**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Leandro Tolomeu Marques

**Restabelecimento de Energia em Sistemas de
Distribuição Considerando Aspectos Práticos**

São Carlos

2018

Leandro Tolomeu Marques

Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição Considerando Aspectos Práticos

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientadora: Prof. Dr. João Bosco Augusto London Júnior

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

**São Carlos
2018**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M357r	<p>Marques, Leandro Tolomeu</p> <p>Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando aspectos práticos / Leandro Tolomeu Marques; orientador João Bosco A. London Junior. São Carlos, 2018.</p> <p>Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.</p> <p>1. Restabelecimento de energia. 2. Sistema de distribuição de energia. 3. Consumidor prioritário. 4. Sequencia de chaveamento. 5. Algoritmo evolutivo multi-objetivo. I. Título.</p>
-------	--

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LEANDRO TOLOMEU MARQUES**.

Título da tese: "Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando aspectos práticos".

Data da defesa: 13/06/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **João Bosco Augusto London Junior**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Rodrigo Andrade Ramos**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Rubén Augusto Romero Lázaro**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Ilha Solteira)

Aprovado

Prof. Dr. **Eduardo Gontijo Carrano**
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

Aprovado

Prof. Dr. **José Roberto Sanches Mantovani**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Ilha Solteira)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

À Santíssima Virgem Mãe de Deus.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de iniciar, realizar e concluir uma pesquisa de doutorado.

À Santíssima Vigem Maria, pelas inúmeras graças que me concedeu ao longo desta pesquisa.

Ao meu orientador e mestre, Prof. João Bosco, pelos incontáveis ensinamentos, orientação, paciência, compreensão, amizade e disponibilidade.

A minha querida e amada esposa, Joice, pelo apoio, compreensão, encorajamento, paciência, amizade, carinho e companhia.

A minha filha, Teresa, pela paciência com que esperou diversas vezes o papai trabalhar.

Aos meus pais, Luiz e Ivany, pelas orações e apoio incondicional.

A minha irmã e ao meu cunhado, Laise e Yuri, pela amizade e apoio.

A minha sogra, Aparecida, pela dedicação e auxílio.

A todos aqueles que rezaram por minhas necessidades em relação ao desenvolvimento e término deste trabalho.

Aos vários colegas do LACoSEP pela amizade, discussões frutíferas e companhia no trabalho.

Aos colegas do grupo de pesquisa pela parceria científica, discussões frutíferas e diversas oportunidades de aprendizado.

Aos professores Eduardo Gontijo Carrano e Rubén Romero Lázaro pelas valiosas sugestões no exame de qualificação que serviram para guiar o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, incluindo os professores, pelo profissionalismo e dedicação.

À Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, pelo suporte oferecido.

À FAPESP pelo apoio financeiro.

RESUMO

MARQUES, L. T. **Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição Considerando Aspectos Práticos**. 2018. 169p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

No contexto da operação de sistemas de distribuição, um dos problemas com os quais os operadores lidam frequentemente é o de restabelecimento de energia. Este problema surge na ocorrência de uma falta permanente e pode ser tratado por meio de manobras em chaves presentes na rede primária. Uma vez que tais redes operam com topologia radial, a ocorrência de uma falta pode resultar no desligamento de consumidores saudáveis. Desta maneira, o problema consiste em definir, num curto intervalo de tempo, um número mínimo de chaves que devem ser operadas a fim de isolar a falta e restaurar o máximo de consumidores saudáveis desligados.

Os esforços para a obtenção de ferramentas computacionais para fornecimento de soluções para o problema de restabelecimento têm sido intensificados nos últimos anos. Isto ocorre, em especial, devido aos enormes prejuízos causados pela falta de energia às companhias de eletricidade e a toda a sociedade.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é a obtenção de um método para auxiliar o trabalho dos operadores através do fornecimento de planos adequados de restabelecimento em curtos intervalos de tempo. Os diferenciais deste método proposto são a sua capacidade de: lidar, em especial, com redes reais de grande porte com reduzido esforço computacional; considerar a existência de vários níveis de prioridade de atendimento entre os consumidores (note, por exemplo, que um hospital ou um centro de segurança pública devem ter maior prioridade de atendimento que um grande supermercado ou unidades residenciais) e priorizar o atendimento deles de acordo a sua prioridade; fornecer uma sequência por meio da qual as chaves possam ser operadas a fim de isolar os setores em falta e reconectar o maior número de consumidores saudáveis desligados executando-se o mínimo de manobras em chaves e priorizando os consumidores com maior prioridade; ser capaz de selecionar cargas menos prioritárias para permanecerem desligadas nas situações em que não é possível obter uma solução que restaure todas as cargas saudáveis fora de serviço; e, adicionalmente, priorizar a operação de chaves controladas remotamente, que, diferentemente das chaves controladas manualmente, podem ser operadas com menores custos e de maneira mais rápida. O método proposto consiste, de maneira sintética, na união de uma busca exaustiva aplicada localmente a um novo algoritmo evolutivo multi-objetivo em tabelas de subpopulação que faz uso de uma estrutura de dados eficiente denominada Representação Nó-Profundidade.

Para avaliar a performance relativa do método proposto, simulações foram realizadas num sistema de distribuição de pequeno porte e os resultados foram comparados com os obtidos por um método de Programação Matemática. Na sequência, novos experimentos foram realizadas em diversos casos de falta na rede de distribuição da cidade de Londrina-PR e cidades adjacentes. As soluções fornecidas mostraram-se adequadas ao tratamento dos casos de falta, assim como as sequências de chaveamento associadas a elas, as quais foram capazes de priorizar o restabelecimento dos consumidores prioritários seguindo seus níveis de prioridade. Adicionalmente, estudos avaliaram a variação do tempo de processamento computacional do método proposto com a dimensão das redes de distribuições e também com o número de gerações realizadas pelo algoritmo evolutivo multi-objetivo proposto e os resultados mostraram-se satisfatórios às necessidades do problema

Portanto, pode-se comprovar que o método proposto atingiu os objetivos especificados, em especial, o tratamento de aspectos práticos do problema. Além do próprio método proposto, algumas contribuições desta pesquisa são a proposição um novo algoritmo evolutivo multi-objetivo em tabelas de subpopulação e de um novo operador para manipulação de florestas de grafo armazenadas pela Representação Nó-Profundidade e voltado ao problema de restabelecimento

Palavras-chave: Restabelecimento de energia. Sistemas de distribuição de grande porte. Priorização de consumidores prioritários. Priorização de chaves controladas remotamente. Definição de sequência de chaveamento. Corte seletivo de consumidores desligados. Algoritmo evolutivo multi-objetivo. Tabelas de subpopulação. Representação Nó-Profundidade. NSGA-II. Busca Exaustiva Local. Aspectos práticos do problema de restabelecimento de energia.

ABSTRACT

MARQUES, L. T. **Distribution Systems Service Restoration with the Consideration of Practical Aspects**. 2018. 169p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

In the context of distribution systems operation, service restoration is one of the problems with which operators constantly deal. It arises when a permanent fault occurs and is treated through operations in switches at primary grid. Since distribution systems are usually radial, fault occurrence turns-off healthy customers. Thereby, the service restoration problem consists in defining, in a short processing time, the minimum amount of switches that must be operated for the isolation of the fault and reconnection of the maximum amount of healthy out-of-service customers.

The efforts of developing computational tools for getting solution to this problems has increased in the last years. It is, in special, due to enormous losses caused to the utilities and to the whole society.

In this sense, the main objective of this research is getting a method able to help the distribution system operator's work through providing service restoration plans quickly. The differentials of this research are its ability to: deal, in special, with large scale grids with a reduced computational effort; consider customers of several priority levels (note, for instance, a hospital has a higher supply priority in relation to a big supermarket) and prioritize the higher priority customers; provide a switching sequence able to isolate and reconnect the maximum amount of healthy out-of-service customer by the minimum amount of switching actions; select lower priority customers to keep out-of-service in order to reconnect higher priority customers when it is not possible to restore all customers; and, additionally, prioritize switching operation in remotely controlled switches, whose operation is faster and cheapest than the operation of manually controlled switches. The proposed method mixes a local exhaustive search and a new multi-objective evolutionary algorithm in subpopulation tables that uses a data structure named Node-Depth Encoding.

For evaluating the relative performance of proposed method, simulations were performed in small distribution systems and the performance was compared with the performance of a Mathematical Programming method from literature. New experiments were performed in several fault situations in the real and large-scale distribution system of Londrina-PR and adjacent cities. The solutions provided were appropriated to the treatment of such contingency situations. The same occurs with the switching sequences provided, which were able to prioritize the restoration of higher priority customers. Additional studies

evaluated the variation of the running time with the size of grids and with the values adopted for the maximum number of generations of the evolutionary algorithm (which is an input parameter). The results expressed the running time of the proposed method is suitable to the problem needs.

Therefore, it could be proved the proposed method achieved the specified objectives, in special, the treatment of practical aspects of the problem. Besides the proposed method, some contributions of this research are proposition of a new multi-objective evolutionary algorithm in subpopulation tables and a new reproduction operator to manipulate graph forests computationally represented by Node-Depth Encoding.

Keywords: Service restoration. Large-scale distribution system. Prioritization of priority customers. Prioritization of remotely controlled switches. Switching sequence definition. Load shedding of out-of-service customers. Multi-objective evolutionary algorithm. Subpopulation tables. Node-Depth Encoding. NSGA-II. Local exhaustive search. Practical aspects of service restoration problem..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de restabelecimento de energia via reconfiguração de redes. . .	26
Figura 2 – Exemplo de um SD típico com dois alimentadores, no formato barra-ramo.	48
Figura 3 – Representação, no formato setor-chave, do SD da Figura 2 por meio de Grafo.	48
Figura 4 – Representação do Grafo da Figura 3 por meio da RNP.	48
Figura 5 – Representação do setor C, quando alimentado pelo setor A, da Figura 3 por meio da RNP.	49
Figura 6 – Representação do setor C, quando alimentado pelo setor E, da Figura 3 por meio da RNP.	49
Figura 7 – Fluxograma genérico dos AEMOs em tabelas de subpopulação.	52
Figura 8 – Procedimento para atualização de uma subpopulação em uma tabela P_* baseado no conceito tradicional de tabelas.	53
Figura 9 – Procedimento para atualização de uma subpopulação em uma tabela P_* baseado no conceito de tabelas de múltiplos critérios.	54
Figura 10 – Intervalos de tempo associados às ações para resolução do problema de restabelecimento.	60
Figura 11 – Fluxograma geral do método proposto.	70
Figura 12 – Fluxograma para a busca exaustiva local modificada.	73
Figura 13 – Fluxograma para a formação da população inicial do AEMO proposto.	75
Figura 14 – Fluxograma para a obtenção de um novo indivíduo.	77
Figura 15 – Fluxograma para a verificação e correção de uma sequência de chaveamento.	79
Figura 16 – Fluxograma para a formação de indivíduos-filho.	80
Figura 17 – Fluxograma para a formação do conjunto Pareto-ótimo.	81
Figura 18 – Potência não suprida <i>vs</i> manobras realizadas para uma sequência de chaveamento arbitrária associada a um indivíduo qualquer.	89
Figura 19 – Configuração pré-falta de um SD ilustrativo de três alimentadores. . . .	98
Figura 20 – Configuração do SD ilustrativo da Figura 19 após a isolamento do setor em falta.	99
Figura 21 – Exemplo de fronteiras de Pareto para dois objetivos 1 e 2.	107
Figura 22 – Configuração pré-falta do SD <i>53-bus</i> no formato barra-chave.	111
Figura 23 – Tempo de execução do método proposto para cada caso de teste apresentado anteriormente, os quais consideram $G_MAX = 10.000$	123
Figura 24 – Número de manobras em chaves das soluções obtidas pelo método proposto nos casos de falta solucionados pela BELM no SD <i>LDR-Full</i> .	125

Figura 25 – Energia não suprida por nível de prioridade das soluções obtidas pelo método proposto nos casos de falta solucionados pela BELM no SD <i>LDR-Full</i>	126
Figura 26 – Tempo de execução computacional do método proposto para os casos de falta solucionados pela BELM no SD <i>LDR-Full</i>	126
Figura 27 – Número de indivíduos gerados pelo método proposto nos casos de falta solucionados pela BELM no SD <i>LDR-Full</i>	127
Figura 28 – Tempo de execução computacional do método proposto para os casos de falta solucionados pelo AEMO proposto no SD <i>LDR-Full</i>	138
Figura 29 – Número de indivíduos gerados pelo método proposto nos casos de falta solucionados pelo AEMO proposto no SD <i>LDR-Full</i>	139
Figura 30 – Tempos de execução <i>vs</i> dimensão da rede.	140
Figura 31 – Valores do indicador R2 para os conjuntos Pareto-ótimo obtidos a cada 3.000 gerações para o caso de falta no setor 1957.	143
Figura 32 – Valores do indicador R2 para os conjuntos Pareto-ótimo obtidos para o caso de falta no setor 2529.	144
Figura 33 – Pontuação obtida por cada AEMO hipotético por meio do programa estatístico proposto por (MARQUES et al., 2017).	146
Figura 34 – Valores do tempo de execução por número máximo de geração para o caso de falta no setor 1586.	148
Figura 35 – Valores do tempo de execução por número máximo de geração para o caso de falta no setor 2529.	149
Figura 36 – Representação de uma rede fictícia de 5 barras através de Grafo - Parte 1.	166
Figura 37 – Matriz incidência nó-aresta pseudo-orientada do grafo da Figura 36. . .	166
Figura 38 – Representação matricial da Equação A.1 para a rede mostrada na Figura 36.	166
Figura 39 – Representação de uma rede fictícia de 5 barras através de Grafo - Parte 2.	167
Figura 40 – Matriz diagonal de admitâncias da rede da Figura 39.	168
Figura 41 – Matriz incidência nó-aresta pseudo-orientada do grafo da Figura 39 transposta.	168
Figura 42 – Matriz incidência nó-aresta pseudo-orientada do grafo da Figura 39 transposta.	168
Figura 43 – Matriz $Y_{Barra}(G^e)$, resultante da multiplicação entre as matrizes $A(G^e)$, $Y_x(G^e)$, $A(G^e)^t$	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas ao método de solução, modelagem do problema, SD para validação e tempo computacional - Parte 1 de 3.	38
Tabela 2 – Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas ao método de solução, modelagem do problema, SD para validação e tempo computacional - Parte 2 de 3.	39
Tabela 3 – Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas ao método de solução, modelagem do problema, SD para validação e tempo computacional - Parte 3 de 3.	40
Tabela 4 – Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas a consideração de corte de carga, priorização de CPs, definição de sequência de chaveamento e de variação da demanda - Parte 1 de 3.	41
Tabela 5 – Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas a consideração de corte de carga, priorização de CPs, definição de sequência de chaveamento e de variação da demanda - Parte 2 de 3.	42
Tabela 6 – Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas a consideração de corte de carga, priorização de CPs, definição de sequência de chaveamento e de variação da demanda - Parte 3 de 3.	43
Tabela 7 – Valores de demanda ou potência ativa por nível de prioridade das cargas presentes nos setores D, E e F da Figura 19.	99
Tabela 8 – Dados dos sistemas de distribuição utilizados nos testes experimentais.	110
Tabela 9 – Valores assumidos pelos dados de entrada nos testes experimentais para comparação com os resultados apresentados por (ROMERO et al., 2016).	112
Tabela 10 – Resultados experimentais para o teste geral 1.	113
Tabela 11 – Resultados experimentais para o teste geral 2.	114
Tabela 12 – Principais características do indivíduo obtido pelo método proposto que consiste na solução de referência do teste geral 2.	114
Tabela 13 – Informações da sequência de chaveamento da primeira solução no conjunto Pareto-ótimo da Tabela 11 - parte 1.	115
Tabela 14 – Informações da sequência de chaveamento da primeira solução no conjunto Pareto-ótimo da Tabela 11 - parte 2.	115
Tabela 15 – Informações da sequência de chaveamento da solução que é igual a solução de referência e que foi apresentada na Tabela 12 - parte 1. . . .	116
Tabela 16 – Informações da sequência de chaveamento da solução que é igual a solução de referência e que foi apresentada na Tabela 12 - parte 2. . . .	116
Tabela 17 – Resultados experimentais para o teste geral 3.	116

Tabela 18 – Resultados experimentais para o teste especializado 1.	118
Tabela 19 – Informações da sequência de chaveamento da segunda solução conjunto Pareto-ótimo 2 da Tabela 18 - Parte 1.	119
Tabela 20 – Informações da sequência de chaveamento da segunda solução conjunto Pareto-ótimo 2 da Tabela 18 - Parte 2.	119
Tabela 21 – Resultados experimentais para o teste especializado 2.	120
Tabela 22 – Valores de potência ativa não suprida por nível de prioridade de atendi- mento para as soluções obtidas pelo método proposto no teste especia- lizado 2.	120
Tabela 23 – Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do con- junto Pareto-ótimo 1 da Tabela 21 - Parte 1.	121
Tabela 24 – Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do con- junto Pareto-ótimo 1 da Tabela 21 - Parte 2.	121
Tabela 25 – Resultados experimentais para o teste especializado 3.	122
Tabela 26 – Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do con- junto Pareto-ótimo 1 da Tabela 25 - Parte 1.	122
Tabela 27 – Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do con- junto Pareto-ótimo 1 da Tabela 25 - Parte 1.	122
Tabela 28 – Tempos de execução (em segundos) apresentados por (ROMERO et al., 2016) em caso de teste.	123
Tabela 29 – Valores assumidos pelos dados de entrada nos testes experimentais no SD <i>LDR-Full</i>	124
Tabela 30 – Potência ativa e número de barras saudáveis não supridas por nível de prioridade por caso de falta solucionado pelo AEMO proposto no SD <i>LDR-Full</i>	128
Tabela 31 – Conjunto Pareto-ótimo obtido para o caso de falta no setor 2532 do SD <i>LDR-Full</i>	129
Tabela 32 – Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do con- junto Pareto-ótimo 1 da Tabela 31 para o caso de falta no setor 2532 do SD <i>LDR-Full</i>	130
Tabela 33 – Conjunto Pareto-ótimo obtido para o caso de falta no setor 919 do SD <i>LDR-Full</i>	130
Tabela 34 – Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do con- junto Pareto-ótimo 1 da Tabela 33 para o caso de falta no setor 919 do SD <i>LDR-Full</i>	131
Tabela 35 – Conjuntos Pareto-ótimo obtido para o caso de falta no setor 839 do SD <i>LDR-Full</i>	132

Tabela 36 – Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 35 para o caso de falta no setor 839 do SD <i>LDR-Full</i>	133
Tabela 37 – Conjuntos Pareto-ótimo obtido para o caso de falta no setor 1587 do SD <i>LDR-Full</i>	134
Tabela 38 – Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 37 para o caso de falta no setor 1587 do SD <i>LDR-Full</i>	135
Tabela 39 – Conjunto Pareto-ótimo obtido para o caso de falta no setor 749 do SD <i>LDR-Full</i>	136
Tabela 40 – Informações da sequência de chaveamento da solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 39 para o caso de falta no setor 749 do SD <i>LDR-Full</i>	137
Tabela 41 – Valores dos dados de entrada para o estudo da influência da dimensão da rede no tempo de execução do método proposto.	139
Tabela 42 – Valores dos dados de entrada para o estudo de convergência e da variação do tempo de execução com o número máximo de gerações.	141
Tabela 43 – Ranqueamento entre os AEMOs hipotéticos para o caso de falta no setor 2336.	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE	Algoritmo evolutivo
AE mono	Algoritmo evolutivo mono-objetivo
AEMO	Algoritmo evolutivo multi-objetivo
AEMT	Algoritmo Evolutivo Multi-objetivo em Tabelas
AEMT++	Algoritmo Evolutivo Multi-objetivo em Tabelas com Priorização de Chaves, Consumidores de Definição de Sequência de Chaveamento
AF	Abre-fecha
AG	Algoritmo genético
BEL	Busca Exaustiva Local
BELM	Busca Exaustiva Local Modificada
CAO	<i>Change Ancestor Operator</i>
CCM	Chave controlada manualmente
CP	Consumidor prioritário
CCR	Chave controlada remotamente
FA	Fecha-abre
LRO	<i>Load Reconnector Operator</i>
MH	Método heurístico
NA	Normalmente aberta
NF	Normalmente fechada
NSGA-II	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm - II</i>
PAO	<i>Preserve Ancestor Operator</i>
PA	Prioridade Alta
PI	Prioridade Intermediária
PB	Prioridade baixa

PM	Programação matemática
RN	Rede neural
RNP	Representação Nó-Profundidade
SD	Sistema de distribuição
SE	Sistema especialista
SMA	Sistemas multi-agente
SP	Sem prioridade
SPEA2	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2</i>
VA	<i>Viterbi Algorithm</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação	23
1.2	O Problema	24
1.3	Justificativas	28
1.4	Metodologia Proposta: Objetivo e Diferenciais	30
1.5	Organização do Documento	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	Objetivo e Procedimentos	33
2.2	Principais Resultados da Revisão Bibliográfica	34
2.3	Considerações finais	46
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	47
3.1	Considerações iniciais	47
3.2	Representação nó-profundidade	47
3.3	Algoritmos evolutivos multi-objetivo em tabelas de subpopulação	50
3.4	Busca exaustiva local	55
4	ENUNCIADO FORMAL E MÉTODO PROPOSTO	59
4.1	Considerações iniciais	59
4.2	Enunciado formal do problema	59
4.2.1	Intervalos de tempo envolvidos no problema	59
4.2.2	Enunciado formal proposto	61
4.3	Método proposto	68
4.3.1	Visão geral do método proposto	69
4.3.2	Informações adicionais sobre alguns tópicos e passos do método proposto	82
4.3.2.1	Obtenção do indivíduo G^1	82
4.3.2.2	<i>Load Reconnector Operator</i>	83
4.3.2.3	Heurística para limitação do problema à regiões adjacentes aos setores em falta	85
4.3.2.4	Avaliação de indivíduos e cálculo de energia não suprida	86
4.3.2.5	As tabelas de subpopulação existentes no AEMO proposto	89
4.3.2.6	Busca Exaustiva Local Modificada	97
4.3.2.7	Obtenção de um novo indivíduo	101
4.3.2.8	Verificação e correção de sequência de chaveamento	104
4.3.2.9	Formação do conjunto Pareto-ótimo	105

4.3.2.10	Escolha das soluções finais a partir de um conjunto Pareto-ótimo	106
4.4	Considerações finais	108
5	TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	109
5.1	Considerações iniciais	109
5.2	Sistemas de distribuição utilizados em testes	109
5.3	Comparação com os resultados apresentados por (ROMERO et al., 2016)	109
5.3.1	Testes gerais	112
5.3.2	Testes especializados	117
5.3.3	Tempo de execução do método proposto por caso de teste	122
5.4	Aplicação do método proposto em uma rede de distribuição de grande porte	123
5.4.1	Casos de falta solucionados pela BELM	124
5.4.2	Casos de falta solucionados pelo AEMO proposto	127
5.5	Estudos para avaliação de desempenho computacional do método proposto	137
5.5.1	Estudo da variação do tempo de execução com a dimensão da rede	137
5.5.2	Estudo de convergência e da variação do tempo de execução com o número máximo de gerações	140
5.6	Considerações finais	150
6	CONCLUSÃO	151
6.1	Conclusões	151
6.2	Contribuições	153
6.3	Trabalhos Futuros	154
6.4	Publicações	154
	REFERÊNCIAS	157
	APÊNDICES	163
	APÊNDICE A – REPRESENTAÇÃO DAS LEIS DE KIRCHOFF ATRAVÉS DE GRAFOS	165

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Os sistemas elétricos de potência devem operar de maneira segura, contínua e econômica. Contudo, interrupções no fornecimento de energia elétrica são inevitáveis e quase sempre imprevisíveis, devido a ocorrência de fenômenos da natureza, acidentes de trânsito, falhas em equipamentos da rede, dentre outros.

Segundo um estudo encomendado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, divulgado em 2004 (LACOMMARE; ETO, 2004) e publicado em 2006 (LACOMMARE; ETO, 2006), interrupções no fornecimento de eletricidade em todo o sistema elétrico geram naquele país perdas estimadas em US\$ 79 bilhões anualmente, sendo 33% deste total (US\$ 26,3 bilhões) causadas por interrupções sustentadas, ou seja, superiores a cinco minutos. Segundo este mesmo estudo, devido às incertezas envolvidas nestas estimativas, como por exemplo, a ocorrência de fenômenos naturais, este custo pode chegar a até US\$ 135 bilhões por ano. Além das perdas econômicas, para os consumidores e para as empresas do setor de energia elétrica, estas interrupções geram temperaturas desconfortáveis no ambiente de trabalho ou em casa, perdas no tempo de lazer e riscos para a saúde e segurança (LINARES; REY, 2013). Estas ocorrências afetam também o nível de satisfação dos consumidores com as empresas de energia, prejudicando a imagem das mesmas junto aos seus clientes.

Considerando as interrupções em todo o sistema elétrico de potência, a grande maioria delas é causada por falhas nos sistemas de distribuição (SDs), segundo (CHEN et al., 2015). De acordo com estes, 80% de todo o tempo de ausência de fornecimento de energia elétrica na China tem sua origem em faltas nas redes de distribuição. Dentre as causas para esta predominância de falhas nos SDs, pode-se citar: o pequeno interesse dos pesquisadores, em décadas passadas, pelos problemas relacionados às redes de distribuição; a rápida expansão das mesmas, impulsionada pelo crescimento da população urbana ocorrido em muitos países nas últimas décadas; o fato de as redes de distribuição estarem dispersas ao longo de uma ampla área, e de serem aéreas em muitas cidades. Por isso, os SDs têm sido mais susceptíveis à falha de todo tipo.

Na ocorrência de uma falta permanente em um SD, após a localização da mesma, é necessária a obtenção de um plano que permita o isolamento do elemento faltoso e o restabelecimento do fornecimento ao maior número possível de consumidores saudáveis desligados, no menor intervalo de tempo e sem violar as restrições operacionais da rede. A determinação deste plano consiste no problema de restabelecimento (ou restauração) de energia e o plano de restabelecimento obtido é uma solução para o problema.

Embora as perdas geradas pela interrupção do fornecimento de energia sejam grandes, as ferramentas computacionais disponíveis atualmente são limitadas e incapazes de fornecer planos de restabelecimento de energia. Consequentemente, o problema de restabelecimento tem sido normalmente tratado de maneira intuitiva pelos engenheiros através de sua experiência e familiaridade com as redes que operam. Contudo, devido ao elevado número de chaves, alimentadores e ramos em SDs reais, não é fácil restaurar o fornecimento aos consumidores saudáveis fora de serviço dependendo somente de experiências anteriores dos operadores da rede (HUANG; HSIEH; WANG, 2011), especialmente em SDs de grande porte.

Desta forma, esta pesquisa tem por finalidade o desenvolvimento de um método para auxiliar o trabalho dos operadores dos SDs por meio do fornecimento de soluções (ou planos de restabelecimento de energia) para situações de contingência. Ao contrário de outros trabalhos já disponíveis na literatura, a mesma deverá ser capaz de, concomitantemente, *(i)* lidar com SDs de grande porte em tempo real sem exigir simplificações na representação da topologia da rede; *(ii)* considerar a existência de prioridades de fornecimento distintas entre os consumidores e priorizar o atendimento dos mesmos considerando estas diferenças; *(iii)* fornecer um conjunto de chaves e a sequência por meio do qual elas poderão ser operadas a fim de solucionar o problema no menor intervalo de tempo; *(iv)* determinar as cargas que devem ser cortadas (deixadas fora de serviço) para priorizar o atendimento dos consumidores com maior prioridade nas situações em que não seja possível atender todas as cargas de maneira segura. Ademais, serão priorizadas manobras em chaves que podem ser operadas de maneira remota pelos próprios operadores da rede.

1.2 O Problema

Para facilitar a operação em redes reais, as barras, os trechos de linha e os demais elementos são agrupados em blocos, chamados de setores (ou seções), que são separados entre si por chaves que operam nos estados normalmente aberto e normalmente fechado. Adicionalmente, estas redes operam normalmente de maneira radial, o que significa que há apenas um caminho para o fluxo de potência entre uma subestação e as barras de cargas que são por ela alimentadas. Além de auxiliar na operação dos SDs, a manutenção da radialidade da rede visa também simplificar ajustes no sistema de proteção.

Devido a estas características específicas, na ocorrência de uma falta permanente em um setor do SD, os consumidores mais afetados são aqueles presentes nos setores sob falta e nos setores localizados à jusante deste, que ficarão sem energia após a isolamento dos setores em falta, razão pela qual são chamados de setores saudáveis fora de serviço ou desligados. Após a localização dos setores faltosos, os mesmos podem ser isolados por meio da operação de chaves normalmente fechadas, e os setores saudáveis fora de serviço podem ter o seu fornecimento restabelecido pela operação de chaves normalmente abertas. Ocasionalmente,

antes da reconexão dos setores saudáveis desligados, manobras para transferência de setores entre alimentadores podem ser necessárias para aumentar a capacidade reserva dos alimentadores nos quais os consumidores desligados serão reconectados. Em virtude da solução do problema de restabelecimento exigir a manobra de chaves, ele é essencialmente um problema de reconfiguração de rede.

A Figura 1 apresenta um exemplo ilustrativo do procedimento de restauração dos consumidores saudáveis desligados. Na Figura 1.a é considerada a ocorrência de uma falta na barra 7. De acordo com a definição anterior, o setor em falta é aquele formado pelas barras 7, 8 e 9, o qual deverá permanecer fora de serviço durante todo o período de tempo necessário à recuperação do elemento faltoso. A Figura 1.b apresenta o setor em falta já isolado. É bom recordar que, devido a presença de dispositivos de proteção, como religadores automáticos, chaves fusível, a chave aberta à montante do setor em falta, no instante da ocorrência de uma falta, pode não ser a chave mais próxima do setor em falta. Consequentemente, pode haver setores saudáveis desligados também à montante do setor faltoso. No caso deste exemplo, se for considerado que a chave C1 é um religador automático, então, no instante da ocorrência da falta, os setores formados pelas barras 1, 2 e 3 e 4, 5 e 6 ficarão sem fornecimento de energia até que seja localizado o setor em falta, aberta a chave à montante mais próxima do setor em falta (C3, neste caso) e fechado novamente o dispositivo seccionador de proteção (neste caso, o religados automático C1). Após isolar o setor em falta e restaurar os setores desligado à montante da falta (Figura 1.b), o setor saudável à jusante pode também ser restaurado, conforme ilustrado na Figura 1.

Note que a restauração de setores saudáveis à montante de setores em falta é muito mais simples que a restauração dos setores localizados à jusante. Isto porque, para a reconexão dos setores saudáveis à montante já se sabe naturalmente quais chaves devem ser operadas e a sequência de sua operação (abertura da chave normalmente fechada mais próxima à montante do setor em falta e fechamento da chave que foi aberta pelo sistema de proteção). Ademais, já se tem a garantia de que tal ação não irá comprometer a segurança e os limites de operação da rede, pois estas manobras irão, tão somente, restaurar esta parte do alimentador à sua configuração operacional pré-falta.

Todavia, o mesmo não se pode afirmar em relação à recuperação dos setores localizados à jusante da falta. Isto deriva do fato de que pode haver várias opções para a restauração destes consumidores e não é conhecido *a priori* se alguma destas opções resultará em violação dos limites operacionais. Ou ainda, não se sabe se é possível restaurar todos os setores saudáveis à jusante nem mesmo quais devem ficar fora de serviço na impossibilidade de uma restauração completa.

Em virtude disso, este trabalho irá focar na restauração dos consumidores saudáveis localizados à jusante dos setores faltosos. Por isso, nas soluções que serão fornecidas, haverá

menção apenas a restauração dos setores à jusante da falta. Considere que, como dito acima, a restauração dos setores saudáveis à montante passa pela operação de apenas duas chaves já conhecidas no momento da ocorrência da falta numa sequência também conhecida.

Uma solução para o problema de restabelecimento, também chamado de plano de restabelecimento, consiste numa estratégia para o restabelecimento do fornecimento de eletricidade que deve prover *(i)* a configuração para a qual a rede deverá ser modificada (com as características operacionais da mesma), *(ii)* as chaves a serem operadas para a obtenção desta configuração a partir da configuração pré-falta e *(iii)* a sequência por meio da qual estas chaves podem ser alteradas de maneira a não violar os limites operacionais, priorizar o atendimento dos consumidores segundo a sua prioridade de atendimento e contribuir para a qualidade dos indicadores de continuidade.

A determinação de uma solução para o problema de restabelecimento de energia envolve as seguintes necessidades gerais:

1. Minimizar o montante de consumidores saudáveis desligados;
2. Minimizar o número de manobras em chaves;
3. Manter a estrutura radial da rede;
4. Manter o valor da tensão em cada barra dentro dos intervalos exigidos pelos órgãos de controle ou legislação e pelos equipamentos;
5. Ausência de sobrecargas ao longo da rede e também nas subestações;
6. Obtenção em tempo real.

Todavia, em SDs reais faz-se necessário considerar também os seguintes aspectos práticos do problema:

1. Priorizar o fornecimento de energia aos consumidores prioritários (CPs), tais como, hospitais e centros de saúde, centros de comando de segurança pública, indústrias, grandes supermercados, etc;
2. Considerar a existência de diversos níveis de prioridade de atendimento entre os consumidores, inclusive entre os CPs. Por exemplo: o fornecimento de energia para um hospital é mais prioritário do que o atendimento de um supermercado;
3. Considerar a possibilidade de selecionar cargas para serem deixadas fora de serviço quando a capacidade reserva dos alimentadores próximos aos setores saudáveis fora de serviço não for suficiente para permitir a reconexão de todos os consumidores

saudáveis desligados (note que este aspecto do problema também exige a consideração dos níveis de prioridade de atendimento) ¹;

4. Prover uma sequência por meio da qual as chaves possam ser operadas de modo a reconectar os consumidores saudáveis desligados no menor intervalo de tempo e a priorizar a restauração de CPs fora de serviço, sem violar os limites operacionais nas configurações pelas quais a rede operará temporariamente;
5. Priorizar a operação de chaves controladas remotamente (CCRs) que, ao contrário das chaves controladas manualmente (CCMs), não exigem o deslocamento de equipes de campo e por isso podem ser operadas de maneira mais rápida e econômica que as CCMs.

Quando um setor saudável desligado possui conexão com setores energizados por meio de chaves NAs, diz-se que ele é um setor restaurável, uma vez que pode ser reenergizado através do fechamento de alguma das chaves NA entre ele e setores adjacentes. Se uma solução é capaz de restaurar todos os setores desligados restauráveis, ela é chamada de solução de restauração completa. Por outro, se somente parte dos setores são restaurados por uma solução, então, ela é uma solução de restauração parcial.

1.3 Justificativas

Movida pela necessidade de uma ferramenta computacional para a determinação de planos de restabelecimento em SDs, uma diversidade de métodos têm sido propostos nas últimas décadas, especialmente em função do aumento da capacidade de processamento dos computadores. As diferenças entre eles estão principalmente nas estratégias de otimização utilizadas e nos aspectos práticos considerados.

Quanto ao método de otimização, atualmente a grande maioria das pesquisas tem se concentrado na utilização de métodos meta-heurísticos, como será notado na revisão bibliográfica apresentada no capítulo seguinte. Todavia, existem também métodos baseadas em programação matemática.

¹ Neste trabalho, optou-se não permitir o corte de consumidores que permaneceram em serviço após a ocorrência da falta, uma vez que o cortá-lo concorre para a deteriorização dos indicadores de fornecimentos destes consumidores. Os consumidores que serão seletivamente cortados estarão sempre dentre aqueles que foram desligados pela ocorrência da falta. Portanto, ao longo deste texto, o termo “corte de carga” estará relacionado com a permanência fora de serviço de alguns consumidores já desligados, exceto quando houver expressa referência do contrário, como ocorre nas Tabelas 4 - 6. Ademais, algumas vezes o termo “corte de carga” poderá estar substituído por “deixar algumas cargas desligadas” ou “seleção de cargas para permanecerem desligadas” ou por algo semelhante que expresse que as cargas escolhidas para permanecer fora de serviço estão dentre aquelas que foram desligadas em função do isolamento dos setores em falta.

Embora os métodos meta-heurísticos não garantam a obtenção da solução ótima global, tal como ocorre com os métodos baseados em programação matemática, eles tem sido amplamente utilizados por diversos motivos, em especial por conta do tempo de processamento reduzido e da simplicidade na compreensão e na implementação dos mesmos. Mas, na maioria dos trabalhos disponíveis na literatura ambas as abordagens têm sido validadas para redes de pequeno porte, isto é, redes cujas dimensões não são compatíveis com as rede reais, que possuem milhares de barras e centenas de chaves ².

Devido à complexidade do problema, inclusive em redes de pequeno porte, muitos dos trabalhos já propostos focam na consideração apenas das necessidades mais gerais do problema (aquelas seis que foram primeiramente apresentadas na seção anterior). Dentre aqueles que se preocupam também com os aspectos e necessidades mais práticas do problema há a limitação de raramente considerarem em conjunto todos os aspectos práticos (maiores informações serão apresentadas nos resultados da revisão bibliográfica no próximo capítulo). Portanto, pode-se notar que, embora o problema de restabelecimento tenha sido alvo de diversas pesquisas, ele ainda consiste num grande desafio de pesquisa. Outro aspecto que tem influenciado amplamente as pesquisas em restabelecimento de energia é o crescimento do número de unidades de geração distribuída. Contudo, este aspecto não será tratado por este trabalho.

Dentre os métodos meta-heurísticos destacam-se os Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivos (AEMOs) pela sua capacidade em lidar com o problema de restabelecimento mantendo a sua natureza multiobjetiva (isto é, sem convertê-lo em um problema mono-objetivo), pela simplicidade de funcionamento e de implementação, pela sua versatilidade e também pelos resultados obtidos. Todavia, os AEMOs podem ter dificuldades em fornecer soluções em tempo real em SDs de grande porte (DELBEM, 2002) já que seu desempenho é influenciado, por exemplo, pela estrutura de dados utilizada para representar computacionalmente a topologia do SD (DELBEM; CARVALHO; BRETAS, 2005) e pelos operadores de reprodução utilizados, que normalmente geram muitas configurações não-radiais (SANTOS et al., 2010).

Para manter as vantagens dos AEMOs e superar estas limitações, em (SANTOS et al., 2010) foi proposto um AEMO, denominado AEMO em Tabelas (AEMT), que faz uso de uma estrutura de dados eficiente baseada na teoria de Grafos. Ela é chamada de Representação Nó-Profundidade (RNP) (DELBEM et al., 2004).

De acordo com os resultados apresentados naquele trabalho, a RNP melhora o desempenho de AEMOs no tratamento do problema de restabelecimento de energia.

² Embora os métodos baseados em programação matemática têm sido aplicados e avaliados apenas em redes de pequeno porte, eles são capazes de fornecer a solução ótima global para do problema, como já dito, e, por isso, possuem a vantagem de servirem para a validação de outros métodos.

Devido aos avanços proporcionados por este trabalho e a sua capacidade de lidar com o problema de restabelecimento de SDs de grande porte em tempo real, o AEMT tem servido de base para o desenvolvimento de diversos outros métodos (ver Seção 3.3). No que tange a capacidade de consideração de aspectos práticos do problema, destaca-se, dentre estes, o método proposto por (MARQUES, 2013). Todavia, como será exposto no Capítulo 3, são limitados os aspectos práticos tratados por esse método. Ademais, nenhum dos métodos proposto baseados no AEMT é capaz de fornecer soluções de restauração parcial. Consequentemente, são incapazes de lidar com situações de contingências para as quais não existe solução de restauração completa.

1.4 Metodologia Proposta: Objetivo e Diferenciais

Com base nas exposições anteriores, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método para auxiliar o trabalho dos operadores de SDs por meio da obtenção de soluções em situações de contingência. O principal diferencial do mesmo será a sua capacidade de, simultaneamente, (i) priorizar o atendimento dos CPs considerando múltiplos níveis de prioridade; (ii) prover uma sequência de chaveamento que garanta a ausência de violação das restrições operacionais ao longo de sua execução e restaure prioritariamente os CPs; (iii) selecionar cargas para serem deixadas fora de serviço a fim de permitir o tratamento de casos de falta para os quais não existe solução com restauração completa; (iv) fornecer soluções de restauração parcial também nos casos em que há soluções de restauração completa com a finalidade de flexibilizar a operação da rede permitindo restaurar menos consumidores para evitar algumas manobras em chaves. Além disso, o método proposto deverá considerar e priorizar operações em CCRs e representar a topologia da rede sem simplificações, considerando, inclusive, os bancos de capacitores e os reguladores de tensão que estão normalmente presentes em redes de grande porte e que exercem influência nas características operacionais da rede. Assim, a metodologia proposta será capaz de considerar tanto as necessidades gerais como os aspectos mais práticos do problema de restabelecimento.

