A Survey Of The Optrial Power Flow Literature. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 6, n. 2, p. 762–770, 1991.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. Technology Roadmap - Smart Grid. 2011.

JABR, R. A.; COONICK, A. H.; CORY, B. J. A primal-dual interior point method for optimal power flow dispatching. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, n. 3, p. 654–662, 2002.

JEONG, Y.; PARK, J.; JANG, S.; LEE, K. Y. A New Quantum-Inspired Binary PSO : Application to Unit Commitment Problems for Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 3, p. 1486–1495, 2010.

JIA, D.; MENG, X.; SONG, X. Study on technology system of self-healing control in smart distribution grid. 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing. **Proceedings**. Beijing, China, p. 26–30, 2011a.

KARMAKAR, N. A new polynomial-time algorithm for linear programming. **STOC'84 Proceedings of the sixteenth annual ACM symposium on Theory of Computing**. ACM, p.302–311, 1984.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth. **Proceedings**. Perth, Australia, v. 4, p. 1942–1948, 1995.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation, Orlando. **Proceedings**. Orlando, USA, v. 5, p. 4104 – 4108, 1997.

LEE, K. Y.; EL-SHARKAWI, M. A. Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Application to Power Systems. John Wiley & Sons, 2008.

LI, J.; LIU, C.; SCHNEIDER, K. P. Controlled partitioning of a power network considering real and reactive power balance. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 1, n. 3, p. 261–269, 2010.

LI, J.; MA, X.; LIU, C.; SCHNEIDER, K. P. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 29, n. 6, p. 3021–3029, 2014.

LI, Y.; YANG, Q.; SIMA, W.; LI, J.; YUAN, T. Optimization of transmission-line route based on lightning incidence reported by the lightning location system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 3, p. 1460–1468, 2013.

LIU, H.; CHEN, X.; YU, K.; HOU, Y. The control and analysis of self-healing urban power grid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 3, p. 1119–1129, 2012.

LOPES, J. A. P.; MOREIRA, C. L.; MADUREIRA, A. G. Defining control strategies for microgrids islanded operation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 2, p. 916–924, 2006.

M.U., A.; MASAND, A. A. K.; MANIKANTAN, K. Optimal feature selection based on image pre-processing using accelerated binary particle swarm optimization for enhanced face recognition. **Procedia Engineering**, v. 30, p. 750–758, 2012.

MEGIDDO, N. The complexity of linear programming. In: T. F. Bewley (Ed.); **Advances in Economic Theory: Fifth World Congress**. p.225–268, 1987. Cambridge University Press.

MILLONAS, M. M. *Swarms, Phase Transitions, and Collective Intelligence*. Addison Wesley, 1994.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Smart Grid - Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes*. 2010.

MIRJALILI, S. Enhanced Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) with 6 new transfer functions. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42448-enhanced-binary-particle-swarm-optimization--bpsi--with-6-new-transfer-functions>>. Acesso em: 5/7/2013.

MIRJALILI, S.; LEWIS, A. S-shaped versus V-shaped transfer functions for binary Particle Swarm Optimization. **Swarm and Evolutionary Computation**, v. 9, p. 1–14, 2013. Elsevier.

MISA, T. J. An interview with Edsger W. Dijkstra. **Communications of the ACM**, v. 53, n. 8, p. 41, 2010.

MOMOH, J. A. **Smart Grid - Fundamentals of Design and Analysis**. Vol. 63. John Wiley & Sons, 2012.

OUALMAKRAN, Y.; MELENDEZ, J.; HERRAIZ, S. Self-healing for smart grids: Problem formulation and considerations. 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). Berlin. **Proceedings**. Berlin, Alemanha, p.1–6, 2012.

PAN, J.; WANG, M.; MA, D.; ZHOU, Q.; LI, J. Seamline Network Refinement Based on Area Voronoi Diagrams With Overlap. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 3, p. 1658–1666, 2014.

PEDRASA, M. A. A.; SPOONER, T. D.; MACGILL, I. F. Scheduling of Demand Side Resources Using Binary Particle Swarm Optimization. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 3, p. 1173–1181, 2009.

PODMORE, R.; ROBINSON, M. R. The Role of Simulators for Smart Grid Development. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 1, n. 2, p. 205–212, 2010.

