

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Fabio Miranda Rodrigues

**Método de otimização de custos de confiabilidade de sistemas de distribuição
considerando geradores móveis de emergência**

Juiz de Fora

2020

Fabio Miranda Rodrigues

Método de otimização de custos de confiabilidade de sistemas de distribuição considerando geradores móveis de emergência

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Dr. Leandro Ramos de Araujo
Coorientadora: Dra. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Juiz de Fora
2020

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Rodrigues, Fabio Miranda.

Método de otimização de custos de confiabilidade de sistemas de distribuição considerando geradores móveis de emergência / Fabio Miranda Rodrigues. -- 2020.

169 p. : il.

Orientador: Leandro Ramos de Araujo

Coorientadora: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

1. Confiabilidade. 2. Otimização. 3. Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 4. Algoritmos Genéticos. 5. Geradores Móveis de Emergência. I. de Araujo, Leandro Ramos, orient. II. Araujo, Débora Rosana Ribeiro Penido, coorient. III. Título.

Fabio Miranda Rodrigues

**Método de Otimização de Custos de Confiabilidade de Sistemas de
Distribuição Considerando Geradores Móveis de Emergência**

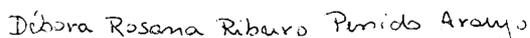
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em 30 de novembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA



Dr. Leandro Ramos de Araujo - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Dra. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo - Coorientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora



Dr. Leonardo Willer de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora



Dr. Guilherme Márcio Soares
Universidade Federal de Juiz de Fora



Dr. Marcus Theodor Schilling
Universidade Federal Fluminense



Dr. Walmir de Freitas Filho
Universidade de Campinas

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Creio que o âmago de um curso de Doutorado resume-se a um verbo: evoluir.

Evolui-se a pessoa e a ciência. Um pensamento vira ideia, que vira pesquisa, que vira qualificação, que vira tese. Tudo permeado por certezas e incertezas, erros e acertos, nascimento de teorias e métodos, lapidação de conceitos. Em suma, trata-se do próprio método científico tomando forma, acontecendo ao vivo e in loco.

Durante meu curso de Doutorado, pude sentir na pele minha evolução, enquanto pessoa e acadêmico. Ainda há muito que evoluir, e sei que a minha caminhada pela Ciência nunca terá fim – mas, olhando para trás, posso perceber que um bom caminho já foi percorrido, e isso me deixa feliz. E, sem dúvidas, trata-se de um caminho que não foi construído individualmente, haja vista que muitas pessoas ajudaram no processo, direta ou indiretamente.

Portanto, quero agradecer aos meus pais, Sergio e Rita, que foram meus primeiros mestres.

Aos meus irmãos Sergio Júnior e Pablo, pela presença constante.

Aos meus amigos – que por sorte tenho vários.

Aos meus orientadores, Leandro e Débora, pelo trabalho sem igual que fizeram.

Finalizo neste parágrafo esta dedicatória porque o espaço é muito curto para descrever tudo o que pôde contribuir nesta jornada. Mas resumo citando alguns outros pontos igualmente importantes nesta caminhada: a todos os professores que tive, ao PPEE-UFJF, à pessoa que descobriu o café e aos autores de todos os livros e artigos que já li na vida.

RESUMO

Este trabalho apresenta um novo método para minimizar custos de confiabilidade dos sistemas de distribuição (DSs) através da realocação de chaves seccionadoras, utilizando algoritmos genéticos para encontrar as melhores soluções para o problema de realocação de chaves quando geradores móveis de emergência (MEGs) estão disponíveis para uso. Os MEGs podem ser usados como versáteis dispositivos melhoradores de confiabilidade em um DS, porque, diferentemente da geração distribuída fixa (DG), eles têm mobilidade e podem ser facilmente conectados em diferentes partes de um alimentador durante diferentes falhas. Neste trabalho, contribuindo para atingir o objetivo, também é apresentado um método de simulação de faltas para análise de confiabilidade e uma estratégia de pré-posicionamento do MEG que visa obter uma posição inicial quase-ótima para o MEG na rede, com foco na minimização do tempo de resposta à interrupção. Usando o método proposto, os índices de confiabilidade e/ou custos de um DS podem ser bastante aprimorados. Para validar o método são feitas simulações em alimentadores (incluindo alimentadores reais) e os resultados mostram melhorias significativas para os alimentadores testados.

Palavras-chave: Confiabilidade; Otimização; Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica; Algoritmos Genéticos; Geradores Móveis de Emergência

ABSTRACT

This work presents a new method for the minimization of reliability costs of distribution systems (DSs) through switches reallocation, which uses genetic algorithms to find the best solutions for the switch placement problem, when mobile emergency generators (MEG) are available for use. MEGs can be used as versatile reliability enhancers in a DS, because differently from fixed distributed generation (DG), they have mobility and can be easily connected in different parts of a feeder during different faults. In order to achieve this goal, it is also presented a fault simulation method for reliability analysis and a MEG pre-positioning strategy which aims to obtain the near optimal initial position for the MEG in the network, focusing to minimize the interruption response time. By using the proposed method, reliability indices and/or costs of a DS can be greatly improved. Simulations on feeders (including real ones) are done, and the results show significant improvements for the tested feeders.

Keywords: Reliability; Optimization; Distribution Systems; Genetic Algorithms; Mobile Emergency Generators