Para este fim, o método proposto deverá fazer uso da RNP (DELBEM et al., 2004) e possuirá um novo AEMO em tabelas de subpopulação que agrega características importantes de pesquisas recentes anteriores e também desenvolvidas neste trabalho. Ademais, considerará uma estratégia proposta por (CAMILLO et al., 2016a) com a finalidade de minimizar o número de manobras nos casos de restauração completa em que não é necessária a execução de manobras para transferência de cargas entre alimentadores. Esta heurística permite ainda melhorar a qualidade da população inicial no AEMO proposto.

1.5 Organização do Documento

Os próximos capítulos deste documento estão organizados da seguinte maneira:

- no Capítulo 2 serão apresentados os resultados de uma revisão bibliográfica dos trabalhos que lidam com o problema de restabelecimento de energia considerando os aspectos práticos do problema;
- no Capítulo 3 serão abordados alguns assuntos que fundamentam o método proposto, com a finalidade de se aprofundar no conhecimento destas bases teóricas e também de facilitar a compreensão do método proposto;
- no Capítulo 4 serão propostos um novo enunciado formal para o problema de restabelecimento e também um método para a determinação de soluções para o problema de restabelecimento considerando aspectos práticos;
- no Capítulo 5 o método proposto será aplicado em diversas situações de contingência em quatro SDs distintos e os resultados destes experimentos serão apresentados e comentados;
- por fim, no Capítulo 6 serão apresentadas as considerações finais e conclusões, as contribuições do método proposto, os trabalhos futuros e as publicações decorrentes do desenvolvimento desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Objetivo e Procedimentos

Com base nos diferenciais desta pesquisa, apresentados no capítulo anterior, uma revisão da literatura científica no tema de restabelecimento de energia em SD foi realizada para responder às seguintes questões:

1. Quais são as metodologias existentes na literatura para o tratamento do *problema de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de energia* que consideram a possibilidade de *priorizar o atendimento de CPs*, de *cortar seletivamente cargas* ¹ quando necessário e de *definir uma sequência de chaveamento* adequada?
2. Quais são as características destas metodologias? Como elas lidam com estas necessidades do problema? Quais são as principais características dos SDs para os quais foram validadas? Qual é o desempenho computacional das mesmas para estes SDs?

Para este fim, buscas foram realizadas em três bases de dados: *IEEEExplore* ², *ScienceDirect* ³ e *Scopus* ⁴. Estas foram escolhidas por meio de critérios como: qualidade dos trabalhos (apenas artigos publicados em revista), disponibilidade para *download*, versatilidade para exportação dos resultados, precisão dos resultados, idioma, etc. Três buscas foram realizadas: a primeira, em agosto de 2014, visando a obtenção de trabalhos que ao lidar com o problema de restabelecimento considerassem pelo menos um dos aspectos práticos do problema; e as duas últimas em julho de 2015 e em maio de 2018, tendo como meta a atualização dos resultados da busca anterior. Desta forma, pouco mais de duas centenas de artigos foram obtidos. A fim de melhorar a seleção dos trabalhos a serem analisados, foi apreciado: *(i)* a adequação do trabalho geral ao escopo do tema desta pesquisa, *(ii)* o grau de impacto e *(iii)* o ano de publicação do trabalho (foram considerados apenas trabalhos publicados desde o ano 2000). Após esta primeira filtragem restaram pouco menos de 100 trabalhos.

Na sequência, estes trabalhos restantes foram analisados e classificados nas seguintes categorias, de acordo com o assunto abordado: *(i)* priorização de CPs; *(ii)* corte seletivo de cargas em e fora de serviço, na impossibilidade de reconectar todas as cargas sem violação de restrições; *(iii)* definição de sequência de chaveamento; e *(v)* ausência de consideração dos aspectos práticos do problema ou indisponibilidade para *download*. Após a exclusão dos

¹ Tanto em serviço quanto cargas já desligadas.

² www.ieeexplore.org

³ www.sciencedirect.com

⁴ www.scopus.com

trabalhos pertencente a esta última categoria, restaram 29 artigos, que foram analisados para a extração de diversas informações, que encontram-se sumarizadas nas Tabelas 1, 2, 3, 4, 5 e 6. É importante destacar que, devido a enorme variedade de métodos e formulações utilizadas por estes trabalhos para o tratamento do problema, é muito difícil realizar uma comparação justa entre eles. Assim, as tabelas citadas sumarizam somente algumas características desejáveis a um método para restabelecimento de energia. Para fins de comparação, as Tabelas 1 e 4 apresentam também as informações do método que será proposto e validado, respectivamente, nos Capítulos 4 e 5.

2.2 Principais Resultados da Revisão Bibliográfica

Analisando as informações apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3, observa-se que a maioria das metodologias propostas na literatura foram validadas em redes de pequeno porte. A exceção das metodologias propostas por (LIN et al., 2011; CHEN; LIN; TSAI, 2002; MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018; GOULART et al., 2018; CARRANO et al., 2016) e (PRADO et al., 2014) que foram validadas em redes reais, isto é, SDs com centenas de barras e chaves.

Todavia, note na oitava coluna das Tabelas 1 e 2 que em (PRADO et al., 2014), em (MANJUNATH; MOHAN, 2007) e na maioria das metodologias que fazem uso de Algoritmos Genéticos (AGs), o problema de restabelecimento é convertido em um problema de otimização mono-objetivo, isto é, com apenas uma função objetivo. Nestes trabalhos, esta função agrega os múltiplos objetivos do problema através de pesos que ponderam a importância de cada um deles. Desta forma, otimiza-se uma única função. Por outro lado, não se tem garantia de que a solução obtida terá, no problema real, o mesmo desempenho apresentado no problema simplificado; pode ser não capaz de encontrar algumas soluções da fronteira de Pareto; a definição dos pesos que ponderarão a importância de cada objetivo na função agregada, como se sabe, é difícil de ser realizada (KUMAR; DAS; SHARMA, 2008), uma vez que os valores assumidos por estes pesos têm influência direta na qualidade das soluções fornecidas e o seu desempenho pode ser diferente de uma rede para outra.

Além dos AGs, os métodos baseados em Programação Matemática (PM) também precisam da definição de apenas uma única função objetivo, para a qual são capazes de determinar a solução ótima global, enquanto consideram as restrições do problema. Para contornar a dificuldade de definição de valores para os pesos, algumas abordagens, tal como em (ROMERO et al., 2016) em (MATHIAS-NETO; MANTOVANI, 2016), representam cada função objetivo em unidades monetárias, o que permite exprimir a adequação das soluções aos objetivos do problema por meio de uma única unidade, e, por consequência, a soma destes valores sem o uso de pesos. Dentre os diferenciais do trabalho proposto por (ROMERO et al., 2016) pode-se citar a modelagem das restrições do problema sem relaxações. Ademais, embora tenha sido validado em um SD de pequeno

porte, em relação aos SDs reais, este trabalho possui a vantagem de permitir a validação de outras metodologias, especialmente daquelas baseadas em métodos meta-heurísticos, por meio de comparações com os resultados apresentados por ele, uma vez que, ele é capaz de determinar a solução ótima global do problema, já que consiste num método baseado em Programação Matemática. Notou-se também em (ROMERO et al., 2016) que a consideração da necessidade de priorização de CPs restringe o espaço de busca, o que permitiu a diminuição do tempo de processamento da metodologia proposta neste trabalho. Já em (MATHIAS-NETO; MANTOVANI, 2016), diferentemente de qualquer outro trabalhos nesta revisão, considerou-se como objetivo também a minimização do custo social de interrupções do fornecimento de energia.

(LIN et al., 2011) e (CHEN; LIN; TSAI, 2002) utilizam, respectivamente, Sistemas Multi-Agente (SMAs) e Sistema Especialistas (SEs) para obter uma solução para o problema de restabelecimento, tendo sido aplicados em SDs reais e de grande porte. Os SMAs consistem numa técnica de inteligência artificial que consideram o comportamento autônomo de cada elemento de um sistema, a capacidade destes em interagirem entre si e de tomarem decisões isolada e/ou conjuntamente. Estes elementos são chamados de agentes (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012), e no problema de restabelecimento consistem nos diversos elementos da rede elétrica, tais como, chaves religadoras, equipamentos de monitoramento e aquisição de dados, canais de comunicação, etc. Logo, as metodologias baseadas em SMAs (SOLANKI; KHUSHALANI; SCHULZ, 2007; LIN et al., 2011; ZIDAN; EL-SAADANY, 2012; SHARMA; SRINIVASAN; TRIVEDI, 2015; HAFEZ; OMRAN; HEGAZY, 2018) partem do princípio de que esta infraestrutura está disponível. Todavia, sabe-se que, infelizmente, nem todas as redes de distribuição possuem tal infraestrutura, especialmente em países em desenvolvimento, o que limita a aplicação destas abordagens. Já os SEs são estratégias que buscam representar computacionalmente o conhecimento dos operadores da rede elétrica e o modo como eles lidam com o problema de restabelecimento com a finalidade de, com base neste conhecimento, tomar decisões em contingências futuras. Contudo, segundo (KUMAR; DAS; SHARMA, 2008), a extração deste conhecimento é uma tarefa difícil. Ademais, a aplicação de metodologias baseadas em SEs pode tornar-se inviável ou limitada em redes cuja filosofia de operação é diferente daquela para a qual tais metodologias foram desenvolvidas.

Encontra-se também na literatura os métodos heurísticos (MHs) (MIU; CHIANG; MCNULTY, 2000; WANG; LI, 2007; KLEINBERG; MIU; CHIANG, 2011; GHOLAMI; MOSHTAGH; RASHIDI, 2015; WANG et al., 2017). Estes usam regras, isto é, procedimentos previamente definidos, para a obtenção de uma solução para o problema. Para tal, eles são normalmente guiados por índices, que visam medir, em relação a estas regras, a viabilidade das ações possíveis de serem executadas. Todavia, por consequência, a eficiência destas abordagens é diretamente dependente da eficácia dos procedimentos definidos pelo pesquisador e da eficiência dos índices. Além disso, estes métodos têm sido validados

apenas em redes de pequeno porte, como pode ser observado nas Tabelas 1, 2 e 3. Em relação às vantagens, os MHs, assim como os SMAs, são capazes de obter, concomitante ao processo de busca da solução do problema, uma sequência de chaveamento adequada, isto é, que assegura que a cada operação de chave a rede estará numa configuração em que não há violação das restrições operacionais.

As dependências da definição de pesos, da infraestrutura da rede, do conhecimento de especialistas e da definição de regras heurísticas não são necessariamente encontradas em metodologias baseadas em AEMOs. Dois exemplos são as metodologias propostas por (KUMAR; DAS; SHARMA, 2008) e (CARRANO et al., 2016) que fazem uso de dois AEMOs muito populares, denominados, respectivamente, *Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II* (NSGA-II) (DEB et al., 2002) e *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2* (SPEA2). Por meio destes, a natureza multiobjetiva do problema pode ser mantida, isto é, não é necessária a utilização de pesos para a conversão do problema em um problema mono-objetivo. Como resultado, as metodologias obtidas são mais genéricas, tornando-se aplicáveis a um número maior de SDs. Por outro lado, segundo (SANTOS et al., 2010), o desempenho de AEMOs, quando aplicados ao problema de restabelecimento, pode ser afetado pela utilização de uma estrutura de dados e de operadores de recombinação inadequados. O primeiro afeta diretamente a eficiência computacional do algoritmo de fluxo de potência, utilizado para avaliar os indivíduos gerados, como dito anteriormente, enquanto que o segundo pode levar a obtenção de indivíduos que violem a restrição que exige a manutenção da radialidade da rede.

É interessante notar ainda nas Tabelas 1, 2 e 3 que alguns destes trabalhos procuram minimizar também as perdas resistivas na rede. Por outro lado, outros pesquisadores defendem que este objetivo, embora seja importante em estado normal de operação, não deve ser considerado durante a restauração do fornecimento de energia, uma vez que pode entrar em conflito outros objetivos fundamentais do problema de restabelecimento (ROMERO et al., 2016). Note também que nem todos os trabalhos consideram todos os objetivos e restrições do problema apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3, como, por exemplo, o limite de carregamento de transformador em subestação.

Para aprimorar esta revisão da literatura, considere também as informações apresentadas nas Tabelas 4, 5 e 6. Elas sumarizam as informações destes trabalhos relacionadas aos aspectos práticos do problema por eles considerados.

Observe que, embora todos os trabalhos cheguem a abordar um ou outro aspecto prático, menos da metade deles considera concomitantemente a possibilidade de cortar seletivamente cargas em ou fora de serviço, de priorizar o atendimento de CPs e de definir uma sequência para operação das chaves (embora pouquíssimos deles verifiquem as características operacionais da rede nas configurações pelas quais a rede passará após a manobra de cada chave). Apesar disto, dentre estes trabalhos, somente em (CHEN;

[LIN; TSAI, 2002](#)) a metodologia proposta é avaliada em um SD de grande porte, embora seja baseado em SEs, o que faz com que seja dependente da filosofia de operação da rede. Outros três destes trabalhos são aqueles propostos por ([ZIDAN; EL-SAADANY, 2012](#); [ZIDAN; EL-SAADANY, 2013](#); [ZIDAN; EL-SAADANY, 2015](#)), que utilizam AGs e SMAs e, embora forneçam uma sequência para operação das chaves, não fazem nenhuma otimização ou verificação das configurações intermediárias ⁵.

Nota-se também uma relação muito próxima entre os critérios utilizados pelos trabalhos para a realização de corte de cargas em e fora de serviço e para priorização de CPs. Isto porque todos os trabalhos que propõem a realização de corte de cargas fazem-no seguindo a prioridade de fornecimento dos consumidores, exceto em ([MOHAMMADI; AFRAKHTEH, 2012](#)) e em ([TSAI, 2008](#)). Dentre todos estes trabalhos que realizam cortes seletivos de cargas e que priorizam os CPs, as principais diferenças entre eles consistem na capacidade de considerar múltiplos níveis de prioridade entre os CPs, na quantidade de níveis (quando são considerados) e também se o corte deve ser feito exclusivamente mantendo-se desligadas cargas já fora de serviço ou desligando cargas em serviço. Uma relação muito próxima é notada também entre priorização de consumidores e definição de sequência de chaveamento, uma vez que a sequência de operação das chaves deve ser tal que permita restaurar os consumidores seguindo seu grau ou nível de prioridade.

⁵ Configurações intermediárias são aquelas que a rede experimentará durante as operações de manobras para a implementação de um plano de restabelecimento.

Tabela 1: Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas ao método de solução, modelagem do problema, SD para validação e tempo computacional - Parte 1 de 3.

Referência	Método de Solução	Funções objetivo						Restrições						SD p/ Validação				Tempo médio de proc. ⁶ (seg.) #
		Min. do nº de cons. fora de serviço	Min. do número de manobras	Min. de perdas resistivas	Priorização de CPs	Outros objetivos	Trata cada objetivo separadamente	Balanco de Potência	Limites de tensão	Limite de car. da rede	Limite de car. em transformador	Radialidade	Outras restrições	Número de alimentadores #	Número de barras #	Número de chaves #	Bancos de Cap. e Reg. de tensão	
Este trabalho	MH+ AEMO	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	83	40606	3893	✓	100
(HAFEZ; OMRAN; HEGAZY, 2018)	SMA	✓	✓	✗	✓	✗	–	✓	✓	✓	✗	✓	✗	4	68	43	✗	–
(GOULART et al., 2018)	SA	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	5	703	132	–	360
(MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018)	AEMO	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	184	30880	5158	✗	2,1
(WANG et al., 2017)	MH	✓	✓	✗	✓	✗	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1	69	–	✗	0,75
(YUAN; ILLINDALA; KHALSA, 2017)	VA	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	1	69	–	✗	–
(CARRANO et al., 2016)	AEMO	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	5	714	121	–	<60
(MATHIAS-NETO; MANTOVANI, 2016)	BT	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	4	37	42	✓	4,5
(ROMERO et al., 2016)	PM	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	6	53	–	–	12,9
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2015)	AG	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	1	119	132	–	34,9

relacionado ao maior SD no qual o método foi testado; ✓ - “sim”; ✗ - “não”; “–” - não informado; AG - Algoritmo Genético; MH - Método Heurístico; PM - Programação Matemática; SMA - Sistemas Multi-Agente; VA - *Viterbi Algorithm*.

Tabela 2: Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas ao método de solução, modelagem do problema, SD para validação e tempo computacional - Parte 2 de 3.

Referência	Método de Solução	Funções objetivo						Restrições						SD p/ Validação				Tempo médio de proc. (seg.) #
		Min. do n° de cons. fora de serviço	Min. do número de manobras	Min. de perdas resistivas	Priorização de CPs	Outros objetivos	Trata cada objetivo separadamente	Balanco de Potência	Limites de tensão	Limite de car. da rede	Limite de car. em transformador	Radialidade	Outras restrições	Número de alimentadores #	Número de barras #	Número de chaves #	Bancos de Cap. e Reg. de tensão	
(GHOLAMI; MOSHTAGH; RASHIDI, 2015)	MH	✓	✓	✗	✓	✗	–	✓	✓	✓	✓	✓	✗	1	37	42	✗	0,7
(SHARMA; SRINIVASAN; TRIVEDI, 2015)	SMA	✓	✓	✗	✓	✗	–	✓	✓	✓	✗	✓	✓	1	119	132	–	44,6
(CHEN et al., 2015)	PM	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	1	69	74	–	0,5
(XIAOYU; MINGCHAO; YINGHUI, 2014)	AG	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	1	33	38	–	–
(JUNLAKARN; ILIC, 2014)	AG	✓	–	–	✓	✓	✗	✓	–	–	–	✓	✓	4	54	17	–	–
(PRADO et al., 2014)	AE mono	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	46	7720	1277	✗	107,6
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2013)	AG	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	4	70	43	–	19,7
(MOHAMMADI; AFRAKHTEH, 2012)	AG	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	3	118	29	–	–
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2012)	SMA	✓	✓	✗	✓	✗	–	✓	✓	✓	✗	✓	✗	4	70	43	–	–
(HUANG; HSIEH; WANG, 2011)	RN	✓	✓	✗	✗	✗	✗	–	✗	✓	✗	✓	✗	10	–	32	–	–

relacionado ao maior SD no qual o método foi testado; ✓ - “sim”; ✗ - “não”; “-” - não informado; AG - Algoritmo Genético; MH - Método Heurístico; RN - Rede Neural; SE - Sistemas Especialistas; SMA - Sistemas Multi-Agente; PM - Programação Matemática; AE mono - Algoritmo Evolutivo Mono-Objetivo.

Tabela 3: Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas ao método de solução, modelagem do problema, SD para validação e tempo computacional - Parte 3 de 3.

Referência	Método de Solução	Funções objetivo						Restrições						SD p/ Validação				Tempo médio de proc. (seg.) #
		Min. do nº de cons. fora de serviço	Min. do número de manobras	Min. de perdas resistivas	Priorização de CPs	Outros objetivos	Trata cada objetivo separadamente	Balanco de Potência	Limites de tensão	Limite de car. da rede	Limite de car. em transformador	Radialidade	Outras restrições	Número de alimentadores #	Número de barras #	Número de chaves #	Bancos de Cap. e Reg. de tensão	
(KLEINBERG; MIU; CHIANG, 2011)	MH	✓	✓	✗	✓	✓	–	✓	✓	✓	✗	✓	✓	–	416	84	–	–
(LIN et al., 2011)	SMA	✓	✓	✗	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	✗	35	–	–	–	< 180
(KUMAR; DAS; SHARMA, 2008)	AEMO	✓	✓	✓	✓	✗	–	✓	✓	✗	–	✓	✗	–	173	75	–	116,3
(TSAI, 2008)	SE	✓	✓	✗	✗	✗	–	✓	✓	✓	✓	✓	✗	6	–	54	–	–
(MANJUNATH; MOHAN, 2007)	AG	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1	133	132	–	16,2
(SOLANKI; KHUSHALANI; SCHULZ, 2007)	SMA	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	2	14	26	–	0,1
(WANG; LI, 2007)	MH	✓	✗	✗	✓	✓	–	✓	✓	✓	✗	✓	✗	4	–	19	✗	720
(CHEN; LIN; TSAI, 2002)	SE	✓	✓	✗	✓	✗	–	✓	✗	✓	✓	✓	✗	18	–	79	–	2,2
(LUAN; IRVING; DANIEL, 2002)	AG	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	7	26	114	–	210
(MIU; CHIANG; MCNULTY, 2000)	MH	✓	✓	✗	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	399	72	C	< 60

relacionado ao maior SD no qual o método foi testado; ✓ - “sim”; ✗ - “não”; “–” - não informado; AEMO - Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo; AG - Algoritmo Genético; MH - Método Heurístico; RN - Rede Neural; SE - Sistemas Especialistas; SMA - Sistemas Multi-Agente.

Tabela 4: Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas a consideração de corte de carga, priorização de CPs, definição de sequência de chaveamento e de variação da demanda - Parte 1 de 3.

Referência	Corte de carga		Priorização de Cons. Esp.				Seq. de Chav.		
	Faz-se corte de carga	Em serviço, Fora de, ou Ambos?	Prioriza o atend. de CPs	Na R, no C. C. ou Ambos?	Cons. vários níveis de prioridade	Quantidade de níveis	Fornece alguma seq. de chav.	OM: FA, AF ou Ambas?	Faz-se uma verif. da seq. de chav.
Este trabalho	✓	F	✓	R	✓	5	✓	AF ou FA	✓
(HAFEZ; OMRAN; HEGAZY, 2018)	✓	F	✓	R	✓	–	✓	AF	✓
(GOULART et al., 2018)	✓	A	✓	A	–	–	✓	FA	✓
(MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018)	✗	–	✓	–	✗	2	✓	AF	✓
(WANG et al., 2017)	✓	E	✓	A	✓	3	✓	–	–
(YUAN; ILLINDALA; KHALSA, 2017)	✓	F	✓	–	✗	–	✓	FA	✓
(CARRANO et al., 2016)	✓	A	✓	A	✓	–	✓	AF	✓
(MATHIAS-NETO; MANTOVANI, 2016)	✓	E	✓	A	✗	–	✓	–	–
(ROMERO et al., 2016)	✓	A	✓	A	✗	–	✓	–	✗
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2015)	✓	A	✓	A	✓	3	✓	–	✗

✓ - “sim”; ✗ - “não”; “-” - não informado; R - Reconexão dos consumidores saudáveis fora de serviço; C.C. - Corte de Cargas; OM - Ordem de execução das manobras que ocorrem para transf. de carga, que ocorrem em pares; FA - primeiro há uma operação de fechamento e depois de abertura; AF - primeiro há uma operação de abertura e depois de fechamento.

Tabela 5: Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionadas a consideração de corte de carga, priorização de CPs, definição de sequência de chaveamento e de variação da demanda - Parte 2 de 3.

Referência	Corte de carga		Priorização de Cons. Esp.				Seq. de Chav.		
	Faz-se corte de carga	Em serviço, Fora de, ou Ambos?	Prioriza o atend. de CPs	Na R, no C. C. ou Ambos?	Cons. vários níveis de prioridade	Quantidade de níveis	Fornecer alguma seq. de chav.	OM: FA, AF ou Ambos?	Faz-se uma verif. da seq. de chav.
(GHOLAMI; MOSHTAGH; RASHIDI, 2015)	✗	–	✓	R	✗	–	✓	–	✗
(SHARMA; SRINIVASAN; TRIVEDI, 2015)	✗	–	✓	R	✗	–	✗	–	–
(CHEN et al., 2015)	✗	–	✗	–	–	–	✗	–	–
(XIAOYU; MINGCHAO; YINGHUI, 2014)	✗	–	✓	R	✓	2	✓	–	–
(JUNLAKARN; ILIC, 2014)	✓	–	✓	C.C.	✓	3	✗	–	–
(PRADO et al., 2014)	✗	–	✗	–	–	–	✓	–	✗
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2013)	✓	A	✓	A	✓	3	✓	AF	✗
(MOHAMMADI; AFRAKHTEH, 2012)	✓	–	✗	–	–	–	✓	AF	✓
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2012)	✓	F	✓	R	✓	3	✓	AF	✗
(HUANG; HSIEH; WANG, 2011)	✗	–	✗	–	–	–	✓	FA	✗

✓ - “sim”; ✗ - “não”; “-” - não informado; R - Reconexão dos consumidores saudáveis fora de serviço; C.C. - Corte de Cargas; OM - Ordem de execução das manobras que ocorrem para transf. de carga, que ocorrem em pares; FA - primeiro há uma operação de fechamento e depois de abertura; AF - primeiro há uma operação de abertura e depois de fechamento; * embora não possua uma rotina específica para otimizar a ordem de execução das manobras, isto é feito implicitamente pelo próprio método de solução.

Tabela 6: Características dos trabalhos recentes e relevantes relacionas a consideração de corte de carga, priorização de CPs, definição de sequência de chaveamento e de variação da demanda - Parte 3 de 3.

Referência	Corte de carga		Priorização de Cons. Esp.				Seq. de Chav.		
	Faz-se corte de carga	Em serviço, Fora de, ou Ambos?	Prioriza o atend. de CPs	Na R, no C. C. ou Ambos?	Cons. vários níveis de prioridade	Quantidade de níveis	Fornece alguma seq. de chav.	OM: FA, AF ou Ambas?	Faz-se uma verif. da seq. de chav.
(KLEINBERG; MIU; CHIANG, 2011)	✓	A	✓	R	✗	–	✗	–	–
(LIN et al., 2011)	✓	A	✓	A	✓	4	✓	A	✗
(KUMAR; DAS; SHARMA, 2008)	✓	F	✓	R	–	–	✗	–	–
(TSAI, 2008)	✓	F	✗	–	–	–	✓	FA	✓*
(MANJUNATH; MOHAN, 2007)	✓	F	✓	R	✓	–	✗	–	–
(SOLANKI; KHUSHALANI; SCHULZ, 2007)	✓	F	✓	R	✗	–	✗	–	–
(WANG; LI, 2007)	✗	–	✓	R	✓	7	✓	–	✓*
(CHEN; LIN; TSAI, 2002)	✓	F	✓	R	✓	4	✓	–	✓*
(LUAN; IRVING; DANIEL, 2002)	✓	A	✓	A	✗	–	✗	–	–
(MIU; CHIANG; MCNULTY, 2000)	✓	F	✓	R	✗	–	✓	AF	✓*

✓ - “sim”; ✗ - “não”; “-” - não informado; R - Reconexão dos consumidores saudáveis fora de serviço; C.C. - Corte de Cargas; OM - Ordem de execução das manobras que ocorrem para transf. de carga, que ocorrem em pares; FA - primeiro há uma operação de fechamento e depois de abertura; AF - primeiro há uma operação de abertura e depois de fechamento; * embora não possua uma rotina específica para otimizar a ordem de execução das manobras, isto é feito implicitamente pelo próprio método de solução.

Embora indesejável, o corte seletivo de cargas faz-se necessário em situações em que não é possível restabelecer o fornecimento para todos os consumidores saudáveis desligados sem incorrer em violação de alguma restrição do problema. (MIU; CHIANG; MCNULTY, 2000), (CHEN; LIN; TSAI, 2002) e também alguns outros autores propõem que o corte de cargas ocorra em cargas saudáveis menos prioritárias que já foram desconectadas em virtude da isolação dos setores em falta. Assim, deixa-se de afetar o fornecimento de cargas não envolvidas com a ocorrência da falta e o indicador de frequência de interrupção e também não são solicitadas manobras adicionais com a finalidade de desconectar consumidores em serviço.

Por outro lado, deve-se ponderar situações em que o corte de cargas fora de serviço ocorra em cargas que possuem maior prioridade de atendimento, em detrimento de cargas menos prioritárias. Deve-se considerar também, situações nas quais todas as cargas saudáveis desligas possuam prioridade elevada, como por exemplo, na ocorrência de uma falta que desligue setores saudáveis que abastecem uma região industrial de uma grande cidade.

Para lidar com estas situações, outros trabalhos propõem que seja avaliada também a possibilidade de cortar o fornecimento de cargas não-prioritárias em serviço, com a finalidade de aumentar a capacidade reserva dos alimentadores nos quais serão reconectadas as cargas prioritárias fora de serviço. (LUAN; IRVING; DANIEL, 2002) e (KLEINBERG; MIU; CHIANG, 2011) propuseram o corte também em cargas em serviço, além daquelas já fora de serviço. Note que a tomada de decisão da quantidade de cargas a serem cortadas ou a serem restabelecidas é diretamente influenciada não apenas pela prioridade das cargas, como também pela potência demandada por elas.

Em relação a definição de uma sequência de chaveamento para guiar a implantação do plano de restabelecimento, nota-se na oitava coluna das Tabelas 4, 5 e 6 que nem todos os trabalhos preocupam-se em fazê-lo. Os trabalhos que provem alguma sequência de chaveamento fazem-no sem a preocupação de determinar se a sequência fornecida possui alguma vantagem em relação as outras sequências possíveis de serem executadas com as mesmas chaves. À exceção de (MOHAMMADI; AFRAKHTEH, 2012) e (CARRANO et al., 2016), nenhum dos trabalhos revisados deixa explícito a existência de uma verificação da factibilidade das configurações intermediárias, isto é, se as configurações pelas quais a rede permanecerá temporariamente entre um chaveamento e outro possuem as características operacionais mínimas para serem operáveis.

Em (MOHAMMADI; AFRAKHTEH, 2012), ao lidar com o problema de restabelecimento de energia por meio de um AG, a energia não suprida é representada por meio de

⁶ Como se sabe o tempo de execução de um programa é diferente para computadores distintos. Assim sendo, o tempo médio de processamento apresentado nas Tabelas 1, 2 e 3 tem caráter apenas informativo, e não comparativo.

uma equação que relaciona a potência não suprida em uma barra de carga fora de serviço com o tempo estimado necessário para a reconexão da mesma sem violação da restrição de limite de tensão. Desta forma, ([MOHAMMADI; AFRAKHTEH, 2012](#)) relacionam a energia não suprida com a sequência na qual as chaves devem ser operadas, e ainda o tipo das chaves (controladas remota ou manualmente), uma vez que considera o tempo de operação das chaves. Desta forma, ao minimizar esta função determina-se também a sequência de manobras que permite a reconexão das cargas saudáveis fora de serviço no menor intervalo de tempo. Todavia, neste trabalho são verificadas nas configurações intermediárias apenas a restrição de limite de tensão, como dito anteriormente, e a restrição de manutenção da radialidade. A restrição de carregamento de rede é verificada somente na configuração obtida após a execução de todas as manobras. E a restrição de carregamento de subestação não é considerada.

Em ([CARRANO et al., 2016](#)) considera-se que, embora seja o mais usual entre os métodos para restabelecimento, a minimização das cargas que permaneceram desconectadas após as ações para restabelecimento não é suficientemente geral e pode não ser adequado em muitos casos. Isto porque, este parâmetro não é capaz de considerar o tempo requerido para a execução das manobras que levarão ao restabelecimento. Em face disto, é proposta a minimização do somatório de tempo necessário para manobrar todas as chaves que recuperarão consumidores desligados no lugar da minimização do número total de manobras em chaves. Nesta mesma linha, ([GOULART et al., 2018](#)) propõem, por sua vez, minimizar o somatório de energia não suprida às cargas durante o período em que permanecem desligadas. Isto permite, conseqüentemente, favorecer a obtenção de soluções com sequências de chaveamento que restauram mais rapidamente os consumidores desligados.

Outra informação importante a ser destacada, no que tange a determinação de uma sequência de chaveamento, consiste na ordem em que são executadas as manobras que são realizadas visando a transferência de cargas entre alimentadores e, conseqüente, aumento da capacidade reserva dos alimentadores que alimentarão as cargas fora de serviço a serem reconectadas. Para manter a radialidade da rede estas manobras ocorrem sempre em pares, sendo uma operação de abertura e outra de fechamento. Todavia, a ordem que estas duas operações são realizadas é também muito importante, visto que, caso seja feita primeiro uma operação de fechamento, enquanto a segunda não for aberta, a rede operará de forma não radial, o que diminui o nível de curto circuito e poderá levar a conexão entre alimentadores ou subestações. Por outro lado, se a primeira manobra do par for a de abertura, então alguns consumidores saudáveis não afetados pela falta terão o seu fornecimento interrompido enquanto não for efetuada a segunda manobra do par, a de fechamento. Quando esta segunda estratégia é adotada, é importante evitar que CPs estejam dentre os consumidores transferidos, a fim de evitar-lhes interrupções temporárias.

Todavia, embora tanto a operação temporária em malha (que pode levar a conexão

entre alimentadores ou subestações distintas) quanto a interrupção temporária de consumidores a serem transferidos ocorram por um pequeno intervalo de tempo, ambas podem afetar de maneira direta a segurança da operação da rede e os indicadores de continuidade. Apesar disto, os trabalhos revisados não fazem menção a esta característica do problema, ao passo que ambas as sequências de operação do par de manobras podem ser encontradas, como pode ser visto nas Tabelas 4, 5 e 6.

2.3 Considerações finais

Como dito anteriormente, é essencialmente impossível realizar uma comparação justa e que abranja todos os aspectos relevantes de trabalhos que fazem uso de formulações e métodos de resolução variados e distintos, que foram validados em SDs e em casos de falta diferentes. Desta maneira, a revisão bibliográfica apresentada visa, principalmente, apresentar como os trabalhos relevantes e recentes na literatura abordam os aspectos importantes dentro do escopo deste trabalho, a fim de demonstrar a sua originalidade e, em segundo grau de importância, apresentar referências que permitam depreender melhor as suas capacidades.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão introduzidos alguns conceitos que estão relacionados e fundamentam o método que será proposto no Capítulo 4. Portanto, as informações apresentadas a seguir visam facilitar a compreensão do método e das bases usadas no seu desenvolvimento. Na Seção 3.2 são apresentadas informações acerca da estrutura de dados utilizada para representar a topologia de SDs; na Seção 3.3 serão introduzidos os algoritmos evolutivos multi-objetivo em tabelas de subpopulação, um fluxograma genérico, o processo de formação das subpopulações em tabelas e, ainda, uma classificação formal acerca dos tipos de tabela de subpopulação existentes; por fim, na Seção 3.4 será abordada uma estratégia capaz de acelerar a obtenção de soluções de restauração completa.

3.2 Representação nó-profundidade

As redes de distribuição de energia usualmente *(i)* operam de forma radial, o que significa que existe apenas um caminho para a corrente elétrica fluir de uma barra de geração ou em subestação até uma barra de carga; *(ii)* consistem de setores interconectados por chaves, sendo que setores são agrupamentos de barras (em subestação, de carga e de passagem) e condutores interconectados por chaves. Em virtude destas duas características, SDs podem ser representados por meio de florestas de Grafo ¹.

Na Figura 2 ilustram-se os principais componentes de um SD típico, no formato barra-ramo, e na Figura 3 sua representação, no formato setor-chave, por meio de grafos. Na Figura 3 os nós representam os setores, as arestas em linhas sólidas representam as chaves que operam normalmente fechadas (NFs), as arestas em linhas tracejadas representam as chaves que operam normalmente abertas (NAs) e as árvores de grafo representam os alimentadores. Os nós raiz das árvores de grafo são barras em subestação.

Para a representação computacional de árvores de grafo, a estrutura de dados denominada RNP foi proposta por (DELBEM et al., 2004). A representação de uma árvore de grafo por meio da RNP consiste numa lista de nós e suas profundidades (DELBEM et al., 2004; SANTOS et al., 2010); e o conjunto de árvores de grafo representadas pela RNP constitui-se na representação de uma floresta de grafo por meio da RNP. Na Figura 4 é ilustrada, a título de exemplo, a representação do grafo da Figura 3 por meio da RNP. Observe que cada uma das árvores é representada por uma RNP diferente e que o conjunto destas representa a floresta.

¹ Uma floresta de grafo é um conjunto de árvores de grafo, as quais consistem em grafos acíclicos (radiais) e conexos (DELBEM et al., 2004).

Figura 2: Exemplo de um SD típico com dois alimentadores, no formato barra-ramo.

Fonte: adaptado de (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018).

Figura 3: Representação, no formato setor-chave, do SD da Figura 2 por meio de Grafo.

Fonte: adaptado de (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018).

Figura 4: Representação do Grafo da Figura 3 por meio da RNP.

Nó	S1	A	B	C
Profundidade	0	1	2	2
Nó	S2	D	E	F
Profundidade	0	1	2	3

Fonte: o autor.

A RNP foi aplicada pela primeira vez ao problema de restabelecimento de energia por (SANTOS et al., 2010) e para permitir a execução de rotinas de fluxo de carga pelos métodos de varredura direta-inversa (SHIRMOHAMMADI et al., 1988; BARAN; WU, 1989) foi necessário o desenvolvimento de uma extensão da RNP para a representação das barras e ramos que compõem cada setor em um SD. A Figura 5 apresenta a representação,

por meio da RNP, do setor C da Figura 3, o qual é composto pelas barras C1, C2 e C3 (como pode ser visto na Figura 2). Note que a RNP do setor C é composta também por uma barra do setor A (barra A4). Isto é feito para informar que o setor C está sendo alimentado pela barra A4 (ver Figura 2). Se o setor C for alimentado pelo setor E, então a sua RNP será aquela ilustrada pela Figura 6. Todas as RNPs possíveis para um setor e também todas as RNPs dos alimentadores de uma rede em sua configuração pré-falta são geradas previamente e apenas lidas pelo método proposto.

Figura 5: Representação do setor C, quando alimentado pelo setor A, da Figura 3 por meio da RNP.

Barra	A4	C1	C2	C3
Profundidade	0	1	2	2

Fonte: o autor.

Figura 6: Representação do setor C, quando alimentado pelo setor E, da Figura 3 por meio da RNP.

Barra	E3	C3	C1	C2
Profundidade	0	1	2	3

Fonte: o autor.

Desde a sua concepção, a RNP visa facilitar e melhorar a performance de algoritmos evolutivos (ver Seção 3.3) aplicados a problemas que envolvem a representação computacional de redes por meio de Grafos. E, como será visto mais adiante, todo algoritmo evolutivo precisa de um ou mais operadores de reprodução para a geração de novos indivíduos ².

Neste sentido, também foram propostos por (DELBEM et al., 2004) dois operadores de reprodução, denominados *Preserve Ancestor Operator* (PAO) e *Chance Ancestor Operator* (CAO), que realizam manipulação (poda e transferência de subárvores) em florestas de Grafo armazenadas por meio da RNP. A principal vantagem destes operadores é a garantia de que geram sempre uma florestas de Grafo quando aplicados a uma outra floresta de Grafo armazenada pela RNP. Isto significa que quando o PAO e o CAO são utilizados, não são necessárias rotinas para verificar se os indivíduos gerados correspondem a uma configuração radial da rede, o que concorre para a eficiência computacional do algoritmo evolutivo que os usa.

² No contexto de algoritmos evolutivos, um indivíduo é uma solução possível e candidata à resolução do problema. No contexto de algoritmos evolutivos aplicados ao problema de restauração de energia, um indivíduo representa uma configuração da rede.

A aplicação do PAO e do CAO numa floresta de Grafo exige a definição de duas árvores: T_{de} e T_{para} . A primeira é a árvore na qual será podada uma subárvore T_{tmp} e a segunda é a árvore na qual T_{tmp} será enxertada. A diferença entre ambos operadores está no modo como T_{tmp} é enxertada em T_{para} . Por meio do PAO, T_{tmp} é inserida em T_{para} por meio do mesmo nó no qual foi podada. Através do CAO, o nó em T_{tmp} por meio do qual T_{tmp} será enxertada em T_{para} é escolhido aleatoriamente dentre os nós que formam T_{tmp} . Quando aplicados ao problema de restabelecimento, as operações realizadas pelo PAO e pelo CAO consistem em transferências de setores entre alimentadores da rede. Uma apresentação amplamente detalhada e ilustrada do funcionamento do PAO e do CAO, bem como da representação de grafos por meio da RNP, pode ser encontrada em (SANTOS et al., 2010) e em (MARQUES, 2013). Ademais, na Seção 4.2 serão apresentadas outras informações sobre o porquê a RNP melhora a eficiência computacional de algoritmos evolutivos no tratamento de problemas de reconfiguração de redes.

3.3 Algoritmos evolutivos multi-objetivo em tabelas de subpopulação

Algoritmos evolutivos são algoritmos de busca estocásticos baseados nos princípios de seleção e recombinação naturais (SANTOS et al., 2010) e que têm sido aplicados à resolução de diversos problemas complexos de otimização. Por não garantirem a obtenção da solução ótima global, os algoritmos evolutivos são mais utilizados em problemas nos quais a aplicação de um método determinístico não é possível ou não é viável.

Existem várias formas classificações para algoritmos evolutivos. Quanto ao número de objetivos que trata, eles podem ser: mono-objetivo ou multi-objetivo. Em relação a capacidade de salvar a melhor solução de uma geração para outra, de acordo com (DEB, 2001) eles podem ser classificados também em: elitista - se possui a capacidade de guardar de uma geração para outra a melhor solução ou o conjunto das melhores soluções; não elitista - se não possui a preocupação de manter a melhor solução ou conjunto com as melhores soluções. Os algoritmos evolutivos multi-objetivos (AEMOs, como já definido anteriormente) são normalmente aplicados em problemas que possuem dois ou mais objetivos conflitantes entre si.