PRASAD, G.; JOSHI, S. H.; JAHANSHAD, N.; et al. Automatic clustering and population analysis of white matter tracts using maximum density paths. **NeuroImage**, v. 97, p. 284–95, 2014.

PROJETOS Piloto no Brasil. Disponível em:
<<http://redesinteligentesbrasil.org.br/projetos-piloto-brasil.html>>. Acesso em:
12/1/2015.

REYNOLDS, C. W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. **ACM SIGGRAPH Computer Graphics**, v. 21, n. 4, p. 25–34, 1987.

SARATH, K. N. V. D.; RAVI, V. Association rule mining using binary particle swarm optimization. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 26, n. 8, p. 1–9, 2013.

SCHEINERMAN, E. R. **Matemática Discreta** - Uma Introdução. Thomson ed. 2006.

SHI, Y.; EBERHART, R. C. Empirical study of particle swarm optimization. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99. Washington. **Proceedings**. Washington, USA, p.1945–1950, 1999.

SOLANKI, J. M.; KHUSHALANI, S.; SCHULZ, N. N. A Multi-Agent Solution to Distribution Systems Restoration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 22, n. 3, p. 1026–1034, 2007.

SOROUDI, A.; AFRASIAB, M. Binary PSO-based dynamic multi-objective model for distributed generation planning under uncertainty. **IET Renewable Power Generation**, v. 6, n. 2, p. 67-78, 2012.

SURESH, K.; KUMARAPPAN, N. Generation maintenance scheduling using improved binary particle swarm optimisation considering aging failures. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 7, n. 10, p. 1072–1086, 2013.

TANG, J.; LIU, J.; PONCI, F.; MONTI, A. Adaptive Load Shedding Based on Combined Frequency and Voltage Stability Assessment Using Synchrophasor Measurements. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 2, p. 2035–2047, 2013.

WRIGHT, S. J. **Primal-Dual Interior-Point Methods**. Philadelphia, PA, USA: SIAM Publication, 1997.

ZIDAN, A.; EL-SAADANY, E. F. A Cooperative Multiagent Framework for Self-Healing Mechanisms in Distribution Systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 3, p. 1525–1539, 2012.

APÊNDICE A – Produção Acadêmica

SEÇÃO I – Artigos publicados relacionados ao tema da dissertação

Foram elaborados dois artigos relacionados ao tema da dissertação sobre a autorrecuperação, sendo o primeiro artigo mostra o desenvolvimento de proposta de função objetivo para resolver o problema de autorrecuperação através de algoritmos genéticos. O segundo artigo mostra a formulação da função objetivo para o BPSO e a consideração do corte de carga como uma ferramenta auxiliar da autorrecuperação.

1. FERREIRA, L. R.; SIEBERT, L. C.; AOKI, A. R.; FERNANDES, T. S. P. Load Shedding Through Optimal Power Flow to Support Self-Healing Actions in Distribution Feeders. 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition - Latin America. **Proceedings**. Medellín, Colombia, 2014.
2. FERREIRA, L. R.; SIEBERT, L. C.; AYALA, H.; AOKI, A. R.; DIREITO, L. C. M. Solução do problema de self-healing para redes de distribuição radiais através de otimização via algoritmo genético. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. **Anais**. Fortaleza, Brasil, 2013.

SEÇÃO II – Demais artigos publicados

Além dos artigos elaborados no tema deste trabalho, também foram desenvolvidos artigos no tema de Smart Grid (1-4) e Eficiência Energética na Indústria (5-6). Estes artigos foram desenvolvidos devido ao contato com os projetos de pesquisa e desenvolvimento dentro dos institutos Lactec.