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1 - Notícia 1..... | 4 |
| Figura 1-2 - Notícia 2..... | 5 |
| Figura 1-4 - Notícia 4..... | 6 |
| Figura 1-5 – Notícia 5..... | 6 |
| Figura 2-1 – Alimentador de exemplo inicial..... | 19 |
| Figura 2-2 – Repetição do alimentador do exemplo inicial, mas variando-se a seção em falta. | 24 |
| Figura 2-3 – Alimentador do exemplo inicial com diferente alocação de chaves, mas mantendo-se a mesma seção em falta. | 24 |
| Figura 2-4 – Alimentador de exemplo inicial, variando-se a posição inicial do MEG. | 25 |
| Figura 2-5 - Fluxograma das etapas de simulação analítica. | 28 |
| Figura 2-6 - Exemplo de geração de valores booleanos. | 32 |
| Figura 2-7 - Estabelecimento de uma lógica de algoritmo para que o MEG escolha a melhor combinação de área para conexão, dentre todas as elegíveis. | 35 |
| Figura 2-8 - Após o crivo realizado pelos passos de escolha de conexão dentre os elegíveis, booleanos de confirmação são gerados. | 36 |
| Figura 2-9 - Exemplo de cálculo de COLF | 40 |
| Figura 2-10 - Exemplo de cálculo de distâncias do COLF aos pontos de conexão a cada falta em que o MEG é utilizado. | 41 |
| Figura 2-11 - Exemplo da lógica de atribuição do mesmo tempo de deslocamento do MEG a todos os pontos da área formada pela abertura da chave associada ao ponto de conexão com o MEG..... | 43 |
| Figura 2-12 - Esquema exemplificativo*..... | 54 |
| Figura 2-13 - Fluxograma do módulo genético do algoritmo desenvolvido. | 56 |
| Figura 2-14 - Fluxograma completo do algoritmo desenvolvido neste trabalho. | 57 |
| Figura 2-15 - Níveis de profundidade da análise completa*..... | 58 |
| Figura 2-16 - Representação esquemática do que ocorre ao longo do passo de uma geração do algoritmo genético | 59 |
| Figura 3-1 – <i>RBTS-BUS 5</i> | 64 |
| Figura 3-2: <i>PEA-51</i> | 67 |
| Figura 3-3 - Topologia original do <i>BRA-134</i> | 72 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3-4 - Gráfico ilustrando o comportamento dos valores mínimo, máximo e médio de custos entre os cromossomos de cada uma de 500 gerações simuladas no contexto da Simulação 5..... | 82 |
| Figura 3-5: Áreas de restauração por MEG no <i>PEA-51</i> , de acordo com a localização das faltas (áreas circuladas com determinada cor serão restauradas devido a faltas nas seções marcadas com a mesma cor). | 90 |
| Figura 3-6 – Comparações*..... | 96 |
| Figura 3-7 – Comparações*..... | 96 |
| Figura 3-8 – Comparações*..... | 97 |
| Figura 3-9 - Variações de COLF quando se altera a capacidade do MEG disponível para uso no <i>PEA-51</i> (em sua alocação original de chaves)..... | 101 |
| Figura 3-10 – Comparações*..... | 103 |
| Figura 3-11 - Detalhes das vias no contexto do <i>PEA-51</i> | 105 |
| Figura 3-12 – Comparações*..... | 108 |
| Figura A-1 - O problema da lógica circular quando se usa métodos de simulação analítica quantitativa para simular faltas em que haja um dispositivo móvel envolvido..... | 117 |
| Figura B-1: Alimentador de exemplo para ilustração do conceito de área..... | 118 |
| Figura B-2: Alimentador de exemplo, dividido em áreas..... | 119 |
| Figura B-3: Cargas de áreas..... | 120 |
| Figura B-4: Quando numa área ocorre uma falta, ela é dita não-restaurável, haja vista que ela não é separável por chaveamento do ponto de falta. Nesta figura, “3” se tornou uma área não-restaurável..... | 121 |
| Figura B-5: Falta ocorrendo na seção entre os nós 1 e 2..... | 122 |
| Figura B-6: A área 2 torna-se não-restaurável devido a uma falta que ocorre dentre seus limites. As outras áreas passam a ser restauráveis por MEG..... | 123 |
| Figura B-7: A área 4 torna-se não-selecionável, por ter carga superior à capacidade do MEG..... | 124 |
| Figura C-1 - Ilustração do porquê de dispositivos de proteção fixos não necessitem ser contabilizados para efeitos de comparações de custos totais..... | 129 |
| Figura D-1 - Sistema teste, sem chave NO..... | 137 |
| Figura D-2 - Sistema teste, com chave NO..... | 142 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1-1 - Comparação entre estudos anteriores e o método proposto. | 12 |
| Tabela 2-1 - Definições de matrizes booleanas. | 30 |
| Tabela 3-1 - Dados de consumidor do <i>RBTS BUS 5</i> | 65 |
| Tabela 3-2 - Comprimentos e numeração dos alimentadores do <i>RBTS BUS 5</i> | 65 |
| Tabela 3-3 - Parâmetros históricos de confiabilidade do <i>RBTS BUS 5</i> | 65 |
| Tabela 3-4 - Custos médios de interrupção por duração de interrupção, para os consumidores do <i>RBTS-Bus 5</i> | 66 |
| Tabela 3-5 - Índices de confiabilidade do sistema <i>RBTS BUS 5</i> - JONNAVITHULA e BILLINTON (1996). | 66 |
| Tabela 3-6 – Comprimento (comp), carga média (L) e número de consumidores (Nº cons) em cada seção do <i>PEA-51</i> | 68 |
| Tabela 3-7 – Índices de confiabilidade da rede original | 68 |
| Tabela 3-8 - Alguns dados do alimentador <i>BRA-134</i> | 70 |
| Tabela 3-9 - Sinopse das simulações conduzidas | 73 |
| Tabela 3-10: Resultados de validação e geração de valores úteis obtidos para a configuração original do <i>RBTS-Bus 5</i> (*: não se aplica/sem referência). | 78 |
| Tabela 3-11: Resultados de validação e geração de valores úteis obtidos para a configuração original do <i>PEA-51</i> (*: não se aplica/sem referência). | 78 |
| Tabela 3-12: Resultados de validação e geração de valores úteis obtidos para a configuração original do <i>BRA-134</i> (*: não se aplica/sem referência). | 78 |
| Tabela 3-13 - Simulações de otimização de alocação de chaves seccionadoras, sem a presença de MEGs. | 79 |
| Tabela 3-14 - Comparações entre os pares de simulações 1-4, 2-5 e 3-6..... | 80 |
| Tabela 3-15 - Resultados das simulações de otimização, sem MEG, mas com restrições e variações diversas. | 84 |
| Tabela 3-16 - Simulações dos sistemas em suas alocações originais de chaves quando um MEG está disponível para uso a cada falta (MEG com e sem custos adicionais). | 87 |
| Tabela 3-17 - Áreas de restauração por MEG no <i>PEA-51</i> , de acordo com a localização das faltas, e carga total restaurada nessas áreas. | 90 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 3-18 – Distâncias (em km) percorridas pelo MEG, do COLF até o ponto de conexão (que é a área restaurada mais a montante), em relação a cada falta que origina tal restauração..... | 91 |
| Tabela 3-19 - Variações em SAIDI do <i>PEA-51</i> de acordo com algumas variações na posição inicial do MEG..... | 91 |
| Tabela 3-20 - Resultados das simulações completas (otimização de alocação de chaves, sendo que no processo de análise de aptidão de cada solução candidata, há um MEG disponível para uso em cada situação de falta)..... | 92 |
| Tabela 3-21 – Resultados da Simulação 23: variações na capacidade de um MEG, disponibilizado para a alocação original de chaves do <i>PEA-51</i> | 99 |
| Tabela 3-22 – Resultados da Simulação 24: variações na velocidade de um MEG, disponibilizado para a alocação original de chaves do <i>PEA-51</i> | 100 |
| Tabela 3-23 – Resultados da Simulação 25: variações na parcela fixa do tempo de entrega de um MEG, disponibilizado para a alocação original de chaves do <i>PEA-51</i> | 100 |
| Tabela 3-24 - Resultados: primeiramente, otimiza-se a alocação de chaves, sem a presença de MEGs; somente depois, um MEG é adicionado ao alimentador. | 102 |
| Tabela 3-25 - Variações de DEC de acordo com as condições de velocidade do MEG fornecidas pelo algoritmo de Dijkstra. | 106 |
| Tabela 3-26 - Resultados das simulações com dois MEGs | 106 |
| Tabela 3-27 - Áreas de restauração pelo 2º MEG no <i>PEA-51</i> , de acordo com a localização das faltas, e carga total restaurada nessas áreas. | 107 |
| Tabela B-1 - Combinações a uma, duas e três áreas do exemplo..... | 125 |
| Tabela C-1 - Custo de interrupção por tipo de usuário..... | 132 |
| Tabela C-2 – Custos de interrupção de energia – consumidores do tipo residencial (US/kWh, maio 1989)..... | 133 |
| Tabela C-3 - Custos de interrupção de energia – consumidores do tipo comercial (US/kWh, dezembro 1990)..... | 133 |
| Tabela C-4 - Custos de interrupção de energia – consumidores do tipo industrial (US/kWh, dezembro 1990)..... | 133 |

SUMÁRIO

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E MOTIVAÇÕES | 1 |
| 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 7 |
| 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO | 13 |
| 1.4 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO TRABALHO | 15 |
| 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO | 16 |
| 1.6 TERMOS COMUMENTE UTILIZADOS NESTE DOCUMENTO | 17 |
| 2. METODOLOGIA E MODELAGEM | 18 |
| 2.1 INTRODUÇÃO..... | 18 |
| 2.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA | 18 |
| 2.3 MÉTODO DE USO DE MEGS PARA MELHORIA DE CONFIABILIDADE | 27 |
| 2.4 OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE CHAVES CONSIDERANDO MEGS.... | 49 |
| 2.5 EXTENSÃO DO ALGORITMO PARA MAIS DE UM MEG POR ALIMENTADOR..... | 60 |
| 2.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO..... | 60 |
| 3. RESULTADOS | 62 |
| 3.1 INTRODUÇÃO..... | 62 |
| 3.2 DADOS DOS SISTEMAS UTILIZADOS | 63 |
| 3.2.1 RBTS-Bus 5 | 63 |
| 3.2.2 PEA-51 | 66 |
| 3.2.3 BRA-134 | 68 |
| 3.3 SINOPSE DAS SIMULAÇÕES | 73 |
| 3.4 SIMULAÇÕES DE VALIDAÇÃO E GERAÇÃO DE VALORES ÚTEIS (MÓDULO DE SIMULAÇÃO ANALÍTICA DE FALTAS)..... | 77 |
| 3.5 SIMULAÇÕES DE OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE CHAVES SECCIONADORAS, SEM A PRESENÇA DE MEGS | 78 |
| 3.5.1 Simulações sem restrições | 78 |
| 3.5.2 Simulações com restrições e variações diversas | 82 |
| 3.6 SIMULAÇÕES DE INSERÇÃO DE MEG, COM E SEM CUSTOS, MAS SEM OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE CHAVES | 87 |
| 3.7 SIMULAÇÕES COMPLETAS: OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE CHAVES, LEVANDO-SE EM CONTA DISPONIBILIDADE DE MEG..... | 92 |
| 3.8 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE: VARIAÇÕES DE PARÂMETROS DO MEG | 97 |
| 3.9 SIMULAÇÕES DE OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE CHAVES SEM MEG, COM POSTERIOR INSERÇÃO DE MEG..... | 101 |

| | | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.10 | SIMULAÇÃO COM MEGS POSSUINDO DIFERENTES VELOCIDADES POR FALTA..... | 104 |
| 3.11 | SIMULAÇÕES COM DOIS MEGS DISPONÍVEIS | 106 |
| 3.12 | CONCLUSÕES DO CAPÍTULO..... | 109 |
| 4. | CONCLUSÕES..... | 112 |
| 4.1 | CONCLUSÕES GERAIS | 112 |
| 4.2 | CONTRIBUIÇÕES DA TESE PARA A LITERATURA..... | 113 |
| 4.3 | TRABALHOS FUTUROS | 114 |
| APÊNDICE A | ALGUMAS CONSIDERAÇÕES ACERCA DO MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE FALTAS ESCOLHIDO PARA ESTA TESE | 115 |
| APÊNDICE B | MÉTODO DE ESCOLHA DE ÁREAS | 118 |
| APÊNDICE C | CUSTOS RELATIVOS A CONFIABILIDADE | 127 |
| APÊNDICE D | DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE TESTE PARA VERIFICAÇÃO DE RESULTADOS DO ALGORITMO..... | 137 |
| | BIBLIOGRAFIA | 147 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E MOTIVAÇÕES

O controle de índices de confiabilidade num sistema de distribuição de energia elétrica é uma das maiores preocupações das concessionárias de energia elétrica do mundo todo. Isto ocorre pela relação direta que existe entre custo e qualidade de energia suprida aos seus vários consumidores, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais. Mesmo sabendo que as redes de distribuição estão constantemente suscetíveis a falhas, existe uma demanda crescente por energia mais confiável, devido ao aumento da sensibilidade das cargas conectadas à rede e ao maior nível de exigência por parte dos consumidores. Portanto, nota-se buscas constantes por melhores métodos de configuração das redes de distribuição e por métodos mais eficientes de proteção e operação dessas redes, com o intuito de melhorar os índices de confiabilidade.

A instalação de chaves e religadores em alimentadores, e o uso de esquemas de reconfiguração por transferência de carga através de pontos com chaves normalmente abertas são métodos comuns de melhoria de confiabilidade que já vêm sendo empregados e analisados há muitos anos. Esses métodos melhoram os índices de confiabilidade das redes porque, no caso de ocorrência de faltas, as concessionárias podem realizar manobras de reconfiguração com o uso das chaves, na tentativa de se isolar as áreas de falta e permitir a restauração de energia aos pontos da rede que não pertencem à região isolada de falta. Isto faz com que o período de interrupção de fornecimento seja menor para os pontos restaurados. Porém, isso depende do posicionamento das chaves na rede, o que pressupõe que, para cada posicionamento, diferentes manobras são possibilitadas, o que leva à existência de posicionamentos ótimos que permitem uma utilização melhor das chaves existentes, permitindo uma otimização do processo de restauração de energia por manobras.