Dentre os AEMOs elitistas já aplicados ao problema de restabelecimento está o “Algoritmo Evolutivo Multi-objetivo em Tabelas” (AEMT, como já definido anteriormente), proposto por (SANTOS et al., 2010). O AEMT baseia-se no princípio de tabelas de subpopulação por meio do qual a população é dividida em subpopulações, as quais contêm os melhores indivíduos para um determinado objetivo ou característica importante do problema. Estas subpopulações são, então, armazenadas em tabelas. Além do uso deste princípio, outras características e diferenciais do AEMT no tratamento do problema de restabelecimento são: utilização da RNP para a representação computacional do SD; uso dos operadores de cruzamento PAO e CAO que, como dito, geram sempre configurações

radiais da rede; utilização de um fluxo de carga computacionalmente eficiente, e; capacidade de lidar eficientemente com SDs de grande porte (com milhares de barras e chaves). Apesar disto, algumas limitações do AEMT são: o não tratamento de aspectos práticos do problema; o fornecimento de fronteiras de Pareto com baixa diversidade; a realização de manobras desnecessárias à solução do problema, etc.

No intento de manter as vantagens do AEMT e superar as suas limitações, diversas outras estratégias foram propostas baseadas no AEMT e visando especialmente melhorias na sua capacidade de busca e/ou tratamento de algum(s) aspecto(s) prático(s). Algumas destas estratégias foram publicadas por (SANCHES et al., 2012; SANCHES; LONDON JR.; DELBEM, 2014; SANCHES et al., 2014; CAMILLO et al., 2015; CAMILLO et al., 2016b; CAMILLO et al., 2016a; MARQUES et al., 2014c; MARQUES et al., 2014a; MARQUES et al., 2014b; MARQUES et al., 2015; MARQUES et al., 2017; MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018; GOIS et al., 2013). Em virtude de todas estas estratégias serem inspiradas no AEMT e, em sua maioria, fazerem uso do mesmo algoritmo básico, elas serão neste trabalho categorizadas e referidas genericamente como *AEMOs em tabelas de subpopulação* ou, simplesmente, *AEMOs em tabelas*.

Para o desenvolvimento do método proposto foi tomado como base o AEMO em tabelas de subpopulação proposto por (MARQUES, 2013) e denominado “Algoritmo Evolutivo Multi-objetivo em Tabelas com Priorização de Chaves, Consumidores e Definição de Sequência de Chaveamento” (AEMT++). Isto porque, como seu nome sugere, o AEMT++ é uma variação do AEMT com a capacidade de tratar os seguintes aspectos práticos: priorização de CCRs; consideração de dois níveis de prioridade entre consumidores (prioritário e não prioritário) e priorização de consumidores prioritários; definição de uma sequência de chaveamento que garante, apenas, que serão radiais todas as configurações intermediárias. Não obstante, o AEMT++ não é capaz de: fornecer soluções de restauração parcial; garantir a ausência de violação dos limites operacionais nas configurações intermediárias; considerar mais que dois níveis de prioridade entre os consumidores; fornecer um conjunto Pareto-ótimo; selecionar cargas a serem deixadas fora de serviço, quando necessário.

Todos os AEMOs em tabelas de subpopulação, incluindo o AEMT++, são baseados no algoritmo genérico ilustrado pela Figura 7. O processo evolutivo consiste dos passos que formam o laço de repetição ilustrado. As especificidades de cada AEMO em tabelas de subpopulação presentes na literatura e citados acima estão na maneira como alguns destes passos são executados ou, ainda, na execução de alguns passos adicionais. Por exemplo, para a definição de uma sequência de chaveamento, apesar das limitações já citadas, o AEMT++ (MARQUES, 2013) possui alguns passos que são executados após o encerramento do processo evolutivo; para a priorização de consumidores prioritários, o AEMT++ possui algumas tabelas de subpopulação diferentes das existentes no AEMT (SANTOS et al., 2010), as quais, por sua vez, não são totalmente iguais às tabelas de subpopulação

propostas por (SANCHES; LONDON JR.; DELBEM, 2014); para a geração de um novo indivíduo, um novo operador foi proposto por (SANCHES; LONDON JR.; DELBEM, 2014) baseado no algoritmo *Differential Evolution* (R; K, 1997).

Figura 7: Fluxograma genérico dos AEMOs em tabelas de subpopulação.

Fonte: o autor.

Um dos passos do algoritmo da Figura 7 consiste em atualizar as subpopulações em tabelas após a geração e avaliação de um novo indivíduo G^{new} . No primeiro AEMO em tabelas (SANTOS et al., 2010) este passo consiste, para cada tabela P_* , em: (i) determinar o pior indivíduo armazenado em P_* (G^{WP*}), considerando o objetivo ou parâmetro a ser minimizado em P_* ; (ii) salvar G^{new} e descartar G^{WP*} , se o primeiro for melhor que o segundo, ou, caso contrário, em descartar G^{new} . Em relação às tabelas de subpopulação que são formadas desta maneira, diz-se que são baseadas no *conceito tradicional* de tabelas de subpopulação, por ter sido este o conceito de tabelas proposto no primeiro AEMO em tabelas. Este procedimento é ilustrado pela Figura 8. Quando uma tabela baseada no *conceito tradicional* não está completamente cheia, um novo indivíduo é automaticamente armazenado.

Figura 8: Procedimento para atualização de uma subpopulação em uma tabela P_* baseado no conceito tradicional de tabelas.

Fonte: o autor.

Apesar de todos os AEMOs em tabelas já propostos possuírem ao menos algumas tabelas baseadas no conceito tradicional, há também tabelas que são construídas a partir de outros conceitos. Um exemplo é o *conceito de tabelas de múltiplos critérios*, utilizado primeiramente por (MARQUES, 2013), por meio do qual diversos critérios são analisados para determinação do pior indivíduo, G^{WP_*} , salvo numa tabela de multi-critério P_* e também na determinação do melhor indivíduo dentre G^{new} e G^{WP_*} . Dada uma tabela P_* , n critérios a serem analisados, um novo indivíduo G^{new} e o pior indivíduo G^{WP_*} salvo em P_* , G^{new} substituirá G^{WP_*} se for melhor que ao menos um dos n critérios. Sendo melhor, G^{WP_*} é descartado para o armazenamento de G^{new} em seu lugar. Caso contrário, G^{new} é descartado. Este procedimento é ilustrado na Figura 9. Em ambos os conceitos de tabelas de subpopulação, dizer descartar G^{new} significa simplesmente que ele não será armazenado em uma determinada tabela, podendo ser incluído em outras tabelas.

Exemplos de tabelas baseadas no conceito de múltiplos critérios são aquelas propostas por (MARQUES, 2013) para a minimização do número de manobras e priorização de manobras em CCRs. Nestas tabelas, considera-se que G^{new} é melhor que G^{WP_*} se ao menos um dos seguintes critérios é satisfeito:

- o número de manobras em CCMs de G^{new} é menor do que o número de manobras em CCMs de G^{WP_*} ;
- o número de manobras em CCMs de G^{new} é igual ao número de manobras em CCMs de G^{WP_*} e o número de manobras em CCRs de G^{new} é menor do que o número de

Figura 9: Procedimento para atualização de uma subpopulação em uma tabela P_* baseado no conceito de tabelas de múltiplos critérios.

Fonte: o autor.

manobras em CCRs de G^{WP*} ;

- o número de manobras em CCMs e em CCRs de G^{new} e de G^{WP*} são iguais, e o maior valor de máxima queda de tensão em G^{new} é menor que o maior valor de máxima queda tensão em G^{WP*} ;
- o número de manobras em CCMs e em CCRs e o máximo valor da maior queda de tensão em G^{new} e em G^{WP*} são iguais, e o valor de máximo carregamento da rede em G^{new} é menor do que o valor de máximo carregamento da rede em G^{WP*} ;
- o número de manobras em CCMs e em CCRs, o máximo valor de queda de tensão e de máximo carregamento da rede em G^{new} e em G^{WP*} são iguais, e o valor de máximo carregamento de transformador em G^{new} é menor do que o valor de máximo carregamento de transformador em G^{WP*} .

Observe que por meio do conceito de tabelas de múltiplos critérios é possível otimizar sequencialmente mais de um parâmetro numa mesma tabela de maneira. Note também que este conceito permite que em uma tabela sejam tratados objetivos para os quais existe ou possa-se estabelecer um nível de hierarquia entre os objetivos. Por exemplo, a tabela anterior, como dito, é para a priorização de manobras em CCRs. Perceba que para atingir esta meta, o uso do conceito de tabelas de multi-critério criou uma hierarquia entre as necessidades de minimizar manobras em CCM e em CCRs, de tal forma que a priorização ocorre na forma de minimização prioritariamente de CCMs.

O tratamento de problemas que possuem hierarquia entre alguns dos objetivos também pode ser feito pela minimização de uma função que agrega os objetivos com hierarquia e pondera a importância de cada um por meio de pesos. Neste caso, a minimização desta função poderia ser feito por meio de uma tabela baseada no conceito tradicional de tabelas de subpopulação. Contudo, de acordo com (KUMAR; DAS; SHARMA, 2008), o estabelecimento destes pesos é uma tarefa difícil de ser realizada e faz com que a qualidade da solução obtida seja dependente do sucesso no ajuste dos pesos. Ademais, uma atualização nos valores de pesos de ponderação pode eventualmente ser necessária após o crescimento da rede ou quando uma nova rede for considerada.

3.4 Busca exaustiva local

As manobras envolvidas na restauração de setores saudáveis desligados pela ocorrência de faltas podem ser divididas em três grupos, segundo a sua finalidade no processo de restabelecimento, a saber: manobras para isolamento dos setores faltosos, manobras para reconexão dos setores saudáveis desligados e manobras para a transferência de cargas entre alimentadores de setores saudáveis não afetados pela falta. As manobras deste último grupo ocorrem em pares, sendo uma operação de abertura e outra de fechamento ou vice-versa, e visam aliviar previamente os alimentadores que receberão os consumidores restauráveis. Este alívio, quando necessário, visa evitar a ocorrência de violação dos limites operacionais da rede decorrentes da conexão de novas cargas.

Em (CAMILLO et al., 2016a) foi mostrado em um SD real e de grande porte que muitos casos de falta podem ser solucionados restaurando todos os setores desligados por meio da realização apenas de manobras para isolamento de setores faltosos e reconexão de setores saudáveis desligados. Observou-se ainda que a identificação e o tratamento destes casos por meio de uma estratégia heurística concorrem para a obtenção de planos de restabelecimento com menos manobras e num intervalo de tempo menor que planos de restauração obtidos por AEMO denominado MEAN-MH (SANCHES; LONDON JR.; DELBEM, 2014).

Para este fim, (CAMILLO et al., 2016a) propuseram uma estratégia determinística que consiste numa Busca Exaustiva Local (BEL), aplicada apenas às chaves NAs capazes de reconectar os setores saudáveis desligados. Mais especificamente, consiste numa busca que testa todas as possibilidades de restauração dos setores desligados usando as chaves NAs disponíveis. Isto significa que as chaves NAs capazes de reconectar os setores saudáveis afetados são combinadas de maneira a que sejam testadas todas as combinações possíveis. Além dos resultados já citados, mostrou-se que, quando não é possível obter um plano de restabelecimento de restauração completa fazendo apenas manobras para reconexão de setores saudáveis desligados, o processo de busca de um AEMO executado posteriormente à BEL tem a sua eficiência melhorada se as configurações da rede obtidas, avaliadas e

testadas pela BEL forem usadas na formação da população inicial deste AEMO.

Em virtude de tais vantagens, optou-se por incluir ao método proposto a BEL definida por (CAMILLO et al., 2016a). Assim, garante-se que os casos de falta mais simples poderão ser solucionados sem a execução do AEMO proposto e, portanto, num intervalo de tempo menor, restaurando todos os setores saudáveis desligados com o mínimo de manobras em chaves. Contudo, para permitir a definição de uma sequência de chaveamento que minimize a energia não suprida e que priorize o atendimento dos consumidores prioritários, a BEL foi ligeiramente alterada, dando origem a BEL Modificada (BELM), que será apresentada com maiores detalhes na Seção 4.3.2.6.

Considerando que os setores em falta já tenham sido isolados, a aplicação da BEL é realizada pelos seguintes passos (CAMILLO et al., 2016a):

Passo 1 - determinação de todos os agrupamentos de setores saudáveis possíveis de serem restaurados;

Passo 2 - determinação, para cada agrupamento de setores saudáveis restauráveis, de quais são as chaves NAs disponíveis para a reconexão deste agrupamento em algum setor energizado;

Passo 3 - determinação de todas as combinações possíveis de chaves NAs capazes de restaurar todos os agrupamentos de setores realizando apenas uma manobra por agrupamento;

Passo 4 - aplicação de todas as combinações de chaves a fim de gerar todas as soluções (configurações da rede) possíveis de restauração completa;

Passo 5 - avaliação de todas as soluções geradas e checagem da factibilidade das mesmas;

Passo 6 - seleção e informação de uma solução factível ou informação de que nenhuma solução factível foi encontrada.

Chamando de N_{SSR} o número total de agrupamentos de setores saudáveis desligados restauráveis e de n_i o número total de chaves NAs capazes de restaurar um agrupamento i , então, o número total de soluções possíveis de restauração completa (N_{TOTAL}) é dado por:

$$N_{TOTAL} = n_1 \times n_2 \times \dots \times n_{N_{SSR}} \quad (3.1)$$

Note que o número de soluções possíveis de serem geradas pela BEL é diretamente proporcional ao número de agrupamento de setores saudáveis desligados e ao número total de chaves NAs disponíveis para restauração destes agrupamentos. Isto significa que, na ocorrência de faltas simultâneas em vários setores em falta, ou em redes com muitas chaves NAs, a aplicação da BEL e também da BELM, que será apresentada, pode tornar-se

inviável em virtude do tempo que exigido para gerar e avaliar tantas soluções. Em virtude disto, tem sido desenvolvido um estudo por outro membro do grupo de pesquisa com a finalidade de determinar as condições limites nas quais a BEL deixa de ser viável em relação ao tempo de execução requerido. Na Seção [4.3.2.6](#) é apresentado um exemplo de aplicação da BELM, que inclui todos os passos anteriores.

4 ENUNCIADO FORMAL E MÉTODO PROPOSTO

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será proposto um enunciado formal para o problema de restabelecimento considerando seus aspectos práticos, cuja apresentação será precedida de outros enunciados mais simples. Em seguida, o método proposto será apresentado em detalhes.

4.2 Enunciado formal do problema

4.2.1 Intervalos de tempo envolvidos no problema

Desde o instante de ocorrência de uma falta até a sua completa eliminação, diversos eventos ocorrem. Para ilustrá-los, considere a Figura 10. Observe que tais eventos ocorrem em intervalos de tempo que conceitualmente são bem definidos. No instante da ocorrência das faltas a rede está operando na configuração pré-falta(G^{pf}). Imediata e quase simultaneamente após a ocorrência de faltas permanentes, as chaves associadas ao sistema de proteção e localizadas à montante e mais próximas dos setores em falta serão abertas. Dessa forma, são colocados fora de serviço: os setores em falta; os setores localizados à jusante dos setores em falta; e os setores localizados à montante dos setores em falta e à jusante das chaves que foram abertas pelo sistema de proteção. Na sequência, procede-se com a localização dos setores em falta.

Uma vez que estes estão localizados, pode-se iniciar a execução de uma ferramenta computacional para a obtenção e fornecimento de planos de restabelecimento. Associada a a um plano deverá haver a sequência de chaveamento que guiará os operadores da rede na isolação dos setores em falta para manutenção e na restauração do fornecimento da maior quantidade possível de consumidores desligados. Ao término da execução destas manobras, estará implementada a configuração na qual a rede operará enquanto estiverem sendo realizados os procedimentos de reparo nos setores em falta.

Assim, observa-se na Figura 10 quatro intervalos. No intervalo Δt_1 ocorrem ações para a localização dos setores em falta. Imediatamente antes de seu início a rede estará operando na configuração pré-falta. Após a sua ocorrência, em virtude da abertura das chaves acionadas pelo sistema de proteção, a rede estará operando na configuração em que estarão desligados setores faltosos e saudáveis. Ao longo do intervalo Δt_2 será executada uma ferramenta para obtenção de ao menos um plano de restabelecimento e a rede permanecerá operando naquela configuração descrita. No intervalo Δt_3 ocorre a execução de manobras em chaves numa sequência prevista no plano de restabelecimento e, por isso, a rede passará por diversas configurações que estarão em operação por um breve período de tempo. Ao longo deste intervalo é que são restaurados parcial ou totalmente

Figura 10: Intervalos de tempo associados às ações para resolução do problema de restabelecimento.

Fonte: o autor.

os consumidores saudáveis desligados pela ocorrência da falta. Ao término do intervalo Δt_3 a rede irá operar na configuração prevista no plano de restabelecimento. Durante o intervalo Δt_4 ocorrem as ações para o reparo da falha. Após este intervalo, isto é, após a recuperação total dos elementos defeituosos, iniciam-se as ações para retornar a rede para a sua configuração pré-falta ou para qualquer outra configuração desejada.

Após a isolação dos setores em falta, pode-se restaurar os setores saudáveis que estão localizados à montante dos setores em falta e à jusante da chave aberta pelo sistema de proteção. Para tal, a sequência de chaveamento deve prever que cada chave aberta pelo sistema de proteção seja fechada imediatamente após a abertura das chaves que isolarão o setor defeituoso. Nas sequências de chaveamento fornecidas pelo método proposto tais chaves de proteção não são informadas, o que exige que o operador recorde-se de operá-las imediatamente após a abertura da chave que isolam um setor em falta pelo lado à jusante. Ademais, o método, do modo como será proposto adiante, não considera a energia não suprida aos consumidores saudáveis desligados localizados à montante dos setores em falta. Todavia, o método proposto é completamente flexível para inserir na sequência de chaveamento a ser fornecida as operações em chaves de proteção. Para tal, seria necessário obter o identificador da chave que foi operada pela proteção e informá-lo juntamente com o identificador do setor em falta. O método proposto pode ser facilmente alterado também para a consideração da energia não suprida aos consumidores saudáveis desligados

localizados à montante dos setores em falta.

4.2.2 Enunciado formal proposto

Considerando a necessidade de definição de uma sequência adequada de chaveamento, formalmente pode-se definir o problema de restabelecimento de energia em SDs da seguinte forma.

$$\text{Minimizar } \varepsilon(G), \psi(G) \quad (4.1)$$

$$\text{s. a : } A(G^e)x(G^e) = c(G^e) \quad (4.2)$$

$$A(G^e)Y_x(G^e)A(G^e)^t v(G^e) = c(G^e) \quad (4.3)$$

$$X(G^e) \leq 1 \quad (4.4)$$

$$B(G^e) \leq 1 \quad (4.5)$$

$$V(G^e) \leq \delta \quad (4.6)$$

$$G^e \text{ ser uma floresta de grafo,} \quad (4.7)$$

$$G = G^e \cup G^{ne} \quad (4.8)$$

$$\text{seq}(G) \text{ ser factível,} \quad (4.9)$$

na qual G é uma configuração radial do SD, representada por uma floresta de grafo; G^e é a porção de G que se encontra em serviço (representa todos os alimentadores que estão energizados em G); G^{ne} é a porção de G que se encontra fora de serviço (representa a parte da rede que está desenergizada em G)^{1 2}; $\varepsilon(G)$ é a energia total não suprida, que consiste no produto entre a potência ativa não suprida e o tempo de ausência de suprimento durante o intervalo de tempo Δt_4 ³; $\psi(G)$ é o número total de manobras necessárias para a obtenção de G a partir de G^{pf} ; $A(G^e)$ é a matriz incidência nó-aresta pseudo-orientada (obtida através de um grafo orientado das correntes) de G^e ; $x(G^e)$ é o vetor de correntes complexas nas linhas em G^e ; $c(G^e)$ é o vetor de correntes complexas demandadas em barras de carga ($c_j \leq 0$) e injetadas em barras de subestações ($c_j > 0$) em (G^e) ⁴; $Y_x(G^e)$ é a matriz diagonal de admitância da rede em G^e ; $v(G^e)$ é o vetor de tensões complexas das barras em G^e ; $X(G^e)$ é o máximo valor de carregamento de rede em G^e , dado por $X(G^e) = \text{MAX}\{x_j/\bar{x}_j\}$, no qual $\bar{x}_j$ é o limite superior admissível para a corrente elétrica x_j em uma linha j ; $B(G^e)$ é o máximo valor de carregamento de transformador (em

¹ A fim de garantir que G^{ne} seja uma floresta de grafo, i.e., um conjunto de grafos acíclicos e conexos, os agrupamentos de setores saudáveis fora de serviço são conectados a uma árvore fictícia.

² Em G^{ne} são desconsiderados os setores saudáveis fora de serviço que não podem ser restaurados devido a ausência de chaves e também os setores em falta.

³ Neste trabalho, desconsidera-se a potência ativa não suprida aos consumidores presentes no setor em falta.

⁴ Note que neste trabalho não foi considerada a presença de geração distribuída.

subestação abaixadora) em G^e , dado por $B(G^e) = \text{MAX}\{b_s/\bar{b}_s\}$, no qual $\bar{b}_s$ é o limite superior admissível para uma injeção de corrente b_s provida por um transformador s ; $V(G^e)$ é o máximo valor de queda de tensão em G^e , dado por $V(G^e) = \text{MAX}\{|v_s - v_k|/v_s\}$, no qual v_s é a magnitude de tensão na barra secundária de um transformador s (em subestação abaixadora), v_k é a magnitude de tensão numa barra k de um alimentador do SD; δ é a máxima queda de tensão admissível; $\text{seq}(G)$ representa a sequência de chaveamento de G , isto é, a sequência na qual devem ser executadas as manobras necessárias para a obtenção de G a partir de G^{pf} .

As restrições 4.2 e 4.3 representam, respectivamente, a primeira e a segunda leis de Kirchoff; as restrições 4.4, 4.5 e 4.6 representam, respectivamente, os limites para carregamento de rede e de transformador e queda de tensão; a restrição 4.8 expressa que em G o SD está dividido em duas porções, uma energizada, que está em serviço (G^e), e outra desenergizada, que está fora de serviço (G^{ne}) (essa divisão é importante para salientar que as restrições 4.2 – 4.6 são aplicadas apenas a porção da rede que permanece em serviço); a restrição 4.7 representa a necessidade de manter a radialidade da porção da rede que está em serviço; e, por fim, a presença da restrição 4.9 faz com que G só possa ser considerada uma solução para o problema se, além de atender as restrições 4.2 – 4.7, a segurança operacional da rede puder ser garantida também ao longo da execução das manobras necessárias para a sua obtenção a partir de G^{pf} . Enquanto tais manobras estiverem sendo realizadas, a rede irá operar por um curto período de tempo em algumas configurações distintas. Tais configurações serão chamadas, deste ponto em diante, de **configurações intermediárias**. As configurações intermediárias associadas a G são definidas pela sequência adotada para a obtenção de G (i.e., $\text{seq}(G)$). Formalmente,

$seq(G)$ é factível, se :

$$A(g^e)x(g^e) = c(g^e), \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.10)$$

$$A(g^e)Y_x(g^e)A(g^e)^tv(g^e) = c(g^e), \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.11)$$

$$X(g^e) \leq 1, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.12)$$

$$B(g^e) \leq 1 + \Delta B, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.13)$$

$$V(g^e) \leq \delta + \Delta V, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.14)$$

$$g^e \text{ for uma floresta de grafo}, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.15)$$

$$g = g^e \cup g^{ne} \quad (4.16)$$

$$A(G^e)x(G^e) = c(G^e) \quad (4.17)$$

$$A(G^e)Y_x(G^e)A(G^e)^tv(G^e) = c(G^e) \quad (4.18)$$

$$X(G^e) \leq 1 \quad (4.19)$$

$$B(G^e) \leq 1 \quad (4.20)$$

$$V(G^e) \leq \delta \quad (4.21)$$

$$G^e \text{ for uma floresta de grafo} \quad (4.22)$$

$$G = G^e \cup G^{ne}. \quad (4.23)$$

Considerando que a obtenção de G a partir de G^{pf} é realizada por meio da operação de uma sequência de manobras $seq(G)$, g representa uma configuração intermediária de G ; g^e é a porção de g que encontra-se em serviço (energizada); g^{ne} é a porção de g que encontra-se fora de serviço (desenergizada); $\Omega_I(G)$ é o conjunto formado por todas as configurações intermediárias de G , isto é, todas as configurações que ficarão temporariamente em operação enquanto $seq(G)$ estiver sendo executada para a obtenção de G ; ΔB e ΔV representam, respectivamente, carregamentos de transformador e quedas de tensão adicionais que são aceitos temporariamente enquanto g está em operação.

Assim, as restrições 4.10 e 4.11 correspondem a primeira e a segunda lei de Kirchhoff para g^e . A restrição 4.12 representa o limite para o valor de carregamento de rede em g^e . As restrições 4.13 e 4.14 representam um relaxamento nos limites, respectivamente, de carregamento de transformador e de queda de tensão que é aceito em virtude do carácter temporário de operação da rede em g . Muito embora o limite para o valor de carregamento de rede não possa ser relaxado, o conjunto formado pelas restrições 4.12, 4.13 e 4.14 será chamado, deste ponto em diante, de Conjunto de Restrições Relaxadas ou, simplesmente, Restrições Relaxadas⁵. O limite para o valor de carregamento de rede não pode ser relaxado porque não são admissíveis sobrecorrentes em cabos elétricos, uma vez que isto causa sobreaquecimentos que podem levar ao rompimento de cabos e, em cabos

⁵ Este termo será utilizado mais adiante, quando for apresentado o método proposto.

com isolação, a falhas na isolação. 4.15 é para dizer da necessidade de manutenção da radialidade em g^e . 4.16 expressa que g é dividido em duas porções, uma energizada (g^e) e outra desenergizada (g^{ne}); por fim, as restrições 4.17 – 4.22 são as mesmas que já foram apresentadas e explicadas anteriormente, e que expressam que em G devem ser respeitadas as leis de Kirchoff e os limites operacionais para carregamentos de rede e de transformador e para quedas de tensão; e que a radialidade da rede deve ser mantida.

Substituído a restrição 4.9 por 4.10 – 4.23 e considerando que as restrições 4.17 – 4.23 expressam o mesmo que as restrições 4.2 – 4.8, então o enunciado formal do problema apresentado anteriormente pode ser rescrito da maneira a seguir.

$$\text{Minimizar } \varepsilon(G), \psi(G) \quad (4.24)$$

$$s. a : \quad A(G^e)x(G^e) = c(G^e) \quad (4.25)$$

$$A(G^e)Y_x(G^e)A(G^e)^t v(G^e) = c(G^e) \quad (4.26)$$

$$X(G^e) \leq 1 \quad (4.27)$$

$$B(G^e) \leq 1 \quad (4.28)$$

$$V(G^e) \leq \delta \quad (4.29)$$

$$G^e \text{ ser uma floresta de grafo,} \quad (4.30)$$

$$G = G^e \cup G^{ne} \quad (4.31)$$

$$A(g^e)x(g^e) = c(g^e), \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.32)$$

$$A(g^e)Y_x(g^e)A(g^e)^t v(g^e) = c(g^e), \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.33)$$

$$X(g^e) \leq 1, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.34)$$

$$B(g^e) \leq 1 + \Delta B, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.35)$$

$$V(g^e) \leq \delta + \Delta V, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.36)$$

$$g^e \text{ ser uma floresta de grafo, } \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.37)$$

$$g = g^e \cup g^{ne} \quad (4.38)$$

Quando é feita a distinção entre as chaves dos SDs que podem ser operadas remotamente (CCRs) das que são controladas manualmente (CCMs), pode-se inserir no problema a necessidade de priorizar operações em CCRs enquanto minimiza-se o total de chaveamento de ambas. Assumindo-se que é sempre mais vantajoso operar CCRs do que CCMs, então a minimização do número de manobras em CCMs torna-se mais prioritária que a minimização do número de manobras em CCRs. E, uma vez que tem-se dois objetivos com um grau de prioridade entre eles, pode-se modelar tal objetivo como um problema hierárquico. Deste modo, para distinguir entre CCMs e CCRs e priorizar operações nesta última, o seguinte objetivo

$$\text{Minimizar } \psi(G)$$

pode ser representado por:

$$\begin{aligned} \text{Min. } & \psi_M(G), \text{ e com o valor de } '\psi_{M_{\min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \\ \text{Min. } & \psi_{M_{\min}}(G) + \psi_R(G), \end{aligned} \quad (4.39)$$

no qual $\psi_M(G)$ representa o número de manobras em CCMs necessários a obtenção de G a partir de G^{pf} ; $\psi_R(G)$ expressa o número de manobras em CCRs necessários a obtenção de G a partir de G^{pf} . A diferenciação entre os graus de prioridade destes dois objetivos pode ser expressa também por meio de uma soma de ambos ponderada por pesos que expressem os graus de prioridade. Todavia, de acordo com (KUMAR; DAS; SHARMA, 2008), a definição de pesos para funções ponderação pode ser uma tarefa difícil de ser realizada e que possui influencia direta nas soluções obtidas. A fim de evitar tal dificuldade, optou-se por modelar os graus de prioridade como um problema hierárquico, conforme mostrado acima e conforme realizado por (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018).

Quando é feita a distinção entre os níveis de prioridade de atendimento entre os consumidores, pode-se considerar no problema a necessidade de priorizar o atendimento para aqueles com os maiores níveis de prioridade. Distinguindo-se os consumidores em quatro níveis de prioridade, a saber: prioridade alta (PA), prioridade intermediária (PI), prioridade baixa (PB) e sem prioridade (SP); pode-se separar $\varepsilon(G)$ em quatro parcelas a serem minimizadas. Ademais, assumindo-se que o atendimento de um único consumidor com PA é mais vantajoso que o atendimento de qualquer quantidade de consumidores com PI, e assim sucessivamente; então, passa-se a existir um grau de prioridade de minimização da energia não suprida aos consumidores. Consequentemente, pode-se modelar tal objetivo como um problema hierárquico. Portanto,

$$\text{Minimizar } \varepsilon(G)$$

pode ser representado por:

$$\begin{aligned} \text{Min. } & \varepsilon_A(G), \text{ e com o valor de } '\varepsilon_{A_{\min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \\ \text{Min. } & \varepsilon_{A_{\min}}(G) + \varepsilon_I(G), \text{ e com o valor de } '\varepsilon_{I_{\min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \\ \text{Min. } & \varepsilon_{A_{\min}}(G) + \varepsilon_{I_{\min}}(G) + \varepsilon_B(G), \text{ e com o valor de } '\varepsilon_{B_{\min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \\ \text{Min. } & \varepsilon_{A_{\min}}(G) + \varepsilon_{I_{\min}}(G) + \varepsilon_{B_{\min}}(G) + \varepsilon_S(G), \end{aligned} \quad (4.40)$$

no qual $\varepsilon_A(G)$ é a energia não suprida aos consumidores com PA durante o intervalo de tempo necessário para a obtenção e a operação de G ; $\varepsilon_I(G)$ é a energia não suprida aos

consumidores com PI durante o intervalo de tempo necessário para a obtenção e a operação de G ; $\varepsilon_B(G)$ é a energia não suprida aos consumidores com PB durante o intervalo de tempo necessário para a obtenção e a operação de G ; $\varepsilon_S(G)$ é a energia não suprida aos consumidores SP durante o intervalo de tempo necessário para a obtenção e a operação de G .

Portanto, substituindo-se os dois objetivos em 4.24 por 4.39 e 4.40, obtém-se o enunciado a seguir, que contempla: a necessidade de definição de uma sequência de chaveamento adequada; a necessidade de distinguir e priorizar de maneira distintas manobras em CCRs e em CCMs; e a necessidade de priorizar o atendimento dos consumidores de acordo com seu grau de prioridade de atendimento.

$$\begin{aligned} \text{Min. } & \varepsilon_A(G), \text{ e com o valor de } '\varepsilon_{A_{\min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \\ \text{Min. } & \varepsilon_{A_{\min}}(G) + \varepsilon_I(G), \text{ e com o valor de } '\varepsilon_{I_{\min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \end{aligned} \quad (4.41)$$

$$\text{Min. } \varepsilon_{A_{\min}}(G) + \varepsilon_{I_{\min}}(G) + \varepsilon_B(G), \text{ e com o valor de } '\varepsilon_{B_{\min}}(G)' \text{ obtido, resolver :}$$

$$\text{Min. } \varepsilon_{A_{\min}}(G) + \varepsilon_{I_{\min}}(G) + \varepsilon_{B_{\min}}(G) + \varepsilon_S(G);$$

$$\begin{aligned} \text{Min. } & \psi_M(G), \text{ e com o valor de } '\psi_{M_{\min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \\ \text{Min. } & \psi_{M_{\min}}(G) + \psi_R(G) \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$s. a : \quad A(g^e)x(g^e) = c(g^e), \quad \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.43)$$

$$A(g^e)Y_x(g^e)A(g^e)^t v(g^e) = c(g^e), \quad \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.44)$$

$$X(g^e) \leq 1, \quad \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.45)$$

$$B(g^e) \leq 1 + \Delta B, \quad \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.46)$$

$$V(g^e) \leq \delta + \Delta V, \quad \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.47)$$

$$g^e \text{ ser uma floresta de grafo}, \quad \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.48)$$

$$g = g^e \cup g^{ne}. \quad (4.49)$$

$$A(G^e)x(G^e) = c(G^e) \quad (4.50)$$

$$A(G^e)Y_x(G^e)A(G^e)^t v(G^e) = c(G^e) \quad (4.51)$$

$$X(G^e) \leq 1 \quad (4.52)$$

$$B(G^e) \leq 1 \quad (4.53)$$

$$V(G^e) \leq \delta \quad (4.54)$$

$$G^e \text{ ser uma floresta de grafo}, \quad (4.55)$$

$$G = G^e \cup G^{me} \quad (4.56)$$

Para a representação computacional de G e de g utiliza-se da RNP (DELBEM et al., 2004), que é a estrutura de dados para a representação de árvores de grafo apresentada na Seção 3.2. De acordo com (SANTOS et al., 2010), a RNP melhora o desempenho de métodos para reconfiguração de redes baseados em AEMOs, uma vez que:

- possui dois operadores (PAO e CAO) (DELBEM et al., 2004) que, quando aplicados a uma floresta de grafo armazenadas pela RNP, sempre produzem uma floresta de grafo. No contexto do problema de restabelecimento, isto significa que todos os indivíduos gerados pelos operadores da RNP e armazenados por ela correspondem a configurações radiais. Portanto, se a RNP é utilizada para armazenar a floresta de grafos que representa o SD e os seus operadores são aplicados para a geração de novas florestas de grafo, então as restrições 4.48 e 4.55 são sempre atendidas. Consequentemente, tornam-se desnecessárias rotinas para a verificação da conformidade com estas duas restrições;
- possui complexidade computacional de tempo médio $O\sqrt{n}$ (SANTOS et al., 2010), na qual n é o número de nós do grafo representado, o que significa que a RNP permite armazenar e manipular florestas de grafo de maneira computacionalmente eficiente. Em outras palavras, além de garantir que as restrições 4.48 e 4.55 são sempre atendidas, a RNP o faz de maneira computacionalmente eficiente;
- garante naturalmente que todas as barras em G e em g estejam organizadas de acordo o sentido de fluidez das correntes (SANTOS et al., 2010), o que é necessário para a execução de algoritmos de fluxo de carga de Varredura Direta-Inversa. Consequentemente, nenhuma rotina adicional é necessária para a obtenção de tal ordenação, o que implica que as restrições 4.43, 4.44, 4.50 e 4.51 podem ser eficientemente satisfeitas pela execução em g^e e em G^e de algum dos métodos de fluxo de carga de Varredura Direta-Inversa com RNP. Em (SANTOS et al., 2008) foi aplicado pela primeira vez os métodos de fluxo de carga de Varredura Direta Inversa do tipo Soma de Correntes e do tipo Soma de Potência, ambos com RNP ⁶;

Deste modo, ao usar a RNP para armazenar e manipular florestas de grafo, o enunciado formal anterior pode ser reescrito conforme a seguir.

$$\begin{aligned}
&Min. \quad \varepsilon_A(G), \text{ e com o valor de } '\varepsilon_{A_{min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \\
&Min. \quad \varepsilon_{A_{min}}(G) + \varepsilon_I(G), \text{ e com o valor de } '\varepsilon_{I_{min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \\
&Min. \quad \varepsilon_{A_{min}}(G) + \varepsilon_{I_{min}}(G) + \varepsilon_B(G), \text{ e com o valor de } '\varepsilon_{B_{min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \\
&Min. \quad \varepsilon_{A_{min}}(G) + \varepsilon_{I_{min}}(G) + \varepsilon_{B_{min}}(G) + \varepsilon_S(G); \\
&Min. \quad \psi_M(G), \text{ e com o valor de } '\psi_{M_{min}}(G)' \text{ obtido, resolver :} \\
&Min. \quad \psi_{M_{min}}(G) + \psi_R(G)
\end{aligned} \tag{4.57}$$

$$\tag{4.58}$$

⁶ No abordagem que será posteriormente proposta optou-se pelo Método de Soma de Correntes enquanto que as cargas foram representadas pelo modelo Corrente Constante com a Tensão.

$$s. a : \quad \text{Fluxo de carga calculado com RNP em } g^e, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.59)$$

$$X(g^e) \leq 1, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.60)$$

$$B(g^e) \leq 1 + \Delta B, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.61)$$

$$V(g^e) \leq \delta + \Delta V, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.62)$$

g^e ser uma floresta de grafo gerada por um dos operadores

$$\text{da RNP}, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.63)$$

$$g^e \text{ ser uma floresta de grafo armazenada pela RNP}, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.64)$$

$$g = g^e \cup g^{ne}. \quad (4.65)$$

$$\text{Fluxo de carga calculado com RNP em } G^e \quad (4.66)$$

$$X(G^e) \leq 1 \quad (4.67)$$

$$B(G^e) \leq 1 \quad (4.68)$$

$$V(G^e) \leq \delta \quad (4.69)$$

G^e ser uma floresta de grafo gerada por um dos operadores

$$\text{da RNP} \quad (4.70)$$

$$G^e \text{ ser uma floresta de grafo armazenada pela RNP} \quad (4.71)$$

$$G = G^e \cup G^{ne} \quad (4.72)$$

4.3 Método proposto

Para o tratamento do problema formulado pelas Equações 4.57-4.72 propõe-se um novo método, que consiste na união da Busca Exaustiva apresentada na Seção 3.4 com um novo AEMO. Este, por sua vez, combina características presentes nos AEMOs em tabelas de subpopulação (ver Seção 3.3) e no NSGA-II (DEB et al., 2002). Por tratar-se de um AEMO em tabelas de subpopulação, o AEMO proposto divide a população em subpopulações e armazena-as em tabelas. Todavia, utiliza também o conceito de seleção de não-dominância, presente no NSGA-II, para selecionar os indivíduos a serem salvos em algumas de suas tabelas de subpopulação.

O método proposto faz uso também da RNP (ver Seção 3.2) para a representação computacional de configurações radiais do SD (DELBEM et al., 2004), incluindo a porção não-energizada; do fluxo de carga calculado com RNP e proposto por (SANTOS et al., 2008); e dos dois operadores de cruzamento da RNP para a geração de novas configurações⁷. Consequentemente, o método proposto garante naturalmente que as restrições 4.59, 4.63 – 4.66 e 4.70 – 4.72 sejam sempre atendidas. Desta forma, passa-se a ser necessário perseguir

⁷ O método proposto faz uso também de um terceiro operador de cruzamento que será proposto a seguir. Por ser baseado no CAO da RNP, tal operador proposto mantém a capacidade de gerar uma nova floresta de grafo sempre que aplicado a uma floresta de grafo armazenada pela RNP.

o atendimento apenas das restrições 4.60 – 4.62 e 4.66 – 4.69.

No AEMO proposto considera-se como um indivíduo uma configuração G armazenada pela RNP. Os valores de $X(G^e)$, $B(G^e)$, $V(G^e)$, $X(g^e)$, $B(g^e)$ e $V(g^e)$ são calculados pelo fluxo de carga referido no parágrafo anterior. Para cada indivíduo G , os valores de $\psi_M(G)$ e $\psi_R(G)$ são calculados por um algoritmo eficiente proposto por (SANTOS et al., 2010) e, posteriormente, modificado por (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018) para diferenciar as CCRs e as CCMs. Diferentemente de outros, este algoritmo não exige o armazenamento do estado da chaves para cada indivíduo gerado, nem a comparação dos estados de todas as chaves para a determinação do número de manobras, o que garante-lhe eficiência computacional. Já o cálculo de $\varepsilon_A(G)$, $\varepsilon_I(G)$, $\varepsilon_B(G)$ e $\varepsilon_S(G)$ é realizado por um procedimento desenvolvido neste trabalho e é apresentado na subseção 4.3.2.4.

O método proposto pode ser apresentado graficamente de maneira sucinta como na Figura 11. Nesta ilustração as rotinas que exigem um pouco mais de detalhes para a sua total compreensão foram sumarizadas num único bloco colorido. Para facilitar a compreensão do método proposto, por meio da Seção 4.3.1 será dada inicialmente uma visão geral do mesmo e, posteriormente, alguns aspectos e rotinas serão abordados com maior profundidade na Seção 4.3.2.