1. CUSTÓDIO, E. S.; FERREIRA, L. R.; SIEBERT, L. C.; et al. Proposta de algoritmo para gerenciamento pelo lado demanda em residências através do corte de smart plugs. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. **Anais**. Fortaleza, 2013.
2. FONSECA, A. G.; AOKI, A. R.; LANGNER, A. L.; et al. Impact Analysis of Voltage Regulators and Distributed Generation on Self-Healing. 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition - Latin America. **Proceedings**. Medellín, Colombia, 2014.
3. SIEBERT, L. C.; AOKI, A. R.; SOUZA, A. R. R.; et al. Deterministic versus probabilistic approaches to self-healing in smart grid. 22 nd International Conference on Electricity Distribution. **Proceedings**. Stockholm, Sweden, 2013.
4. SIEBERT, L. C.; FERREIRA, L. R.; YAMAKAWA, E. K.; et al. Centralized and Decentralized Approaches to Demand Response Using Smart Plugs. 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. **Proceedings**. Chicago, USA, 2014.
5. SIEBERT, L. C.; AOKI, A. R.; YAMAKAWA, E. K.; et al. Metodologia de indicadores de eficiência energética para o setor industrial. XXII SNTPEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. **Anais**. Brasília, Brasil, 2013.
6. SIEBERT, L. C.; YAMAKAWA, E. K.; AOKI, A. R.; et al. Energy Efficiency Indicators Assessment Tool for the Industry Sector. 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition - Latin America. **Proceedings**. Medellín, Colombia, 2014.

APÊNDICE B – Tabela para Inserir as Informações do Alimentador

O arquivo para armazenar os dados de um alimentador está dividido em quatro planilhas, a primeira planilha, representada na TABELA 29, são os dados iniciais do alimentador, sobre informações de tensão e demais alimentadores que existe no sistema a ser usado na autorrecuperação. O espaço em branco na coluna é somente para separar os dados.

TABELA 29 – INFORMAÇÕES DO ALIMENTADOR E DO SISTEMA AO QUAL ELE FAZ PARTE

Nome Alimentador	Alim1		Demais alimentadores do sistema
Nome da Subestação	SE1		Alim3
Tensão base [kV]	13		Alim4
Tensão inicial [kV]	13		Alim5
			Alim2

FONTE: O autor (2015)

A segunda planilha considera todas as chaves internas e de recurso, e o relacionamento em qual alimentador é localizada e em que barra está alocada, conforme a TABELA 30.

TABELA 30 – INFORMAÇÕES DAS CHAVES

ID	Ligação	Barra
CI1-AL1	Alim1	64
CI2-AL1	Alim1	75
CR-AL1-AL3	Alim3	89
CR-AL1-AL2	Alim2	154

FONTE: O autor (2015)

A terceira planilha contém as informações de nós importantes para serem destacadas dentro do programa, podendo inserir um novo tipo de nó se necessário, a TABELA 31 mostra somente três pontos importantes como exemplo.

TABELA 31 – INFORMAÇÕES REFERENTES AOS NÓS IMPORTANTES

Subestacao	1
Reguladores	50
Geracao Distribuida	23

FONTE: O autor (2015)

A última planilha é representada pelas TABELA 32 e TABELA 33, e traz as informações do alimentador para a realização de análises elétricas. Sendo que os espaços em branco representam os locais que podem ser preenchidos caso a concessionárias tenham os dados disponíveis.

TABELA 32 – INFORMAÇÕES ELÉTRICAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO, PARTE 1

ID	Tipo	Fase	DE	PARA	COMP [km]	RES [ohm/km]	REA [ohm/km]
Linha 1			1	2	0,07521	0,124	0,172
Linha 2			2	21	0,22609	0,124	0,172
Linha 3			21	28	0,03986	0,124	0,172
Carga 1			28	32	0,01361	0,509	0,172

FONTE: O autor (2015)

TABELA 33 – INFORMAÇÕES ELÉTRICAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO, PARTE 2

POT ATIVA A [kW]	POT ATIVA B [kW]	POT ATIVA C [kW]	POT REA A [kvar]	POT REA B [kvar]	POT REA C [kvar]	Consumidores	AMP [A]	Tap	Shunt
0			0				450	1	0
0			0				450	1	0
0			0				505	1	0
226,23			172,50				505	1	0

FONTE: O autor (2015)

APÊNDICE C – Análise da Função de Transferência para o BPSO

Foram realizados 10 testes, a partir de uma falta simultânea nos blocos AL2BL1 e AL3BL1, considerando 50 partículas e 200 iterações, para a escolha da melhor função de transferência, tais funções são apresentadas em Mirjalili e Lewis (2013). Os resultados dos testes são mostrados na TABELA 34, que a partir da mesma função objetivo testada, a função S1 apresentou os melhores resultados no quesito da velocidade de convergência, onde o pior caso para S1, apresentado no Teste 1, demorou 28 iterações para encontrar o melhor resultado. E o pior caso foi a função S4, com uma média de 88,7 iterações, e que no Teste 4 a convergência foi ocorrer na iteração 198.