Alguns métodos de otimização de posicionamento de chaves em redes de distribuição com esta finalidade já foram propostos, como será visto na revisão

bibliográfica. Esses métodos incluem técnicas variadas, com destaque maior para programação baseada em heurística, como algoritmos genéticos e colônia de formigas. Isto ocorre por ser um problema de programação não-linear inteira mista com restrições que não são simples de implementar matematicamente.

Atualmente, com o advento e a melhoria de dispositivos de geração distribuídos na rede, como geração em nível de consumidores, baterias, fontes móveis de energia, como os geradores móveis da concessionária, novas formas de melhoria de confiabilidade vêm sendo estudadas. Neste contexto, incluem-se e destacam-se os Geradores Móveis de Emergência (MEGs), que constituem em uma forma de fornecimento de energia versátil, capaz de restaurar uma gama variada de potência em diferentes pontos de uma rede, de acordo com sua capacidade, particularmente nos casos de faltas e sobrecargas nas redes de distribuição. Os geradores móveis de emergência possuem também a vantagem de poderem ser conectados não apenas a pontos diferentes de um mesmo alimentador, como também a pontos de outros alimentadores, devido à sua mobilidade. Isto é particularmente atraente para as concessionárias de energia, dado que um único gerador móvel pode ser utilizado para melhorar a confiabilidade de mais de um alimentador.

Porém, nota-se que, embora os MEGs possuam diversas vantagens, eles ainda são subutilizados (sobremaneira devido aos custos envolvidos com sua aquisição e manutenção, que caso não sejam compensados pela melhoria de custos associados ao aumento da confiabilidade por eles promovida, não se mostram atraentes financeiramente para as concessionárias). Devido a isto é que se percebe a necessidade de haver análises que contemplem o uso de MEGs e seus impactos em confiabilidade, conjugada com impactos em custos, e sobretudo a necessidade de se otimizar as redes que dispõem dessa tecnologia, no intuito de se extrair o máximo de benefício do uso dos MEGs, de forma a compensar ou até mesmo lucrar com seu uso, em duas vias principais: de um lado, a redução de custos da concessionária; de outro, a redução dos impactos sofridos pelos consumidores.

A literatura ainda contém pouca pesquisa acerca do uso de MEGs, como será visto na revisão bibliográfica. Sobretudo, no que tange otimização de custos e confiabilidade de redes que dispõem de MEG, nenhum estudo foi encontrado, mostrando escassez neste tema que é importante e promissor,

servindo de indicativo de que o presente trabalho pode, além de servir de avanço dos estudos na área, ser fonte de conhecimento prático para concessionárias de energia e engenheiros que busquem por métodos de otimizar o uso de geradores móveis de emergência em redes de distribuição de energia elétrica.

Finalmente, para ressaltar a aplicação prática e atual dos MEGs compila-se a seguir algumas notícias de jornais que relatam o uso de geradores móveis por concessionárias de distribuição de energia elétrica, da Figura 1-1 até a Figura 1-4. É, portanto, um fato notável que o uso prático de tais dispositivos tem sido realizado – muito embora haja carência de estudos teóricos sobre isto na literatura. Seria importante analisar o uso de MEGs na prática, aliando este uso a planejamentos otimizados e estratégias para se extrair o melhor desempenho de tais equipamentos no que tange melhorias de custos e índices de confiabilidade.

Figura 1-1 - Notícia 1

☰ **GLOBO** RIO f t i

Light instala geradores no Leblon por causa de falta de luz

Flavia Lima, , e
20/02/2010 - 00:00 / Atualizado em 01/11/2011 - 21:04



Falta de luz no Leblon obriga a Light colocar gerador de luz na esquina das ruas General San Martin com General Venâncio Flôres. Foto Carlos Ivan Agência O Globo

Fonte: <https://oglobo.globo.com/rio/light-instala-geradores-no-leblon-por-causa-de-falta-de-luz-3051791>. Acesso em 15/07/2020.

Figura 1-2 - Notícia 2

Light fornece geradores para prédios do Leblon que ainda estão sem luz

27/11/2009 às 11h30 - Por Redação SRzd



Os problemas com a falta de luz ainda afetam alguns moradores de bairros na Zona Sul do Rio. Na manhã desta sexta-feira, três prédios do Leblon ainda sofriam com problemas no fornecimento de energia. Por causa disso, a Light informou que vai fornecer geradores para suprir a falta de luz nos locais.

De acordo com a empresa, os prédios estão sem luz desde a noite de quinta-feira, dia 26, quando problemas técnicos na rede subterrânea da Light provocaram um apagão em parte da Zona Sul da cidade. A companhia não informou o total de clientes afetados, mas afirmou que o problema foi solucionado ainda na madrugada, com exceção dos três prédios do Leblon, que ficam na rua Dias Ferreira.

Fonte: <http://www.srzd.com/brasil/light-fornece-geradores-para-predios-do-leblon-que-ainda-estao-sem-luz/>. Acesso em 15/07/2020.

Figura 1-3 - Notícia 4

☰ **G1**
RIO DE JANEIRO

16/03/2011 01h14 - Atualizado em 16/03/2011 01h31

Após mais de 24 horas sem energia, luz é restabelecida na Uerj

Light chegou a instalar geradores para abastecer os laboratórios. O problema começou por volta das 17h de segunda-feira (14).



Uerj ficou sem luz por mais de 24 horas
(Foto: Reprodução / TV Globo)

Após mais de 24 horas **sem energia elétrica**, a luz foi restabelecida por volta das 22h15 desta terça-feira (15), na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (Uerj), no Maracanã, na Zona Norte do Rio. As informações são da Light, concessionária responsável pelo fornecimento de energia na região. O problema começou por volta das 17h de segunda-feira (14).

Fonte: <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2011/03/apos-mais-de-24-horas-sem-luz-energia-e-restabelecida-na-uerj.html>. Acesso em 15/07/2020.

Figura 1-4 – Notícia 5

29/12 às 11h53 - Atualizada em 29/12 às 11h53

Light terá esquema especial para o Réveillon

Jornal do Brasil

De acordo com comunicado enviado à imprensa, a Light também realizou cerca de 4 mil inspeções em sua rede, além de monitoramento preventivo em 44 subestações. "Geradores em *stand by* estarão posicionados em pontos estratégicos para suprir a demanda no caso de eventuais ocorrências", informa o texto.

Fonte: https://www.jb.com.br/index.php?id=acervo/materia.php&cd_matia=787436&dinamico=1&preview=1. Acesso em 15/07/2020.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será feito, nesta seção, um apanhado geral sobre alguns pontos importantes correlacionados aos objetivos que o presente trabalho visa alcançar, apresentando os principais trabalhos encontrados na literatura que os tratam, além da citação de algumas normas relativas ao tema abordado.

A alocação de dispositivos de proteção e manobra em redes de distribuição deve seguir alguns critérios, sendo objeto de estudo de agências regulamentadoras, como pode ser visto nas normas brasileiras encontradas na RESOLUÇÃO Nº24 DA ANEEL (2000) e em todo o conjunto PRODIST (2015).

Para se estimar a confiabilidade de uma dada alocação de equipamentos de proteção e manobra, é preciso determinar a frequência e a duração dos cortes estimados de energia para cada consumidor, para cada possível contingência. Essas estimativas geram índices capazes de medir a confiabilidade da rede. Vários índices podem ser definidos, como no PADRÃO IEEE 1366 (2003). A estimativa da confiabilidade das redes de distribuição motiva até hoje a concepção de trabalhos que abordam exclusivamente esse aspecto das redes de distribuição, como em BROWN (2009).

Devido ao caráter econômico associado às diversas possibilidades de topologias, ao longo dos últimos anos foram sendo criadas ferramentas computacionais com o intuito de otimizar índices de confiabilidade das redes, de acordo com as escolhas de alocação de dispositivos de proteção e manobra. Essas ferramentas possuem diversas variações entre seus autores proponentes – variações essas no que concerne, por exemplo, a modelagem da rede, os índices de confiabilidade analisados, quais equipamentos a se alocar, qual algoritmo que realizará a otimização, dentre outros critérios e restrições. Alguns trabalhos serão resumidos na sequência.

Um dos primeiros trabalhos concernentes à otimização da confiabilidade das redes de distribuição através da realocação de dispositivos de chaveamento foi proposto por BILLINTON e ALLAN (1996). O trabalho lançou a ideia de otimização de redes de distribuição com o uso de algoritmos heurísticos e pôde, àquela época, permitir a obtenção de algumas soluções com boas características de confiabilidade em relação aos custos envolvidos.

No caso, foi utilizado um algoritmo do tipo *simulated annealing* na resolução do problema de alocação otimizada de chaves.

Ainda na década de 1990, SOUDI e TOMSOVIC (1998) formularam um interessante método de modelagem de redes de distribuição para análises de confiabilidade, modelagem esta que passou a englobar, além de chaves, dispositivos de proteção a serem alocados no alimentador, o que significou uma melhoria significativa na otimização da confiabilidade das redes. Essa modelagem é baseada em conhecimentos técnicos e empíricos empregados na construção de redes de distribuição da época, e considera que uma rede é composta por um alimentador principal e algumas derivações laterais – cada um desses ramos apresentando algumas restrições. Nesse contexto, o alimentador principal não deve receber fusíveis e sua única proteção consiste no disjuntor alocado na subestação que o alimenta. As derivações laterais são divididas em várias categorias, as quais serão caracterizadas como tipo 1, 2 ou 3. Uma derivação lateral de tipo 1 é pequena e possui exposição a faltas limitada, e, devido à sua baixa significância, não deve receber fusíveis. Uma derivação lateral de tipo 2 é um pouco maior que a do tipo 1, e pode receber fusíveis. Uma derivação lateral de tipo 3 é longa e/ou possui muitas cargas conectadas, e conseqüentemente é muito exposta a falhas, podendo receber fusíveis, chaves e religadores. Neste trabalho, um método de programação binária foi proposto com o intuito de reduzir-se o custo total da rede (incluindo os custos de equipamentos e confiabilidade) de acordo com a modelagem apresentada.