4.3.1 Visão geral do método proposto

De uma maneira geral, o método proposto pode ser dividido nos passos apresentados e explicados a seguir, os quais são baseados no fluxograma da Figura 11.

Passo 1 - Leitura de dados de entrada

A execução do método proposto inicia-se pela obtenção (a) das informações da rede ⁸ em sua configuração pré-falta - G^{pf} - (dados de topologia, impedância e capacidade de condução de cada trecho, localização e tipo de cada chave, localização e grau de prioridade dos consumidores, valores de demanda de potência ativa e reativa por parte das cargas, etc.), (b) da lista dos setores em falta e (c) da lista com os valores escolhidos para os parâmetros do AEMO proposto, que são os seguintes:

- δ - máxima queda de tensão admissível permanentemente, conforme definido na página 62;
- ΔB - carregamento adicional em transformador aceito temporariamente, conforme definido na página 63;

⁸ Neste trabalho considera-se apenas a rede de média tensão dos SDs (rede de distribuição primária), uma vez que é neste lado da rede que encontram-se as chaves que permitem a solução do problema.

Figura 11: Fluxograma geral do método proposto.

Fonte: o autor.

- ΔV - queda de tensão adicional aceita temporariamente, conforme definido na página 63;

- s - parâmetro binário que assume 1 se for desejável que as manobras para transferência de carga entre alimentadores sejam executadas na sequência abre-fecha, ou 0, caso seja desejável que essa sequência seja fecha-abre ⁹;
- T - tempo total estimado necessário para a recuperação do elemento causador da falha, o qual consiste no intervalo de tempo Δt_4 da Figura 10 ¹⁰;
- t_{CCR} - tempo necessário estimado para a operação de uma CCR;
- t_{CCM} - tempo necessário estimado para a operação de uma CCM;
- G_MAX - número máximo de gerações a serem executadas;
- S_{P_x} - tamanho máximo da subpopulação salva na tabela P_x , para $x = 1, \dots, 26$, isto é, número máximo de indivíduos a serem salvos em P_x .

O primeiro parâmetro está relacionado com o valor mínimo de tensão desejável em estado normal de operação (usualmente definido com base nas exigências dos “Procedimentos de Distribuição” - PRODIST). Os três parâmetros seguintes estão relacionados com os procedimentos adotados em cada empresa para a operação da rede em estado emergencial e para as manobras para transferência de cargas energizadas em alimentadores. Já os valores de T , t_{CCR} e t_{CCM} são normalmente conhecidos, especialmente pelos operadores mais experientes, muito embora possam ser obtidos também através de estudos estatísticos de dados históricos de contingências. Os dois últimos parâmetros são necessários, respectivamente, para o critério de encerramento do processo evolutivo e para o comportamento das tabelas de subpopulação.

Passo 2 - Verificação de existência de consumidores a serem restaurados

A partir das informações lidas anteriormente é verificado se há consumidores saudáveis a serem restaurados. Isto porque, há situações nas quais, apesar da ocorrência de uma falta, não há consumidores a serem restaurados ou não há possibilidade de restaurar os consumidores saudáveis desligados. Esta primeira situação ocorre quando os setores em falta estão localizados no final dos alimentadores. Neste caso não há setores à jusante e,

⁹ Note que quando há uma transferência de setores entre alimentadores são necessárias duas manobras (um par de manobras): uma de abertura, para desconexão destes setores do alimentador origem; e outra de fechamento, para a reconexão destes setores no alimentador destino. Ademais, se for escolhida a sequência abre-fecha para a operação dos pares de manobra, após a operação da primeira das duas chaves os consumidores transferidos estarão desligados. Por outro lado, se for selecionada a sequência fecha-abre para execução de pares de manobras, após a primeira operação os haverá um laço em operação, que poderá ser no mesmo alimentador, entre dois alimentadores ou entre duas subestações distintas. Esta sequência é usualmente definida pela empresa de distribuição.

¹⁰ Este parâmetro é importante para o cálculo da energia não suprida pelo indivíduos incapazes de restaurar todos as cargas saudáveis desligadas, como será detalhado posteriormente.

portanto, não há nada para ser restaurado. A segunda situação ocorre quando há setores saudáveis desligados, mas não há chaves NAs que permitam a restauração dos mesmos. Em virtude da impossibilidade de restaurar tais setores, os mesmos são desconsiderados pelo método proposto. Em ambos os casos não há qualquer ação que possa ser feita para amenizar os efeitos da ocorrência da falta e, por isso, o método proposto é encerrado. Por outro lado, na ocorrência de setores ou agrupamentos de setores saudáveis com possibilidade de restauração, o método proposto continua a sua execução.

Passo 3 - Execução de uma Busca Exaustiva Local Modificada

Diz-se que um caso de falta é de restauração completa, quando sua solução restara todos os setores saudáveis desligados restauráveis. Por outro lado, diz-se que um caso de falta é de restauração parcial se não para ele houver uma solução capaz de restaurar todos os setores sãos fora de serviço. Na Seção 3.4 foi apresentada uma estratégia proposta por (CAMILLO et al., 2016a) para o tratamento dos casos de falta de restauração completa possíveis de serem solucionados apenas com manobras para isolação dos setores em falta e reconexão dos setores saudáveis desligados, isto é, sem a necessidade de execução de manobras para transferência de setores energizados entre alimentadores. Como dito, esta estratégia consiste numa busca exaustiva realizada sobre as chaves NAs capazes de reconectar setores sãos fora de serviço (não são consideradas as chaves NFs que interligam entre si os setores saudáveis desligados).

Em virtude das vantagens apresentadas por esta estratégia, optou-se por incluí-la ao método proposto como um estágio que antecede a execução do AEMO proposto. Assim, antes da execução deste, o método proposto usa tal busca para obter todas as configurações de restauração completa que exigem manobras apenas de isolação dos setores em falta e reconexão dos setores saudáveis desligados, e para verificar, através do passo 4, se há a solução para o caso de falta que restaure todas as cargas fazendo apenas tais manobras.

Um vez que a sequência na qual são restaurados os setores saudáveis desligados deve ser guiada pelo grau de prioridade de atendimento dos consumidores presentes em tais setores, a busca exaustiva proposta por (CAMILLO et al., 2016a) foi ligeiramente modificada para a consideração de tal necessidade prática do problema, resultando naquilo que será chamado neste como Busca Exaustiva Local Modificada (BELM). Detalhes mais aprofundados sobre a BELM serão fornecidos na Seção 4.3.2.6. Mas também podem ser visto no fluxograma da Figura 12.

Passo 4 - Teste de sucesso da BELM

Posteriormente à execução da BELM, o método proposto realiza um teste para determinar se ela foi capaz de encontrar algum indivíduo factível. Caso positivo, prossegue-se ao passo 16 para que seja escolhida uma solução final dentre os indivíduos factíveis

Figura 12: Fluxograma para a busca exaustiva local modificada.

Fonte: o autor.

obtidos pela BELM. Caso contrário, o método proposto passa para o passo 5 que inicia a execução do AEMO proposto.

Com base nisto pode-se dizer que o AEMO proposto tem por finalidade o tratamento dos casos de falta não solucionáveis pela BELM. Tais casos são aqueles de restauração

parcial ou de restauração completa que exigem manobras para alívio de alimentadores. Nos casos de restauração parcial o AEMO proposto deverá selecionar os setores que ficarão desligados considerando o grau de prioridade de atendimento dos consumidores, bem como a demanda não suprida.

Passo 5 - Formação da população inicial

A população inicial do AEMO proposto é formada pelos indivíduos correspondentes às configurações geradas pela BELM e pelo indivíduo G^1 , que é obtido e avaliado neste passo. Este consiste na configuração da rede a qual todos os setores em falta encontram-se isolados e os agrupamentos de setores saudáveis à jusante dos setores em falta encontram-se desligados. A partir do indivíduos G^1 e de seus descendentes é que serão obtidos indivíduos capazes de solucionar os casos de falta que possuem somente solução com restauração parcial; ou ainda, indivíduos capazes de fornecer uma opção de restauração parcial nos casos em que uma restauração completa seja possível, mas pouco viável por algum motivo, como por exemplo, excesso de manobras em chaves ou custo de implantação.

A formação da população inicial é bem simples e consiste apenas na união dos indivíduos gerados na BELM com o indivíduo G^1 . Apesar disto, na Figura 13 é ilustrado um fluxograma com os passos para a formação da população inicial do AEMO proposto. Em relação aos procedimentos para a obtenção do indivíduo G^1 , estes serão apresentados com maior profundidade na Seção 4.3.2.1.

Passo 6 - Inicialização das tabelas de subpopulação por meio da população inicial

Para a exploração do espaço de busca e obtenção de soluções para o problema formulado, o AEMO proposto faz uso do conceito de Tabelas de Subpopulação, que consiste em dividir a população em subpopulações que são armazenadas em tabelas. Assim, procura-se reunir em cada subpopulação os melhores indivíduos para uma certa característica do problema (objetivo ou restrição) ou que melhor mapeiem um determinado trecho da fronteira de Pareto desejada.

O AEMO proposto é composto por 26 tabelas de subpopulação cujo número máximo de indivíduos possíveis de serem armazenados é dado por S_{P_x} , para $x = 1, \dots, 26$ (ver passo 1). Em linhas gerais, um indivíduo G^{new} é salvo numa tabela de subpopulação se esta encontra-se incompleta. Caso contrário, é feita uma seleção entre G^{new} e os indivíduos já salvos. Neste passo 6 todas as tabelas encontram-se vazias e são inicializadas com os indivíduos que formaram a população inicial.

Passo 7 - Inicialização do contador de gerações

O processo evolutivo do AEMO proposto inicia-se no passo 9 e encerra-se quando é atingido o número máximo de gerações a serem executadas, lido no passo 1 e expresso

Figura 13: Fluxograma para a formação da população inicial do AEMO proposto.

Fonte: o autor.

por G_MAX . Assim, neste passo 7 é iniciado o contador de gerações, representado por g_c e será incrementado e comparado com G_MAX a cada geração executada.

Passo 8 - Verificação do critério de parada

Como dito, o processo evolutivo é executado enquanto o valor de g_c não atingir o valor de G_MAX . Assim, neste passo é verificado se $g_c < G_MAX$. Caso positivo, uma nova geração do processo evolutivo é iniciada. Caso contrário, passa-se à execução do passo 14.

Passo 9 - Obtenção e avaliação de um novo indivíduo

A geração de um novo indivíduo (G^{new}) é realizada pela execução das ações: seleção randômica de uma tabela de subpopulação P_* e de um indivíduo G^{PAI} em P_* , de maneira também aleatória; seleção de um operador de reprodução; e aplicação do operador escolhido em G^{PAI} para a geração de G^{new} . Além dos operadores tradicionais da RNP- PAO e CAO- o AEMO proposto utiliza também um novo operador, denominado *Load Reconnector Operator* (LRO) proposto mais adiante na Seção 4.3.2.2. Como seu

nome sugere, o LRO realiza a geração de um novo indivíduo por meio da reconexão de setores saudáveis desligados que encontram-se fora de serviço. Neste passo é realizada também a avaliação do novo indivíduo, a qual consiste na determinação de $\varepsilon_P(G)$, para $P = A, I, B$ e S ; $\psi_C(G)$, para $C = M$ e R ; $K(G^e)$ e $K(g^e)$, para $K = X, B$ e V ; e de outras informações adicionais. Em virtude da necessidade de uma explicação mais detalhada para o entendimento completo deste passo, dedicou-se a Seção 4.3.2.7 ao aprofundamento dos procedimentos de obtenção de um novo indivíduo e a Seção 4.3.2.4 para uma compreensão mais detalhada acerca da avaliação de indivíduos. O fluxograma com a rotina para a geração de um novo indivíduo é ilustrado pela Figura 14.

Passo 10 - Verificação e correção da sequência de chaveamento de G^{new}

Durante o processo de geração de um novo indivíduo é possível que alguma chave retorne ao seu estado inicial. Em outras palavras, é possível que, para a obtenção de G^{new} , seja aberta uma chave que havia sido anteriormente fechada, ou que seja fechada uma chave que havia sido anteriormente aberta, ou ambas as situações. Quando isto ocorre haverá em $seq(G^{new})$ chaves repetidas, isto é, mais de uma operação numa mesma chave. Uma vez que tais operações se cancelam e ainda aumentam desnecessariamente os esforços e custos para implantação de G^{new} , não é desejável que tais manobras repetidas apareçam na sequência associada ao indivíduo. Este problema foi descrito em detalhes por (MARQUES, 2013) e por (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018).

Assim, neste passo 10 é realizada uma verificação da sequência de chaveamento associada a G^{new} com a finalidade de detectar se há alguma chave que retornou ao seu estado inicial durante a obtenção de G^{new} . Caso isto tenha ocorrido, é realizada, também neste passo, uma correção nesta sequência de chaveamento.

A correção de uma sequência de chaveamento é realizada em duas etapas: (1^a) obtenção de uma sequência sem a presença de chave repetida; (2^a) verificação da factibilidade da nova sequência obtida. Para a remoção de chaves repetidas e conseqüentemente obtenção de uma sequência corrigida foi utilizado o algoritmo proposto por (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018). Já a verificação da factibilidade de sequência de chaveamento corrigida consiste na verificação do atendimento das condições expressas pelas Equações 4.10 – 4.23.

Ao longo da execução de qualquer sequência de chaveamento, a rede opera por um curto período de tempo em várias configurações distintas, que foram denominadas (na Seção 4.2) configurações intermediárias e representadas por g no enunciado formal do problema. Antes da correção da sequência de chaveamento de G^{new} as suas configurações intermediárias são todas conhecidas, uma vez que foram, em sua maioria, geradas por algum dos operadores de reprodução. Contudo, quando há a obtenção de uma sequência de chaveamento sem a presença de chaves repetidas, surgem configurações intermediárias

Figura 14: Fluxograma para a obtenção de um novo indivíduo.

Fonte: o autor.

inéditas. As configurações intermediárias inéditas obtidas devem ser avaliadas para a verificação da factibilidade da nova sequência obtida.

Considerando que tais configurações intermediárias são inéditas e que há um esforço computacional para a avaliação das mesmas, optou-se por permitir que tais configurações

sejam consideradas indivíduos para o AEMO a fim de que também possam ser usados para a evolução das subpopulações em tabelas. Desta maneira, a aplicação deste procedimento de verificação e correção de sequência de chaveamento resulta (a) numa sequência de chaveamento comprovadamente factível para G^{new} ; e (b) num conjunto de novos indivíduos gerados. O fluxograma desta rotina para verificação e correção de sequência de chaveamento é mostrado na Figura 15. Detalhes complementares acerca das ações que envolvem esta rotina serão fornecidos na Seção 4.3.2.8.

Passo 11 - Formação da população de indivíduos-filho

A cada geração do processo evolutivo a população de indivíduos-filho será formada (a) pelo indivíduo G^{new} , gerado pelo LRO, PAO ou CAO; e (b) pelos indivíduos gerados durante a correção da sequência de chaveamento de G^{new} . Em decorrência disto, o número de indivíduos que compõem a população de indivíduos-filho em cada geração é variável e indeterminado, uma vez que o número de indivíduos gerados pelo procedimento de correção de sequência de chaveamento é variável e indeterminado. Sabe-se apenas que, quando a sequência de chaveamento associada a G^{new} não precisar de correção, o tamanho da população de indivíduos-filho a cada geração será igual a 1. O fluxograma da Figura 16 ilustra o procedimento descrito.

Passo 12 - Atualização das subpopulações em tabelas

Neste passo as subpopulações salvas em tabelas poderão ser atualizadas por meio dos indivíduos-filhos. Para tal, em cada tabela é aplicado um procedimento de seleção entre os indivíduos já salvos e cada um dos indivíduos presentes na população de indivíduos-filho. As tabelas de subpopulação presentes no AEMO proposto e os critérios de seleção aplicados por cada uma delas são apresentados na Seção 4.3.2.5.

Passo 13 - Incremento do contador de gerações

Os passos 9, 10, 11 e 12 consistem no processo evolutivo do AEMO proposto e, após cada execução deste conjunto de passo, o contador de gerações, g_c , é incrementado. Na sequência, retorna-se à execução da verificação realizado no passo 8.

Passo 14 - Formação do conjunto Pareto-ótimo

Desta forma, após o encerramento do processo evolutivo (que ocorre quando g_c torna-se igual a G_MAX) são selecionados os indivíduos para comporem o conjunto Pareto-ótimo¹¹ resultante da execução do AEMO. Tais indivíduos devem atender as restrições do problema, expressas pelas Equações 4.57 – 4.72, e são selecionados a partir das subpopulações salvas nas tabelas ao término do processo evolutivo. Esta seleção por

¹¹ O conjunto Pareto-ótimo é formado pelas soluções factíveis não-dominadas.

Figura 15: Fluxograma para a verificação e correção de uma sequência de chaveamento.

Fonte: o autor.

não-dominância é realizada com base nos valores de energia total não suprida e de total de manobras em chaves. Informação detalhadas, bem como todas as ações seguidas para execução deste passo são apresentadas na Seção 4.3.2.9. A Figura 17 mostra o fluxograma para a formação do conjunto Pareto-ótimo.

Figura 16: Fluxograma para a formação de indivíduos-filho.

Fonte: o autor.

Passo 15 - Escolha das soluções finais a partir do conjunto Pareto-ótimo

A partir do conjunto Pareto-ótimo obtido, três indivíduos são selecionados para tornarem-se soluções finais do problema, os quais serão informados aos operadores da rede juntamente com a sequência de chaveamento associada. Informações mais detalhadas serão fornecidas na Subseção 4.3.2.10.

Passo 16 - Escolha de uma solução final a partir dos indivíduos obtidos pela BELM

Quando a BELM encontra ao menos um indivíduo factível o AEMO proposto não chega a ser executado, uma vez que já fora obtida ao menos uma solução factível de restauração completa. Neste caso, o fluxo de execução do método proposto vai do passo 4 diretamente para este passo 16.

Primeiramente, os indivíduos obtidos pela BELM têm a sua factibilidade verificada em relação as restrições do problema (Equações 4.59 – 4.72) e os infactíveis são descartados. Em seguida, é determinado, dentre todos os indivíduos factíveis obtidos pela BELM, aquele que possui os menores valores de energia não suprida, considerando-se os níveis de prioridade de atendimento dos consumidores. Este indivíduo será a solução final que será, no passo seguinte, fornecida. Valores de número de manobras não são avaliados na escolha desta solução final porque todos os indivíduos obtidos pela BELM possuem o mesmo número total de manobras.

Figura 17: Fluxograma para a formação do conjunto Pareto-ótimo.

Fonte: o autor.

A determinação do indivíduo factível com os menores valores de energia não suprida considerando-se os níveis de prioridade de consumidores é realizada da seguinte maneira: determinação do indivíduo com o menor valor de $\varepsilon_A(G)$; caso mais de um indivíduo possua o mesmo valor de $\varepsilon_A(G)$ ¹², então determina-se, dentre eles, aquele que possui o menor valor de $\varepsilon_I(G)$. Caso ainda persista algum empate, então, determina-se, dentre os que empataram, aquele com o menor valor de $\varepsilon_B(G)$, e assim sucessivamente. O indivíduo com os menores valores de energia não suprida será definido como a solução final, como dito.

¹² Desconsiderando-se as casas decimais.

Passo 17 - Informação das soluções finais

Neste passo são informados para o operador as soluções finais escolhidas anteriormente juntamente com as respectivas sequências de chaveamento. Em seguida, a execução do método proposto é encerrada.

4.3.2 Informações adicionais sobre alguns tópicos e passos do método proposto

Nesta seção são apresentados com maior profundidade alguns tópicos selecionados e passos do método proposto.

4.3.2.1 Obtenção do indivíduo G^1

A população inicial do AEMO proposto é formada pelos indivíduos obtidos pela BELM e pelo indivíduo G^1 , que é uma configuração da rede na qual os agrupamentos de setores saudáveis à jusante dos setores em falta encontram-se desligados e os setores em falta encontram-se isolados, como dito anteriormente. Dado que os indivíduos obtidos pela BELM fornecem apenas opções para restauração completa e que os operadores tradicionais da RNP (PAO e CAO) realizam aleatoriamente a escolha dos setores a serem transferidos entre alimentadores energizados, mostrou-se necessária a existência de um indivíduo que concorra para a geração de soluções de restauração parcial.

Muito embora deseja-se restaurar todos os consumidores desligados, indivíduos que proporcionam restauração parcial são importantes para lidar com os casos de falta para os quais não existe uma solução de restauração completa. Tais casos podem ocorrer, por exemplo, em redes que operam próximo do seu limite operacional, seja em apenas um período do dia em que a demanda está mais elevada, seja durante todo o dia devido a falta de investimentos em ampliação da rede. Além disso, mesmo em casos de falta em que há soluções com restauração completa, os indivíduos com restauração parcial são importantes porque proporcionam alternativamente a opção de deixar alguns consumidores desligados a fim de evitar a realização de um número mais elevado de manobras. Tais opções podem ser desejadas por conta dos custos para operação de chaves ou em ocasionais impossibilidades de manobrar muitas chaves, como, por exemplo, numa ocasião em que dispõe-se de um número limitados de equipes de campo.

A obtenção de G^1 a partir da configuração pré-falta é bem simples, e consiste apenas em operar as chaves para isolamento dos setores em falta. Após esta operação, em virtude da estrutura radial da rede, os agrupamentos de setores saudáveis localizados à jusante dos setores em falta já estarão desligados. Contudo, para permitir o armazenamento de G^1 por meio da RNP, tais setores saudáveis desligados precisam estar conectados em alguma árvore.

Contudo, como estão fora de serviço, eles não podem pertencer a nenhuma das árvores que formam a porção energizada da rede em G^1 (representada por $G^{1:e}$, conforme

definição de G^e na Subseção 4.2.2). Assim sendo, cada agrupamento de setores saudáveis desligados é conectado em uma árvore fictícia. O conjunto das árvores fictícias formam a porção não-energizada de G^1 (representada por $G^{1;ne}$, conforme definição de G^{ne} na Seção 4.2.2). As árvores não-energizadas que constituem G^{ne} , para qualquer indivíduo G , são chamadas também RNPs fictícias. E os setores-raiz em cada uma destas árvores são denominados setores-raiz fictícios ou nós-raiz fictícios. As arestas que conectam os agrupamentos de setores saudáveis desligados aos nós-raiz fictícios são consideradas, igualmente, chaves fictícias. Diz-se fictícios porque tais chaves, setores e árvores não existem na rede real e consistem apenas de um artifício para a modelagem e a representação computacional da porção desenergizada da rede em cada configuração G . As árvores fictícias são representadas pela RNP da mesma forma que as árvores energizadas. Portanto, pode-se dizer que o indivíduo G^1 é obtido pela isolamento dos setores em falta e pela reconexão dos agrupamentos de setores saudáveis desligados em árvores fictícias.

4.3.2.2 Load Reconnector Operator

Conforme o enunciado formal do problema proposto na Seção 4.2 e como dito anteriormente, todo indivíduo G do AEMO proposto é formado por uma porção energizada G^e e por porção não-energizada G^{ne} ¹³, sendo esta última constituída pelos setores saudáveis desligados em G e pelos nós-raiz fictícios nos quais são conectadas. Tomando como base esta divisão da rede em duas porções, o restabelecimento de setores desligados consiste em transferi-los da porção não-energizada G^{ne} para a porção energizada G^e , ação esta que poderia ser realizada por meio da aplicação dos operadores PAO ou CAO da RNP.

Contudo, da maneira como foram proposto, tais operadores escolhem os setores a serem transferidos de maneira randômica, o que impossibilita priorizar a restauração de consumidores. Dessa maneira, optou-se pela criação de um novo operador de cruzamento. Para tal, tomou-se como base o CAO e modificações foram realizadas a fim de que: (i) a poda de uma subárvore para transferência possa ocorrer sempre numa árvore contida na porção não-energizada da rede (G^{ne}), isto é, numa árvore fictícia; (ii) o enxerto da subárvore podada possa ocorrer sempre numa árvore contida na porção energizada da rede (G^e); (iii) a escolha da subárvore a ser transferida ocorra de maneira a restaurar prioritariamente os consumidores com maiores níveis de prioridade de atendimento e maiores valores de demanda (potência ativa), reproduzindo, assim, uma ação que seria tomada pelos operadores de SDs. Tais modificações culminaram na obtenção de um novo operador chamado *Load Reconnector Operator* (LRO, com definido anteriormente).

A escolha da subárvore a ser transferida pelo LRO e o modo como ela é enxertada envolve a escolha de três nós (ou setores), assim como no CAO: p , r e a . O primeiro

¹³ No caso de indivíduos de restauração completa as árvores fictícias que forma a porção não-energizada serão constituídas apenas dos nós-raiz fictícios. O setor em falta é desconectado da rede e não está presente em G^{ne} .

consiste no nó em que é feita a poda, isto é, no nó-raiz da subárvore podada, o qual é escolhido pelo LRO a partir de três outros nós selecionados aleatoriamente; o segundo consiste no nó-raiz da subárvore enxertada, escolhido randomicamente dentre os nós que formam a subárvore podada e inicialmente enraizada em p (o LRO, como o CAO, permite que o nó da subárvore usado para o enxerto seja diferente do nó no qual a poda ocorreu); e o terceiro nó consiste num nó adjacente a r , o qual que é escolhido aleatoriamente dentre aqueles nós adjacentes a r pertencentes à porção energizada da rede. O grande diferencial do LRO está nos critérios usados na definição de p , r e a .

Dado um indivíduo G^{PAI} a ser utilizado para a geração de um novo indivíduo G^{new} , a escolha dos nós p , r e a é realizada pelos seguintes passos:

- **Passo 1** - *escolha de uma árvore fictícia origem T_{de}* . A fim de priorizar a reconexão de consumidores segundo o seu grau de prioridade, a árvore origem T_{de} será aquela em G^{PAI-ne} que possuir o maior somatório de potência ativa não suprida para consumidores com prioridade alta, expresso por $PNS_A(T(G^{PAI}))$. Caso mais de uma árvore possua o mesmo valor de $PNS_A(T(G^{PAI}))$, então T_{de} será aquela com o maior somatório de potência ativa não suprida para consumidores com prioridade intermediária ($PNS_I(T(G^{PAI}))$). Caso mais de uma árvore fictícia possua os mesmos valores de $PNS_A(T(G^{PAI}))$ e de $PNS_I(T(G^{PAI}))$, então T_{de} será aquela com o maior somatório de potência ativa não suprida para consumidores com prioridade baixa ($PNS_L(T(G^{PAI}))$), e assim sucessivamente;
- **Passo 2** - *escolha de três nós de poda: $p1$, $p2$ e $p3$* . Diferentemente do PAO e do CAO, no LRO a escolha do nó de poda p envolve três nós candidatos, denominados $p1$, $p2$ e $p3$ e selecionados randomicamente (distribuição de probabilidade uniforme) dentre os nós que formam a árvore T_{de} (a exceção do nó-raiz fictício no qual T_{de} está conectada).
- **Passo 3** - *determinação do somatório de potência ativa, por nível de prioridade, nas subárvores enraizadas em $p1$, $p2$ e $p3$* .
- **Passo 4** - *escolha do nó de poda p* . O nó de poda p será aquele dentre $p1$, $p2$ e $p3$ em cuja subárvore estiver o maior somatório de potência ativa em consumidores com prioridade alta. Caso haja empate entre ao menos duas subárvores, então escolhe-se aquela na qual o maior somatório de potência ativa em consumidores com prioridade intermediária, e assim sucessivamente.
- **Passo 5** - *escolha do novo nó raiz r* . O nó r será escolhido aleatoriamente dentre os nós contidos na subárvore enraizada em p .

- **Passo 6** - escolha do nó adjacente a . O nó a será escolhido randomicamente dentre os nós adjacente ao nó r contido na porção energizada de G^{PAI} (G^{PAI-e}). A árvore que contém o nó a é denominada árvore destino e é representada por T_{para} .

Após a seleção dos nós p , r , a e das árvores T_{de} e T_{para} , as operações em Grafo realizadas para obter G^{new} a partir de G^{PAI} são realizadas da mesma maneira que no CAO. Pelo fato de G^{PAI} ser uma floresta de grafo, T_{de} ser diferente de T_{para} , r estar contido na subárvore enraizada em p e pertencente a T_{de} , e das operações em Grafo para obtenção de G^{new} a partir de G^{PAI} serem como no CAO, tem-se a garantia de que G^{new} será também uma floresta de Grafo armazenada pela RNP. Tais condições são as mesmas por meio das quais garante-se que as operações realizadas pelo CAO e pelo PAO geram sempre uma floresta de Grafo quando aplicados noutra floresta de Grafo. Exemplos e maiores informações sobre o modo como são realizadas as operações em Grafo pelo CAO e que, como dito, são as mesmas realizadas pelo LRO após a definição de p , r e a , podem ser obtidas em (MARQUES, 2013).

4.3.2.3 Heurística para limitação do problema à regiões adjacentes aos setores em falta

Da mesma forma que o LRO, os operadores de reprodução PAO e CAO (DELBEM et al., 2004) também exigem a definição de uma árvore origem T_{de} e de uma árvore destino T_{para} nas quais possam realizar, respectivamente, a poda e o enxerto de uma subárvore. Da maneira como foram propostos por (DELBEM et al., 2004) e utilizados por vários trabalhos em problemas de reconfiguração de redes (SANTOS et al., 2010; MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018; SANCHES; LONDON JR.; DELBEM, 2014; MANSOUR, 2009a), a escolha das árvores T_{de} e T_{para} é randômica. Todavia, observou-se que, no problema de restabelecimento de energia, esta aleatoriedade de escolha pode resultar em operações desnecessárias em alimentadores com nenhum envolvimento com a ocorrência de falta.

Para evitar isto foi desenvolvida pelo grupo de pesquisa, dentro de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D), uma heurística que altera o modo como é escolhida a árvore origem T_{de} quando o PAO ou o CAO são utilizados. Devido ao fato de agregar maior inteligência ao processo de reconfiguração da rede e evitar manobras desnecessárias, tal heurística foi aplicada ao método proposto. Essa heurística consiste em limitar a escolha de T_{de} às árvores salvas em um conjunto $\Omega_{FALTA}(G)$ criado para cada indivíduo G a partir do seu indivíduo-pai G^{PAI} .

Constituição de $\Omega_{FALTA}(G)$

Em $\Omega_{FALTA}(G)$ estarão salvos os identificadores de todos os alimentadores (ou árvores) que receberam setores restaurados ou transferidos ao longo das operações realizadas desde G^{PF} até a obtenção de G e também o identificador dos alimentadores nos quais

estavam os setores em falta. Para cada indivíduo G gerado pela BELM, por exemplo, em $\Omega_{FALTA}(G)$ estarão salvos os identificadores dos alimentadores (ou árvores) nos quais foram reconectados os setores saudáveis fora de serviço. Para o indivíduo G^1 , em $\Omega_{FALTA}(G^1)$ estarão salvos apenas os identificadores dos alimentadores nos quais estavam os setores em falta. Para cada indivíduo G , qualquer, gerado a partir de G^{PAI} , em $\Omega_{FALTA}(G)$ estarão salvos os alimentadores salvos em $\Omega_{FALTA}(G^{PAI})$ mais o identificador do alimentador que recebeu os setores restaurados, se G tiver sido gerado pelo LRO, ou os setores transferidos, se G tiver sido gerado pelo PAO ou pelo CAO.

Utilização de $\Omega_{FALTA}(G)$

Toda vez que o PAO ou o CAO for selecionado para a geração de um novo indivíduo G^{new} a partir de um indivíduo G^{PAI} o conjunto $\Omega_{FALTA}(G^{PAI})$ será utilizado na escolha da árvore T_{de} (o alimentador no qual serão podados setores para transferência). A árvore T_{de} será escolhida randomicamente dentre os alimentadores salvos em $\Omega_{FALTA}(G^{PAI})$. Uma vez que em $\Omega_{FALTA}(G^{PAI})$ estão salvos apenas alimentadores que foram de alguma maneira envolvidos na ocorrência da falta, T_{de} será sempre um alimentador próximo ao local de ocorrência da falta e de alguma forma envolvido com ela. Desta maneira, soluciona-se o problema descrito e evita-se manobras desnecessárias em regiões saudáveis da rede.

O conjunto $\Omega_{FALTA}(G)$ é utilizado também na determinação de $X(G^e)$, $B(G^e)$ e $V(G^e)$. Os valores de $X(G^e)$ e $V(G^e)$ são calculados considerando-se apenas os alimentadores salvos em $\Omega_{FALTA}(G)$ e o valor de $B(G^e)$ é calculado considerando-se somente transformadores que atendem algum alimentador salvo em $\Omega_{FALTA}(G)$. Desta maneira, evita-se que eventuais sobrecargas e excesso de quedas de tensão pré-existentes em trechos da rede não envolvidos pela ocorrência da falta exerçam influência nos valores de $X(G^e)$, $B(G^e)$ e $V(G^e)$ e, conseqüentemente, no processo de obtenção de uma solução para o problema. .

4.3.2.4 Avaliação de indivíduos e cálculo de energia não suprida

No contexto de algoritmos evolutivos, a avaliação de indivíduos consiste em determinar os valores dos parâmetros que caracterizam a sua aptidão em relação aos objetivos e a sua adequações às restrições do problema. Considerando o problema conforme formulado pela Equações 4.57 – 4.72, a avaliação de indivíduo G no AEMO proposto consiste em calcular os valores de $\varepsilon_P(G)$, para $P = A, I, B$ e S ; $\psi_C(G)$, para $C = M$ e R ; $K(G^e)$ e $K(g^e)$, para $K = X, B$ e V ; e, adicionalmente, das perdas resistivas em G ($\gamma(G)$).

Com dito no início da Seção 4.3, os valores de $\psi_C(G)$, para $C = M$ e R , são calculados por um algoritmo computacionalmente eficiente proposto por (SANTOS et al., 2010) e, posteriormente, modificado por (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018) para diferenciar manobras em CCRs e em CCMs; os valores de $K(G^e)$ e $K(g^e)$, para

$K = X, B \text{ e } V$, e de $\gamma(G)$ são calculados pelo fluxo de carga com RNP proposto por (SANTOS et al., 2008); já o cálculo de $\varepsilon_P(G)$, para $P = A, I, B \text{ e } S$, é feito por uma estratégia que será apresentada a seguir.

Cálculo de energia não suprida por nível de prioridade de consumidor

Neste trabalho optou-se por estimar a quantidade de consumidores sem suprimento por meio da energia não suprida ao longo do intervalo de tempo T (definido na página 4.3.1). Isto porque tal parâmetro depende de três informações importantes: a potência não suprida, o tempo sem fornecimento e a sequência de chaveamento adotada.¹⁴ Os valores de energia não suprida são dependentes da sequência de chaveamento porque, dado um conjunto de chaves a serem manobradas, o valor da energia não suprida será diferente para cada uma das sequências possível de serem construídas com o referido conjunto de chaves. Em virtude disso, os valores de energia não suprida permitem medir também a qualidade de uma sequência de chaveamento e, ao calcular-se o valor de energia suprida por nível de prioridade de atendimento, ganha-se uma métrica para quantificar a qualidade de uma sequência em relação a necessidade de priorização de consumidores prioritários.

O valor de $\varepsilon_P(G)$, para $P = A, I, B \text{ e } S$, pode ser determinado pela Equação 4.73.

$$\begin{aligned} \varepsilon_P(G) = \varepsilon_P(G^{PAI}) - [PNS_P(G^{PAI}) - PNS_P(G)] \cdot [T - t(G, G^{PF})] + \\ + s \cdot [PTR_P(G, G^{PAI})] \cdot [t(G, G^{PF}) - \tau_S(G, G^{PAI})], \end{aligned} \quad (4.73)$$

na qual G é a configuração a ser avaliada; G^{PAI} é a configuração que foi escolhida para gerar G ; G^{PF} é a configuração pré-falta, como já definido anteriormente; P é o nível de prioridade de atendimento dos consumidores para os quais deseja-se calcular a energia não suprida e que pode ser $P = A, I, B \text{ ou } S$; $\varepsilon_P(G)$ é a energia não suprida em G para consumidores com nível de prioridade P ; $PNS_P(G)$ é a potência ativa total não suprida em G para consumidores com nível de prioridade P e é determinada pelo somatório da potência ativa de todos os consumidores com nível de prioridade P saudáveis desligados em G possíveis de serem reconectados por meio de chaves; T é um parâmetro de entrada do método proposto que consiste no tempo total estimado necessário para a recuperação do elemento causador da falha (representado pelo intervalo de tempo Δt_4 na Figura 10); $t(G, G^{PF})$ é o tempo total requerido para manobrar as chaves que proporcionam a obtenção de G a partir de G^{PF} e que consiste no intervalo Δt_3 da Figura 10; s é o parâmetro de entrada do método proposto que assume 0 ou 1 e que informa a sequência escolhida para operação das manobras que ocorrem em par, como definido anteriormente ("0" - sequência fecha-abre; "1" - sequência abre-fecha); $PTR_P(G, G^{PAI})$ é somatório de potência ativa dos consumidores com prioridade P que foram transferidos entre alimentadores a fim de obter

¹⁴ Considera-se por potência não suprida o valor de potência ativa não atendida após cada manobra de uma sequência de chaveamento.

G a partir de G^{PAI} ; $\tau_S(G, G^{PAI})$ é o tempo estimado necessário para operar a segunda chave do par de manobras efetuadas para transferir cargas entre alimentadores e gerar G a partir de G^{PAI} .

Neste equação é possível identificar três partes principais, a saber:

$$(1^a) \quad " \varepsilon_P(G^{PAI}) ";$$

$$(2^a) \quad "[PNS_P(G^{PAI}) - PNS_P(G)].[T - t(G, G^{PF})]";$$

$$(3^a) \quad "s.[PTR_P(G, G^{PAI})].[t(G, G^{PF}) - \tau_S(G, G^{PAI})]".$$

A primeira diz respeito a energia não suprida na configuração selecionada para ser modificada a fim de gerar G . O valor de $\varepsilon_P(G)$ será, portanto, determinado a partir de correções no valor de $ENS_P(G^{PAI})$, as quais dependerão do tipo de modificação realizada em G^{PAI} para a obtenção de G . Se tal modificação consistiu, por exemplo, na reconexão de consumidores desligados (o que é feito pelo LRO, então $PNS_P(G)$ será menor que $PNS_P(G^{PAI})$ e, conseqüentemente, a segunda parte da Equação 4.73 descontará de $\varepsilon_P(G^{PAI})$ a porção de energia suprida aos consumidores restaurados. Além disso, neste caso $PTR_P(G, G^{PAI})$ será nulo, o que significa que a terceira parte da equação assumirá valor nulo. Por outro lado, se G foi gerado a partir de transferência de cargas entre alimentadores (o que é feito pelo PAO ou CAO), então $PNS_P(G)$ será igual a $PNS_P(G^{PAI})$ e a segunda parte da Equação 4.73 será nula, enquanto que $PTR_P(G, G^{PAI})$ será maior do que zero. Assim, se $s = 1$ (i.e, se tiver sido escolhida a sequência abre-fecha para executar o par de manobras), então esta terceira parte será responsável para atualizar o valor de $PNS_P(G^{PAI})$ por meio da adição da energia que deixará de ser temporariamente suprida aos consumidores transferidos durante o período de tempo entre a realização da primeira e da segunda operação do par de manobras executado. Por outro lado, se a sequência fecha-abre for adotado para o par de manobras, então s será igual a 0 e, conseqüentemente, $\varepsilon_P(G)$ será igual a $\varepsilon_P(G^{PAI})$. Os valores de $PNS_P(G^{PAI})$ e $PNS_P(G)$ consistem no simples somatório da potência ativa dos consumidores com prioridade P pertencentes a porção não-energizada de G^{PAI} e G , respectivamente. O valor de $PTR_P(G, G^{PAI})$ é calculado durante a aplicação do PAO ou CAO e consiste no somatório da potência ativa dos consumidores com prioridade P pertencentes a subárvore podada e transferida pelo PAO ou pelo CAO.

Considerando que a obtenção de cada indivíduo passa pela execução de várias manobras a partir da configuração pré-falta; considerando também que algumas destas manobras envolve a diminuição da potência não suprida ou, eventualmente, o desligamento temporário de cargas em serviço; então, para cada indivíduo haverá uma gráfico semelhante aquele ilustrado na Figura 18. Sabendo que cada uma destas manobras exige um tempo

para ser executada, então o que a Equação 4.73 faz, afinal, é determinar a área abaixo da curva $[PNS_P(G)]$ vs $[t(G, G^{PF})]$ existente para cada indivíduo.

Figura 18: Potência não suprida vs manobras realizadas para uma sequência de chaveamento arbitrária associada a um indivíduo qualquer.

Fonte: o autor.