TABELA 34 – TESTES DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA PARA O BPSO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Média
S1	28	11	17	22	12	12	15	11	13	12	15,3
S2	8	9	42	14	23	31	11	24	8	46	21,6
S3	35	23	27	40	33	117	101	38	146	171	73,1
S4	127	33	41	198	9	48	94	113	136	88	88,7
V1	161	49	7	21	28	162	6	15	171	52	67,2
V2	18	3	36	133	33	173	11	51	20	62	54
V3	17	50	110	43	160	159	115	7	41	4	70,6
V4	14	69	13	30	151	25	120	56	11	125	61,4

FONTE: O autor (2015)

APÊNDICE D – Simulação Sem Restrição de Tempo do BPSO para o Caso 1

Este apêndice aborda os resultados e comparações de dois casos de parametrização do método BPSO, o primeiro caso é configurado para obter um resultado em menos de três minutos, com 40 iterações e 15 partículas. O segundo caso é um teste exaustivo com 200 iterações e 100 partículas.

O valor 1,1176493074 da função objetivo para o caso 2 mostra uma solução melhor quando se compara com o valor de 1.1176494113 do caso 1, devido a um menor valor na parcela de perda sistêmica de $2.2891058668e-6$ para o caso 2, frente ao valor de $2.3929950160e-6$ para o caso 1. Leva-se em consideração somente a perda sistêmica, pois a quantidade de carga restabelecida e o número de chaveamentos são iguais em ambos os casos. O tempo total despendido para o segundo caso foi de 34,25 minutos.

A diferença do chaveamento do sistema, foi que em vez do alimentador 5 recuperar os blocos do alimentador 3 através da chave CR-AL3-AL5, foi o alimentador 1 que restabeleceu os blocos possíveis do alimentador 3 através da chave CR-AL1-AL3, conforme observado na FIGURA 56.

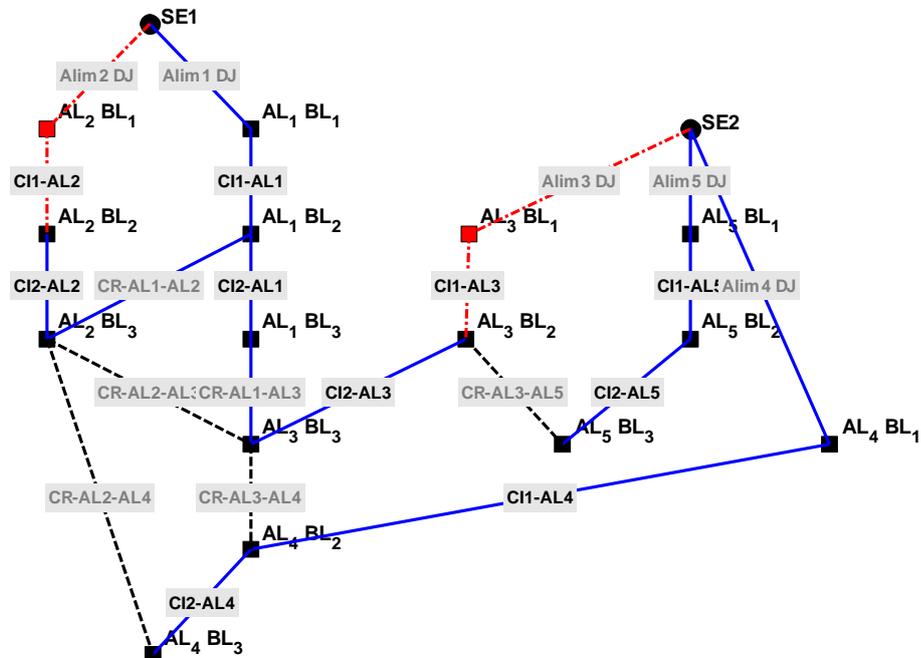


FIGURA 56 – SISTEMA RECUPERADO DO CASO 1 POR BPSO, SEM A RESTRIÇÃO DE TEMPO
FONTE: O autor (2015)