Embora essa modelagem tenha influenciado outros trabalhos, como SILVA *et al.* (2003), SOHN *et al.* (2006) e SILVA *et al.* (2007), é preciso notar suas limitações, posto que as restrições definidas para cada parte do alimentador nem sempre conduzirão para as soluções ótimas globais, uma vez que tais restrições impedem os algoritmos de testarem a alocação de chaves e dispositivos de proteção em todos os ramos da rede de distribuição. Porém, os citados trabalhos que se basearam nessa modelagem representaram um sólido avanço no problema da otimização das redes, pois os algoritmos utilizados ficaram cada vez mais robustos e bem estruturados. Em SILVA *et al.* (2003), o problema foi analisado por meio de algoritmos genéticos, contribuindo com a ideia de que as soluções ótimas em sistemas de várias barras são melhor

abordadas por algoritmos baseados em programação não-linear. SOHN *et al.* (2006), por outro lado, acrescentou à análise do problema os efeitos de durações prolongadas de interrupção, e no ano seguinte SILVA *et al.* (2007) passou a enfatizar o caráter multi-objetivo do problema, que produziria soluções melhores ao serem considerados, simultaneamente, a alocação de dispositivos de manobra e proteção e seus impactos nas frequências e durações de interrupção dos consumidores e nos custos envolvidos, sugerindo a utilização de um algoritmo tabu para a análise do problema. Nota-se também, em SILVA *et al.* (2007), uma crescente preocupação em não mais classificar os alimentadores em apenas 3 tipos, posto que os autores passaram a dividi-los em 7 tipos – representando uma melhoria na análise de otimização das redes ao possibilitar testes computacionais em um número maior de topologias.

Na linha de algoritmos bio-inspirados, CHEN *et al.* (2006) abordou o problema de alocação de chaves através de um algoritmo imune (baseado no sistema imunológico humano na busca por soluções otimizadas), que embora possuísse a desvantagem de analisar apenas a alocação de chaves, revelou a tendência crescente do uso desta classe de algoritmos na resolução de problemas combinatórios de largo espaço de soluções. Em sequência, foi proposto por MORADI e FOTUHI-FIRUZABAD (2008) um método baseado na otimização por enxame de partículas, que busca regiões ótimas em espaços complexos de possibilidade de soluções através da interação de indivíduos numa população de partículas – também com a desvantagem de alocar apenas chaves, sem se preocupar com o posicionamento de dispositivos de proteção, o que restringe uma análise de confiabilidade mais completa das redes.

Um estudo interessante no problema de alocação de dispositivos de proteção e manobra nas redes de distribuição se deu com o trabalho de TIPPACHON e RERKPREEDAPONG (2009), também na linha de algoritmos bio-inspirados. Foi utilizado o método de otimização por colônia de formigas na análise das possíveis topologias das redes, método este que se mostrou eficaz na resolução do problema, evidenciando novamente as vantagens de se utilizar algoritmos heurísticos na abordagem do problema. Uma característica interessante neste trabalho foi o uso de uma função multi-objetivo, que procurou minimizar simultaneamente três elementos: os índices SAIFI, SAIDI e o custo da rede, o que passou a gerar conjuntos de soluções não-dominadas

de Pareto para a rede, de tal forma que a solução ótima final poderia ser escolhida de acordo com a experiência do engenheiro que analisasse o problema, e de acordo com os pesos que ele atribuísse para cada elemento a ser minimizado. Outra contribuição importante desse trabalho foi a introdução do uso de grafos em árvore para montar a topologia do sistema, que influenciaria vários trabalhos futuros na área, dentre eles ZAMBON *et al.* (2009), FERREIRA *et al.* (2010), FERREIRA e BRETAS (2012), SARDOU *et al.* (2012) e BENAVIDES *et al.* (2013). Os grafos em árvores se mostram melhores formas de se modelar a rede em relação à sua classificação em tipos de alimentadores, pois permitem a análise de todas as combinações de equipamentos alocados em cada ramo da rede e facilitam a análise da operação dos esquemas de proteção.

A consideração das faltas momentâneas foi abordada por FERREIRA *et al.* (2010). Uma função multi-objetivo foi apresentada, que passou a considerar os índices de confiabilidade de faltas momentâneas além dos índices relativos a faltas sustentadas, ambos em relação aos custos envolvidos. Neste contexto, alocar religadores mostrou-se necessário, mas tal formulação, como era de se esperar, não causou melhorias nos índices de confiabilidade relativos a faltas sustentadas na rede que são os responsáveis imediatos pela frustração dos consumidores frente a situações de interrupção, além das multas aplicáveis a concessionárias pela energia não suprida nos períodos de queda permanente de energia.

No trabalho de BENAVIDES *et al.* (2012), o problema de alocação de chaves passou a ser integrado ao problema da restauração da energia, que consiste em buscar formas de se melhorar a confiabilidade da rede ao tentar restaurar energia a pontos desenergizados (isolados por equipamentos de proteção ativados ou chaves seccionadoras abertas) através do fechamento de chaves normalmente abertas na topologia do circuito que conectariam as áreas desenergizadas a áreas energizadas, livres da contingência.

Um estudo interessante, feito por DA SILVA *et al.* (2005), utiliza simulação de Monte Carlo para se estimar distribuições de probabilidade de índices de confiabilidade em sistemas de distribuição, mostrando que essa ferramenta é bem promissora nos estudos de confiabilidade, consistindo numa alternativa de cálculo de índices em relação aos métodos analíticos já presentes na literatura.

Com o avanço de veículos elétricos, geração distribuída e *smartgrids*, novas formas de melhorias de confiabilidade vêm sendo estudadas e implementadas, como é mostrado em QUEVEDO *et al.* (2018). Uma revisão da literatura acerca de *microgrids* encontra-se em HIRSCH *et al.* (2018). Nesse panorama geral, os MEGs estão inclusos.

Os MEGs consistem em dispositivos versáteis de restauração de fornecimento de energia, devido à mobilidade e opções de capacidade encontradas no mercado. A principal vantagem de um MEG reside em sua mobilidade, podendo ser utilizado na restauração de pontos diferentes de um mesmo alimentador ou até mesmo de alimentadores diferentes. Um MEG é facilmente conectável a pontos de um alimentador usando-se garras, e como é conectado a pequenas áreas isoladas e radiais, ajustes de proteção não são necessários (CHOI *et al.* 2018).

O uso prático de MEGs não é novo, como mostrado em O Globo (2010), mas a literatura científica contém pouquíssimos estudos acerca do uso, especialmente em relação a melhorias de custos e índices de confiabilidade. Em JEONG *et al.* (2000), um projeto de gerador móvel de emergência baseado em controlador integrado para back-up de redes de distribuição foi criado e testado, enquanto IWAI *et al.* (2009) realizou estudos sobre o uso de geradores móveis como back-up no fornecimento de energia de empresas do setor de telecomunicações do Japão. Em DAI (2008), foram realizados estudos sobre modificações em esquemas de proteção de redes que utilizam geradores móveis de emergência. Alguns métodos de otimização de alocação de chaves seccionadoras em sistemas de distribuição com geração distribuída foram propostos, como em POMBO *et al.* (2016), mas esses métodos consideram apenas gerações distribuídas fixas – e não dispositivos móveis, como os MEGs.

Algumas análises de despacho de geradores móveis de emergência correlacionados com custos e cargas começaram a surgir nos trabalhos de ZHOU *et al.* (2009) e SHANG *et al.* (2009). Em TANAKA *et al.* (2017), despachos de MEGs em unidades médicas foram analisados. Já em LEI *et al.* (2018), uma análise de despacho foi realizada, em que se propõe dois estágios de despacho: um pré-posicionamento baseado em análises probabilísticas e uma alocação em tempo real, de forma a se otimizar os tempos de

deslocamento no uso dos geradores móveis de emergência no caso de desastres naturais que os demandem. Em CHE (2019), o uso de MEGs também foi analisado em caso de desastres naturais. Em XU *et al.* (2019) e KIM *et al.* (2019), são analisadas questões de resiliência de fontes móveis de energia (MEGs e baterias). Em KWON *et al.* (2018), foi indicado que o uso de dispositivos móveis de energia pode reduzir perdas no sistema.

Mesmo com vasta pesquisa bibliográfica, nenhuma referência foi encontrada na literatura em relação à otimização de custos e confiabilidade global de redes de distribuição que levem em conta o posicionamento das chaves seccionadoras considerando-se o uso de geradores de emergência, que por fornecerem energia à rede, impactam diretamente a posição ótima das chaves. Em resumo, a Tabela 1-1 apresenta uma comparação qualitativa entre o método proposto e outros estudos publicados.