No caso da exemplo na Figura 18, ela caracteriza um caso de falta simples com apenas um agrupamento de setores saudáveis desligados, que totaliza 8 MW de potência ativa não suprida; com sequência "abre-fecha" para as manobras que ocorrem em pares; e restauração parcial. Assim, as manobras $m1$ e $m2$ são para isolar o setor em falta; a manobra $m3$ permitiu a restauração de 2MW de potência ativa não suprida; as manobras $m4$ e $m5$ constituem um par de manobras para a transferência de carga energizada entre alimentadores; a manobra $m4$ realizou a poda dos agrupamentos transferidos e a manobra $m5$ realizou o enxerto dos mesmos no novo alimentador, sendo que é importante destacar o aumento temporário no valor na potência não suprida em decorrência do corte temporário de fornecimento dos setores transferidos; a manobra $m6$ permitiu, posteriormente, restaurar mais 2 MW de potência não suprida. Note que após a manobra $m6$ as cargas que não puderam ser restauradas ficaram desligados durante todo o tempo T , o qual foi definido na Seção 4.3.1. Sempre que em G houver cargas fora de serviço, o tempo T será necessário para permitir o cálculo de $\varepsilon_P(G)$. Neste exemplo considerou-se todas as chaves operadas como sendo do mesmo tipo e a existência de apenas um único nível de prioridade.

4.3.2.5 As tabelas de subpopulação existentes no AEMO proposto

O AEMO proposto consiste num AEMO em tabelas de subpopulação e, portanto, faz uso do conceito de Tabelas de Subpopulação, explicado na Seção 3.3 e retomado no início desta seção e que permite o tratamento de problemas com vários objetivos de maneira separada, isto é, sem exigir a agregação de objetivos em uma função por meio de fatores de ponderação. Apesar de nenhum deles considerar todos os aspectos práticos tratados neste trabalho, AEMOs em Tabelas de Subpopulação tem sido amplamente aplicados ao problema de restabelecimento e apresentado desempenho superior a outros AEMOs

da literatura, especialmente em SDs de grande porte, conforme mostram os resultados em (SANCHES; LONDON JR.; DELBEM, 2014; SANCHES et al., 2014; MARQUES et al., 2017). Apesar disto, tal estratégia de exploração do espaço de busca resulta em uma alta concentração de soluções nas extremidades de fronteiras de Pareto.

Por outro lado, apesar dos métodos baseados no NSGA-II para restabelecimento possuírem desempenho inferior aos AEMOs em Tabelas, como provado em (SANCHES; LONDON JR.; DELBEM, 2014) e visto também em (MARQUES et al., 2017), eles empregam uma estratégia denominada Seleção por Não-Dominância que é potencialmente capaz de melhorar a diversidade de soluções na região central das fronteiras de Pareto. Assim, o AEMO proposto emprega diversas estratégias para a seleção dos indivíduos a serem salvos em cada subpopulação, dentre os quais, a estratégia de seleção por não dominância do NSGA-II.

O AEMO proposto possui 26 tabelas de subpopulação de subpopulação. As 10 primeiras tabelas usam o conceito de Tabelas de Multi-Critérios, proposto por (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018) e por meio do qual a seleção dos indivíduos a serem salvos envolve a análise de vários critérios. Como poderá ser notado mais adiante, este critério permite o tratamento de objetivos que possuem entre si uma hierarquia de prioridade de otimização. As 10 tabelas seguintes empregam a estratégia de seleção por não-dominância, presente no NSGA-II, para a escolha dos indivíduos a serem armazenados. As seis últimas tabelas são baseadas no conceito tradicional de tabelas de subpopulação proposto por (SANTOS et al., 2010), e, por isso, usam um único critério para a seleção dos indivíduos a serem salvos.

As cinco primeiras tabelas de subpopulação são para a minimização de $\psi_M(G)$ (manobras em CCMs) e de $\psi_R(G)$ (manobras em CCRs) e atendimento da necessidade prática de priorização de manobras em CCRs. Em outras palavras, estas tabelas tratam o objetivo formulado em 4.58.

Considerando como $\psi_T(G)$ o número total de manobras requerido por um indivíduo G e considerando como $\psi_T(G^{BELM})$ o número total de manobras requerido pelos indivíduos obtidos pela BELM, então nas tabelas P_1 a P_5 são salvos:

- P_1 – indivíduos G para os quais $\psi_T(G) \leq [\psi_T(G^{BELM}) \div 2]$;
- P_2 – indivíduos G para os quais $[\psi_T(G^{BELM}) \div 2] < \psi_T(G) \leq [\psi_T(G^{BELM})]$;
- P_3 – indivíduos G para os quais $[\psi_T(G^{BELM})] < \psi_T(G) \leq [\psi_T(G^{BELM}) + 6]$;
- P_4 – indivíduos G para os quais $[\psi_T(G^{BELM}) + 6] < \psi_T(G) \leq [\psi_T(G^{BELM}) + 12]$;
- P_5 – indivíduos G para os quais $\psi_T(G) > [\psi_T(G^{BELM}) + 12]$.

Adotou-se como referência o número total de manobras dos indivíduos obtidos pela BELM porque este parâmetro informa, para cada caso de falta, quantas manobras são necessárias exclusivamente para isolar os setores em falta e reconectar todos setores saudáveis desligados ¹⁵. Assim, as tabelas P_1 e P_2 tendem a salvar indivíduos que proveem restauração parcial dos setores saudáveis desligados ou que proveem restauração completa usando apenas manobras para isolamento de setores faltosos e restauração de setores saudáveis. Enquanto isso, nas três tabelas seguintes há a tendência de serem salvos indivíduos que exigem manobras para alívio de alimentadores para a restauração completa dos setores afetados.

Se P_{0+p} , para $p = 1, \dots, 5$, está completa, além de atender algum dos critérios anteriores, G^{new} é salvo em P_{0+p} apenas se for melhor que o pior indivíduo salvo em P_{0+p} , referido por $G^{WP_{0+p}}$. G^{new} será melhor que $G^{WP_{0+p}}$ se ao menos um dos critérios a seguir for atendido:

- i) $[\psi_M(G^{new}) < \psi_M(G^{WP_{0+p}})]$, ou;
- ii) $[\psi_M(G^{new}) = \psi_M(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\psi_R(G^{new}) < \psi_R(G^{WP_{0+p}})]$, ou;
- iii) $[\psi_M(G^{new}) = \psi_M(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\psi_R(G^{new}) = \psi_R(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\varepsilon_A(G^{new}) < \varepsilon_A(G^{WP_{0+p}})]$, ou;
- iv) $[\psi_M(G^{new}) = \psi_M(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\psi_R(G^{new}) = \psi_R(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\varepsilon_A(G^{new}) = \varepsilon_A(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\varepsilon_I(G^{new}) < \varepsilon_I(G^{WP_{0+p}})]$, ou;
- v) $[\psi_M(G^{new}) = \psi_M(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\psi_R(G^{new}) = \psi_R(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\varepsilon_A(G^{new}) = \varepsilon_A(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\varepsilon_I(G^{new}) = \varepsilon_I(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\varepsilon_B(G^{new}) < \varepsilon_B(G^{WP_{0+p}})]$, ou;
- vi) $[\psi_M(G^{new}) = \psi_M(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\psi_R(G^{new}) = \psi_R(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\varepsilon_A(G^{new}) = \varepsilon_A(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\varepsilon_I(G^{new}) = \varepsilon_I(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\varepsilon_B(G^{new}) = \varepsilon_B(G^{WP_{0+p}})]$ e $[\varepsilon_S(G^{new}) < \varepsilon_S(G^{WP_{0+p}})]$.

Os dois primeiros critérios servem para tratar o objetivo formulado em 4.58. Embora não haja uma relação de prioridade de minimização entre os objetivos de minimizar o número de manobras e o de minimizar a energia não suprida, os critérios de iii) a vi) servem para, adicionalmente, tratar o objetivo formulado em 4.57 quando G^{new} e $G^{WP_{5+p}}$ requerem o mesmo número de manobras em CCRs e em CCMs.

¹⁵ Uma vez que todos os indivíduos obtidos pela BELM realizam exatamente esta mesma ação (isolamento dos setores faltosos e reconexão dos setores saudáveis) o número total de manobras dos mesmos é sempre igual entre si; além de ser igual também ao número total de agrupamentos de setores saudáveis desligados.

As cinco tabelas seguintes (P_6 a P_{10}) são para a minimização de $\varepsilon_A(G)$, $\varepsilon_I(G)$, $\varepsilon_B(G)$ e $\varepsilon_S(G)$ e atendimento da necessidade prática de priorização o atendimentos dos consumidores segundo o grau de prioridade de atendimento dos mesmo. Este objetivo foi formalmente formulado por 4.57.

Considerando como $\varepsilon_T(G)$ o somatório total de energia não suprida em um indivíduo G e considerando como $\varepsilon_T(G^1)$ o somatório total de energia não suprida pelo indivíduo G^1 (obtido no Passo 5 e que consiste na configuração da rede a qual todos os setores em falta encontram-se isolados e os agrupamentos de setores saudáveis à jusante dos setores em falta encontram-se desligados), então nas tabelas P_6 a P_{10} são salvos:

- P_6 – indivíduos G para os quais $\varepsilon_T(G) \leq [0, 2 \cdot \varepsilon_T(G^1)]$;
- P_7 – indivíduos G para os quais $[0, 2 \cdot \varepsilon_T(G^1)] < \varepsilon_T(G) \leq [0, 4 \cdot \varepsilon_T(G^1)]$;
- P_8 – indivíduos G para os quais $[0, 4 \cdot \varepsilon_T(G^1)] < \varepsilon_T(G) \leq [0, 6 \cdot \varepsilon_T(G^1)]$;
- P_9 – indivíduos G para os quais $[0, 6 \cdot \varepsilon_T(G^1)] < \varepsilon_T(G) \leq [0, 8 \cdot \varepsilon_T(G^1)]$;
- P_{10} – indivíduos G para os quais $\varepsilon_T(G) > [0, 8 \cdot \varepsilon_T(G^1)]$.

Se P_{5+p} , para $p = 1, \dots, 5$, está completa, além de atender algum dos critérios anteriores, G^{new} é salvo em P_{5+p} apenas se for melhor que o pior indivíduo salvo em P_{5+p} , referido por $G^{WP_{5+p}}$. G^{new} será melhor que $G^{WP_{5+p}}$. G^{new} se ao menos um dos critérios a seguir for atendido:

- i) $[\varepsilon_A(G^{new}) < \varepsilon_A(G^{WP_{5+p}})]$ ou;
- ii) $[\varepsilon_A(G^{new}) = \varepsilon_A(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_I(G^{new}) < \varepsilon_I(G^{WP_{5+p}})]$, ou;
- iii) $[\varepsilon_A(G^{new}) = \varepsilon_A(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_I(G^{new}) = \varepsilon_I(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_B(G^{new}) < \varepsilon_B(G^{WP_{5+p}})]$, ou;
- iv) $[\varepsilon_A(G^{new}) = \varepsilon_A(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_I(G^{new}) = \varepsilon_I(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_B(G^{new}) = \varepsilon_B(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_S(G^{new}) < \varepsilon_S(G^{WP_{5+p}})]$, ou;
- v) $[\varepsilon_A(G^{new}) = \varepsilon_A(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_I(G^{new}) = \varepsilon_I(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_B(G^{new}) = \varepsilon_B(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_S(G^{new}) = \varepsilon_S(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\psi_M(G^{new}) < \psi_M(G^{WP_{5+p}})]$, ou;
- vi) $[\varepsilon_A(G^{new}) = \varepsilon_A(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_I(G^{new}) = \varepsilon_I(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_B(G^{new}) = \varepsilon_B(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_S(G^{new}) = \varepsilon_S(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\psi_M(G^{new}) < \psi_M(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\psi_R(G^{new}) < \psi_R(G^{WP_{5+p}})]$.

No caso das tabelas P_{5+p} , para $p = 1, \dots, 5$, os quatro primeiro critérios são para o tratamento do objetivo problema formulado em 4.57. Adicionalmente, os critérios $v)$ e $vi)$ servem para lidar com o objetivo formulado em 4.58 quando $[\varepsilon_A(G^{new}) = \varepsilon_A(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_I(G^{new}) = \varepsilon_I(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_B(G^{new}) = \varepsilon_B(G^{WP_{5+p}})]$ e $[\varepsilon_S(G^{new}) = \varepsilon_S(G^{WP_{5+p}})]$, muito embora não haja qualquer relação de prioridade de tratamento entre os objetivos de minimizar a energia não suprida e o de minimizar o número de manobras em chaves.

Testes realizados no decorrer do desenvolvimento deste trabalho mostraram que considerar adicionalmente os critérios de $iii)$ a $vi)$ nas tabelas P_{0+p} , para $p = 1, \dots, 5$, e os critérios $v)$ a $vi)$ nas tabelas P_{5+p} , para $p = 1, \dots, 5$, concorre para uma ligeira melhoria na qualidade das fronteiras de Pareto. Ademais, nos testes apresentados em (MARQUES et al., 2017) observou-se que a estratégia de separar os indivíduos segundo o número total de manobras nas tabelas P_{0+p} , para $p = 1, \dots, 5$, bem como separar os indivíduos nas tabelas P_{5+p} , para $p = 1, \dots, 5$, segundo o valor de energia não suprida total, melhora a diversidade das soluções ao longo da fronteira de Pareto. Isto ocorre porque tal divisão faz com que cada tabela concentre-se no mapeamento de um trecho específico da fronteira de Pareto. Por exemplo, considerando que deseja-se construir uma fronteira de Pareto que possui no eixo das ordenadas valores de número total de manobras e no eixo das abcissas de energia total não suprida, então a tabela P_1 irá mapear na fronteira de Pareto a região para a qual os valores no eixo das ordenadas variam de $[\psi_T(G^{BELM}) \div 2]$ até $[\psi_T(G^{BELM})]$. Por outro lado, a tabela P_8 , por exemplo, irá mapear a região da fronteira de Pareto que compreender os valores no eixo das ordenadas que variam de $[0, 4 \cdot \varepsilon_T(G^1)]$ até $[0, 6 \cdot \varepsilon_T(G^1)]$, e assim por diante.

As tabelas de subpopulação P_{11} a P_{20} aplicam a estratégia elitista de seleção por não-dominância, presente no NSGA-II, para a escolha e armazenamento de indivíduos. Esta estratégia consiste em, primeiramente, ordenar os indivíduos de um conjunto M em diversas fronteiras ($\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots, \mathcal{F}_k$, onde k é o número de fronteiras), conforme o grau de dominância de cada indivíduo, de tal forma que a fronteira $\mathcal{F}_1$ contenha os indivíduos não dominados de todo o conjunto de soluções M , $\mathcal{F}_2$ contenha os indivíduos que são dominados ¹⁶ apenas pelos indivíduos presentes em $\mathcal{F}_1$, $\mathcal{F}_3$ contenha os indivíduos não dominados apenas pelos indivíduos contidos em $\mathcal{F}_1 \cup \mathcal{F}_2$ e assim sucessivamente. Assim, posteriormente, são selecionados e salvos os indivíduos em $\mathcal{F}_1$ e, caso ainda restem posições para serem preenchidas, salva-se também os indivíduos em $\mathcal{F}_2$. Caso ainda restem posições a serem preenchidas salva-se os indivíduos em $\mathcal{F}_3$, e assim sucessivamente até cada tabela P_{10+p} , para $p = 1, \dots, 10$, esteja completa.

Caso o número de indivíduos em uma fronteira $\mathcal{F}_x$ seja maior que o número de

¹⁶ Diz-se que um indivíduo A domina um indivíduo B se as seguintes condições forem satisfeitas (MANSOUR, 2009b): (i) o indivíduo A é no mínimo igual (tão bom quanto) a B em todas as funções objetivo; (ii) o indivíduo A é melhor que B em pelo menos uma função objetivo.

posições restantes a serem preenchidas, então, são calculados os valores de distância de multidão dos indivíduos em $\mathcal{F}_x$ e são salvos os indivíduos com os maiores valores de distância de multidão. A distância de multidão é um parâmetro proposto em (DEB et al., 2002) que mede o grau de espalhamento de um indivíduo em relação aos demais presentes numa mesma fronteira. Assim, ao priorizar o armazenamento dos indivíduos com os maiores valores de distância de multidão evita-se o salvamento de indivíduos muito próximos e, conseqüentemente, aumenta-se a diversidade entre os indivíduos.

Esta estratégia de seleção por não-dominância possui desempenho muito bom quando na ordenação dos indivíduos em fronteiras são considerados até dois ou três objetivos, mas falha em problema de otimização combinatorial com muitos objetivos (ZHANG; LI, 2007). Em virtude disso, no AEMO proposto os seis parâmetros que objetiva-se minimizar ($\varepsilon_A(G)$, $\varepsilon_I(G)$, $\varepsilon_B(G)$, $\varepsilon_S(G)$, $\psi_M(G)$, $\psi_R(G)$) são divididos grupos formados por dois objetivos conflitantes. Portanto, considerando que o grau de dominância de um indivíduo G é tão menor quanto maior for o número de indivíduos dominados por G , as tabelas de subpopulação P_{10+p} , para $p = 1, \dots, 10$, armazenam:

- P_{11} – indivíduos que possuem os menores graus de dominância em relação a minimização de $\varepsilon_A(G)$ e $\psi_R(G)$;
- P_{12} – indivíduos que possuem os menores graus de dominância em relação a minimização de $\varepsilon_I(G)$ e $\psi_R(G)$;
- P_{13} – indivíduos que possuem os menores graus de dominância em relação a minimização de $\varepsilon_B(G)$ e $\psi_R(G)$;
- P_{14} – indivíduos que possuem os menores graus de dominância em relação a minimização de $\varepsilon_S(G)$ e $\psi_R(G)$;
- P_{15} – indivíduos que possuem os menores graus de dominância em relação a minimização de $\varepsilon_A(G)$ e $\psi_M(G)$;
- P_{16} – indivíduos que possuem os menores graus de dominância em relação a minimização de $\varepsilon_I(G)$ e $\psi_M(G)$;
- P_{17} – indivíduos que possuem os menores graus de dominância em relação a minimização de $\varepsilon_B(G)$ e $\psi_M(G)$;
- P_{18} – indivíduos que possuem os menores graus de dominância em relação a minimização de $\varepsilon_S(G)$ e $\psi_M(G)$;
- P_{19} – indivíduos que possuem os menores graus de dominância em relação a minimização de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$;

- P_{20} – indivíduos **factíveis** que possuem os menores graus de dominância em relação a minimização de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$.

Em (SANCHES, 2013) e em (MARQUES et al., 2017) também foi realizada uma união das vantagens do NSGA-II aos AEMOs em Tabelas. Contudo, aquele primeiro trabalho não era capaz de tratar separadamente os objetivos, exigindo o agrupamento dos mesmo em uma função ponderada por pesos. Ademais, tratava somente casos de falta com soluções de restauração completa. Já em (MARQUES et al., 2017) permitia-se o armazenamento exclusivamente de indivíduos não dominados, isto é, apenas dos indivíduos presentes em $\mathcal{F}_1$. Mas, como mostrado em (MARQUES; FERNANDES; LONDON JR., 2018), o preenchimento das posições restantes nas tabelas com indivíduos dominados aumenta a diversidade entre as soluções e, conseqüentemente, melhora o desempenho do AEMO.

As cinco tabelas seguintes presentes no AEMO proposto são baseadas no conceito clássico de tabelas de subpopulação, por meio do qual é analisado apenas um único critério para a seleção dos indivíduos a serem salvos. Assim, nas tabelas P_{20+p} , para $p = 1, \dots, 5$, são salvos:

- P_{21} – indivíduos que possuem os menores valores de $X(G^e)$;
- P_{22} – indivíduos que possuem os menores valores de $B(G^e)$;
- P_{23} – indivíduos que possuem os menores valores de $V(G^e)$;
- P_{24} – indivíduos que possuem os menores valores de $f_a(G)$;
- P_{25} – indivíduos que possuem os menores valores de $\gamma(G)$.

$X(G^e)$, $B(G^e)$ e $V(G^e)$ foram definidos na Seção 4.2, $\gamma(G)$ são as perdas resistivas em G e $f_{agreg}(G)$ é uma função agregação dada pela Equação 4.74.

$$f_a(G) = \frac{\gamma(G)}{\gamma(G^{pf})} + w_X \frac{X(G)}{X(G^{pf})} + w_B \frac{B(G)}{B(G^{pf})} + w_V \frac{V(G)}{V(G^{pf})}, \quad (4.74)$$

na qual G , G^{pf} , $\gamma(G)$, $X(G)$, $B(G)$ e $V(G)$ foram definidos anteriormente; e w_X , w_B e w_V são pesos cujos valores são baseados nos valores de $X(G)$, $B(G)$ e $V(G)$, respectivamente, conforme a seguir:

$$w_K = \begin{cases} 1, & \text{se } K(G) > 1, \text{ para } K = X, B \text{ e } V, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Note que, diferentemente das tabelas anteriores, estas cinco tabelas não tratam de nenhum dos objetivos do enunciado formal compreendido pelas equações 4.57 – 4.72. Apesar disto, elas estão presentes no AEMO proposto porque garante-nos algumas características importantes. No caso das tabelas P_{21} , P_{22} e P_{23} , elas servem para armazenar indivíduos com menor probabilidade de violação das restrições relacionados aos limites operacionais, a saber: restrições 4.60 – 4.62 e 4.66 – 4.69. Diferentemente das demais restrições em 4.57 – 4.72, estas são as únicas que não são naturalmente atendidas pelo uso da RNP, como dito anteriormente. Logo, dado que o AEMO proposto tem liberdade para percorrer regiões inactíveis do espaço de busca, a presença das tabelas P_{21} , P_{22} e P_{23} auxilia na preservação e perpetuação de indivíduos factíveis. Optou-se por permitir ao AEMO proposto a liberdade de percorrer regiões inactíveis do espaço de buscas porque, conforme fora observado em diversos testes realizados, isto melhora a qualidade das fronteiras de Pareto, ao passo que leva o AEMO a alcançar soluções mais adequadas.

A minimização de perdas resistivas ($\gamma(G)$) por meio da tabela P_{25} , apesar deste não ser um objetivo do problema de restabelecimento, foi inicialmente proposta por (SANTOS et al., 2010) com a finalidade de melhorar a diversidade entre as soluções e, indiretamente, priorizar o salvamento de indivíduos com baixos valores de $X(G)$, $B(G)$ e $V(G)$. Isto porque, aumentos nos valores de $X(G)$, $B(G)$ e $V(G)$ costumam ser refletidos nos valores de $\gamma(G)$, dado que ambos podem ter a mesma causa: corrente excessiva circulando pela rede. Estas hipóteses feitas por (SANTOS et al., 2010) foram confirmadas num estudo realizado no decorrer desta pesquisa e, por isso, optou-se por incluir a tabela P_{25} ao AEMO proposto.

O mesmo pode-se dizer do uso de uma função que agregue $\gamma(G)$, $X(G)$, $B(G)$ e $V(G)$ e da sua minimização por meio de uma tabela de subpopulação, inicialmente proposto também por (SANTOS et al., 2010) para as mesmas finalidades citadas anteriormente. Contudo, observou-se no referido estudo realizado que a normalização dos valores de $\gamma(G)$, $X(G)$, $B(G)$ e $V(G)$ através de $\gamma(G^{pf})$, $X(G^{pf})$, $B(G^{pf})$ e $V(G^{pf})$, respectivamente, potencializa as vantagens da existência de tal tabela de subpopulação.

Por fim, a última tabela do AEMO proposto está relacionada a priorização de atendimento aos consumidores prioritários e a filosofia adotada para a operação de manobras para transferências de cargas entre alimentadores. Na tabela P_{26} são salvos:

- P_{26} – indivíduos que possuem os menores valores de $PTR_P(G)$.

$PTR_P(G)$ é o somatório de potência ativa dos consumidores energizados com prioridade P , para $P = A, I, B$ ou S , que foram transferidos entre alimentadores a fim de obter G^{New} . Assim sendo, se P_{26} está completa, um indivíduo G^{new} é salvo em P_{26} apenas se for melhor que o pior indivíduo já salvo em P_{26} , referido por $G^{WP_{26}}$. G^{new} será melhor que $G^{WP_{26}}$ se ao menos um dos critérios a seguir for atendido:

- i) $[PTR_A(G^{new}) < PTR_A(G^{WP_{26}})]$ ou;
- ii) $[PTR_A(G^{new}) = PTR_A(G^{WP_{26}})]$ e $[PTR_I(G^{new}) < PTR_I(G^{WP_{26}})]$, ou;
- iii) $[PTR_A(G^{new}) = PTR_A(G^{WP_{26}})]$ e $[PTR_I(G^{new}) = PTR_I(G^{WP_{26}})]$ e $[PTR_B(G^{new}) < PTR_B(G^{WP_{26}})]$, ou;
- iv) $[PTR_A(G^{new}) = PTR_A(G^{WP_{26}})]$ e $[PTR_I(G^{new}) = PTR_I(G^{WP_{26}})]$ e $[PTR_B(G^{new}) = PTR_B(G^{WP_{26}})]$ e $[PTR_S(G^{new}) < PTR_S(G^{WP_{26}})]$.

Com base nas definições anteriores, note que nesta tabela são salvos indivíduos que minimizam as transferências de consumidores energizados entre alimentadores, operação esta que pode aliviar um alimentador e permitir que este alimente setores saudáveis desligados. Para compreender a finalidade desta minimização considere (a) que, como dito anteriormente, para a transferência de um setor ou de um agrupamento de setores de um alimentador para outro deve-se realizar uma manobras de abertura e outra de fechamento; (b) que, caso a distribuidora de energia opte por operar tais chaves na sequência abre-fecha, os setores em transferência ficarão temporariamente sem fornecimento de energia ¹⁷. Assim sendo, ao minimizar-se as transferências de consumidores energizados entre alimentadores, se está evitando que consumidores prioritários tenham o seu fornecimento temporariamente interrompido. Como este inconveniente ocorre somente quando as distribuidoras de energia adotam a filosofia de operar pares de manobra na sequência abre-fecha, então esta tabela somente é utilizada se s for igual a 0 ¹⁸.

4.3.2.6 Busca Exaustiva Local Modificada

No Seção 3.4 foi apresentada a busca exaustiva local proposta por (CAMILLO et al., 2016a), bem como, a sua finalidade, as suas principais características e as suas vantagens. Todavia, esta abordagem não é capaz de considerar os níveis de prioridade de atendimentos entre os consumidores. Isto significa que nenhuma prioridade de atendimento é concedida aos setores com consumidores prioritários quando estes são desligados pela ocorrência de uma falta. Ademais, não há qualquer preocupação em definir uma sequência para a restauração dos setores saudáveis por meio da qual possa minimizar a energia não suprida, isto é, reconectar primeiramente os agrupamentos de setores com maior demanda.

A fim de garantir ao método proposto as vantagens de utilização de tal busca exaustiva e ainda considerar as necessidades práticas de priorização de consumidores e de minimização da energia não suprida, optou-se por incluir a busca exaustiva proposta

¹⁷ Esta opção é usualmente adotada para evitar que a rede opere em malha.

¹⁸ Como dito na página 4.3.1, s um é parâmetro de entrada deste AEMO, portanto previamente escolhido, que assume 1 se for desejável que as manobras para transferência de carga entre alimentadores ocorram na sequência abre-fecha, ou 0, caso seja desejável que essa sequência seja fecha-abre.

por (CAMILLO et al., 2016a) e realizar nela algumas ligeiras melhorias, o que resultou na Busca Exaustiva Local Modificada (BELM, como já definida na Seção 3.4).

Assim sendo, na ocorrência de faltas que resultem no desligamento de setores com consumidores prioritários, será sempre restaurado primeiramente os consumidores que possuem a prioridade mais elevada e, posteriormente, os consumidores com menor prioridade. Caso haja dois agrupamentos distintos com consumidores de igual nível de prioridade, será dada preferência à reconexão daquele que possuir o maior valor de potência ativa (demanda). Ao restaurar prioritariamente os setores com maior demanda, na ocorrência de setores desligados com o mesmo nível de prioridade de atendimento, permite-se também minimizar a energia não suprida, o que resulta em atendimento prioritário das cargas maiores e redução dos prejuízos da distribuidora com o não fornecimento de energia. Observe ainda que tal procedimento de decisão das sequências de restauração dos consumidores acaba por resultar na obtenção de uma sequência de chaveamento adequada.

Na Figura 12 é apresentado um fluxograma da BELM. Para complementar tal informação, será apresentado a seguir um exemplo da aplicação da BELM.

Exemplo de aplicação da BELM

Para exemplificar os passos de aplicação da BELM considere o SD representado na Figura 19 e a ocorrência de uma falta no setor C. Considere também os somatórios dos valores de potência ativa por setor apresentados na Tabela 7.

Figura 19: Configuração pré-falta de um SD ilustrativo de três alimentadores.

Fonte: o autor.

O funcionamento da BELM pode ser compreendido pelos passos a seguir.

Passo 1 - Leitura das informações de entrada

As principais informações recebida pela rotina que executa a BELM são: a configuração pré-falta (G^{PF} , como definido anteriormente) e a lista dos setores em falta. Para

Tabela 7: Valores de demanda ou potência ativa por nível de prioridade das cargas presentes nos setores D, E e F da Figura 19.

Setor	Nível de prioridade	Demanda (kW)
D	Sem prioridade	500
	Prioridade Intermed.	200
E	Sem prioridade	700
F	Sem prioridade	150

Fonte: Elaborada pelo autor.

o exemplo em questão, esta informações encontram-se respectivamente na Figura 19 (e Tabela 7) e no enunciado do exemplo (setor em falta: C).

Passo 2 - Isolação dos setores em falta

O topologia do SD do exemplo em questão passa a ser aquela mostrada na Figura 20 após a isolação do setor em falta.

Figura 20: Configuração do SD ilustrativo da Figura 19 após a isolação do setor em falta.

Fonte: o autor.

Passo 3 - Identificação dos agrupamentos de setores saudáveis possíveis de serem restaurados

Neste exemplo surgiram dois agrupamentos de setores saudáveis desligados, a saber:

Agrupamento	Setores que o compõe
1	E e F
2	D

Não houve neste caso nenhum agrupamento de setores saudáveis fora de serviço sem possibilidade de restauração.

Passo 4 - Ordenação dos agrupamentos identificados

Como base no que foi explicado anteriormente e considerando os valores de potência ativa e os níveis de prioridade de atendimento apresentados na Tabela 7, os agrupamentos identificados precisam ser restaurados na seguinte sequência para que sejam priorizados os consumidores mais prioritários: **1º** o Agrupamento 2; **2º** o Agrupamento 1. Isto deve-se ao fato de que, como visto na 7, o setor D possui alguns consumidores com prioridade intermediária de atendimento que, juntos somam 200 kW de demanda, enquanto que nos setores que formam o agrupamento 1 há somente consumidores sem prioridade.

Passo 5 - Identificação, para cada agrupamento, das chaves NAs disponíveis para a sua reconexão

Analisando a Figura 20 observa-se a seguinte relação entre agrupamentos e chaves NAs disponíveis:

Agrupamento	Chaves NAs disponíveis para reconexão
1	12; 15
2	13; 14

Passo 6 - Determinação das combinações possíveis de serem feitas com as chaves NAs identificadas

As combinações entre as chaves anteriores capazes de restaurar todos os agrupamentos são as seguintes (nestas combinações deve haver apenas uma chave NA associada a cada agrupamento de setores):

Id. da combinação	Id. da chave para o Agrupamento 1	Id. da chave para o Agrupamento 2
C1	12	13
C2	15	13
C3	12	14
C4	15	14

Passo 7 - Ordenação das chaves em cada combinação de maneira que os agrupamentos de setores sejam restaurados na sequência definida na passo 4

Considerando, como identificado no passo 4, as manobras para restauração do agrupamento 2 devem ocorrer antes das manobras para restauração do agrupamento 1. Em virtude disso as combinações determinadas na passo anterior devem ser feitas na seguinte sequência:

Id. da combinação	Primeira chave a ser operada	Segunda chave a ser operada
C1	13	12
C2	13	15
C3	14	12
C4	14	15

Passo 8 - Aplicação das combinações ordenadas

Esta passo consiste em aplicar cada uma das combinações ordenadas. Observe que aplicação de cada uma delas irá resultar numa configuração capaz de reconectar todos setores são desligados. Note também que todas as configurações obtidas serão distintas entre si, mas que, em todas elas, a sequência na qual os agrupamentos são restaurados respeita prioriza o atendimento dos consumidores com maior grau de prioridade de atendimento. As configurações obtidas são consideradas como indivíduos para formarem, posteriormente, a população inicial do AEMO proposto, caso sua execução venha a ser necessária.

Passo 9 - Avaliação dos indivíduos obtidos

Este passo consiste em avaliar cada indivíduo obtido segundo descrito na Seção 4.3.2.4.

Passo 10 - Informação dos indivíduos obtidos

Os indivíduos obtidos são informados, juntamente com seus valores de aptidão e de características elétricas, para, posteriormente, ser verificado se algum deles é factível ou para que possam formar a população inicial do AEMO proposto.

4.3.2.7 Obtenção de um novo indivíduo

Em todos os AEMOs em Tabelas presentes na literatura para o tratamento do problema de restabelecimento (SANTOS et al., 2010; SANCHES; LONDON JR.; DELBEM, 2014; SANCHES et al., 2014; CAMILLO et al., 2016a; MARQUES et al., 2017; MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018) os indivíduos consistem em configurações da rede nas quais todos os setores saudáveis possíveis de serem restaurados estão conectados em alguma árvore energizada. Isto ocorre porque tais AEMOs são capazes de fornecer soluções apenas em casos de falta que possuem restauração completa. Diferentemente deles, o AEMO proposto: (a) é capaz de lidar com casos de falta de restauração parcial, o que exigiu que fosse capaz de lidar também com a porção não-energizada da rede; (b) possui três, em vez de dois operadores de reprodução - o LRO (Seção 4.3.2.2), o PAO e o CAO (DELBEM et al., 2004).

Em virtude da necessidade de lidar com indivíduos que possuem porções energizadas e não-energizadas, bem como com três operadores de reprodução, o processo de obtenção (ou geração) de um novo indivíduo no AEMO proposto é completamente distinto em relação a outros AEMOs em Tabelas. Ademais, procurou-se em tal processo mesclar um pouco de aleatoriedade com ações objetivas que usualmente seriam tomadas por operadores em situações semelhantes. Um pouco de aleatoriedade é importante porque auxilia o AEMOs a escapar de ótimo-locais no espaço de busca, enquanto que a emulação do conhecimento de um especialista no problema ajuda a guiar o processo de busca para regiões com soluções mais adequadas e, conseqüentemente, melhorar a qualidade das soluções. A rotina para a geração de um novo indivíduo G^{new} pelo AEMO proposto está ilustrada pelo fluxograma da Figura 14.

Os passos apresentados em tal figura para a geração de um novo indivíduo G^{new} podem ser expressos com mais detalhes conforma a seguir.

- *Passo 1 - recebimento das tabelas de subpopulação e dos indivíduos nelas salvos.* O procedimento para geração de um novo indivíduo G^{new} é baseado nos indivíduos que formam as subpopulações em tabelas, uma vez que é nelas que estão armazenados os indivíduos mais adequados para cada objetivo ou aspecto do problema, conforme abordado na Seção 4.3.2.5.
- *Passo 2 - seleção randômica de uma das tabelas de subpopulação P^* .* Durante o desenvolvimento deste trabalho estudou-se a viabilidade de selecionar uma tabela de subpopulação com base num *fitness* associado a cada tabela e que mede a taxa de inserção de novos indivíduos. Contudo, a seleção randômica mostrou mais viável ao permitir a obtenção de fronteiras de Pareto mais adequadas. Se a tabela selecionada estiver vazia, então seleciona-se uma outra tabela P^* .
- *Passo 3 - seleção randômica de um indivíduo G^{PAI} em P^* .* O indivíduo G^{PAI} será aquele a partir do qual G^{new} será obtido.
- *Passo 4 - Verificação da existência de setores fora de serviço em G^{PAI} .* Este passo é necessário para que, caso haja consumidores fora de serviço em G^{PAI} , seja dada preferência à execução de manobras para restauração dos consumidores desligados, as quais são realizadas pelo LRO. Caso em G^{PAI} todos os consumidores já tenham sido restaurados, então, serão realizadas manobras para a transferência de carga entre alimentadores visando a melhoria dos valores de queda de tensão e de carregamento de rede e subestação, as quais podem ser realizadas pelo CAO e pelo PAO. Esta escolha procura emular o comportamento dos operadores da rede que buscam, antes de tudo, a restauração dos consumidores. No que tange ao fluxo de execução desta rotina de geração de indivíduo, se há em G^{PAI} consumidores fora de serviço, então executa-se o passo 5. Caso contrário, a rotina é direcionada para o passo 11.

- *Passo 5 - Aplicação do LRO.* Este passo consiste em aplicar o LRO em G^{PAI} para a geração de um indivíduo temporário G^α . A maneira como isto é feito está descrita na Seção 4.3.2.2.
- *Passo 6 - Associação de G^α para G^{new} .* Este passo consiste tão somente numa estratégia para simplificar a apresentação do fluxograma da Figura 14.
- *Passo 7 - Avaliação de G^{new} .* Consiste no levantamento dos parâmetros que caracterizam G^{new} . Para tal são executadas as ações apresentadas na Seção 4.3.2.4.
- *Passo 8 - Verificação dos limites operacionais relaxados em G^{new} .* Consiste em verificar se (i) $X(G^{new}) \leq 1$; (ii) $B(G^{new}) \leq 1 + \Delta B$; e (iii) $V(G^{new}) \leq \delta + \Delta V$, cujos termos já foram anteriormente definidos. Se estes três limites são respeitados, então G^{new} consiste numa configuração que pode ser operada ao menos temporariamente até que outras manobras sejam realizadas. Logo, passa-se para o passo 14, que retornará G^{new} como o novo indivíduo gerado. Por outro lado, a violação de ao menos um destes limites significa que, antes de manobras para a restauração de setores desligados em G^{PAI} , são necessárias manobras para alívio dos alimentadores adjacentes. Desta forma, passa-se para o passo 10 que poderá direcionar a rotina para a geração de outro indivíduo, a partir de G^{PAI} , por meio da transferência de cargas energizadas entre alimentadores usando o PAO ou o CAO. É importante recordar que o AEMO proposto faz uso da heurística proposta por (CAMILLO et al., 2016a) para restringir às operações do LRO, do PAO e do CAO à região no entorno dos setores em falta.
- *Passo 9 - Verifica se foi o LRO que gerou G^{new} .* Conforme dito, se em G^{new} algum limite operacional relaxado for violado, então um novo indivíduo é gerado a partir G^{PAI} por meio do PAO ou do CAO. Contudo, isto deve ocorrer somente se G^{new} tiver sido gerado pelo LRO. Assim, neste passo é verificado se G^{new} fora obtido pelo LRO. Se sim, então a rotina é direcionada para o passo 10 a fim de que outro indivíduo seja gerado. Caso contrário, então, nenhum outro indivíduo deve ser gerado e a rotina é direcionada para o passo 14 para a informação do último indivíduo gerado e encerramento da execução da rotina.
- *Passo 10 - Descarte de G^{new} .* Considerando que G^{new} foi gerado pelo LRO e que viola algum limite operacional relaxado, ele é descartado para que outro indivíduo seja gerado.
- *Passo 11 - Seleção de um operador entre o PAO e o CAO.* A escolha do PAO e do CAO é realizada por meio da estratégia proposta por (SANTOS et al., 2010), através da qual a probabilidade de escolha de um destes operadores é dependente de uma taxa de probabilidade ajustada de acordo com o sucesso de cada operador em gerar

bons indivíduos. Neste trabalho, optou-se por ajustar tal taxa a partir do sucesso na inserção de um indivíduo gerado na Tabela P_{20} . Maiores informações sobre este assunto podem ser obtido em (SANTOS et al., 2010; SANTOS, 2009).

- *Passo 12 - Aplicação em G^{PAI} do operador selecionado e geração de um indivíduo G^β .* O modo por meio do qual um indivíduo é gerado pelo PAO ou pelo CAO é detalhadamente apresentado por (SANTOS et al., 2010).
- *Passo 13 - Associação de G^β para G^{new} .* Após este passo 13, o fluxo de execução da rotina é direcionado de volta para o passo 7.
- *Passo 14 - Informação de G^{new} e encerramento da execução da rotina.*

4.3.2.8 Verificação e correção de sequência de chaveamento

A correção da sequência de chaveamento de um indivíduo G só é realizada quando há chaves que retornaram ao seu estado inicial. Como dito na Seção 4.3.1, tal correção de sequência é realizada em duas etapas: (1^a) obtenção de uma sequência de chaveamento sem a presença de chave repetida; (2^a) verificação da factibilidade da nova sequência obtida.

A primeira destas duas etapas é realizada por meio do algoritmo proposto por (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018). Este considera algumas sequências alternativas sem a presença de chaves repetidas e testa-as em relação a manutenção da radialidade de rede em cada uma das configuração intermediárias. Caso nenhuma delas seja capaz de manter a radialidade da rede, o que é muito raro, então, o procedimento proposto (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018) retornará a sequência original (com chaves repetidas).

Na obtenção de uma sequência de chaveamento corrigida, a segunda etapa é executada. Ela consiste em, primeiramente, gerar, armazenar por meio da RNP e avaliar todas configurações intermediárias inéditas da sequência corrigida, isto é, as configurações intermediárias que não existiam na sequência original; e, em seguida, verificar a factibilidade da sequência de chaveamento corrigida, o que consiste na verificação do atendimento das condições expressas pelas Equações 4.10 – 4.23. Caso a sequência corrigida seja factível, então ela será associada ao indivíduo G . Caso contrário, mantém-se associada ao indivíduo G a sua sequência de chaveamento original. Independentemente da factibilidade da sequência corrigida, as suas configurações intermediárias inéditas são retornadas a fim de que possam, posteriormente, fazer parte da população de indivíduos-filho.

É importante salientar que a rotina em questão não procura por uma sequência de chaveamento ótima para um indivíduo G . Mas objetiva tão somente a obtenção de uma sequência factível com o mínimo de chaves repetidas. Isto decorre do fato de que tal procedimento é executado em todas as gerações do processo evolutivo e que a determinação de uma sequência de chaveamento ótima a cada geração demandaria um tempo computacional incompatível com as necessidades do problema. A verificação da

factibilidade de uma sequência de chaveamento envolve a avaliação de todas as configurações intermediárias, o que, por sua vez, exige diversas execuções do algoritmo para cálculo de fluxo de carga. E, apesar da eficiência computacional do fluxo de carga com RNP, as rotinas de fluxo de carga são as que mais demandam esforço e tempo computacional neste método proposto.

Vale destacar também que o tratamento do aspecto prático relacionado ao fornecimento de sequências de chaveamento é feito em conjunto por esta rotina, que procura corrigir sequências de chaveamento, e pelas tabelas de subpopulação que minimizam os valores de energia não suprida. Isto porque os valores de energia não suprida por nível de prioridade de consumidor fornecem uma medida da qualidade da sequência de chaveamento, de tal forma que quanto menores são, melhor será a qualidade da sequência de chaveamento. Um valor baixo de energia não suprida significa que uma grande quantidade de cargas foram restauradas num curto intervalo de tempo. Um fluxograma para a rotina de verificação e correção de sequência de chaveamento é apresentado na Figura 15.

4.3.2.9 Formação do conjunto Pareto-ótimo

A divisão da população em tabelas de subpopulação pelo AEMO proposto faz com que ao término do seu processo evolutivo não exista automaticamente um conjunto Pareto-ótimo. Por outro lado, isto garante uma flexibilidade na escolha dos objetivos a serem avaliados para a composição do conjunto Pareto-ótimo. De qualquer maneira, ao término do processo evolutivo faz-se necessária a execução de uma rotina que analise os indivíduos armazenados nas tabelas e determine as soluções não-dominadas para comporem a aproximação do conjunto Pareto-ótimo. Para este fim, foi desenvolvida a estratégia apresentada na sequência.

Nesta estratégia, a obtenção do conjunto Pareto-ótimo ocorre após o encerramento do processo evolutivo e por meio dos passos a seguir.

- *Passo 1 - coleta dos indivíduos salvos nas tabelas de subpopulação.* Todas as tabelas são percorridas e são coletados todos os indivíduos armazenados.
- *Passo 2 - verificação da factibilidade dos indivíduos.* Os indivíduos coletados são analisados a fim de determinar se atendem as restrições do problema, conforme o enunciado formal apresentado. Os indivíduos infactíveis são descartados nestes passos. Não é necessária execução de fluxo de carga neste passo porque os indivíduos já foram avaliados e o método proposto salva suas características elétricas.
- *Passo 3 - ordenação por grau de dominância dos indivíduos factíveis.* Usando a estratégia de seleção por não-dominância (DEB et al., 2002), os indivíduos factíveis são separados por grau de dominância.

- *Passo 4 - formação da aproximação do conjunto Pareto-ótimo.* A aproximação do conjunto Pareto-ótimo resultante da execução do AEMO será, enfim, formado pelos indivíduos com grau de dominância nulo, isto é, pelos indivíduos factíveis não-dominados por nenhum outro indivíduo. Tais indivíduos são salvos para serem posteriormente analisados na escolha das soluções finais.

É muito importante ressaltar que na separação dos indivíduos por grau de dominância e, consequentemente, na seleção dos indivíduos não-dominados optou-se por analisar os valores de energia total não suprida ($\varepsilon_T(G)$) e do total de manobras em chaves ($\psi_T(G)$). Isto porque, da maneira como formulado pela Equações 4.57 – 4.58, o problema envolve níveis de hierarquia entre os múltiplos objetivos, além de conflito entre alguns deles, e não é conhecida uma maneira de traçar uma fronteira de Pareto (o que é feito com as soluções da aproximação do conjunto Pareto-ótimo) que represente o modelo referido. Concorreu também para escolha de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$ o fato de estes serem determinados pela soma dos valores dos parâmetros que são realmente alvos de otimização: $\varepsilon_A(G)$, $\varepsilon_I(G)$, $\varepsilon_B(G)$ e $\varepsilon_S(G)$; e $\psi_M(G)$ e $\psi_R(G)$, respectivamente.

4.3.2.10 Escolha das soluções finais a partir de um conjunto Pareto-ótimo

Considerando que: (a) nem sempre os engenheiros de operação de SDs têm familiaridade com o conceito de fronteira de Pareto; (b) um conjunto Pareto-ótimo pode possuir várias soluções e (c) há um curto intervalo de tempo para a tomada da decisão de qual solução da aproximação do conjunto Pareto-ótimo deverá ser escolhida. Acredita-se que, para melhor auxiliar o trabalho dos operadores, deve-se informar a este apenas algumas das soluções constantes na aproximação do conjunto Pareto-ótimo obtido pelo AEMO.

A seleção de soluções num conjunto Pareto-ótimo é ainda alvo de pesquisas e não consiste num trabalho facilmente executável, uma vez que envolve preferências pessoais e, eventualmente, o seguimento de uma filosofia previamente determinada pela empresa de distribuição (no caso do problemas de otimização em SDs). Apesar da relevância deste tópico para o problema de restabelecimento, especialmente quando este é tratado por abordagens multi-objetivo, ele não consiste num dos focos desta pesquisa. Devido a isso foi adotado um procedimento mais simplista para selecionar algumas soluções junto à aproximação do conjunto Pareto-ótimo obtida. Todavia, em função da modularidade desta rotina junto ao método proposto, ela pode ser facilmente substituída por outra estratégia mais precisa ou mais adequada às preferências da empresa de distribuição.

Dada a aproximação do conjunto Pareto-ótimo obtido anteriormente, esta estratégia consiste em selecionar as seguintes soluções: (1^a) a solução com o menor valor de $\varepsilon_T(G)$; (2^a) a solução com o menor valor de $\psi_T(G)$; (3^a) a solução que melhor pondera os valores de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$. Esta última solução usualmente está próxima do meio da fronteira de

Pareto plotável a partir das soluções da aproximação do conjunto Pareto-ótimo, na região da fronteira comumente chamada de “joelho da curva”.

Para exemplificar, considere a Figura 21 e também como sendo $f_1 = \varepsilon_T(G)$ e $f_2 = \psi_T(G)$. Nesta figura a fronteira $\mathcal{F}_1$ é aquela formada pelos indivíduos não-dominados, isto é, pelas soluções que compõem a aproximação da aproximação do conjunto Pareto-ótimo obtida pelo procedimento apresentado na Seção 4.3.2.9. As demais fronteiras são formadas por soluções dominadas. Dada a fronteira $\mathcal{F}_1$, com base no que foi descrito no parágrafo anterior, seriam escolhidas para serem as Soluções Finais do problema os indivíduos: I_1 , I_3 e I_4 . O primeiro por ser aquele com o menor valor de $\varepsilon_T(G)$, o terceiro por possuir o menor valor para $\psi_T(G)$; e o segundo por ser o indivíduo que melhor pondera os valores de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$.

Figura 21: Exemplo de fronteiras de Pareto para dois objetivos 1 e 2.

Fonte: adaptado de (DEB, 2001).

A determinação da solução que melhor pondera os valores de f_1 e f_2 é feita conforme os seguintes passos:

- *Passo 1 - Normalização dos valores de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$ para cada indivíduo (solução) G presente na aproximação do conjunto Pareto-ótimo;*
- *Passo 2 - Determinação da solução mais próxima do “joelho” da fronteira de Pareto formada pela aproximação do conjunto Pareto-ótimo. Ao normalizar os valores de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$ o joelho da fronteira de Pareto formada pelos valores normalizados estará exatamente no ponto em que a diferença entre $\varepsilon_T^{NORM}(G)$ e $\psi_T^{NORM}(G)$ é nula. Assim sendo, o indivíduo que melhor pondera os valores de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$ é aquele que possui o menor valor de $|\varepsilon_T^{NORM}(G) - \psi_T^{NORM}(G)|$.*

Caso sejam utilizados outros parâmetros, diferentes de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$, na determinação da aproximação do conjunto Pareto-ótimo pelo procedimento descrito na Seção 4.3.2.9, então os mesmos novos parâmetros devem ser usados na escolha da solução final.

4.4 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado um enunciado formal para o problema e o método proposto para tratá-los. Por fim, é importante salientar que as tabelas que salvam os indivíduos com os menores valores de energia não suprida, também privilegiam indivíduos com uma boa sequência de chaveamento. Sabendo que uma sequência de chaveamento é tão melhor quanto antes restaura as cargas desligadas, considere ainda que a energia não suprida é um parâmetro dependente do tempo de ausência de fornecimento. Então, ao priorizar o armazenamento de indivíduo com os menores valores de energia não suprida, o método proposto está, diretamente, privilegiando os indivíduos com as melhores sequências de chaveamento.

5 TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os experimentos computacionais realizados para a avaliação do método proposto e os resultados principais. Nestas simulações foi utilizado um computador pessoal com processador Intel Core i7-3770 de 3,40 GHz, 32 GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 16.04 LTS *64-bits*. O programa computacional do método proposto foi codificado em linguagem C.

5.2 Sistemas de distribuição utilizados em testes

Na avaliação do método proposto foram utilizados quatro SDs cujas principais características são apresentadas na Tabela 8. O primeiro consiste numa rede ilustrativa de pequeno porte disponibilizada por (ROMERO et al., 2016) e cuja topologia pré-falta é ilustrada pela Figura 22. Note que neste SD todos os ramos consistem em chaves NAs ou NFs, o que faz com que cada setor da rede seja formado por uma única barra e, assim, a sua representação no formato barra-ramo (ou barra-chave) e no formato setor-chave são iguais.

O segundo SD (*SCL-City*) consiste na rede de distribuição da cidade de São Carlos-SP, em operação no ano de 1994. O SD *LDR-City* é a rede de distribuição em operação na cidade de Londrina-PR no ano de 2014 e o SD *LDR-full* é a rede em operação na região metropolitana de Londrina, que envolve também as cidades mais próximas à Londrina, no dia 1º de novembro de 2016. Os valores de demanda utilizados para o SD *LDR-full* são das 19 horas (horário de ponta). Nos SDs *LRD-City* e *LDR-full* são originalmente conhecidos quais são os consumidores prioritários, porém não é sabido o nível de prioridade dos mesmos. Por isso, a fim de haver uma distinção de prioridade entre eles, foram escolhidos aleatoriamente em ambos os SDs 50% dos consumidores prioritários para terem prioridade baixa de fornecimento, 30% para possuírem prioridade intermediária e 20% para terem prioridade alta.

5.3 Comparação com os resultados apresentados por (ROMERO et al., 2016)

Para lidar com o problema de restabelecimento de energia é proposta por (ROMERO et al., 2016) uma estratégia que considera os seguintes aspectos práticos: discriminação entre consumidores prioritários e não prioritários (i.e, dois níveis de prioridade de atendimentos entre os consumidores); distinção entre CCRs e CCMs e priorização de manobras em CCRs; necessidade de que os setores da rede que não foram afetados pela ocorrência da falta não tenham, posteriormente, o seu fornecimento cortado; e consideração de

Tabela 8: Dados dos sistemas de distribuição utilizados nos testes experimentais.

		Sistemas de distribuição			
		<i>53-bus</i>	<i>SCL-City</i>	<i>LDR-City</i>	<i>LDR-Full</i>
Subestações		3	3	13	15
Alimentadores		6	23	68	83
Setores		53	532	3.148	3.479
Barras		53	3.860	21.656	40.606
Chaves	CCMs	61	632	3.429	3.712
	CCRs	0	0	151	181
	Total	61	632	3.580	3.893
Consumidores	P. Alta	0	0	44	107
	P. Intermediária	0	0	84	154
	P. Baixa	0	0	133	254
	Sem prioridade	50	2.057	6.721	6.763
	Total	50	2.057	6.982	7.278
Máx. carregamento de rede na configuração pré-falta (%)		75,2	56,7	82,0	105,1
Máx. queda de tensão na configuração pré-falta (%)		2,8	3,9	6,4	7,2
Máx. car. de transformador na configuração pré-falta (%)		76,7	96,8	90,1	104,4

Fonte: Elaborada pelo autor.

situações em que parte das chaves de rede estejam inoperantes. Esta estratégia consiste num modelo matemático que representa o problema de restabelecimento como um problema de programação matemática inteira mista cônica de segunda ordem. Para a solução deste modelo foi utilizando o programa CPLEX e um computador com processador *Intel i7 4770*.

Para uma avaliação comparativa do método proposto no capítulo anterior, o mesmo foi aplicado aos casos de falta simulados por (ROMERO et al., 2016). Tomou como base para este estudo comparativo o trabalho de (ROMERO et al., 2016) porque o mesmo disponibiliza todas as informações do SD de teste; consiste num método matemático, o que garante que as soluções apresentadas são as ótimas para o modelo matemático utilizado; seus testes foram realizados num SD possível de ser representado graficamente, o que facilita a interpretação dos resultados e a comparação.

Todavia, deve-se ter em mente que não é esperado que o método proposto e o modelo apresentado por (ROMERO et al., 2016) alcancem precisamente os mesmos resultados. Isto porque, apesar de possuírem em comum a capacidade de lidar com alguns aspectos práticos do problema, em cada um deles o problema é formulado de maneira distinta. Por exemplo, para fins de quantificar as cargas desligadas, o método proposto utiliza a energia não suprida, enquanto que é utilizado por (ROMERO et al., 2016) o

Figura 22: Configuração pré-falta do SD 53-bus no formato barra-chave.

Fonte: (ROMERO et al., 2016).

somatório de potência ativa e reativa das consumidores que permanecerão desligados após a implementação da solução obtida; por meio do método proposto os objetivos do problema são tratados separadamente enquanto que em (ROMERO et al., 2016) eles são convertidos em unidades monetárias e seus valores são somados. Apesar destas e de outras diferenças, a comparação entre ambos os métodos é viável e importante porque os resultados apresentados por (ROMERO et al., 2016) darão uma referência para a análise dos resultados obtidos pelo método proposto para os mesmos casos de contingência.

Os testes que realizou foram categorizados por (ROMERO et al., 2016) em: testes gerais e testes especializados. Nos testes gerais não foi considerado nenhum aspecto prático do problema e foram simulados três casos de falta simples em barras (ou setores) distintas. Quatro foram os testes especializados, os quais simulam uma falta na barra 3 da rede e diferenciam-se entre si pelos aspectos práticos considerados. O método proposto foi aplicado em seis destes sete casos de teste ¹. Os detalhes, os resultados e uma breve discussão sobre esta análise comparativa serão apresentado na sequência. O método proposto foi executado

¹ O sétimo caso foi desconsiderado porque, para reproduzir as considerações por ele consideradas, seriam necessárias modificações topológicas da rede.

35 vezes para cada um dos seis casos de testes, sendo que todos eles exigiram a execução do AEMO. Na Tabela 9 são mostrados os valores assumidos pelos parâmetros de entrada.

Tabela 9: Valores assumidos pelos dados de entrada nos testes experimentais para comparação com os resultados apresentados por (ROMERO et al., 2016).

Parâmetro	δ	ΔB ²	ΔV	s	T	t_{CCR}
Valor	0,1 (10%)	0,5 (50%)	0,1 (10%)	1	4 h / Falta	50 seg. *

Parâmetro	t_{CCM}	$S_{P_1, \dots, 10}$	$S_{P_{11}, \dots, 19}$	$S_{P_{20}}$	$S_{P_{21}, \dots, 26}$	G_MAX
Valor	25 min. *	5	20	40	5	10.000

* de acordo com (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012).

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.1 Testes gerais

Teste geral 1

No teste geral 1 foi considerada a ocorrência de uma falta permanente na barra 3 do SD 53-bus (ver Figura 22), responsável por retirar o fornecimento de todos os consumidores de um alimentador inteiro. Na Tabela 10, os resultados apresentados por (ROMERO et al., 2016) e pelo método proposto são apresentados. A primeira coluna apresenta a origem do resultado apresentado; a segunda e a terceira colunas trazem um identificador para os conjuntos de Pareto-ótimos encontrados ao longo das 35 execuções realizadas e o número de vezes em que cada um foi obtido; a quarta, a quinta e a sexta colunas informam, respectivamente, a energia total não suprida, o número total de manobras e a potência não suprida total (somatório de potência ativa de todas as cargas que não puderam ser restauradas) de cada indivíduo presente nos conjuntos de Pareto-ótimo; a última coluna informa as barras que permaneceram desligadas em cada indivíduo, isto é, as barras que não puderam ser restauradas.

Nos resultados apresentados por (ROMERO et al., 2016) não são contabilizadas as manobras para a isolação da barra em falta. Por outro lado, tais manobras são contados no método proposto. Por isso, optou-se por apresentar os valores de manobras obtidos por (ROMERO et al., 2016) já adicionadas as manobras para isolação da barra em falta, a fim de padronizar as informações e facilitar a comparação.

Observa-se na Tabela 10 que nenhum dos conjuntos Pareto-ótimo obtidos contém a solução de referência, obtida por (ROMERO et al., 2016). Todavia, considerando-se os valores de $\psi_T(G)$ e $PNS_T(G)$, já que o valor de $\varepsilon_T(G)$ não é informado, pode-se observar que as soluções em cada conjunto Pareto-ótimo e a solução de referência são não-dominadas entre si, o que significa que não é possível apontar a melhor dentre elas. Apesar disto, a

² A definição dos valores ΔB e de ΔV foi realizada com o auxílio de engenheiro de operação da Companhia Paranaense de Energia.

Tabela 10: Resultados experimentais para o teste geral 1.

Origem	Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocor- rência	$\varepsilon_T(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\psi_T(G)$	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)	Barras desligadas
Artigo de referência	-	-	n.d.*	11	3118,5	5 6 26
Método proposto	1	3 de 35	20778,5	6	4227,3	4 5 6 28 7
			21217,4	4	6444,9	4 5 7 8 27 26
	2	30 de 35	20131,7	8	3257,1	4 5 7
			20778,5	6	4227,3	4 5 6 7 28
			21217,4	4	6444,9	4 5 7 8 27 26
	3	2 de 35	21217,4	4	6444,9	4 5 7 8 27 26

* n.d.: não disponível.

Fonte: Elaborada pelo autor.

primeira solução no conjunto Pareto-ótimo 2, que foi o mais obtido, é muito semelhante a solução de referência em termos de $PNS_T(G)$ e exigiu três manobras a menos.

Adicionalmente, o método proposto alcançou mais de uma solução, o que permite maior flexibilidade na escolha da solução a ser aplicada à restauração da rede. Por exemplo, a segunda solução no conjunto Pareto-ótimo 2 é uma opção adequada caso deseja-se realizar um número menor de manobras, uma vez que exige 5 manobras a menos que a solução de referência e deixa adicionalmente desligadas apenas 1.108,8 kW de potência ativa, o que corresponde a aprox. 15% ao somatório de potência ativa de todas os consumidores saudáveis inicialmente desligados, que foi de 7415,1 kW.

Teste geral 2

No teste geral 2 foi considerada uma falta na barra 11, que resultou no desligamento de 9078,3 kW em consumidores saudáveis. A solução de referência, fornecida por (ROMERO et al., 2016), foi capaz de restaurar todos os consumidores por meio de 9 manobras, como pode ser visto na Tabela 11. Por outro lado, todas as soluções no conjunto Pareto-ótimo fornecido pelo método proposto são de restauração parcial. Apesar disto, nota-se, mais uma vez, que a solução de referência e as soluções no conjunto Pareto-ótimo são não-dominadas entre si em termos de $\psi_T(G)$ e $PNS_T(G)$.

O mesmo conjunto Pareto-ótimo foi encontrado nas 35 execuções, e, embora possua apenas duas soluções, apresenta opções adequadas de restauração. Por exemplo, a pior solução neste conjunto, em termos de $PNS_T(G)$, restaura aprox. 40% das cargas desligadas com aprox. 55% menos manobras que a solução de referência.

Em diversas simulações para este caso geral 2, foi observado que o AEMO proposto

Tabela 11: Resultados experimentais para o teste geral 2.

Origem	Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocor- rência	$\varepsilon_T(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\psi_T(G)$	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)	Barras desligadas
Artigo de referência	-	-	n.d.	9	0	-
Método proposto	1	35 de 35	16227,8	6	2772,0	12 45 44
			20177,9	4	5405,4	12 45 44 38 39 32

Fonte: Elaborada pelo autor.

obteve indivíduos com as mesmas características da solução de referência, como pode ser comprovado através da Tabela 12. Note que ambos possuem o mesmo número de manobras, restauram todas as cargas e possuem o mesmo conjunto de chaves a serem operadas: abertura de (102-11), (12-11), (45-12), (39-38), (34-33) e fechamento de (13-12), (8-33), (35-40), (10-38).

Tabela 12: Principais características do indivíduo obtido pelo método proposto que consiste na solução de referência do teste geral 2.

Origem	$\varepsilon_T(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\psi_T(G)$	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)	Barras desligadas
Método Proposto	51628,5	9	0	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar de ser igual a solução de referência, este indivíduo não está no conjunto Pareto-ótimo obtido (Tabela 11) porque, em termos de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$, ele é dominado por ambos os indivíduos que compõem tal conjunto. Diz-se em termos de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$, porque estes são os dois parâmetros usados na determinação das soluções factíveis que formam o conjunto Pareto-ótimo, como descrito na Seção 4.3.2.9.

O fato deste indivíduo ser dominado significa que possui valores de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$ maiores que os das soluções do conjunto Pareto-ótimo, apesar de restaurar todos os consumidores. Isto ocorre porque a sequência de chaveamento associada a este indivíduo divide os consumidores saudáveis desligados em blocos menores, o que exige um número maior de manobras de reconexão e resulta em maiores valores de potência ativa desligados por um intervalo de tempo maior. Enquanto isso, nos indivíduos presentes no conjunto Pareto-ótimo quantidades maiores de cargas são reconectados com um número menor de manobras. Consequentemente os consumidores saudáveis permanecem desligados por um intervalo menor de tempo.

Isto pode ser visto pela comparação da sequência de chaveamento da primeira solução no conjunto Pareto-ótimo, apresentada nas Tabelas 13 e 14³, com a sequência de chaveamento da solução que é igual à solução de referência, apresentada nas Tabelas 15 e 16. Para facilitar o entendimento vale dizer que nas tabelas que apresentarão sequências de chaveamento neste capítulo os valores de $\varepsilon_T(G)$, $\psi_T(G)$ e $PNS_T(G)$ apresentados em uma linha L representam, respectivamente, o valor total de energia não suprida, o número total de manobras e a potência ativa total não suprida caso a sequência de chaveamento fosse executada somente até a linha L .

Tabela 13: Informações da sequência de chaveamento da primeira solução no conjunto Pareto-ótimo da Tabela 11 - parte 1.

ABRIR	FECHAR	Barras Reconectadas	$\varepsilon_T(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\psi_T(G)$	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)
(11-102)	-	-	28747,95	2	9078,3
(11-12)	-				
(33-39)	(8-33)	33-34-35-36	20177,85	4	5405,4
(38-44)	(10-38)	32-38-39	16227,75	6	2772,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 14: Informações da sequência de chaveamento da primeira solução no conjunto Pareto-ótimo da Tabela 11 - parte 2.

ABRIR	FECHAR	$X(g^e)$ (%)	$V(g^e)$ (%)	$B(g^e)$ (%)
(11-102)	-	0	0	32,28
(11-12)	-			
(33-39)	(8-33)	89,66	2,53	76,65
(38-44)	(10-38)	95,57	2,96	76,65

Fonte: Elaborada pelo autor.

Teste geral 3

No teste geral 3 é simulada uma falta na barra 14, que resulta em 8108,1 kW de potência não suprida para consumidores saudáveis. Na Tabela 17 é apresentado o

³ Os valores de $X(g^e)$ e $V(g^e)$ são inicialmente nulos na Tabela 14 porque, como explicado na Seção 4.3.2.3, eles são calculados apenas nos alimentadores que compõem o conjunto $\Omega_{FALTA}(G)$, que salva o identificador dos alimentadores que receberam setores restaurados ou transferidos e também o identificador do alimentador no qual estava o setor em falta. E enquanto tiverem sido executadas apenas manobras para isolamento dos setores em falta (em toda sequência de chaveamento as primeiras manobras são sempre para a isolamento dos setores em falta) nenhum setor saudável desligado terá sido restaurado ou transferido, de modo que no conjunto $\Omega_{FALTA}(G)$ haverá apenas o identificador do alimentador que continha o setor em falta. Se a falta ocorrer no início de um alimentador, como é o caso de todos os casos de falta simulados, após a isolamento do setor em falta restará em seu alimentador apenas a barra raiz de subestação. Consequentemente, não haverá corrente fluindo neste alimentador e, portanto os valores de $X(g^e)$ e $V(g^e)$ serão nulos.

Tabela 15: Informações da sequência de chaveamento da solução que é igual a solução de referência e que foi apresentada na Tabela 12 - parte 1.

ABRIR	FECHAR	Barras Reconectadas	$\varepsilon_T(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\psi_T(G)$	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)
(11-102)	-	-	28747,95	2	9078,3
(11-12)	-				
(33-34)	(35-40)	34-35-36	24867,15	4	7415,1
(38-39)	(8-33)	32-33-39	19045,95	6	3534,3
(12-45)	(10-38)	38-44-45	17521,35	8	1247,4
-	(12-13)	12	17209,5	9	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16: Informações da sequência de chaveamento da solução que é igual a solução de referência e que foi apresentada na Tabela 12 - parte 2.

ABRIR	FECHAR	$X(g^e)$ (%)	$V(g^e)$ (%)	$B(g^e)$ (%)
(11-102)	-	0	0	32,28
(11-12)	-			
(33-34)	(35-40)	91,49	2,31	85,05
(38-39)	(8-33)	91,49	2,77	85,05
(12-45)	(10-38)	92,88	2,77	85,05
-	(12-13)	92,88	2,77	91,35

Fonte: Elaborada pelo autor.

conjunto Pareto-ótimo obtido nas 35 execuções e a solução de referência para este caso, fornecida em (ROMERO et al., 2016). Este é um caso de falta mais complexo que os anteriores, pois a solução de referência, que é a ótima para a formulação matemática proposta por (ROMERO et al., 2016), restaura menos de 50% do total de potência não suprida.

Tabela 17: Resultados experimentais para o teste geral 3.

Origem	Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocorrência	$\varepsilon_T(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\psi_T(G)$	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)	Barras desligadas
Artigo de referência	-	-	n.d.	10	4435,2	15 16 46 47 36
Método proposto	1	35 de 35	19508,0	5	6652,8	15 16 46 47 40 41 42

Fonte: Elaborada pelo autor.

A complexidade maior deste caso de testes refletiu-se também nos resultados apresentados pelo método proposto, visto que o seu desempenho foi inferior ao apresentado

nos testes anteriores, no que tange a diversidade das soluções presentes no conjunto Pareto-ótimo. Em todas as execuções, este possuía uma única solução. Apesar disto, a solução no conjunto Pareto e a solução de referência são, novamente, não-dominadas entre si em relação aos valores de $PNS_T(G)$ e $\psi_T(G)$, indicando que ambas poderiam ser usadas no tratamento deste caso de falta.

5.3.2 Testes especializados

Nos testes especializados foram considerados os aspectos práticos do problema. Em todos eles considerou-se uma falta na barra 3.

Teste especializado 1

Um dos aspectos práticos tratados por (ROMERO et al., 2016) foi o de impedir o corte de consumidores que não foram desligados pela ocorrência da falta, isto é, dos consumidores que permaneceram em serviço após a ocorrência da falta. O tratamento deste aspecto prático é importante porque evita a deteriorização do indicador de continuidade relacionado à frequência de interrupções para os consumidores que permaneceram em serviço.

Em (ROMERO et al., 2016) este aspecto prático foi tratado impedido-se operações nas chaves adjacentes às barras não desligadas. Em outras palavras, permitiu-se a operação apenas das chaves NFs presentes no agrupamento de barras desligadas e das chaves NAs capazes de ligar as barras desligadas a alguma barra energizada.

Este aspecto prático também é considerado pelo método proposto, mas de uma maneira distinta àquela descrita no parágrafo anterior, apesar disto não ter sido enfatizado nos capítulos anteriores. Recorde que o método proposto não possui um operador de reprodução responsável por realizar cortes de cargas. Recorde também que as operações realizadas pelo LRO consistem apenas em selecionar consumidores fora de serviço e restaurá-los. Assim, o método proposto não é capaz de realizar cortes em setores saudáveis energizados, mesmo naqueles que estavam fora de serviço e foram restaurados. Portanto, sempre que o uma solução de restauração parcial é fornecida, os setores que permanecerão inoperantes estarão sempre no grupo daqueles que foram inicialmente desligados. O método proposto não realiza corte de carga, mas seleciona algumas para permanecerem desligadas quando necessário.

A Tabela 18 apresenta os conjuntos Pareto-ótimo obtidos pelo método proposto e a solução de referência, apresentada por (ROMERO et al., 2016). Note que as soluções alcançadas são as mesmas fornecidas para o caso de teste geral 1, pois trata-se do mesmo caso de falta e o método proposto já havia sido aplicado àquela caso geral 1 considerando o aspecto prático descrito. Por outro lado, a solução de referência foi diferente porque o

modelo proposto por (ROMERO et al., 2016) foi ajustado para não permitir manobras que desligassem cargas que não foram desligadas pela ocorrência da falta, como dito.

Tabela 18: Resultados experimentais para o teste especializado 1.

Origem	Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocor- rência	$\varepsilon_T(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\psi_T(G)$	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)	Barras desligadas
Artigo de referência	-	-	n.d.	9	4573,8	4 5 6 7 26
Método proposto	1	3 de 35	20778,45	6	4227,3	4 5 6 7 28
			21217,35	4	6444,9	4 5 7 8 27 26
	2	30 de 35	20131,65	8	3257,1	4 5 7
			20778,45	6	4227,3	4 5 6 7 28
			21217,35	4	6444,9	4 5 7 8 27 26
	3	2 de 35	21217,35	4	6444,9	4 5 7 8 27 26

Fonte: Elaborada pelo autor.

Perceba que as duas primeiras soluções no conjunto de Pareto 2 apresentam valores de $PNS_T(G)$ e $\psi_T(G)$ menores que os da solução de referência. Isto resulta do fato de que o método proposto permite a realização de manobras em chaves adjacentes às barras mantidas em serviço. Assim, pode-se diminuir o carregamento dos alimentadores que contém tais barras e, conseqüente e posteriormente, conectar em tais alimentadores uma quantidade maior de consumidores saudáveis fora de serviço. Isto pode ser notado nas informações da sequência de chaveamento da segunda solução, por exemplo, do conjunto Pareto-ótimo 2 apresentadas nas Tabelas 19 e 20. Observe nesta sequência de chaveamento que as duas primeiras manobras são para isolar a barra 3, em falta; o par de manobras seguinte é para a transferência de consumidores saudáveis energizados de um alimentador para outro; o último par de manobras realiza a reconexão de barras saudáveis desligadas.

Por fim, é importante recordar que este resultado não significa que o método proposto é superior a abordagem proposta por (ROMERO et al., 2016). Isto porque, como dito, ambos formulam o problema de maneiras distintas.

Teste especializado 2

No teste especializado 2, o SD 57-bus foi modificado para que fosse considerada a existência de consumidores prioritários nas barras 25, 27, 31 e 33. Por ser uma das barras localizadas à jusante da barra 3 em falta, a barra 27 será uma das desligadas pela ocorrência da falta. Foi assumido o mesmo nível de prioridade de atendimento (baixo) para estes consumidores com a finalidade de reproduzir a mesma situação de contingência na qual foi obtida a solução de referência, dado que em (ROMERO et al., 2016) não é feita distinção de níveis de prioridade entre os consumidores prioritários. Os resultados

Tabela 19: Informações da sequência de chaveamento da segunda solução conjunto Pareto-ótimo 2 da Tabela 18 - Parte 1.

ABRIR	FECHAR	Barras Reconectadas	$\varepsilon_T(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\psi_T(G)$	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)
(3-101)	-	-	23481,2	2	7415,1
(3-4)	-				
(33-34)	(35-40)	-	25560,2	4	7415,1
(7-8)	(8-33)	26 27	20778,5	6	4227,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 20: Informações da sequência de chaveamento da segunda solução conjunto Pareto-ótimo 2 da Tabela 18 - Parte 2.

ABRIR	FECHAR	$X(g^e)$ (%)	$V(g^e)$ (%)	$B(g^e)$ (%)
(3-101)	-	0	0	13,4
(3-4)	-			
(33-34)	(35-40)	91,5	2,3	85,1
(7-8)	(8-33)	96,6	4,1	85,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

são sumarizados nas Tabelas 21 e 22. A primeira apresenta a solução de referência e os conjuntos Pareto-ótimo alcançados pelo método proposto, e a segunda detalha os valores de potência ativa não suprida (ou não restaurada) para os consumidores em cada nível de prioridade de atendimento.

Observando a solução de referência nota-se que este é um caso de falta para o qual não há solução com restauração completa. Isto significa que a escolha dos consumidores a serem deixados fora de serviço deverá considerar a prioridade de atendimento do consumidor da barra 27 e, ademais, a sua reconexão deverá ter maior prioridade que a reconexão dos demais consumidores.

Nota-se que duas das três soluções presentes no conjunto Pareto-ótimo 1 promovem a restauração do consumidor prioritário presente na barra 27. Mas, por outro lado, a última solução no conjunto Pareto-ótimo 1, que é também a única solução que forma o conjunto Pareto-ótimo 2, não restaura o fornecimento à barra 27. Isto ocorre simplesmente por uma limitação dos procedimentos adotados na formação do conjunto Pareto-ótimo e descritos na Seção 4.3.2.9, uma vez que na seleção por não-dominância para a formação dos conjuntos de Pareto não é avaliada a energia não suprida por nível de prioridade, mas sim a energia não suprida total.

Para mostrar que as duas primeiras soluções no conjunto Pareto-ótimo 1 priorizam a restauração da barra 27 em detrimento dos demais consumidores, as Tabelas 23 e 24 apresentam a sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo

Tabela 21: Resultados experimentais para o teste especializado 2.

Origem	Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocor- rência	$\varepsilon_T(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\psi_T(G)$	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)	Barras desligadas
Artigo de referência	-	-	n.d.	11	3118,5	5 6 26
Método proposto	1	33 de 35	20131,7	8	3257,1	4 5 7
			20778,5	6	4227,3	4 5 6 7 28
			21217,4	4	6444,9	4 5 7 8 27 26
	2	2 de 35	21217,4	4	6444,9	4 5 7 8 27 26

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 22: Valores de potência ativa não suprida por nível de prioridade de atendimento para as soluções obtidas pelo método proposto no teste especializado 2.

Id. Conjunto Pareto-ótimo	$PNS_A(G)$ ($kW_{1\phi}$)	$PNS_I(G)$ ($kW_{1\phi}$)	$PNS_B(G)$ ($kW_{1\phi}$)	$PNS_S(G)$ ($kW_{1\phi}$)	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)	Barras desligadas
1	0	0	0	3257,1	3257,1	4 5 7
	0	0	0	4227,3	4227,3	4 5 6 7 28
	0	0	1039,5	5405,4	6444,9	4 5 7 8 27 26
2	0	0	1039,5	5405,4	6444,9	4 5 7 8 27 26

Fonte: Elaborada pelo autor.

1. Ao acompanhar a atuação destas chaves na rede da Figura 22, é possível notar que as duas primeiras manobras (abertura de 3-101 e de 3-4) são para a isolamento da barra em falta; as duas manobras seguintes formam um par de manobras que realiza a transferência das barras saudáveis não afetadas 34, 35 e 36 de um alimentador para outro; o par de manobras posterior (abertura de 7-8 e fechamento de 8-33) promove a restauração da barra prioritária 27 e das barras 8 e 26; e, por fim, o último par de manobras (abertura de 5-6 e fechamento de 28-50) restaura a barra não prioritária 28. Uma vez que a barra 27 foi restaurada antes que qualquer outra barra desligada, pode-se afirmar que tal solução e a sua respectiva sequência de chaveamento priorizaram o atendimento do consumidor prioritário fora de serviço.

É importante notar também que a operação realizada pelo par de manobras executado antes da restauração da barra 27 consistiu em retirar cargas exatamente do alimentador que viria, na sequência, a atender as barras 27, 8 e 26 e transferi-las para outro alimentador próximo. Este tipo de operação é aquele descrito anteriormente como sendo para o alívio de alimentador.

Tabela 23: Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 21 - Parte 1.

ABRIR	FECHAR	Barras Reconectadas	$\varepsilon_B(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\varepsilon_S(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$PNS_B(G)$ ($kW_{1\phi}$)	$PNS_S(G)$ ($kW_{1\phi}$)
(3-101)	-	-	3291,8	20189,4	1039,5	6375,6
(3-4)	-					
(33-34)	(35-40)	-	3291,8	22268,4	1039,5	6375,6
(7-8)	(8-33)	8 26 27	1732,5	19046,0	0	4227,3
(5-6)	(28-50)	6 28	1732,5	18399,2	0	3257,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 24: Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 21 - Parte 2.

ABRIR	FECHAR	$\psi_T(G)$	$X(G)$ (%)	$V(G)$ (%)	$B(G)$ (%)
(3-101)	-	2	0	0	13,4
(3-4)	-				
(33-34)	(35-40)	4	91,5	2,3	85,1
(7-8)	(8-33)	6	96,6	4,1	85,1
(5-6)	(28-50)	8	96,6	4,1	90,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Teste especializado 3

Além dos consumidores prioritários considerados no teste especializado 2, o teste especializado 3 considerou também como sendo CCRs as seguintes chaves: 8-33; 35-40; 28-50; 10-38; 17-18; 33-34; 26-27; 8-27; 13-43; 44-45. As cinco primeiras são NAs e as demais NFs.

Na Tabela 25 são sumarizados os resultados gerais e nas Tabelas 26 e 27 é mostrada a sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 25. Os valores de potência ativa e de energia não suprida por nível de prioridade foram apresentados desta vez na Tabela 26. Na Tabela 27 é detalhado o número de manobras por tipo de chaves.

À exceção dos valores de manobras em chaves, as soluções que formam o conjunto Pareto-ótimo 1, obtido em todas as execuções, são as mesmas que constituem o conjunto Pareto-ótimo no caso especializado 2. Apesar disto, nota-se que o valor da energia não suprida total (na Tabela 25) e por nível de prioridade (na Tabela 26) neste caso especializado 3 são menores que no caso especializado 2. Isto ocorre porque metade das chaves que são operados em ambos os testes especializados deixaram de ser do tipo CCM e passaram a ser CCRs. E, como o tempo de manobra requerido por uma CCRs é muito menor que

Tabela 25: Resultados experimentais para o teste especializado 3.

Origem	Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocor- rência	$\varepsilon_T(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\psi_T(G)$	$PNS_T(G)$ ($kW_{1\phi}$)	Barras desligadas
Artigo de referência	-	-	n.d.	11	3118,5	5 6 26
Método proposto	1	35 de 35	14046,7	8	3257,1	4 5 7
			16256,6	6	4227,3	4 5 6 28 7
			20826,6	4	6444,9	4 5 7 8 27 26

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 26: Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 25 - Parte 1.

ABRIR	FECHAR	Barras Reconec- tadas	$\varepsilon_B(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$\varepsilon_S(G)$ ($kWh_{1\phi}$)	$PNS_B(G)$ ($kW_{1\phi}$)	$PNS_S(G)$ ($kW_{1\phi}$)
(3-101)	-	-	3291,8	20189,4	1039,5	6375,6
(3-4)	-					
(33-34)	(35-40)	-	3291,8	21598,5	1039,5	6375,6
(7-8)	(8-33)	7 26 27	476,4	15780,2	0	4227,3
(5-6)	(28-50)	6 28	476,4	13570,3	0	3257,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 27: Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 25 - Parte 1.

ABRIR	FECHAR	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$X(G)$ (%)	$V(G)$ (%)	$B(G)$ (%)
(3-101)	-	2	0	0	0	13,35
(3-4)	-					
(33-34)	(35-40)	2	2	91,49	2,31	85,05
(7-8)	(8-33)	3	3	96,64	4,05	85,05
(5-6)	(28-50)	4	4	96,6	4,1	90,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

o de uma CCMs, o tempo necessário para a execução das manobras tornou-se menor e, consequentemente, as cargas foram restauradas num intervalo de tempo menor. Assim, este caso de testes permite mostrar adicionalmente que o método proposto é capaz de diferenciar as CCRs e as CCMs.