Tabela 1-1 - Comparação entre estudos anteriores e o método proposto.

| | Alocação de chaves | Múltiplos alimentadores adjacentes | Uso de MEG | Pré-posicionamento de MEG | Diferentes perfis de consumidores |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|-------------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| POMBO <i>et al.</i> (2016) | ✓ | | | | |
| SOHN <i>et al.</i> (2006) | ✓ | ✓ | | | ✓ |
| TANAKA <i>et al.</i> (2017) | | | ✓ | | ✓ |
| SHANG <i>et al.</i> (2009) | | | ✓ | ✓ | |
| ZHOU <i>et al.</i> (2009) | | | ✓ | | ✓ |
| LEI <i>et al.</i> (2018) | | | ✓ | ✓ | |
| XU <i>et al.</i> (2019) | | | ✓ | ✓ | |
| KIM <i>et al.</i> (2019) | | | ✓ | ✓ | |
| Método proposto | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Entende-se que, dado o crescente uso de geradores móveis de emergência nas redes, que impactam diretamente seus índices de confiabilidade e seus custos de operação, um algoritmo que otimize o problema multi-objetivo de custos versus confiabilidade de uma rede, no panorama atual da rede de distribuição, deve levar em conta a possibilidade de existência desse tipo de geração distribuída. O objetivo principal deste trabalho é apresentar um método de otimização de custos e índices de confiabilidade de redes de distribuição que disponham de geradores móveis de emergência. Para uma eficiência maior, será necessário otimizar as alocações de chaves seccionadoras nas redes em conjunto com uma estratégia de pré-posicionamento e uso de MEGs. Por um lado, as variadas alocações possíveis de chaves possibilitam a criação de diferentes microgrids em caso de faltas, o que impacta nas possíveis manobras de restauração que podem ser efetuadas; por outro lado, a eficiência destas manobras pode ser significativamente impactada pelas variadas estratégias de pré-posicionamento de MEGs e formas como eles serão utilizados em caso de faltas. Tais fatos motivam a análise conjunta de chaves e MEGs, a qual pode permitir uma melhoria global nos custos e índices de confiabilidade das redes de distribuição.

A modelagem que será desenvolvida deverá permitir que se analise quais áreas são afetadas por cada possível contingência que ocorre na rede, pois, para cada situação de falha, uma determinada operação do esquema de proteção dessa rede é desencadeada (abertura de disjuntores ou rompimento de fusíveis em pontos específicos da topologia, de forma coordenada), o que impacta nos seus índices de confiabilidade. A atuação da proteção permite também, em certas ocasiões (a depender da localidade da falta e da topologia da rede), que se realize a reconfiguração da rede, de forma a diminuir os impactos de interrupção por meio de manobras que restaurem a energia ao máximo número de consumidores possível, através da abertura ou fechamento de chaves seccionadoras e inserção ou não de gerador móvel de emergência.

Ademais, deve-se notar que os MEGs são elementos móveis no contexto de uma rede de distribuição, de forma que faz-se mister a análise de seus pontos de partida, seus deslocamentos e seus pontos de conexão nos

alimentadores. Cada situação de falta poderá gerar diferentes grupos de consumidores elegíveis para restauração por conexão com um MEG. Os consumidores que serão restaurados, bem como os deslocamentos que o MEG deve efetuar para proceder a essas restaurações, em conjunto com uma estratégia de posicionamento inicial ideal do MEG serão todos analisados no método proposto.

No que concerne a otimização da rede, já foi descrito que os algoritmos heurísticos têm se mostrado ferramentas interessantes na abordagem do problema. Notando a tendência crescente do uso de algoritmos bio-inspirados, devido às suas boas características de encontro de soluções otimizadas com menores custos computacionais, será formulado um algoritmo genético, a fim de se melhorarem custos de confiabilidade da rede, que por sua vez levam em conta custos de instalação e operação de chaves seccionadoras, aquisição e operação de geradores móveis de emergência e custos de interrupção de fornecimento de energia. Tal otimização será baseada na análise de alocação de chaves seccionadoras nos alimentadores, de forma a se encontrar quais são as melhores posições para alocá-las ao longo da rede, e também considerará a alocação dos MEGs.

Serão realizadas diversas simulações com diferentes parâmetros, em variados alimentadores e cenários, no intuito de se avaliar a eficácia e a eficiência do método proposto. Tais simulações englobarão tópicos como análises de alocação de chaves em uma ou ambas as extremidades de cada seção do alimentador, restrições práticas variadas (como fixação do número de chaves presentes e limitação de índices de confiabilidade), existência de diferentes perfis de consumidores (cargas prioritárias, ou que possuem maiores custos por interrupção), variações de parâmetros do MEG (capacidade, velocidade, tempos fixos de alocação), dentre outras simulações de potencial interesse para as conclusões a serem levantadas acerca do método proposto.

Assim, espera-se com este trabalho a criação de uma ferramenta de otimização de posicionamento de chaves seccionadoras em redes de distribuição, levando-se em conta o uso de geradores móveis de emergência, com vias de se diminuir custos anuais de alimentadores e permitir melhorias gerais de suas confiabilidades, o que consiste numa análise que não foi

encontrada de forma integral na literatura. Espera-se, assim, que este trabalho contribua aos estudos modernos sobre confiabilidade de redes.

1.4 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO TRABALHO

RODRIGUES, F. M.; ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R. A Method to Improve Distribution System Reliability Using Available Mobile Generators. *IEEE Systems Journal*, 2020 – DOI: 10.1109/JSYST.2020.3015154.

RODRIGUES, F. M.; ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R. Using Mobile Emergency Generators as reliability enhancers in Distribution Systems. *International Transactions on Electrical Energy Systems – ITEES* (2020 – Artigo considerado para publicação com condicional de revisão. Atualmente em R1).

RODRIGUES, F. M.; ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R. Optimal Placement of Switches considering Multiple Scenarios to Improve Distribution System Reliability. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems – JCAE*, v. 31, p. 1508-1519 (2020) – DOI: 10.1007/s40313-020-00652-2

RODRIGUES, F. M.; ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R.. Optimization of Reliability through Switch Reconfiguration in Distribution Systems. *IEEE Latin America Transactions*, v. 17, p. 972-982 (2019) – DOI: 10.1109/TLA.2019.8896820

RODRIGUES, F. M.; ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R. Distribution network reliability optimization through relocation of equipment using genetic algorithms. In: 12° Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Ingeniería de Procesos - CAIP 2015, 2015, Cartagena de Indias. CAIP 2015, 2015.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por quatro capítulos (incluindo este de introdução e os outros que serão descritos a seguir) e quatro apêndices.

No Capítulo 2, o problema a ser abordado será apresentado. Em seguida, será mostrado como MEGs podem ser utilizados para melhorar a confiabilidade de alimentadores de distribuição, sendo apresentado o chamado “método analítico booleano qualitativo-quantitativo” de simulação de faltas para análise de confiabilidade, desenvolvido nesta tese. Será apresentado também o conceito do COLF, que consiste numa estratégia de pré-posicionamento de um MEG numa rede de distribuição que possibilita melhor desempenho desenvolvida nesta tese. Serão mostrados como os índices de confiabilidade individuais, os índices de confiabilidade coletivos e os custos de confiabilidade serão calculados pelo algoritmo desenvolvido. Por fim, será mostrado como se organiza o algoritmo genético utilizado no processo de otimização pretendido, que visa uma otimização dupla: simultaneamente alocar chaves seccionadoras e MEGs num alimentador. Ao final deste capítulo, o fluxograma geral do algoritmo desenvolvido nesta tese será mostrado.

No Capítulo 3, três alimentadores (sendo um de teste e dois reais) serão simulados, levando-se em conta diferentes cenários e parâmetros, com o intuito de tirar-se conclusões acerca do método proposto e elucidar outras questões de ordem prática concernentes ao uso do MEG enquanto dispositivo de melhoria de custos e índices de confiabilidade.

No Capítulo 4, serão abordadas as conclusões gerais desta tese. Ideias acerca de trabalhos futuros também serão comentadas.

No Apêndice A, outros detalhes referentes ao processo de simulação de faltas desenvolvido são explicados.

No Apêndice B, será apresentado com detalhes o método de escolha de áreas para conexão com MEG, método este que foi utilizado no desenvolvimento do algoritmo do Capítulo 2.

No Apêndice C, esclarecem-se alguns aspectos econômicos concernentes ao problema abordado. Serão mostrados alguns detalhes referentes ao custeio de equipamentos que influenciarão na função objetivo do

problema (chaves seccionadoras e MEGs), e informações referentes a custos de interrupções de fornecimento de energia.

Por fim, no Apêndice D, são mostrados dois sistemas desenvolvidos nesta tese, que podem ser utilizados na conferência manual das respostas que o algoritmo desenvolvido retorna, a fim de comprovar sua eficácia. Esses sistemas também poderão vir a ser usados por pesquisadores de confiabilidade, para realizar estudos diversos e viabilizar comparações.

1.6 TERMOS COMUMENTE UTILIZADOS NESTE DOCUMENTO

Alocação de chaves: combinação de determinadas quantidade e localização das chaves seccionadoras normalmente fechadas num alimentador.

Área (de consumidores): conjunto de pontos consumidores num alimentador, que obedeçam a alguma propriedade (a ser especificada em cada caso).

Área de falta: conjunto de consumidores que não podem ser separados do ponto onde ocorre a falta, por não haver chave(s) seccionadora(s) que os separem fisicamente do ponto sob falta.

Área elegível para conexão por MEG: área sob interrupção de fornecimento de energia (após a ocorrência de uma falta e atuação de uma proteção do alimentador) que, devido à suas condições de localização, pode ser isolada da área de falta, mas não está sob possibilidade de ter seu fornecimento restaurado por simples manobras de chaveamento, sendo então elegíveis para conexão com um possível MEG disponível para uso durante a ocorrência daquela falta.

2. METODOLOGIA E MODELAGEM

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, inicialmente, será mostrado o problema a ser resolvido. Serão abordados: a necessidade de se perfazer uma simulação de faltas nos sistemas analisados; a influência da alocação de chaves no problema; o impacto da posição inicial do MEG na análise, bem como de sua capacidade e velocidade média; e como os custos e níveis de confiabilidade dos alimentadores se relacionam com esses fatores.