5.3.3 Tempo de execução do método proposto por caso de teste

O método proposto foi executado 35 vezes em cada um dos seis casos apresentados. Na Figura 23 são sumarizados os valores de tempo de execução em cada caso de teste.

Na Tabela 28 são apresentados o tempo de execução apresentado por (ROMERO et al., 2016) para cada caso de teste. Note que o tempo de execução do método proposto, com execução do AEMO, ficou próximo de 3 segundos em todos os testes.

Figura 23: Tempo de execução do método proposto para cada caso de teste apresentado anteriormente, os quais consideram $G_MAX = 10.000$.

Fonte: o autor.

Tabela 28: Tempos de execução (em segundos) apresentados por (ROMERO et al., 2016) em caso de teste.

Teste geral 1	Teste geral 2	Teste geral 3	Teste espec. 1	Teste espec. 2	Teste espec. 3
38,6	8,1	27,8	0,7	8,4	5,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 Aplicação do método proposto em uma rede de distribuição de grande porte

Para avaliar a sua capacidade de lidar com SDs de grande porte, o método proposto foi aplicado ao tratamento de casos de falta no SD *LDR-Full*. Dentre os 3479 setores (ver Tabela 8) que este SD possui: em 469 deles a ocorrência de uma falta (simples) pode ser solucionada pela BELM (portanto, com restauração de todos os setores saudáveis desligados); em 127 o AEMO proposto precisa ser executado pois a BELM não é capaz de fornecer uma solução; nos demais setores, a ocorrência de uma falta não coloca nenhum setor saudável fora de serviço (isso ocorre em setores localizados no final dos alimentadores)

ou desliga setores saudáveis que não possuem nenhuma outra opção de restauração (em virtude da ausência de chaves NAs capazes de reconectá-los em outros pontos da rede).

Dentre os 127 setores nos quais a ocorrência de falta exige a execução do AEMO proposto: 103 possuem apenas 1 único agrupamento de setores saudáveis desligados restaurável à jusante; 19 possuem 2 agrupamentos de setores saudáveis restauráveis à jusante; e em 5 deles há 3 agrupamentos de setores possíveis de serem restaurados.

O método proposto foi aplicado a estes 5 casos de falta mais críticos e também aos 469 casos de falta solucionáveis pela BELM, considerando os valores apresentados na Tabela 29 para os dados de entrada. Como a BELM é determinística, uma única execução por caso de falta é suficiente. Para cada um dos 5 casos de falta mais críticos serão apresentados dados de 35 simulações computacionais. Os principais resultados e comentários a cerca destes casos serão apresentados, respectivamente, nas Seções 5.4.1 e 5.4.2 a seguir.

Tabela 29: Valores assumidos pelos dados de entrada nos testes experimentais no SD *LDR-Full*.

Parâmetro	δ	ΔB	ΔV	s	T	t_{CCR}
Valor	0,1 (10%)	0,5 (50%)	0,1 (10%)	1	4 h / Falta	50 seg. *
Parâmetro	t_{CCM}	$S_{P_{1,...,10}}$	$S_{P_{11,...,19}}$	$S_{P_{20}}$	$S_{P_{21,...,26}}$	G_MAX
Valor	25 min. *	5	20	40	5	45.000

* de acordo com (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012).

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4.1 Casos de falta solucionados pela BELM

Conforme dito no capítulo anterior, a BELM produz apenas indivíduos que restauram todos os agrupamentos de setores saudáveis restauráveis (ver Seção 4.3.2.6). Ademais, sempre que um ou mais indivíduos obtidos pela BELM atendem a todas as restrições do problema, o método proposto prossegue com a seleção de um indivíduo, dentre aqueles factíveis, e encerra-se após a informação deste indivíduo como a solução final para o problema (ver fluxograma na Figura 11). As Figuras 24 e 25 sumarizam, respectivamente, os valores de número de manobras em chaves e de energia não suprida das soluções informadas pelo método proposto nos 469 casos de falta solucionados pela BELM. Embora o ideal seja analisar do desempenho da BELM em cada caso, esta tarefa torna-se inviável devido a enorme quantidade de informações. Assim, as Figuras 24 e 25 permitem uma análise e conclusões mais generalistas.

Nos gráficos de caixa da Figura 24 o traço horizontal mais destacado é a mediana dos valores de número de manobras em CCRs e em CCMs. Com base nisto, observa-se que em pelo menos metade dos 469 casos de falta a solução fornecida continha ao menos

Figura 24: Número de manobras em chaves das soluções obtidas pelo método proposto nos casos de falta solucionados pela BELM no SD *LDR-Full*.

Fonte: o autor.

uma manobra em CCRs, o que é muito satisfatório dada a pequena quantidade percentual de CCRs no SD *LDR-Full*. Ao fornecer apenas soluções de restauração completa, a BELM executa somente manobras para isolamento de setores faltosos e de reconexão de setores são desligados. Em virtude disto, o número de manobras requerido pelas soluções que fornece é sempre o menor possível (para soluções de restauração completa). Assim sendo, não faz sentido analisar se as quantidades de manobras ilustrada pela Figura 25 são suficientemente baixos ou se poderiam ser menores. O principal ganho no uso da BELM é exatamente o de fornecer sempre soluções com o mínimo de manobras e restauração completa.

Uma vez que fornece soluções com o mínimo de manobras em chaves, os valores de energia não suprida das soluções obtidas pela BELM são também baixos, como pode ser observado na Figura 25. Concorre ainda para minimizar a energia não suprida, o fato de que a BELM, diferentemente da BEL (CAMILLO et al., 2016a), define uma sequência de chaveamento que restaura os agrupamentos de setores saudáveis em ordem decrescente do valor de potência ativa não suprida por nível de prioridade de atendimento.

A Figura 26 sumariza os valores de tempo de execução computacional do método proposto nos 469 casos solucionados pela BELM. Note que são extremamente baixos.

Adicionalmente, a Figura 27 sumariza o número de indivíduos, isto é, configurações, que foram gerados e avaliados pela BELM para a obtenção das soluções informadas. Ainda que tenha ocorrido um caso em que foram geradas até 50 configurações, o número de

Figura 25: Energia não suprida por nível de prioridade das soluções obtidas pelo método proposto nos casos de falta solucionados pela BELM no SD *LDR-Full*.

Fonte: o autor.

Figura 26: Tempo de execução computacional do método proposto para os casos de falta solucionados pela BELM no SD *LDR-Full*.

Fonte: o autor.

indivíduos gerados foi sempre muito pequeno, o que comprova, juntamente com a Figura 26, que a BELM é computacionalmente viável para casos de falta simples neste SD de grande porte. Os valores de tempo ilustrados na Figura 26 consequência deste comportamento da BELM.

Figura 27: Número de indivíduos gerados pelo método proposto nos casos de falta solucionados pela BELM no SD *LDR-Full*.

Fonte: o autor.

Em resumo, a execução da BELM mostrou-se capaz de solucionar inúmeros casos de falta com restauração completa e o mínimo de manobras em chaves num tempo computacional quase irrelevante, o que dificilmente seria realizado da mesma forma por algum AEMO. Apesar disto, a execução da BELM da maneira como proposta (em substituição ao AEMO nos casos possíveis) possui como consequência a impossibilidade de fornecimento de soluções com restauração parcial juntamente com soluções de restauração completa. Isto impossibilita que os operadores de SDs tenham acesso a uma opção de restauração que envolva ainda menos manobras sob o preço de deixar algumas cargas fora de serviço.

5.4.2 Casos de falta solucionados pelo AEMO proposto

O método proposto foi aplicado aos 5 casos de falta do SD *LDR-Full* que implicam no maior número (3) de agrupamentos de setores saudáveis desligados restauráveis e que não podem ser solucionado pela BELM. Logo, foi simulado a ocorrência de falta simples nos setores 749 (barra 409), 839 (barra 4481), 919 (barra 2703), 1587 (barra 3479) e 2532 (barra 1235). A Tabela 30 apresenta o número de barras desligadas e a potência

ativa não suprida por nível de prioridade para cada um destes casos de falta. Note que, a exceção do caso de falta no setor 919, em todas estas situações de contingência havia algum consumidor prioritário desligado. Os principais resultados de 35 simulações computacionais executadas por caso de falta serão apresentados a seguir.

Tabela 30: Potência ativa e número de barras saudáveis não supridas por nível de prioridade por caso de falta solucionado pelo AEMO proposto no SD *LDR-Full*.

		Setor em falta									
		749		839		919		1587		2532	
		$NBNS_P(G^1)^*$	$PNS_P(G^1)^{**}$	$NBNS_P(G^1)^*$	$PNS_P(G^1)^{**}$	$NBNS_P(G^1)^*$	$PNS_P(G^1)^{**}$	$NBNS_P(G^1)^*$	$PNS_P(G^1)^{**}$	$NBNS_P(G^1)^*$	$PNS_P(G^1)^{**}$
Nível de prioridade	A	1	62,3	0	0,0	0	0,0	1	38,2	2	69,8
	I	2	50,4	0	0,0	0	0,0	1	60,0	5	228,0
	B	0	0,0	1	56,8	0	0,0	2	146,8	1	31,3
	S	515	2008,5	312	4856,8	277	2482,1	275	3000,7	689	5386,0

* $NBNS_P(G^1)$ - número de barras saudáveis não supridas após a isolação do setor em falta; ** $PNS_P(G^1)$ - somatório de potência ativa não supridas aos consumidores saudáveis desligadas após a isolação do setor em falta, em $kW_{1\phi}$; $P = A, I, B, S$; A - Alta; I - Intermediária; B - Baixa; S - Sem prioridade.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Caso de falta no setor 2532 do *LDR-Full*

A Tabela 31 apresenta as características do conjunto Pareto-ótimo obtido nas 35 simulações para uma falta no setor 2532. Note que as soluções presentes neste conjunto permitem desde uma restauração completa até a restauração de apenas 1 dos 3 agrupamentos de setores desligados. Note também que operações em CCRs são requisitadas por todas as soluções e que os valores de $X(G^e)$, $V(G^e)$ e $B(G^e)$ são diretamente proporcionais a quantidade de cargas restauradas.

Para verificar a performance do método proposto em fornecer sequências de chaveamento que priorizem a restauração dos consumidores segundo seu grau de prioridade, considere a Tabela 32. Ela apresenta as informações da sequência de chaveamento associada a primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 31, que restaura todos os consumidores ($PNS_T(G) = 0$).

Observa-se na Tabela 32 que foram necessárias 4 manobras para isolar o setor 2532 em falta, sendo uma para a sua isolação à montante e três para a sua isolação dos três agrupamentos localizados à jusante ⁴. Posteriormente, a primeira manobra foi para a

⁴ Como explicado anteriormente, o fato dos valores de $X(g^e)$ e $V(g^e)$ estarem baixos deve-se à

Tabela 31: Conjunto Pareto-ótimo obtido para o caso de falta no setor 2532 do SD *LDR-Full*.

Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocorrência	$\varepsilon_A(G)^*$	$\varepsilon_I(G)^*$	$\varepsilon_B(G)^*$	$\varepsilon_S(G)^*$	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$PNS_T(G)^{**}$	$X(G^e)$ (%)	$V(G^e)$ (%)	$B(G^e)$ (%)
1	35 de 35	33,9	223,0	296,5	6781,5	6	3	0,0	97,5	8,1	83,1
		33,9	316,1	296,5	7067,2	5	3	259,8	97,5	8,1	82,4
		54,2	532,6	85,6	9580,1	4	3	3368,9	77,3	5,8	82,4
		54,2	623,9	85,6	14200,8	4	1	5425,1	70,5	2,7	82,4

* em $kWh_{1\phi}$; ** em $kW_{1\phi}$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

reconexão de consumidores desligados, o que pode ser notado pelo decremento nos valores de $PNS_A(g)$ e $PNS_S(g)$. O fato de $PNS_A(g)$ ter diminuído de 69,8kW para pouco mais de 10 kW significa que esta primeira manobra priorizou pela restauração do maior dentre os dois consumidores com prioridade elevada. Esta manobra resultou, adicionalmente, na restauração de alguns consumidores sem prioridade presentes no mesmo agrupamento de setores.

Na sequência foi realizado um par de manobras para transferência de cargas entre alimentadores, e posteriormente duas novas manobras de restauração. A primeira resultou na reconexão de consumidores de todos os níveis de prioridade, em especial numa grande porção de consumidores com prioridade intermediária. A última manobras resultou na reconexão de todos os demais dos consumidores que ainda estavam fora de serviço. Observe que em todas as configurações intermediárias os valores $X(g^e)$, $V(g^e)$ e $B(g^e)$ não excedem os limites operacionais relaxados. Um suma, a sequência de chaveamento apresentada mostra que todos os agrupamentos de setores saudáveis restauráveis foram reconectados à rede numa sequência tal que priorizou os consumidores com maior prioridade de atendimento e sem violação dos limites operacionais.

Caso de falta no setor 919 do *LDR-Full*

Para o caso de uma falta no setor 919 não há consumidores prioritários desligados. Um único conjunto Pareto-ótimo com duas soluções de restauração parcial foi obtido em todas as simulações são apresentadas na Tabela 33. A primeira solução restaura mais de 90% da potência não suprida total com duas manobras de reconexão, enquanto que a segunda realiza uma manobra de restauração e restabelece mais de 55% das cargas

heurística que restringe operações em chaves e o cálculo de $X(g^e)$ e $V(g^e)$ ao um conjunto variável de alimentadores (ver Seção 4.3.2.3).

Tabela 32: Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 31 para o caso de falta no setor 2532 do SD *LDR-Full*.

ABRIR	FECHAR	Finalidade	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$X(g^e)$ (%)	$V(g^e)$ (%)	$B(g^e)$ (%)
501	-	I	3	1	5,3	0,1	81,6
618	-						
617	-						
488	-						
-	75	R	4	1	70,5	2,7	82,4
3190	3826	T	5	2	73,3	8,1	82,4
-	3706	R	5	3	97,5	8,1	82,4
-	3811	R	6	3	97,5	8,1	83,1

ABRIR	FECHAR	Finalidade	$\varepsilon_A(g)^*$	$\varepsilon_I(g)^*$	$\varepsilon_B(g)^*$	$\varepsilon_S(g)^*$	$PNS_A(g)^{**}$	$PNS_I(g)^{**}$	$PNS_B(g)^{**}$	$PNS_S(g)^{**}$
501	-	I	190,9	623,9	85,6	14736,7	69,8	228,0	31,3	5386,0
618	-									
617	-									
488	-									
-	75	R	54,2	623,9	85,6	14200,8	10,8	228,0	31,3	5155,0
3190	3826	T	54,2	623,9	355,1	16365,5	10,8	228,0	31,3	5155,0
-	3706	R	33,9	316,1	296,5	7067,2	0,0	63,9	0,0	195,9
-	3811	R	33,9	223,0	296,5	6781,5	0,0	0,0	0,0	0,0

I - Isolação do setor em falta; T - Transferência de carga entre alimentadores;
R - Reconexão de consumidores saudáveis desligados; * em $kWh_{1\phi}$; ** em $kW_{1\phi}$.
Fonte: Elaborada pelo autor.

desligadas.

Tabela 33: Conjunto Pareto-ótimo obtido para o caso de falta no setor 919 do SD *LDR-Full*.

Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocorrência	$\varepsilon_A(G)^*$	$\varepsilon_I(G)^*$	$\varepsilon_B(G)^*$	$\varepsilon_S(G)^*$	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$PNS_T(G)^{**}$	$X(G^e)$ (%)	$V(G^e)$ (%)	$B(G^e)$ (%)
1	35 de 35	0,0	0,0	0,0	616,0	3	3	209,2	62,0	4,2	96,5
		0,0	0,0	0,0	2966,3	3	2	1077,0	55,7	4,2	96,5

* em $kWh_{1\phi}$; ** em $kW_{1\phi}$.
Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma análise dos indivíduos salvos nas tabelas de subpopulação ao término do processo evolutivo permitiu observar que para este caso de falta, indivíduos com restauração completa chegaram a ser obtidos. Mas a grande maioria deles era inactível e os poucos factíveis exigiam um número elevado de manobras em chaves. Isto fez com que fossem elevados também seus valores de energia não suprida, fazendo com que tornassem-se dominados pelas soluções apresentadas na Tabela 33.

A Tabela 34 ilustra as características da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 33. Observe que as duas manobras para restauração de cargas ocorreram em CCRs e que, ao restaurar estas cargas, a energia não suprida total durante as 4 horas estimadas necessárias para correção do elemento causador da falta passou para apenas 616 kWh.

Tabela 34: Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 33 para o caso de falta no setor 919 do SD *LDR-Full*.

ABRIR	FECHAR	Finalidade	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$X(g^e)$ (%)	$V(g^e)$ (%)	$B(g^e)$ (%)
2628	-	I	3	1	20,5	0,9	47,4
1352	-						
2770	-						
1351	-						
-	864	R	3	2	55,7	4,2	96,5
-	1790	R	3	3	62,0	4,2	96,5

ABRIR	FECHAR	Finalidade	$\varepsilon_A(g)^*$	$\varepsilon_I(g)^*$	$\varepsilon_B(g)^*$	$\varepsilon_S(g)^*$	$PNS_A(g)^{**}$	$PNS_I(g)^{**}$	$PNS_B(g)^{**}$	$PNS_S(g)^{**}$
2628	-	I	0,0	0,0	0,0	6791,4	0,0	0,0	0,0	2482,1
1352	-									
2770	-									
1351	-									
-	864	R	0,0	0,0	0,0	2966,3	0,0	0,0	0,0	1077,0
-	1790	R	0,0	0,0	0,0	616,0	0,0	0,0	0,0	209,2

I - Isolação do setor em falta; T - Transferência de carga entre alimentadores;
R - Reconexão de consumidores saudáveis desligados; * em $kWh_{1\phi}$; ** em $kW_{1\phi}$.
Fonte: Elaborada pelo autor.

Caso de falta no setor 839 do *LDR-Full*

Para o caso de falta no setor 839, a Tabela 35 ilustra os conjuntos Pareto-ótimo obtidos. A sequência de chaveamento da única solução que forma o conjunto Pareto-ótimo

1 é apresentada pela Tabela 36 a título de exemplo.

Tabela 35: Conjuntos Pareto-ótimo obtido para o caso de falta no setor 839 do SD *LDR-Full*.

Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocorrência	$\varepsilon_A(G)^*$	$\varepsilon_I(G)^*$	$\varepsilon_B(G)^*$	$\varepsilon_S(G)^*$	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$PNST(G)^{**}$	$X(G^e)$ (%)	$V(G^e)$ (%)	$B(G^e)$ (%)
1	15 de 35	0,0	0,0	23,7	3555,1	5	0	799,0	64,4	3,0	65,6
2	8 de 35	0,0	0,0	0,8	1920,8	4	1	799,0	92,7	7,4	65,6
3	4 de 35	141,1	6,0	85,0	8982,3	6	1	799,0	92,7	7,4	99,6
		141,1	6,0	169,3	15012,6	6	0	4913,5	89,7	7,4	99,6
4	2 de 35	198,4	97,8	52,6	6706,8	10	1	0,0	95,6	7,8	100,0
		0,0	124,0	31,4	8987,0	8	1	0,0	87,7	4,4	99,6
		141,1	6,0	85,0	8982,3	6	1	799,0	92,7	7,4	99,6
		141,1	6,0	169,3	15012,6	6	0	4913,5	69,3	5,9	99,6
5	2 de 35	0,0	141,1	32,5	9876,4	9	0	0,0	87,7	4,0	99,6
		141,1	6,0	107,8	10616,7	7	0	799,0	69,3	5,9	99,6
		141,1	6,0	169,3	15012,6	6	0	4913,5	69,3	5,9	99,6
6	1 de 35	170,2	7,2	45,3	5633,6	7	1	416,5	92,7	7,4	99,6
		141,1	6,0	107,8	10616,7	7	0	799,0	92,7	5,6	99,6
		141,1	6,0	169,3	15012,6	6	0	4913,5	69,3	6,6	99,6

* em $kWh_{1\phi}$; ** em $kW_{1\phi}$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com a Tabela 35 foram obtidos um total de 6 conjuntos Pareto-ótimo diferentes nas 35 simulações. Observe que apenas os conjuntos 4 e 5 apresentaram soluções de restauração completa. Todavia, nas três soluções de restauração completa obtidas os valores de carregamento de transformador ($B(G^e)$) estiveram extremamente próximos ou igual ao valor limite para operação sem sobrecarga. Isto significa que as soluções de restauração completa para este caso de falta estão localizadas muito próximo a região do espaço de busca que separa as soluções factíveis e infactíveis em termos de carregamento de transformador, o que faz com seja mais difícil atingir tais soluções. Não obstante, em 5 das 35 simulações ao menos uma esteve presente no conjunto Pareto-ótimo; nas soluções que formam os conjuntos 1 e 2, que foram as fornecidas com maior frequência, apenas 799 kW permaneceu fora de serviço de um total de 4856,8 kW inicialmente desligados. Todos os consumidores prioritários foram restaurados por ambas soluções.

Na Tabela 35 é possível notar ainda que as soluções que formam os conjuntos 1 e 2 restauram os mesmos setores, mas a solução no conjunto Pareto-ótimo 2 o faz usando uma CCR no lugar de uma CCM, tornando-a melhor que a solução do conjunto Pareto-ótimo 1. Apesar disto, o conjunto 1 foi obtido com uma frequência maior que o conjunto 2.

Tabela 36: Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 35 para o caso de falta no setor 839 do SD *LDR-Full*.

ABRIR	FECHAR	Finalidade	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$X(g^e)$ (%)	$V(g^e)$ (%)	$B(g^e)$ (%)
2299	-	I	4	0	0,0	0,0	48,2
2241	-						
2304	-						
1042	-						
-	3431	R	5	0	64,4	3,0	65,6

ABRIR	FECHAR	Finalidade	$\varepsilon_A(g)^*$	$\varepsilon_I(g)^*$	$\varepsilon_B(g)^*$	$\varepsilon_S(g)^*$	$PN_{S_A}(g)^{**}$	$PN_{S_I}(g)^{**}$	$PN_{S_B}(g)^{**}$	$PN_{S_S}(g)^{**}$
2299	-	I	0,0	0,0	132,5	11332,5	0,0	0,0	56,8	4856,8
2241	-									
2304	-									
1042	-									
-	3431	R	0,0	0,0	23,7	3555,1	0,0	0,0	0,0	799,0

I - Isolação do setor em falta; T - Transferência de carga entre alimentadores;
R - Reconexão de consumidores saudáveis desligados; * em $kWh_{1\phi}$; ** em $kW_{1\phi}$.
Fonte: Elaborada pelo autor.

Isto é devido ao fato de que, na seleção das soluções não-dominadas (como descrito na Seção 4.3.2.9), são analisados valores de número total de manobras e número total de energia não suprida. Desta maneira, para privilegiar soluções que priorizam manobras em CCRs, o procedimento de definição do conjunto Pareto-ótimo, executado após o término do processo evolutivo do AEMO proposto, pode ser melhorado.

Outra melhoria que pode ser realizada no método proposto está na sequência de chaveamento e na contagem do número de manobras em chaves. Note na Tabela 36 que, embora um único agrupamento de setores tenha sido restaurado, a sequência exigiu a isolamento também dos agrupamentos de setores que permaneceram desligados, o que é desnecessário na prática.

Apesar disto, a sequência de chaveamento da Tabela 36 permite observar que, mesmo restaurando apenas um dos três agrupamentos de setores desligados, a única manobra de restauração realizada foi para o restabelecimento do único consumidor prioritário (com prioridade baixa) desligado. Note ainda que, apesar de terem sido executadas duas manobras desnecessárias, e consequentemente, o consumidor prioritário ter ficado um tempo adicional desligados, a sua energia total não suprida durante o período em que

esteve fora de serviço foi de apenas 23,7 kWh.

Caso de falta no setor 1587 do *LDR-Full*

Para o caso de falta no setor 1587 foram obtidos três conjuntos Pareto-ótimo distintos, mas que possuem algumas soluções em comum, conforme pode ser visto na Tabela 37. Observa-se que todas as soluções obtidas são de restauração parcial e a solução obtida com maior frequência é a primeira do conjunto Pareto-ótimo 1, que esteve também no conjunto Pareto-ótimo 3. A sequência de chaveamento desta solução é apresentada na Tabela 38.

Tabela 37: Conjuntos Pareto-ótimo obtido para o caso de falta no setor 1587 do SD *LDR-Full*.

Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocorrência	$\varepsilon_A(G)^*$	$\varepsilon_I(G)^*$	$\varepsilon_B(G)^*$	$\varepsilon_S(G)^*$	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$PNS_T(G)^{**}$	$X(G^e)$ (%)	$V(G^e)$ (%)	$B(G^e)$ (%)
1	28 de 35	32,4	75,8	342,6	4431,4	7	1	400,5	98,1	5,2	99,5
		32,4	139,9	342,6	7020,3	6	1	2881,3	98,1	5,2	86,6
		89,1	139,9	342,6	7505,0	6	0	3245,7	98,1	5,2	84,7
2	4 de 35	0,5	25,8	342,6	1638,8	5	1	400,5	71,9	3,5	99,5
		0,5	139,9	342,6	6245,1	4	1	2881,3	50,4	1,5	86,6
3	3 de 35	0,5	75,8	342,6	4162,9	7	1	400,5	98,1	5,2	99,5
		0,5	139,9	342,6	6245,1	4	1	2881,3	50,4	1,5	86,6

* em $kWh_{1\phi}$; ** em $kW_{1\phi}$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observe na Tabela 38 que esta solução previu a realização de um par de manobras para a transferência de cargas entre alimentadores e, posteriormente, duas manobras para reconexão de consumidores saudáveis desligados. É importante notar também, por meio dos valores de $PNS_A(g)$ e $PNS_I(g)$, que a sequência destas duas manobras de restauração possibilitou restaurar o consumidor com prioridade alta antes do consumidor com prioridade intermediária. Observe também que os consumidores que permaneceram desligados possuíam prioridade baixa ou eram sem prioridade. Em outras palavras, a solução fornecida com maior frequência pelo método proposto possui uma sequência de chaveamento adequada capaz de priorizar o atendimento dos consumidores segundo o grau de prioridade dos mesmos.

Caso de falta no setor 749 do *LDR-Full*

Para o caso de falta no setor 749 o método proposto obteve, mais uma vez, o mesmo conjunto Pareto-ótimo em todas as 35 simulações, o qual é formado por uma

Tabela 38: Informações da sequência de chaveamento da primeira solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 37 para o caso de falta no setor 1587 do SD *LDR-Full*.

ABRIR	FECHAR	Finalidade	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$X(g^e)$ (%)	$V(g^e)$ (%)	$B(g^e)$ (%)
1743	-	I	4	0	0,0	0,0	84,7
1740	-						
1745	-						
1744	-						
2225	3848	T	6	0	98,1	5,2	84,7
-	3586	R	6	1	98,1	5,2	86,6
-	2613	R	7	1	98,1	5,2	99,5

ABRIR	FECHAR	Finalidade	$\varepsilon_A(g)^*$	$\varepsilon_I(g)^*$	$\varepsilon_B(g)^*$	$\varepsilon_S(g)^*$	$PN S_A(g)^{**}$	$PN S_I(g)^{**}$	$PN S_B(g)^{**}$	$PN S_S(g)^{**}$
1743	-	I	89,1	139,9	342,6	7001,6	38,2	60,0	146,8	3000,7
1740	-									
1745	-									
1744	-									
2225	3848	T	89,1	139,9	342,6	7505,0	38,2	60,0	146,8	3000,7
-	3586	R	32,4	139,9	342,6	7020,3	0,0	60,0	146,8	2674,5
-	2613	R	32,4	75,8	342,6	4431,4	0,0	0,0	146,8	253,7

I - Isolação do setor em falta; T - Transferência de carga entre alimentadores;
R - Reconexão de consumidores saudáveis desligados; * em $kWh_{1\phi}$; ** em $kW_{1\phi}$.
Fonte: Elaborada pelo autor.

solução, como mostra a Tabela 39. Nesta caso de falta foram desligados 1 barra com consumidor prioridade alta, 2 barras com consumidor prioridade intermediária e 515 barras com consumidores sem prioridade e a solução fornecida foi capaz de restaurar todos eles. Note que, assim como no caso de falta no setor 839, a solução de restauração completa possui valores de $X(G^e)$ e $B(G^e)$ muito próximos do valor limite aceitável para operação permanente. Observe ainda que, apesar de não ter havido nenhum consumidor com prioridade baixa desligado, o valor de $\varepsilon_B(G)$ não foi nulo, uma vez que houve uma manobra para transferência de carga envolvendo consumidores com prioridade baixa.

Na Tabela 40 são apresentas as informações da sequência de chaveamento da solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 39. Este sequência é didaticamente interessante porque ilustra um comportamento previsto e aceito pelo enunciado formal do problema representado pelas Equações 4.57 – 4.72: a possibilidade de permitir violações temporárias em carregamento de transformador e queda de tensão em configurações intermediárias

Tabela 39: Conjunto Pareto-ótimo obtido para o caso de falta no setor 749 do SD *LDR-Full*.

Id. Conjunto Pareto-ótimo	Ocorrência	$\varepsilon_A(G)^*$	$\varepsilon_I(G)^*$	$\varepsilon_B(G)^*$	$\varepsilon_S(G)^*$	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$PNST(G)^{**}$	$X(G^e)$ (%)	$V(G^e)$ (%)	$B(G^e)$ (%)
1	35 de 35	148,76	0,7	368,95	7698	5	4	0,0	97,6	7,7	99,4

* em $kWh_{1\phi}$; ** em $kW_{1\phi}$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

a fim de permitir restaurar mais rapidamente consumidores desligados (restrições 4.61 e 4.62, respectivamente).

Observe na Tabela 40 que, após as quatro manobras para isolamento do setor em falta, três operações em chaves foram realizadas para restaurar os três agrupamentos de setores saudáveis desligados. Todavia, desde a primeira manobra de restauração a rede passou a operar com uma violação de aproximadamente 8% em carregamento de transformador, aceitável segundo a restrição 4.61 e segundo o valor de ΔB definido para este teste (ver Tabela 29). Todavia, como este valor de carregamento não é aceitável para uma operação por um tempo maior (conforme a restrição 4.68), um par de manobras foi realizado para extinguir esta pequena sobrecarga. Observe que, embora esta pequena sobrecarga tenha ocorrido em virtude da primeira operação de restauração, ela foi extinguida somente após todos os demais setores saudáveis desligados terem sido restaurados, concorrendo para minimizar a energia não suprida. Ademais, os consumidores saudáveis desligados foram restaurados numa sequência que priorizou o atendimento dos consumidores com maior prioridade.

Tempo de execução

Para complementar esta análise da performance do método proposto em um SD de grande porte, a Figura 28 sumariza os valores de tempo de execução computacional obtidos nas simulações. Considerando as dimensões do SD e também a complexidade dos casos de falta simulados, os valores apresentados nesta tabela podem ser considerados adequados às necessidades do problema.

Na Figura 29 são sumarizados os números de indivíduos gerados nos cinco casos de teste apresentados. Conforme esperado, observa-se que o tempo de execução computacional é proporcional ao número de indivíduos gerados e avaliados.

Tabela 40: Informações da sequência de chaveamento da solução do conjunto Pareto-ótimo 1 da Tabela 39 para o caso de falta no setor 749 do SD *LDR-Full*.

ABRIR	FECHAR	Finalidade	$\psi_M(G)$	$\psi_R(G)$	$X(g^e)$ (%)	$V(g^e)$ (%)	$B(g^e)$ (%)
748	-	I	3	1	40,0	2,5	56,0
205	-						
2886	-						
1602	-						
-	2972	R	3	2	83,2	5,4	108,6
-	1618	R	4	2	83,2	5,4	108,6
-	2971	R	5	2	83,2	5,4	109,1
32	1870	T	5	4	97,6	7,7	99,4

ABRIR	FECHAR	Finalidade	$\varepsilon_A(g)^*$	$\varepsilon_I(g)^*$	$\varepsilon_B(g)^*$	$\varepsilon_S(g)^*$	$PN S_A(g)^{**}$	$PN S_I(g)^{**}$	$PN S_B(g)^{**}$	$PN S_S(g)^{**}$
748	-	I	170,5	137,9	0,0	5495,4	62,3	50,4	0,0	2008,5
205	-									
2886	-									
1602	-									
-	2972	R	0,9	0,7	0,0	1481,7	0,0	0,0	0,0	534,0
-	1618	R	0,9	0,7	0,0	712,4	0,0	0,0	0,0	200,4
-	2971	R	0,9	0,7	0,0	333,9	0,0	0,0	0,0	0,0
32	1870	T	148,8	0,7	369,0	7698,0	0,0	0,0	0,0	0,0

I - Isolação do setor em falta; T - Transferência de carga entre alimentadores;
R - Reconexão de consumidores saudáveis desligados; * em $kWh_{1\phi}$; ** em $kW_{1\phi}$.
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.5 Estudos para avaliação de desempenho computacional do método proposto

Uma ferramenta adequada para o tratamento do problema de restabelecimento deve ser capaz também de fornecer soluções num curto intervalo de tempo. Desta forma, serão apresentados nesta seção dois estudos que visam compreender melhor dois dos fatores que podem influenciar no tempo de execução do método proposto: a dimensão da rede e o valor do parâmetro de entrada G_MAX , que diz respeito ao número máximo de gerações a ser executado pelo AEMO proposto.

5.5.1 Estudo da variação do tempo de execução com a dimensão da rede

Dentre os fatores que podem influenciar no tempo de execução computacional de uma ferramenta para solução deste problema está a dimensão e o nível de conectividade

Figura 28: Tempo de execução computacional do método proposto para os casos de falta solucionados pelo AEMO proposto no SD *LDR-Full*.

Fonte: o autor.

da rede, uma vez que a complexidade do problema tende a aumentar com o aumento do número de chaves e de barras da rede. O número de chaves exerce influência no número de configurações, isto é, soluções, possíveis para a rede e, portanto, na complexidade do processo de busca por soluções. O número de barras exerce influência na dimensão das equações do fluxo de carga, que modelam o comportamento elétrico da rede, e, portanto, no esforço computacional necessário para a solução de tais equações.

A fim de determinar a influência da dimensão da rede no tempo de execução do método proposto uma série de simulações foram realizadas nos quatros SDs descritos na Tabela 8. Neste teste foram considerados 10 casos de falta simples, por SD, que exigem a execução do AEMO proposto (i.e., que não podem ser solucionados pela BELM). A única exceção é o SD *SCL-City* para o qual foram simulados dois casos de faltas simples, uma vez que, de todos os casos de faltas simples possíveis nesta rede, apenas estes dois exigem a execução do AEMO proposto. Isto decorre do fato de que muitos casos de falta são solucionados pela BELM e de que para outros não há solução possível, em virtude da ausência de chaves NAs disponíveis para restauração de setores desligados. O pequeno número de chaves NAs nesta rede pode ser consequência do fato de estes dados representarem sua operação em 1994, época em que o controle sobre indicadores de qualidade não era tão rígido.

Para cada caso de falta foram realizadas 35 simulações computacionais, o que

Figura 29: Número de indivíduos gerados pelo método proposto nos casos de falta solucionados pelo AEMO proposto no SD *LDR-Full*.

Fonte: o autor.

resulta em 70 valores de tempo de execução no SD *SCL-City* e em 350 valores de tempo para cada um dos demais SDs. Tais valores foram agrupados e são sumarizados pela Figura 30. Os valores assumidos pelos parâmetros de entrada nestes testes são mostrado pela Tabela 41, com destaque para o número máximo de gerações executadas: 45.000.

Tabela 41: Valores dos dados de entrada para o estudo da influência da dimensão da rede no tempo de execução do método proposto.

Parâmetro	δ	ΔB	ΔV	s	T	t_{CCR}
Valor	0,1 (10%)	0,5 (50%)	0,1 (10%)	1	4 h / Falta	50 seg. *
Parâmetro	t_{CCM}	$S_{P_{1,...,10}}$	$S_{P_{11,...,19}}$	$S_{P_{20}}$	$S_{P_{21,...,26}}$	G_MAX
Valor	25 min. *	5	20	40	5	45.000

* de acordo com (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012).

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com o gráfico da Figura 30, o tempo de execução computacional do método proposto aumenta com o aumento na dimensão da rede, como esperado. Contudo, nota-se que tal aumento não ocorre na mesma proporção do aumento da dimensão da rede. Por exemplo, se a dimensão da rede for medida em termos de número de barras, o SD *SCL-City* é aproximadamente 72 vezes maior que o SD *53-bus*. Caso a dimensão da rede seja medida em termos de número de chaves, então o SD *SCL-City* é aproximadamente

Figura 30: Tempos de execução *vs* dimensão da rede.

Fonte: o autor.

20 vezes maior que o SD *53-bus*. Apesar disto, observa-se que o tempo de execução computacional para o SD *SCL-City* é apenas pouco mais de 2 vezes maior que o do SD *53-bus*. O mesmo em relação ao demais SDs. Por exemplo, embora o SD *LDR-Full* seja ligeiramente maior que o SD *LDR-City*, o tempo de execução em ambos foi relativamente próximo. Este gráfico permite observar ainda que a dimensão da rede exerce influência também na dispersão dos valores de tempo, de tal forma que quanto maior a dimensão da rede, maior a dispersão dos valores de tempo.

Por fim, é importante destacar também que o valor absoluto do tempo de execução é satisfatório mesmo para os SDs de grande porte. Por exemplo, no caso do SD *LDR-Full*, o maior dentre estes, a mediana dos valores de tempo foi de aproximadamente 100 segundos, o que é aceitável dada a dimensão desta rede (3.893 chaves e 40.606 barras). A adequação do método proposto quanto ao tempo de execução é decorrente principalmente da sua eficiência computacional na representação da rede por meio da RNP, no cálculo do fluxo de carga, na geração de novos indivíduos e no cálculo do número de manobras em chaves. Os valores de tempo de execução para os casos de falta solucionados pela BELM para o SD *LDR-Full* foram apresentados na Figura 26.

5.5.2 Estudo de convergência e da variação do tempo de execução com o número máximo de gerações

Este estudo foi realizado para determinar como é a variação da qualidade do conjunto Pareto-ótimo ao longo do processo iterativo do AEMO proposto. A partir dele será possível, por exemplo, compreender seu processo de convergência em relação a qualidade do conjunto de Pareto-ótimo e observar também o comportamento do tempo

de execução do método proposto com o valor do número máximo de gerações (G_MAX , como já foi definido).

Para este fim, foram simulados 27 casos de falta simples no SD *LDR-Full* escolhidos aleatoriamente dentre os casos de falta que exigem a execução do AEMO. Destes 27, foram selecionados, para a geração dos resultados apresentados a seguir, os 7 casos de falta que exigiram maior número de gerações para a sua convergência. A Tabela 42 informa os valores assumidos pelos dados de entrada.

Tabela 42: Valores dos dados de entrada para o estudo de convergência e da variação do tempo de execução com o número máximo de gerações.

Parâmetro	δ	ΔB	ΔV	s	T	t_{CCR}
Valor	0,1 (10%)	0,5 (50%)	0,1 (10%)	1	4 h / Falta	50 seg. *

Parâmetro	t_{CCM}	$S_{P_{1,...,10}}$	$S_{P_{11,...,19}}$	$S_{P_{20}}$	$S_{P_{21,...,26}}$	G_MAX
Valor	25 min. *	5	20	40	5	101.000

* de acordo com (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012).

Fonte: Elaborada pelo autor.

35 simulações foram realizadas para cada caso de falta. Em cada simulação, a cada 3.000 gerações do processo evolutivo, foi formado e fornecido um conjunto Pareto-ótimo pelo procedimento descrito no Passo 14 na Seção 4.3.1. Em seguida, cada conjunto Pareto-ótimo foi avaliado pelo indicador R2 (HANSEN; JASZKIEWICZ, 1998), que mensura a qualidade da fronteira de Pareto formada pelas soluções presentes em um conjunto Pareto-ótimo. Portanto, em cada caso de falta 35 valores de indicador R2 foram obtidos para cada adicional de 3.000 gerações. O gráfico da Figura 31 sumariza os valores de R2 para cada adicional de 3.000 gerações para o caso de falta no setor 1957.

Sabendo que quanto menor o valor de R2 tanto melhor, nota-se que a qualidade dos conjuntos Pareto-ótimo sofre grandes incrementos de melhoria até 21.000^a geração. A partir dela a qualidade continua sendo incrementada, mas a uma taxa menor. Até que após 57.000 gerações pouco incremento ocorre. Isto sugere que após a geração de número 57.000 o método proposto alcança a sua convergência em relação a qualidade dos conjuntos Pareto-ótimo, dado que praticamente nenhuma melhoria é observada. Todavia, deve-se considerar que esta convergência é distinta para cada caso de falta. Por exemplo, observa-se na Figura 32 que, para o caso de falta no setor 2529, a qualidade dos conjuntos Pareto-ótimo sofre incrementos muitíssimo pequenos após 15.000 gerações.

A fim de permitir uma conclusão mais geral, optou-se por usar o programa computacional estatístico utilizado em (MARQUES et al., 2017), que permite a comparação entre AEMOs por meio da avaliação e comparação de conjuntos Pareto-ótimo. Para tal, considerou-se os conjuntos Pareto-ótimo obtidos na geração 3.000 como tendo sido obtidos por um AEMO hipotético 3; os conjuntos Pareto-ótimo obtidos na geração 6.000 como

tendo sido obtidos por um AEMO hipotético 6; os conjuntos Pareto-ótimo obtidos na geração 9.000 como tendo sido obtidos por um AEMO hipotético 9; e assim por diante, totalizando 34 AEMOs.

Ao parametrizar tal programa estatístico optou-se por continuar utilizando o indicador R2 para a avaliação de conjuntos Pareto-ótimo. O referido programa estatístico aplica (i) o teste de hipótese *t de Welch* para a comparação dos valores destes indicadores; (ii) o método de Benjamini-Hochberg para o ajuste do p-valor e controle de falsos positivos; (iii) a seguinte hipótese nula (H_0) - as distribuições dos valores de dois conjunto são iguais, e a seguinte hipótese alternativa (H_1) - as distribuições dos valores de dois conjunto são diferentes. Optou-se por um nível de confiança igual a 0,05.

Dadas 7 situações de contingência e um indicador de qualidade (R2), 7 comparações são realizadas entre os 34 AEMOs hipotéticos (uma para cada caso de falta). Em cada comparação o referido programa estatístico monta um ranqueamento entre os AEMOs com base nos resultados do teste de hipótese. Por exemplo, na Tabela 43 pode-se ver o ranqueamento entre os AEMOs hipotéticos para o caso de falta no setor 2336. Note que quanto maior o identificador do AEMO, melhor é a sua posição no ranqueamento, o que significa que quanto maior o número gerações decorridas até a obtenção do conjunto Pareto-ótimo melhor é a sua qualidade, conforme observado anteriormente também nas Figuras 31 e 32.

Figura 31: Valores do indicador R2 para os conjuntos Pareto-ótimo obtidos a cada 3.000 gerações para o caso de falta no setor 1957.

Fonte: o autor.

Figura 32: Valores do indicador R2 para os conjuntos Pareto-ótimo obtidos para o caso de falta no setor 2529.

Fonte: o autor.

Tabela 43: Ranqueamento entre os AEMOs hipotéticos para o caso de falta no setor 2336.

AEMO	3	6	9	12	15	18
Posição	12 ^o	11 ^o	10 ^o	9 ^o	8 ^o	7 ^o
AEMO	21	24	27	30	33	36
Posição	6 ^o	6 ^o	5 ^o	5 ^o	5 ^o	5 ^o
AEMO	39	42	45	48	51	54
Posição	5 ^o	5 ^o	4 ^o	4 ^o	4 ^o	4 ^o
AEMO	57	60	63	66	69	72
Posição	4 ^o	3 ^o	3 ^o	3 ^o	3 ^o	2 ^o
AEMO	75	78	81	84	87	90
Posição	2 ^o	2 ^o	2 ^o	1 ^o	1 ^o	1 ^o
AEMO	93	96	99	101		
Posição	1 ^o	1 ^o	1 ^o	1 ^o		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Contudo, a existência de um ranqueamento para cada caso de falta ainda não permite a obtenção de uma conclusão mais genérica. Em virtude disso, este programa estatístico utiliza um procedimento similar àquele adotado em campeonatos de corrida automotiva, nos quais cada corredor recebe uma quantidade de pontos a cada corrida proporcionalmente à sua colocação ou posição ao término dela. Assim, o vencedor do campeonato é o corredor que ao final dele acumular a maior quantidade de pontos. Tomando em consideração a posição de cada AEMO hipotético em cada ranqueamento, $N_{AEMO} - P_M$ pontos são atribuídos a cada AEMO em cada ranqueamento, onde N_{AEMO} é o número total de AEMOs comparados (34, neste caso) e P_M é a posição de um AEMO no ranqueamento M . A soma dos pontos atribuídos a cada AEMO em cada ranqueamento resulta no ranqueamento geral ilustrado pela Figura 33, que mostra também o total de ponto acumulado por cada AEMO.

Sabendo que o AEMO hipotético 3 representa os conjuntos Pareto-ótimo obtidos para 3.000 gerações, o AEMO hipotético 6 representa os conjuntos Pareto-ótimo obtidos para 6.000 gerações, e assim sucessivamente, observe na Figura 33 que a qualidade dos conjuntos Pareto-ótimo é, de uma maneira geral, substancialmente melhorada até a geração de número 18.000; desta geração em diante a qualidade dos conjuntos Pareto-ótimo continua sendo incrementada pelo AEMO proposto, mas a uma taxa menor. Nota-se que a partir 45.000^a geração, pouquíssima melhora é notada na qualidade dos conjuntos Pareto-ótimo. Portanto, pode-se concluir que, de uma maneira geral, a qualidade dos conjuntos Pareto-ótimo converge com aproximadamente 45.000 gerações. É importante notar que esta conclusão é válida apenas para o SD *LDR-Full*, uma vez que tal comportamento pode ser diferente num SD distinto. Optou-se por realizar este estudo no SD *LDR-Full* porque ser ele o maior dentre os SDs de teste e, como observado no estudo anterior, aquele com a tendência de possuir valores mais elevados de tempo de execução computacional.

Figura 33: Pontuação obtida por cada AEMO hipotético por meio do programa estatístico proposto por (MARQUES et al., 2017).

Fonte: o autor.

Em todas as simulações realizadas para o estudo anterior, foram obtidos também o tempo de execução computacional do método proposto até cada geração múltipla de 3.000. Isto foi realizado com a finalidade de observar o comportamento do tempo de execução com a variação do valor de G_MAX . Nas Figuras 34 e 35 é ilustrado o resultado para os casos de falta nos setores 1586 e 2529, que são dois dos casos de falta que apresentaram tempos de execução mais elevados. Observa-se claramente que o tempo de execução do método proposto varia de forma aproximadamente linear com o número máximo de gerações. O mesmo comportamento foi observado nos demais casos de falta cujo gráfico “tempo *vs* geração” não foi apresentado. É importante recordar que para a realização destes testes o programa do método proposto foi alterado para a obtenção e impressão dos conjuntos de Pareto-ótimo e do tempo de execução a cada 3.000 gerações, como dito anteriormente. Consequentemente, os valores de tempo de execução apresentados para uma geração GER contabilizam também o tempo necessário para obter e imprimir os conjuntos Pareto-ótimo e os tempos de execução nas gerações anteriores a GER . Portanto, numa execução normal do método proposto, o seu tempo de execução tende a ser ligeiramente menor que aquele apresentados nas Figuras 34 e 35.

Figura 34: Valores do tempo de execução por número máximo de geração para o caso de falta no setor 1586.

Fonte: o autor.

Figura 35: Valores do tempo de execução por número máximo de geração para o caso de falta no setor 2529.

Fonte: o autor.

5.6 Considerações finais

Os experimentos computacionais e estudos apresentados evidenciaram a capacidade do método proposto em lidar com casos de falta simples em SDs de diversas dimensões. No que tange a sua capacidade de tratamentos dos aspectos práticos, ela foi avaliada em duas redes: uma de pequeno e outra de grande porte. As sequências de chaveamento fornecidas não possuíam chaves repetidas e priorizaram o atendimento de CPs desligados segundo o grau de prioridade. Ademais, foram fornecidas desde soluções de restauração parcial até soluções de restauração completa em casos de falta que exigiram a execução do AEMO proposto. Soluções de restauração completa foram fornecidas BELM com tempos baixíssimos de execução computacional. Os resultados apresentados permitiram observar também alguns pontos do método proposto que precisam ser fortalecidos, o que é natural em virtude da complexidade do problema e da aplicação do método proposto em redes de grande porte. Adicionalmente, estudos apresentaram o desempenho computacional do método proposto.

É importante observar que não foram apresentados resultados para casos de falta que envolvem múltiplas faltas simultâneas. Isto ocorreu porque o programa computacional do método proposto ainda não foi validado para tais situações de contingência.

6 CONCLUSÃO

6.1 Conclusões

Nesta tese foi proposto um novo método para o tratamento do problema de restabelecimento capaz de auxiliar o trabalho dos operadores de SDs por meio do fornecimento de soluções, i.e., planos de restabelecimento. Os principais diferenciais desta proposta são a sua capacidade de lidar com redes reais de grande porte, com baixo tempo computacional e considerando simultaneamente importantes aspectos práticos do problema, a saber: priorização de CPs enquanto são considerados quatro níveis de prioridade de atendimento entre os consumidores, priorização de manobras em CCRs e definição de uma sequência de chaveamento para cada solução informada. Esta sequência é tal que permite a isolamento do setor em falta, a reconexão dos consumidores prioritários desligados dando privilégio à restauração daqueles com maior prioridade e maiores valores de potência ativa, e, caso necessário, a execução de manobras para transferência de cargas em serviço entre alimentadores a fim de evitar sobrecargas e/ou quedas de tensão inaceitáveis. Adicionalmente, o método proposto mostrou-se capaz de lidar com casos de faltas para os quais não há soluções de restauração completa.

Para este fim, o método proposto mescla uma busca exaustiva local e um novo AEMO em tabelas de subpopulação. Esta primeira visa tratar os casos de falta para os quais há soluções de restauração completa que exijam apenas manobras de isolamento de falta e reconexão de consumidores saudáveis desligados e foi modificada para priorizar a reconexão dos CPs desligados considerando seus níveis de prioridade, ou, na ausência deles, restaurar primeiramente os agrupamentos saudáveis desligados com maiores valores de potência ativa não suprida. Os resultados de um experimento em um SD real de grande porte, que aplicou a BELM em 469 casos de falta, mostraram que a mesma foi capaz de fornecer soluções com o mínimo de manobras em chaves e com as características esperadas em relação a priorização de CPs e fornecimento de sequência de chaveamento. Tudo isso em intervalos de tempo muito baixos, mostrando, assim, a sua viabilidade em casos de faltas simples. Todavia, observou-se que a ausência de execução do AEMO proposto nos casos em que a BELM obtém soluções factíveis incorreu no fornecimento de soluções apenas de restauração completa, o que limita as escolhas do operador. É importante salientar que isto não é devido ao comportamento da BELM, mas sim do fluxograma executado pelo método proposto, que não permite a execução AEMO proposto na obtenção de solução factível pela BELM.

A segunda parte do método proposto consiste num novo AEMO em tabelas de subpopulação que trata os casos de falta não solucionados pela BELM. Este AEMO possui

diversas inovações em relação ao AEMOs em tabelas da literatura, cujas principais são: capacidade de fornecer soluções de restauração parcial; novas tabelas de subpopulação; um novo operador de reprodução para florestas armazenadas pela RNP; uma heurística que evita operações em locais da rede não relacionados com a ocorrência da falta (o que concorre para diminuir o número de manobras); capacidade de associar a cada indivíduo uma sequência de chaveamento; uma rotina para verificação e correção de sequências de chaveamentos capaz de avaliar também as características operacionais de cada configuração intermediária; um método para o cálculo da energia não suprida por nível de prioridade, e; uma nova estratégia para a geração de um novo indivíduo-filho, a qual privilegia a aplicação do operador de reconexão de carga. Em relação as tabelas de subpopulação do AEMO proposto, eles são inspiradas em três conceitos diferentes de tabelas de subpopulação, que diferenciam-se entre si pelo modo como as subpopulações em tabela são atualizadas: o primeiro, proposto por (SANTOS et al., 2010), faz uma única comparação na atualização de cada subpopulação em tabelas; o segundo, proposto por (MARQUES; DELBEM; LONDON JR., 2018), faz a verificação de múltiplos critérios e permite o tratamento de metas que possuem entre si uma hierarquia sem o uso de pesos e funções ponderação; e o terceiro, proposto neste trabalho, é inspirado na estratégia de seleção por não dominância e distância de multidão do NSGA-II (DEB et al., 2002). O método proposto possui ainda um estágio para a formação do conjunto Pareto-ótimo a partir do qual podem ser escolhidas as soluções a serem fornecida.

A avaliação do AEMO proposto ocorreu por meio da comparação do método proposto com os resultados apresentados por um trabalho da literatura para um SD de 53 barras e também por meio da aplicação do método proposto em 5 casos de falta complexos do SD real da região metropolitana de Londrina-PR. A trabalho da literatura citado é aquele proposto por (ROMERO et al., 2016), no qual é apresentado um método de programação matemática. Os 5 casos de falta ditos são aqueles do SD da região metropolitana de Londrina-PR que não podem ser solucionados pela BELM e para os quais ocorrem o número mais elevado de agrupamentos de setores saudáveis desligados. A performance do AEMO proposto foi avaliada através dos conjuntos Pareto-ótimo obtidos e da sequência de chaveamento de algumas das soluções fornecidas. A grande maioria das soluções evidenciou um desempenho satisfatório para o AEMO proposto. Um caso de falta específico e mais complexo no SD real de grande porte evidenciou melhorias que podem ser realizadas na estratégia para formação do conjunto Pareto-ótimo ao término do processo evolutivo. Em todas as sequências de chaveamento, a ordem de restauração dos setores saudáveis desligados priorizou os consumidores com maior nível de prioridade de atendimento. Também nos casos tratados pelo AEMO proposto, o tempo de execução computacional mostrou-se adequado às necessidades do problema.

Apesar de os valores de tempo de execução computacional do método proposto terem mostrado-se adequados às necessidades do problema, inclusive nos casos tratados

pelo AEMO proposto, estudos adicionais de desempenho computacional foram realizados. Um destes estudos visou avaliar a variação do tempo computacional com a dimensão das redes de distribuição. Para tal, simulações em quatro SDs de tamanhos distintos foram realizadas e os resultados mostraram que o tempo computacional exigido pelo método proposto para fornecer soluções aumenta numa proporção muito menor a proporção de aumento da dimensão da rede e mostrou-se, mais uma vez, satisfatório inclusive para o maior SD. Um segundo estudo foi desenvolvido com finalidade de verificar o comportamento da taxa de melhoria da aptidão da população com o aumento do número de gerações e, adicionalmente, verificar o comportamento do tempo computacional em relação ao número máximo de gerações a serem realizadas, o qual é um dos dados de entrada do método proposto. Os resultados de teste num SD real de grande porte mostraram que partir da 45.000^a geração a aptidão da população cresce a taxas muitíssimo baixas e que o tempo de execução varia linearmente com o número máximo de gerações escolhido.

Em face de todos estes resultados, pode-se concluir que o método proposto é adequado para o fim a que se propõe: o tratamento do problema de restabelecimento considerando aspectos práticos já citados. Não obstante, alguns poucos pontos ainda podem ser fortalecidos, o que é natural em qualquer trabalho.

6.2 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é o próprio método proposto, cujos diferenciais já foram explorados. Contudo, contribuições pontuais estão também nas diversas partes que o compõe. Algumas delas são:

- Um novo conceito de tabelas de subpopulação;
- Tabelas de subpopulação capazes de priorizar indivíduos com maior aptidão em relação a priorização de manobras em CCRs e de CPs
- Um novo operador de reprodução para AEMOs que faz uso da RNP, o qual é focado na seleção e restauração de consumidores desligados;
- Armazenamento, para cada indivíduo, de uma sequência de chaveamento capaz de obtê-lo;
- Fornecimento de sequências de chaveamento que atendem os limites operacionais relaxados em cada configuração intermediária e garante ausência de violação dos limites da rede na configuração que ficará em operação após a execução de todas as manobras;
- Um método para calcular a energia não suprida em um indivíduo a partir da atualização da energia não suprida de seu ancestral;

- Um nova estratégia para a geração de um novo indivíduo, durante o processo evolutivo, que prioriza a realização de manobras para restauração em detrimento das manobras para transferência de cargas;
- Um novo enunciado formal para o problema de restabelecimento de energia que considera aspectos práticos.

6.3 Trabalhos Futuros

Algumas perspectivas de trabalhos futuros são as seguintes:

- Modificar o método proposto a fim de evitar a presença e a contagem de manobras para isolamento de agrupamentos de setores que permanecerão fora de serviço;
- Tornar o procedimento para formação do conjunto Pareto-ótimo (Passo 14), ao término do processo evolutivo, apto a privilegiar soluções mais adequadas em relação aos aspectos de priorização de consumidores e de manobras;
- Modificar o método proposto a fim de que o AEMO possa ser executado mesmo quando uma solução factível é obtida pela BELM, a fim de que possa ser fornecido, em tais situações, também soluções de restauração parcial;
- Distinguir as chaves que podem ser operadas com carga das que não possuem tal capacidade e definir a sequência de operação considerando a impossibilidade de algumas chaves operarem sob carga;
- No processo de obtenção de uma sequência de chaveamento, verificar as características operacionais da rede também após a primeira operação de um par de manobras;
- Fornecer sequências de chaveamento cujas manobras possam ser realizadas também em paralelo, a fim de minimizar o tempo de ausência de fornecimento;
- Comparar o desempenho do uso das tabelas de multi-critérios que priorizam consumidores sem o uso de pesos com algum método que realiza a ponderação das prioridades de atendimento dos consumidores por meio de pesos.

6.4 Publicações

As publicações decorrentes do desenvolvimento desta pesquisa são as seguintes:

- **MARQUES, L. T.; DELBEM, A. C. B.; LONDON JR., J. B. A.** Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 3, p. 2359–2370, May 2018;

- **MARQUES, L. T.**; FERNANDES, J. P. R.; LONDON JR., J. B. A. Multi-objective evolutionary algorithm in subpopulation tables with features from nsga-ii for the service restoration problem (aceito para publicação). No: **IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition - Latin America (T&D-LA 2018)**. p. 1–5.
- **MARQUES, L. T.**; LONDON JR., J. B. A.; CAMILLO, M. H. M.; DE LIMA, T. W.. A new multi-objective evolutionary algorithm for service restoration: Non-dominated sorting genetic algorithm-ii in subpopulation tables. No: **2017 IEEE Manchester PowerTech**. 2017. p. 1–6.
- **MARQUES, L. T.**; DELBEM, A. C. B.; LONDON JR., J. B. A.; CAMILLO, M. H. M.. Towards the improvement of multi-objective evolutionary algorithms for service restoration. No: **2017 IEEE PES General Meeting**. 2017. p. 1–5.
- CAMILLO, M. H. M.; FANUCCHI, R. Z.; ROMERO, M. E. V.; DE LIMA, T. W.; **MARQUES, L. T.**; MASSIGNAN, J. A. D.; MACIEL, C. D.; SOARES, A. S.; DELBEM, A. C. B.; BESSANI, M.; LONDON JR., J. B. A.. Determination of switching sequence of service restoration in distribution systems: application and analysis on a real and large-scale radial system. No: **IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D 2016)**. 2016. p. 1–6.
- **MARQUES, L. T.**; DELBEM, A. C. B.; CAMILLO, M. H. M.; LONDON JR., J. B. A.. Service restoration in large-scale distribution systems considering three levels of priority customers. No: **Power Tech, 2015 IEEE PES Eindhoven**. 2015. p. 1–6.
- **MARQUES, L. T.**; SANCHES, D. S.; DELBEM, A. C. B.; LONDON JR., J. B. A.. Methodology for service restoration in large-scale distribution systems with priority customers. No: **Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2014 IEEE PES**. 2014. p. 1–6.
- **MARQUES, L. T.**; DA SILVA, M.; PEREIRA, D. H.; DELBEM, A. C. B.; LONDON JR., J. B. A.; LEOPOLDINO, R.; DE GOIS, A. M.. Metodologia para restabelecimento de energia em sistemas de distribuição com priorização de chaves controladas remotamente: Aplicação em um sistema real da cpfl. No: **XXI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**. 2014. p. 1–12. *Premiado como melhor trabalho no tema “Operação de Sistemas de Distribuição”*.
- **MARQUES, L. T.**; ZAN, J. C.; DELBEM, A. C. B.; LONDON JR., J. B. A.. Análise da influência da geração distribuída no problema de restabelecimento de energia. No: **XX Congresso Brasileiro de Automática**. 2014. p. 3870–3876. *Premiado como melhor trabalho na categoria “Doutorado”*.

- **MARQUES, L. T.**; ZAN, J. C.; DELBEM, A. C. B.; LONDON JR., J. B. A.. Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de grande porte com priorização de chaves. No: **XX Congresso Brasileiro de Automática**. 2014, p. 280–287

Em virtude da colaboração com trabalhos de terceiros, as seguintes publicações também foram obtidas no período de desenvolvimento desta pesquisa:

- CAMILLO, M. H. M.; FANUCCHI, R. Z.; ROMERO, M. E. V.; DE LIMA, T. W.; SOARES, A. S.; DELBEM, A.; **MARQUES, L. T.**; MACIEL, C. D.; LONDON JR., J. B. A.. Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 134, p. 1–8, 2016.
- CAMILLO, M. H. M.; ROMERO, M. E. V.; FANUCCHI, R. Z.; DE LIMA, T. W.; SOARES, A. S.; LONDON JR., J. B. A.; DELBEM, A.; **MARQUES, L. T.**; MACIEL, C. D.. Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems. **Procedia Computer Science**, v. 80, p. 2367–2371, 2016.
- CAMILLO, M. H. M.; FANUCCHI, R. Z.; DE LIMA, T. W.; SOARES, A. S.; BESSANI, M.; MACIEL, C. D.; MASSIGNAN, J. A. D.; **MARQUES, L. T.**; DELBEM, A. C. B.; LONDON JR., J. B. A.. Detecção, Isolamento, Inspeção e Restabelecimento de Energia em Tempo Real em Sistemas de Distribuição de Larga Escala. No: **VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL)**. 2017, p. 1-11.
- HEBLING, G. M.; MASSIGNAN, J. A. D.; **MARQUES, L. T.**, LONDON JR, J. B. A.; CAMILLO, M. H.. Fluxo de potência em alimentadores de distribuição fracamente malhados. No: **XXI Congresso Brasileiro de Automática**. 2016. p. 1-6.
- ZAN, J. C.; **MARQUES, L. T.**; COIMBRA, A. M.; PEREIRA, D. H. ; DA SILVA, M.; BENTO, C. R. C.; GOIS, A. M.; LONDON JR., J. B. A.. Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de grande porte considerando bancos de capacitores e reguladores de tensão. No: **2015 Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. 2015. p. 1-6.

REFERÊNCIAS

BARAN, M.; WU, F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 1, p. 735–743, Jan 1989. ISSN 0885-8977.

CAMILLO, M. H. M. et al. Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 134, p. 1–8, 2016.

_____. Determination of switching sequence of service restoration in distribution systems: application and analysis on a real and large-scale radial system. In: **IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D 2016)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

_____. Exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for single fault service restoration in a real large-scale distribution system. In: **General Meeting, 2015 IEEE PES**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.

CARRANO, E. G. et al. Subpermutation-based evolutionary multiobjective algorithm for load restoration in power distribution networks. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 20, n. 4, p. 546–562, Aug 2016. ISSN 1089-778X.

CHEN, C.-S.; LIN, C.-H.; TSAI, H.-Y. A rule-based expert system with colored petri net models for distribution system service restoration. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 17, n. 4, p. 1073–1080, Nov 2002. ISSN 0885-8950.

CHEN, K. et al. Robust Restoration Decision-Making Model for Distribution Networks Based on Information Gap Decision Theory. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 2, p. 587–597, 2015. ISSN 1949-3053.

DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. New York: Wiley, 2001.

DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 2, p. 182–197, April 2002. ISSN 1089-778X.

DELBEM, A. C. B. **estabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição por Algoritmo Evolucionário Associado a Cadeias de Grafos**. 2002. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2002.

DELBEM, A. C. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F. de; BRETAS, N. G. Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 1, p. 425–436, 2005.

DELBEM, A. C. B. et al. Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design. In: **GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE**. [S.l.], 2004. p. 678–687.

- GHOLAMI, M.; MOSHTAGH, J.; RASHIDI, L. Service restoration for unbalanced distribution networks using a combination two heuristic methods. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 67, p. 222–229, 2015.
- GOIS, M. M. et al. Multi-objective evolutionary algorithm with node-depth encoding and strength pareto for service restoration in large-scale distribution systems. In: _____. **Evolutionary Multi-Criterion Optimization: 7th International Conference, EMO 2013, Sheffield, UK, March 19–22, 2013. Proceedings**. [S.l.]: Springer Berlin, 2013. p. 771–786. ISBN 978-3-642-37140-0.
- GOULART, F. et al. Permutation-based optimization for the load restoration problem with improved time estimation of maneuvers. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 101, p. 339 – 355, 2018. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061517327588>>.
- HAFEZ, A. A.; OMRAN, W. A.; HEGAZY, Y. G. A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 3, p. 1911–1919, May 2018. ISSN 1949-3053.
- HANSEN, M.; JASZKIEWICZ, A. **Evaluating the quality of approximations of the non-dominated set**. [S.l.], 1998.
- HUANG, C.-M.; HSIEH, C.-T.; WANG, Y.-S. Evolution of radial basic function neural network for fast restoration of distribution systems with load variations. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 33, n. 4, p. 961–968, 2011.
- JUNLAKARN, S.; ILIC, M. Distribution system reliability options and utility liability. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, v. 5, n. 5, p. 2227–2234, Sept 2014. ISSN 1949-3053.
- KLEINBERG, M.; MIU, K.; CHIANG, H.-D. Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, n. 3, p. 1110–1117, 2011.
- KUMAR, Y.; DAS, B.; SHARMA, J. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 1, p. 261–270, Jan. 2008. ISSN 0885-8977.
- LACOMMARE, K. H.; ETO, J. H. **Understanding the Cost of Power Interruptions to U.S. Electricity Consumers**. [S.l.], 2004.
- _____. Cost of power interruptions to electricity consumers in the united states (us). **Energy**, v. 31, p. 1845 – 1855, 2006.
- LIN, C.-H. et al. A multiagent-based distribution automation system for service restoration of fault contingencies. **European Transactions on Electrical Power**, John Wiley And Sons, Ltd., v. 21, n. 1, p. 239–253, 2011. ISSN 1546-3109.
- LINARES, P.; REY, L. The costs of electricity interruptions in spain. are we sending the right signals? **Energy Policy**, v. 61, p. 751–760, 2013.

- LUAN, W. P.; IRVING, M.; DANIEL, J. S. Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks. **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-**, v. 149, n. 2, p. 145–151, Mar 2002. ISSN 1350-2360.
- MANJUNATH, K.; MOHAN, M. A new hybrid multi-objective quick service restoration technique for electric power distribution systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 29, n. 1, p. 51 – 64, 2007. ISSN 0142-0615.
- MANSOUR, M. R. **Algoritmo para obtenção de planos de restabelecimento para sistemas de distribuição de grande porte**. 2009. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2009.
- MANSOUR, M. R. **Algoritmo para obtenção de planos de restabelecimento para sistemas de distribuição de grande porte**. 2009. Dissertação (Mestrado) — Engenharia Elétrica, EESC/USP, São Carlos/SP - Brasil, 2009.
- MARQUES, L. T. **Restabelecimento de Energia por Reconfiguração de Redes em Sistemas de Distribuição de Grande Porte com Priorização de Chaves, Consumidores e Definição de Sequência de Chaveamento**. 2013. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.
- MARQUES, L. T. et al. Service restoration in large-scale distribution systems considering three levels of priority customers. In: **Power Tech, 2015 IEEE PES Eindhoven**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- _____. Towards the improvement of multi-objective evolutionary algorithms for service restoration. In: **2017 IEEE Power Energy Society General Meeting**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.
- MARQUES, L. T.; DELBEM, A. C. B.; LONDON JR., J. B. A. Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 3, p. 2359–2370, May 2018. ISSN 1949-3053.
- MARQUES, L. T.; FERNANDES, J. P. R.; LONDON JR., J. ao B. A. Multi-objective evolutionary algorithm in subpopulation tables with features from nsga-ii for the service restoration problem (aceito para publicação). In: **IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition - Latin America (T&D-LA 2018)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.
- MARQUES, L. T. et al. A new multi-objective evolutionary algorithm for service restoration: Non-dominated sorting genetic algorithm-ii in subpopulation tables. In: **2017 IEEE Manchester PowerTech**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.
- _____. Methodology for service restoration in large-scale distribution systems with priority customers. In: **Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2014 IEEE PES**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- _____. Metodologia para restabelecimento de energia em sistemas de distribuição com priorização de chaves controladas remotamente: Aplicação em um sistema real da cpfl. In: **XXI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–12.

_____. Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de grande porte com priorização de chaves. In: **XX Congresso Brasileiro de Automática**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 280–287.

MATHIAS-NETO, W. P.; MANTOVANI, J. R. S. A node-depth encoding-based tabu search algorithm for power distribution system restoration. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 27, n. 3, p. 317–327, 2016.

MIU, K. N.; CHIANG, H. D.; MCNULTY, R. J. Multi-tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks. **IEEE TPS**, v. 15, n. 3, p. 1001–1007, 2000. ISSN 0885-8950.

MOHAMMADI, F.; AFRAKHTEH, H. Optimal load restoration in distribution network using intentional islanding. **Journal of Electrical Engineering**, v. 12, n. 4, p. 108–113, 2012.

PRADO, R. et al. Differential evolution using ancestor tree for service restoration in power distribution systems. **Applied Soft Computing Journal**, 2014.

R, S.; K, P. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. **J Global Optim**, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997.

ROMERO, R. et al. A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 31, n. 2, p. 1259–1268, March 2016. ISSN 0885-8950.

SANCHES, D.; LONDON JR., J.; DELBEM, A. Multi-Objective Evolutionary Algorithm for single and multiple fault service restoration in large-scale distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 110, p. 144–153, 2014.

SANCHES, D. et al. Multiobjective evolutionary algorithm with a discrete differential mutation operator developed for service restoration in distribution systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 62, p. 700–711, 2014.

SANCHES, D. S. **Algoritmos evolutivos multi-objetivo para reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2013. Tese (Doutorado) — Engenharia Elétrica - EESC/USP., São Carlos/SP, Brasil, 2013.

SANCHES, D. S. et al. Node-depth encoding with recombination for multi-objective evolutionary algorithm to solve loss reduction problem in large-scale distribution systems. In: **Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–8.

SANTOS, A. C. et al. Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 25, n. 3, p. 1254 –1265, 2010. ISSN 0885-8950.

_____. A power flow method computationally efficient for large-scale distribution systems. In: **Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6.

SANTOS, A. C. dos. **Algoritmo evolutivo computacionalmente eficiente para reconfiguração de sistemas de distribuição**. 2009. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2009.

- SHARMA, A.; SRINIVASAN, D.; TRIVEDI, A. A Decentralized Multiagent System Approach for Service Restoration Using DG Islanding. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2015.
- SHIRMOHAMMADI, D. et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 3, n. 2, p. 753–762, May 1988. ISSN 1558-0679.
- SOLANKI, J.; KHUSHALANI, S.; SCHULZ, N. A multi-agent solution to distribution systems restoration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 22, n. 3, p. 1026–1034, 2007.
- TSAI, M.-S. Development of an object-oriented service restoration expert system with load variations. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 1, p. 219–225, 2008. ISSN 0885-8950.
- WANG, F. et al. A multi-stage restoration method for medium-voltage distribution system with dgs. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 6, p. 2627–2636, Nov 2017. ISSN 1949-3053.
- WANG, P.; LI, W. Reliability evaluation of distribution systems considering optimal restoration sequence and variable restoration times. **Generation, Transmission Distribution, IET**, v. 1, n. 4, p. 688–695, July 2007. ISSN 1751-8687.
- XIAOYU, H.; MINGCHAO, X.; YINGHUI, H. A service restoration method for active distribution Network. **Energy Procedia**, v. 61, p. 339–344, 2014.
- YUAN, C.; ILLINDALA, M. S.; KHALSA, A. S. Modified viterbi algorithm based distribution system restoration strategy for grid resiliency. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 1, p. 310–319, Feb 2017. ISSN 0885-8977.
- ZHANG, Q.; LI, H. Moea/d: a multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 11, n. 6, p. 712–731, 2007.
- 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.
- _____. Incorporating load variation and variable wind generation in service restoration plans for distribution systems. **Energy**, v. 57, n. 0, p. 682 – 691, 2013. ISSN 0360-5442.
- _____. Incorporating customers' reliability requirements and interruption characteristics in service restoration plans for distribution systems. **Energy**, v. 87, p. 192–200, 2015.

Apêndices

APÊNDICE A – REPRESENTAÇÃO DAS LEIS DE KIRCHOFF ATRAVÉS DE GRAFOS

Um enunciado formal para o problema de restabelecimento de energia foi proposto na Seção 4.2. Dentre as equações envolvidas, encontram-se aquelas que representam a primeira e a segunda leis de Kirchhoff, expressas em função de uma floresta de grafo. A fim de facilitar a compreensão de tais equações, neste Apêndice será apresentado como os elementos que compõe tais equações podem ser obtidos a partir de uma pequena rede elétrica. Desta maneira será possível compreender também a validade de tais equações.

A primeira e a segunda leis de Kirchhoff foram expressas na Seção 4.2 da maneira indicada, respectivamente, pelas equações A.1 e A.2, a seguir.

$$A(G^e)x(G^e) = c(G^e) \quad (\text{A.1})$$

$$A(G^e)Y_x(G^e)A(G^e)^t v(G^e) = c(G^e). \quad (\text{A.2})$$

Nas quais, G^e é a porção de G (G é uma configuração radial do SD, representada por uma floresta de grafo) que se encontra em serviço (representa todos os alimentadores que estão energizados em G); $A(G^e)$ é a matriz incidência nó-aresta pseudo-orientada (obtida através de um grafo orientado das correntes) de G^e ; $x(G^e)$ é o vetor de correntes complexas nas linhas em G^e ; $c(G^e)$ é o vetor de correntes complexas demandadas em barras de carga ($c_j \leq 0$) e injetadas em barras de subestações ($c_j > 0$) em (G^e); $Y_x(G^e)$ é a matriz diagonal de admitância da rede em G^e ; $v(G^e)$ é o vetor de tensões complexas das barras em G^e .

Na equação A.1, a matriz $A(G^e)$ e o vetor $c(G^e)$ são construídos a partir da topologia da rede e das correntes demandas por cada barra, respectivamente. Para melhor compreender isto, considere a Figura 36. Ela apresenta um grafo com a topologia de uma rede fictícia, no qual os nós consistem em barras e as arestas são trechos de linha. Esta figura apresenta ainda uma indicação das correntes nas linhas e nas barras (demanda ou injetada).

Para a rede elétrica representada por esta figura, a matriz $A(G^e)$ (matriz incidência nó-aresta pseudo-orientada) é dada pela Figura 37. Note que, para cada aresta “ $\text{Barra}_{De} - \text{Barra}_{Para}$ ”, a mesma possui “1” na barra de origem do fluxo da corrente (Barra_{De}) e “-1” na barra de destino do fluxo da corrente (Barra_{Para}). Observe que a obtenção de tal matriz é bem simples.

Com base nisto, para a rede apresentada na Figura 36, a Equação A.1 pode ser representada matricialmente conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 36: Representação de uma rede fictícia de 5 barras através de Grafo - Parte 1.

Fonte: o autor.

Figura 37: Matriz incidência nó-aresta pseudo-orientada do grafo da Figura 36.

		Aresta			
		1-2	2-4	2-3	3-5
Nó	1	1			
	2	-1	1	1	
	3			-1	1
	4		-1		
	5				-1

Fonte: o autor.

Figura 38: Representação matricial da Equação A.1 para a rede mostrada na Figura 36.

$$\begin{array}{c|cccc}
 & \text{Aresta} & & & \\
 & 1-2 & 2-4 & 2-3 & 3-5 \\
 \text{Nó} & \\
 1 & 1 & & & \\
 2 & -1 & 1 & 1 & \\
 3 & & & -1 & 1 \\
 4 & & -1 & & \\
 5 & & & & -1
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \left| \begin{array}{c} l_{1-2} \\ l_{2-4} \\ l_{2-3} \\ l_{3-5} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} +l_1 \\ -l_2 \\ -l_3 \\ -l_4 \\ -l_5 \end{array} \right|
 \end{array}$$

Fonte: o autor.

A multiplicação da matriz $A(G^e)$ pelo vetor $x(G^e)$, segundo a representação matricial da Figura 38 resulta nas equações da Lei de Kirchoff dos Nós para cada um dos nós da rede da Figura 36, a saber:

$$I_{1-2} = +I_1 \quad (\text{A.3})$$

$$-I_{1-2} + I_{2-4} + I_{2-3} = -I_2 \quad (\text{A.4})$$

$$-I_{2-3} + I_{3-5} = -I_3 \quad (\text{A.5})$$

$$-I_{2-4} = -I_4 \quad (\text{A.6})$$

$$-I_{3-5} = -I_5. \quad (\text{A.7})$$

Na Equação A.2 tem-se a representação da segunda lei de Kirchoff. Nesta, a matriz $Y_x(G^e)$ pode ser construída a partir dos valores de admitância dos trechos de linha da rede elétrica. O vetor $v(G^e)$ (vetor de tensões complexas das barras em G^e), por sua vez, contém as variáveis desta equação. A construção da matriz $A(G^e)$ e do vetor $c(G^e)$ já foi explicada anteriormente.

A rede ilustrada na Figura 36 é apresentada novamente na Figura 39 com a indicação das tensões nas barras e admitâncias nas linhas (trechos ou arestas). Para o caso desta rede, a matriz $Y_x(G^e)$ é dada pela Figura 40 e a matriz $A(G^e)^t$ é apresentada na Figura 41.

Figura 39: Representação de uma rede fictícia de 5 barras através de Grafo - Parte 2.

Fonte: o autor.

Com base nestas informações, a Equação A.2 pode ser expressa matricialmente, para o caso da rede da Figura 39, tal como representado na Figura 42. A multiplicação entre as matrizes $A(G^e)$, $Y_x(G^e)$, $A(G^e)^t$ resultará na matriz apresentada na Figura 43, que é conhecida como matriz “ Y_{Barra} ” (neste caso, $Y_{Barra}(G^e)$).

A multiplicação da matriz $Y_{Barra}(G^e)$ pelo vetor $v(G^e)$, segundo a representação matricial da Figura 42, resulta nas equações da Lei de Kirchoff das Tensões da rede da Figura 36, a saber:

$$Y_{1-2} \cdot V_1 - Y_{1-2} \cdot V_2 = +I_1 \quad (\text{A.8})$$

$$-Y_{1-2} \cdot V_1 + (Y_{1-2} + Y_{2-3} + Y_{2-4}) \cdot V_2 - Y_{2-3} \cdot V_3 - Y_{2-4} \cdot V_4 = -I_2 \quad (\text{A.9})$$

$$-Y_{2-3} \cdot V_2 + (Y_{2-3} + Y_{3-5}) \cdot V_3 - Y_{3-5} \cdot V_5 = -I_3 \quad (\text{A.10})$$

$$-Y_{2-4} \cdot V_2 + (Y_{2-4}) \cdot V_4 = -I_4 \quad (\text{A.11})$$

$$-Y_{3-5} \cdot V_3 + (Y_{3-5}) \cdot V_5 = -I_5. \quad (\text{A.12})$$

Figura 40: Matriz diagonal de admitâncias da rede da Figura 39.

		Aresta			
		1-2	2-4	2-3	3-5
Aresta	1-2	Y_{1-2}			
	2-4		Y_{2-4}		
	2-3			Y_{2-3}	
	3-5				Y_{3-5}

Fonte: o autor.

Figura 41: Matriz incidência nó-aresta pseudo-orientada do grafo da Figura 39 transposta.

		Nó				
		1	2	3	4	5
Aresta	1-2	1	-1			
	2-4		1		-1	
	2-3		1	-1		
	3-5			1		-1

Fonte: o autor.

Figura 42: Matriz incidência nó-aresta pseudo-orientada do grafo da Figura 39 transposta.

$$\begin{vmatrix} 1 & & & & \\ -1 & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & -1 & 1 \\ & -1 & & & \\ & & & & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Y_{1-2} & & & & \\ & Y_{2-4} & & & \\ & & Y_{2-3} & & \\ & & & Y_{3-5} & \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -1 & & & \\ & 1 & & -1 & \\ & & 1 & -1 & \\ & & & 1 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} +I_1 \\ -I_2 \\ -I_3 \\ -I_4 \\ -I_5 \end{vmatrix}$$

Fonte: o autor.

Figura 43: Matriz $Y_{Barra}(G^e)$, resultante da multiplicação entre as matrizes $A(G^e)$, $Y_x(G^e)$, $A(G^e)^t$.

$$\begin{vmatrix} Y_{1-2} & -Y_{1-2} & & & \\ -Y_{1-2} & Y_{1-2} + Y_{2-3} + Y_{2-4} & -Y_{2-3} & -Y_{2-4} & \\ & -Y_{2-3} & Y_{2-3} + Y_{3-5} & & -Y_{3-5} \\ & -Y_{2-4} & & Y_{2-4} & \\ & & -Y_{3-5} & & Y_{3-5} \end{vmatrix}$$

Fonte: o autor.