Depois, será mostrado o método desenvolvido para melhorar a confiabilidade de sistemas a partir do uso de MEGs. Serão apresentados os critérios de uso de um MEG quando ocorre uma falta, bem como será apresentada uma ferramenta para otimização da posição inicial do MEG.

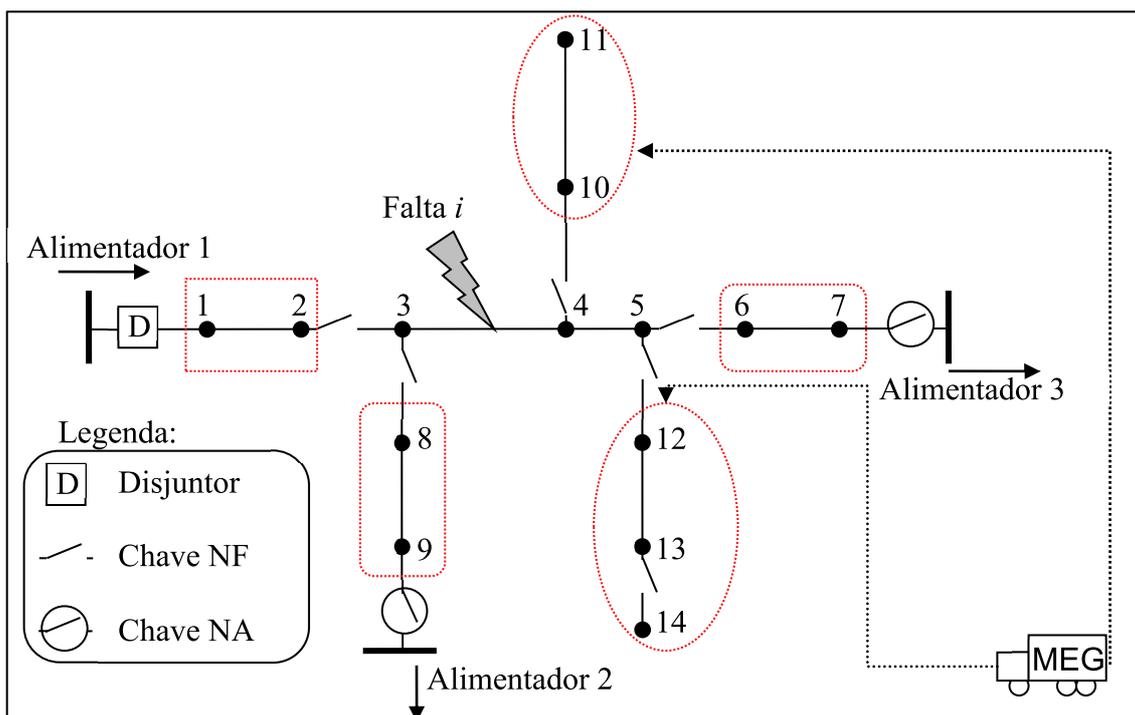
Logo após, será apresentado o método de otimização concomitante de alocação de chaves e uso de MEGs, utilizando-se algoritmos genéticos, desenvolvido nesta tese. Como este último método engloba aquele método mencionado no parágrafo anterior, em alguns momentos este será referido como “método completo”, enquanto aquele de “método parcial”.

Por fim, será mostrado como o algoritmo pode ser estendido para a análise de mais de um MEG por alimentador.

2.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A Figura 2-1 apresenta a ideia geral do método proposto nesta tese. A figura mostra o “Alimentador 1”, que faz parte de uma rede de distribuição radial, que pode vir a ser conectado a outros dois alimentadores, “Alimentador 2” e “Alimentador 3”, por meio de manobras de chaveamento.

Figura 2-1 – Alimentador de exemplo inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Suponha que uma falta sustentada i ocorra no ramo entre os nós 3 e 4. De acordo com o sistema de proteção em vigência nesse alimentador, bem como à presença e localização das chaves seccionadoras que permitem manobras de isolamento de áreas, essa falta desencadeará as seguintes ações:

I - O disjuntor D irá se abrir, levando à situação de interrupção de energia todos os nós: {1, 2, ..., 12, 13, 14};

II – As chaves normalmente fechadas localizadas entre os nós 2-3, 3-8, 4-10, 5-6 e 5-12 podem ser abertas, isolando-se a área de falta composta pelos nós {3, 4, 5}. Tais nós não poderão ter a energia restaurada enquanto a situação de falta não seja completamente extinta, posto que não há chaves que separem os referidos nós do ponto da falta.

III – Enquanto a situação de falta não seja completamente extinta, manobras de restauração podem ser realizadas. Tais manobras são:

III.a: restauração a montante da falta: a chave normalmente fechada localizada entre os nós 2-3 foi aberta, isolando-se a área

composta pelos nós {1, 2} da área de falta. Assim, o disjuntor pode ser fechado, levando à restauração imediata do fornecimento de energia aos nós {1, 2};

III.b: restauração por transferência de carga a outros alimentadores adjacentes: as chaves normalmente fechadas localizadas entre os nós 5-6 e 3-8 foram abertas, isolando-se as áreas compostas pelos nós {6, 7} e {8, 9} da área de falta. As chaves normalmente abertas podem então ser fechadas (caso as restrições de potência e tensão das novas configurações dos alimentadores 2 e 3 assim obtidas sejam atendidas). Isto leva à restauração imediata por transferência de carga dos nós {6, 7}, restaurados no Alimentador 2, e dos nós {8, 9} no Alimentador 3.

A princípio, levando-se em conta as operações de manobra classicamente utilizadas pelas concessionárias de energia, as possibilidades de restauração de fornecimento durante a vigência da falta (isto é, enquanto ela não for completamente extinta para que a configuração normal do Alimentador 1 seja retornada) estariam finalizadas. Porém, neste trabalho sugere-se que sejam utilizados geradores móveis de emergência montados em caminhões para que manobras versáteis de restauração possam ser conduzidas, o que leva a novas possibilidades de manobras:

III.c: restauração por conexão utilizando MEGs: as chaves normalmente fechadas localizadas entre os nós 4-10 e 5-12 teriam sido abertas, isolando-se as áreas formadas pelos nós {10, 11} e {12, 13, 14} da área de falta. Havendo ao menos um MEG disponível para uso pela concessionária, ele poderá ser deslocado para alguma dessas áreas, gerando restauração dos nós que dela fazem parte. Quando maior o número de MEGs disponíveis, maior a quantidade de carga restaurada.

Então, em resumo, para o alimentador indicado na Figura 2-1, a falta *i* provocará:

- interrupção por todo o tempo necessário até que a falta seja corrigida, para os consumidores {3, 4, 5}, que não podem ser restaurados por

qualquer método, já que inclusive não há chaves seccionadoras que possam separar esses consumidores do ponto de falta;

- interrupção por apenas o tempo necessário de se realizar uma manobra de chaveamento a montante da área de falta, para os consumidores {1, 2};

- interrupção por apenas os tempos necessários de se realizar manobras de chaveamentos (isolamento e restauração) a jusante da área de falta, com transferência de carga para alimentadores adjacentes por fechamento de chave NA, para os grupos de consumidores {6, 7} e {8, 9};

- interrupção por apenas o tempo necessário de se deslocar e conectar os MEGs, para possivelmente algum dos grupos de consumidores {10, 11} e {12, 13, 14} (na realidade, apenas um, ambos ou nenhum desses grupos poderá(ão) ser efetivamente conectado(s) com um MEG; isto dependerá do número de MEGs disponíveis para uso e de suas capacidades, que devem ser maiores do que a carga a ser restaurada. Mais detalhes sobre como isto é analisado no método proposto serão mostrados mais à frente neste texto).

As seguintes premissas também devem ser consideradas:

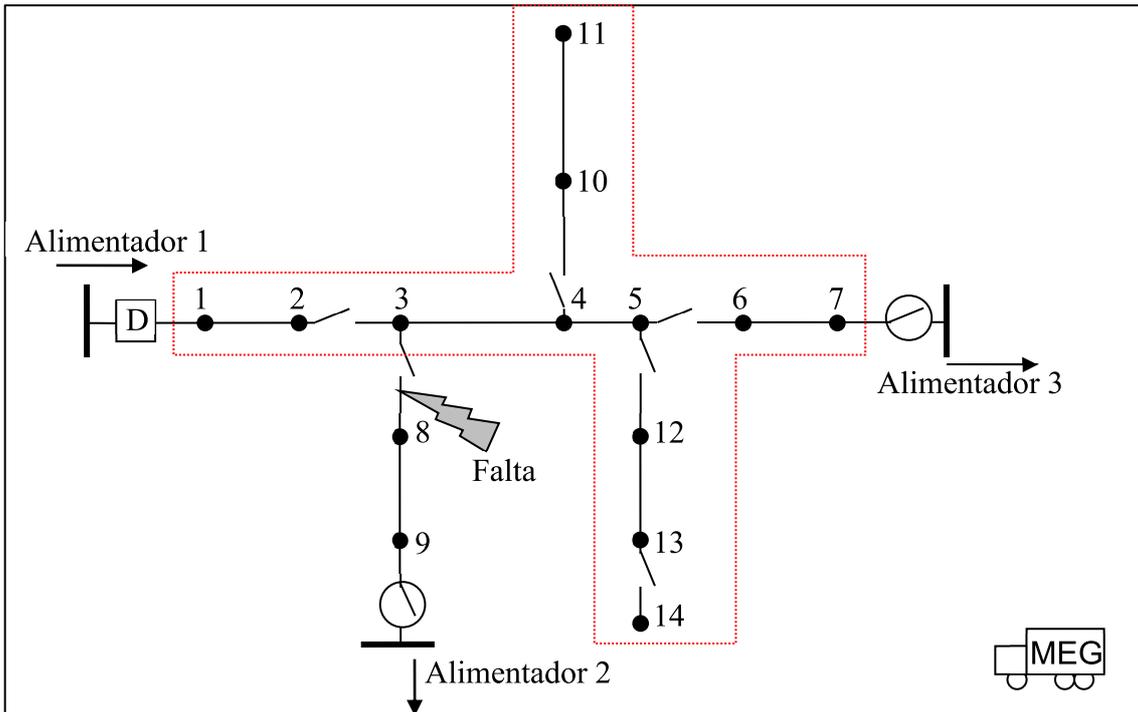
a) **A localização da falta influencia a análise:** cada seção passível de falta no alimentador gerará conjuntos de pontos impactados e restaurados diferentes e, com isto, novas possibilidades de restauração. A Figura 2-2 mostra o mesmo alimentador, mas com uma falta ocorrendo em uma seção adjacente àquela que havia sofrido falta na Figura 2-1. Neste caso, novamente, todos os consumidores serão inicialmente impactados pela ação do disjuntor, que se abre. Porém, todos os consumidores poderão ser restaurados por uma simples manobra de restauração a montante da área de falta, uma vez que a chave NF entre os pontos 3 e 8 pode ser aberta, permitindo que o disjuntor possa voltar à sua configuração inicial, o que restaurará o fornecimento para todos os consumidores interrompidos – exceto {8, 9}, que permanecem interrompidos

enquanto a falta não é corrigida e o alimentador não retornar à sua configuração original de funcionamento.

- b) **A alocação de chaves seccionadoras influencia a análise:** a alocação de chaves no alimentador influencia diretamente quais pontos conseguem ser isolados da área de falta e quais manobras de restauração podem ser efetuadas, a cada situação de falta. Na Figura 2-3, tem-se o mesmo alimentador da Figura 2-1 em relação à topologia básica deste, mas com alocação diferente de chaves. Ademais, a falta ocorre na mesma seção que a original. É possível reparar como tudo muda, embora a falta permaneça na mesma posição. Nesse caso, após a ação do disjuntor, não haveria possibilidade de restauração a montante da falta, já que o disjuntor, caso fosse fechado nesta situação, alimentaria a falta por não haver chave que o separasse da área de falta. Os grupos de pontos {9} e {6, 7} poderiam ser restaurados por manobra de transferência de carga, após abertura das chaves NF que os separam da área de falta, e os grupos de pontos {11} e {13, 14} seriam elegíveis para restauração por conexão com MEG.
- c) **A posição inicial do MEG varia o tempo de interrupção de quem será restaurado por ele:** como o MEG é um dispositivo móvel, que demanda tempo entre a sua solicitação e a viagem até seu destino final, sua posição inicial (isto é, onde ele se encontra estacionado, pronto para atender alguma região elegível para conexão com ele) influenciará nos tempos de interrupção dos consumidores que serão restaurados. Quanto maior a distância entre a posição inicial do MEG e a área que ele restaurará, por mais tempo se encontrará a situação de interrupção. Percebe-se, por exemplo, que o alimentador da Figura 2-4 possui a mesma topologia e alocação de chaves que o alimentador da Figura 2-1, e ambos estão sob mesma situação de falta; mas, dado que a posição inicial do MEG é diferente, os tempos de interrupção para os consumidores que serão restaurados por MEG serão menores na Figura 2-4, haja vista que o MEG se localiza em posição inicial mais próxima de ambas as áreas elegíveis para restauração.

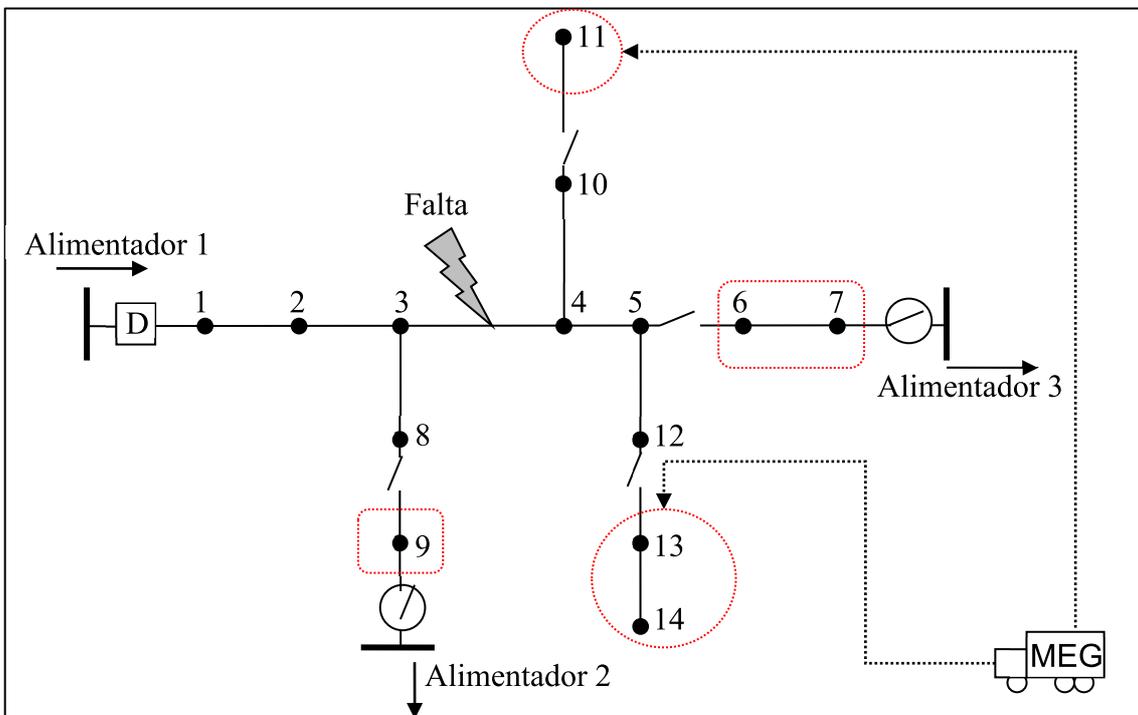
- d) **A capacidade do MEG e sua velocidade influenciam na escolha dos consumidores que serão por ele restaurados:** como o MEG é um dispositivo elétrico que possui uma capacidade de potência fixa, esta capacidade deve ser levada em conta ao se escolher quais consumidores ele irá restaurar. Portanto, uma área elegível para conexão com MEG que possua consumidores cujas cargas conjugadas extrapolem a capacidade do MEG, embora seja elegível, não será conectada ao MEG, pois esse MEG em específico possui capacidade aquém do necessário. Assim, somente áreas elegíveis que possuam somatório de cargas de seus consumidores inferior à potência do MEG poderão ser, de fato, conectadas a este. Por outro lado, se houver mais de uma área elegível com carga capaz de ser atendida pelo MEG, deverá ser instituída uma estratégia de escolha de qual área será restaurada.
- e) **Os custos envolvidos devem ser bem planejados:** é claro que um alimentador com chaves NF em todas suas possíveis posições seria altamente desejável do ponto de vista de possibilidades de manobra, pois uma área de falta sempre poderia ser minimizada nesse caso. Porém, na prática, essa situação seria inviável. Se, por um lado, os custos de interrupção percebidos pela concessionária de energia tendem a diminuir quando mais chaves seccionadoras são disponibilizadas para um alimentador, os custos de aquisição e manutenção dessas chaves oneram a concessionária. Na verdade, os custos com todos os equipamentos que possam melhorar a confiabilidade do alimentador, e que possivelmente sofrerão alteração na busca pelo alimentador ideal, deverão ser levados em conta numa análise profunda – incluindo o valor do próprio MEG (que apenas em certas condições específicas, a serem comentadas nesta tese, poderá ser considerado “de custo nulo”). Assim, os custos totais, que envolvem custos de interrupção e custos de melhoria de confiabilidade, devem ser equilibrados – de forma a se encontrar o menor custo total, obtendo-se um alimentador eficiente.

Figura 2-2 – Repetição do alimentador do exemplo inicial, mas variando-se a seção em falta.



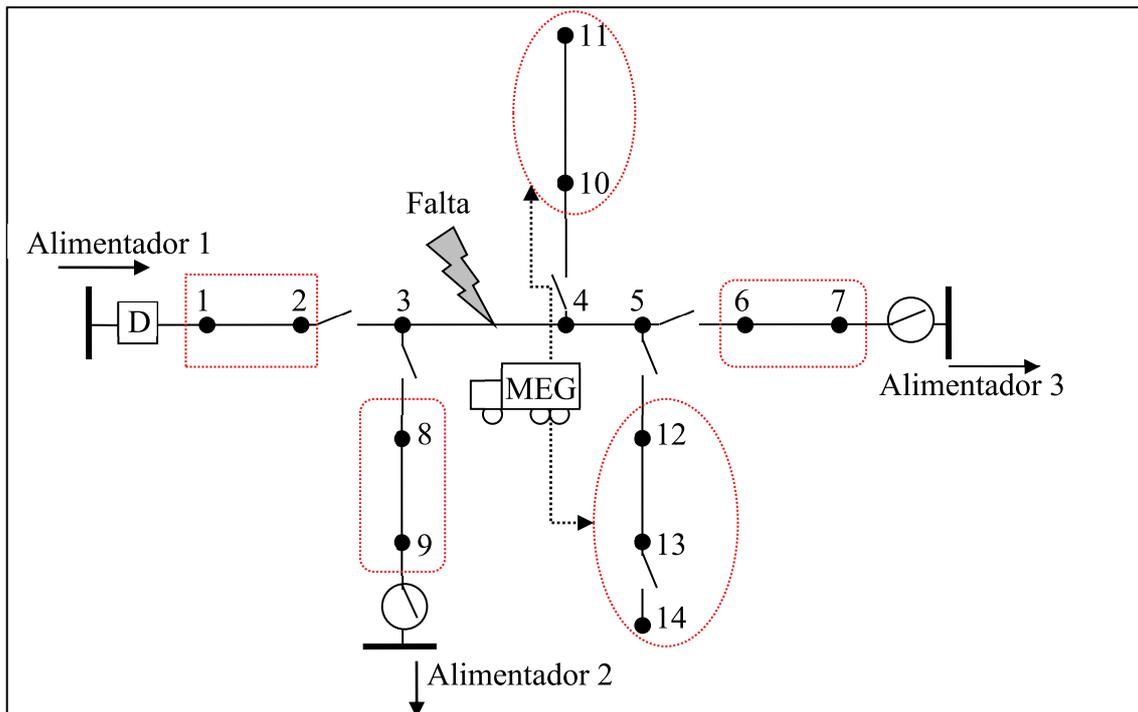
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 2-3 – Alimentador do exemplo inicial com diferente alocação de chaves, mas mantendo-se a mesma seção em falta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 2-4 – Alimentador de exemplo inicial, variando-se a posição inicial do MEG.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Vistos todos os fatores anteriores, chega-se à conclusão de que um alimentador otimizado, na prática, deve levar em conta os custos com interrupções e os custos com melhoria de confiabilidade, possuindo o menor custo total razoável em relação à confiabilidade aceitável. Isto envolve analisar: diferentes faltas possíveis num alimentador; ocorrendo em diferentes alocações possíveis de chaves; havendo possibilidade de diferentes posições iniciais de MEG; e levando-se em conta a possibilidade de haver um número de áreas elegíveis e de menor carga que a potência do MEG, o que demanda ainda uma estratégia de preferência de área a ser por ele restaurada – tudo isto acontecendo numa única solução candidata a alimentador otimizado. Ou seja, há um montante extremamente volumoso de soluções possíveis a serem analisadas (“soluções candidatas¹”), de forma que somente uma delas terá o menor custo total. Este é o problema a ser abordado nesta tese.

¹ Notar que o termo “solução candidata” se refere a uma alocação sugerida de chaves e MEGs, associada a um mesmo alimentador. Ou seja: um mesmo alimentador, por possuir várias possibilidades de alocação de chaves e pré-posicionamento de MEGs, possui várias “soluções possíveis”, sendo que apenas uma dessas será ótima.

Assim, explicado o problema, serão apresentados neste capítulo os pontos fundamentais que serão necessários para sua resolução. São eles:

- I) **Método de simulação de faltas.** Será necessário para que seja possível avaliar os índices de confiabilidade e custos de cada solução candidata, com sua própria alocação de chaves; isto se deve ao fato de que os custos e índices de confiabilidade, para serem calculados, requerem uma análise de como cada falta impacta cada consumidor conectado à rede;
- II) **Método de escolha da melhor posição inicial do MEG.** Será necessário para que sejam avaliadas as melhores posições iniciais para se estacionar um MEG num alimentador, de forma que ele fique de prontidão para que, quando seja solicitado por alguma área elegível e dentro de sua capacidade, ele possa se deslocar consumindo o menor tempo possível em seu trajeto;
- III) **Método de otimização.** Dentre todas as soluções candidatas a ótima, referente às suas alocações de chaves e MEGs, haverá uma única com custo total mínimo. Encontrar essa solução em específico torna-se inviável pelo método de busca exaustiva, o que já foi evidenciado por vários trabalhos elencados na revisão bibliográfica realizada. Destarte, um método heurístico deverá ser adaptado para o caso pesquisado.

Os desenvolvimentos dos três pontos supracitados constituíram contribuições da presente tese, haja vista que:

- embora o ponto I já possua algumas modelagens propostas na literatura, nenhuma se mostrou adequada para adaptação ao uso otimizado de MEGs, de forma que uma nova modelagem foi criada;
- o ponto II encontrava-se totalmente omissa na literatura, não havendo estudos sobre melhor posicionamento para um MEG com vias de se melhorar a confiabilidade de um alimentador;
- embora o ponto III possua algumas abordagens propostas na literatura, a inclusão de MEG (que é um componente móvel, diferentemente da geração distribuída fixa já estudada pela

literatura) em problemas de otimização de confiabilidade de alimentadores não foi encontrada na literatura pesquisada.

Nas próximas seções os desenvolvimentos serão apresentados.

2.3 MÉTODO DE USO DE MEGS PARA MELHORIA DE CONFIABILIDADE

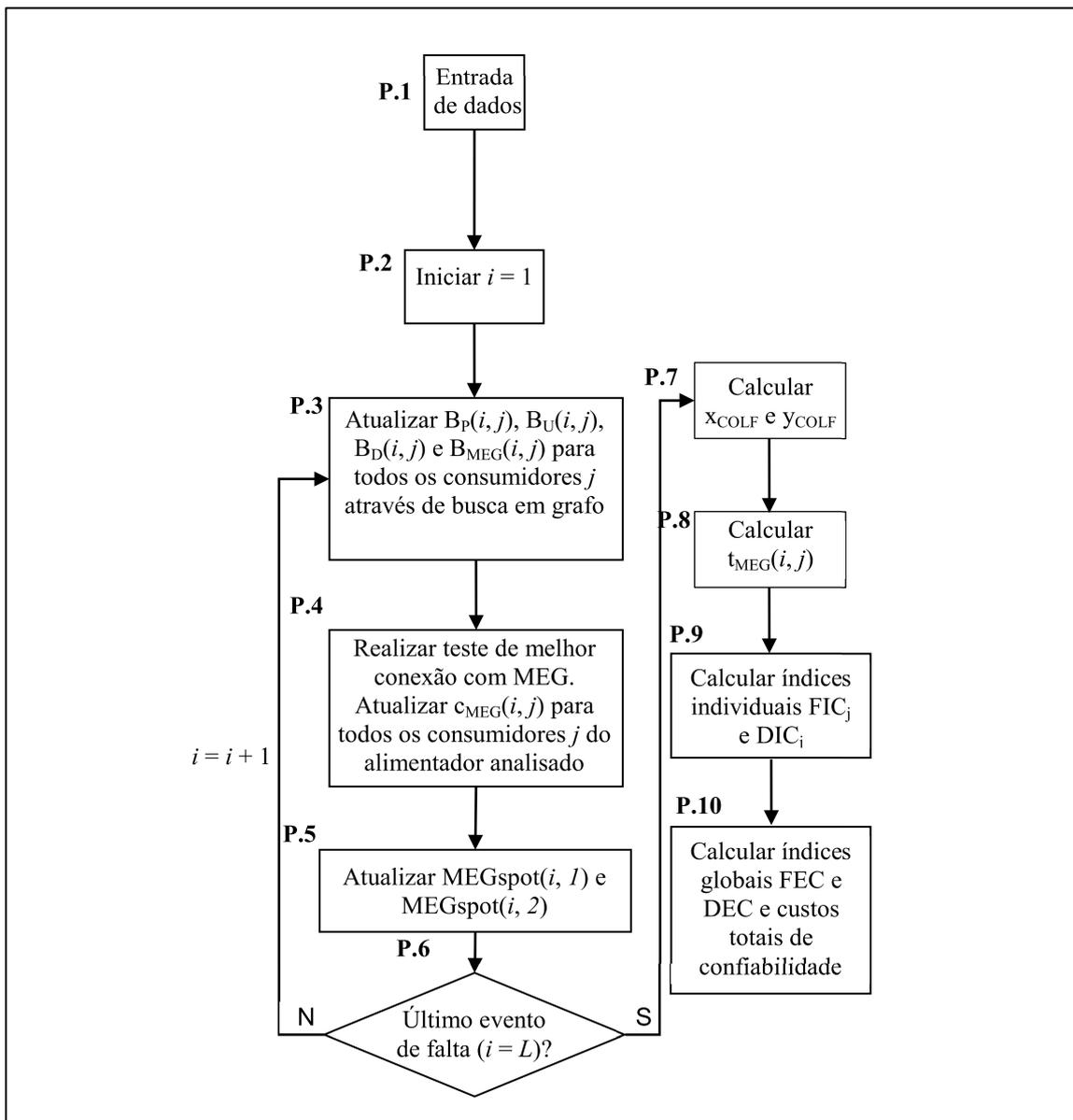
Nesta seção, será apresentado um método² de uso de MEGs visando melhoria de confiabilidade. Será mostrado como um MEG pode ser utilizado num alimentador, quais cargas ele pode atender no caso de faltas, e uma estratégia de pré-posicionamento otimizado deste MEG no contexto do alimentador.

O fluxograma desse método segue na Figura 2-5. Os passos do algoritmo, evidenciados de **P.1** a **P.10** nesse fluxograma, serão explicados na sequência.

No Apêndice D, são apresentados dois sistemas simples de teste e seus resultados retornados pelo algoritmo. Os sistemas são simples o suficiente para que se permita a conferência manual dos resultados, com consequente validação do algoritmo.

² Ressalta-se que, como já mencionado, este é considerado um método parcial no contexto desta tese, haja vista que, na próxima seção deste capítulo, este método será ampliado, no sentido de englobar uma otimização simultânea do pré-posicionamento do MEG com alocação otimizada das chaves seccionadoras presentes no alimentador, o que gerará microgrids mais eficientes para manobras de restauração.

Figura 2-5 - Fluxograma das etapas de simulação analítica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

P.1: Entrada de dados

Lista-se aqui os dados do alimentador que são necessários para que o algoritmo possa efetuar os próximos passos. Destarte, tais dados devem ser fornecidos ao algoritmo neste passo inicial.

Tais são os dados:

- Os nós do alimentador a ser otimizado, organizados em forma tabular (“de” e “para” de cada seção entre nós);

- A carga total média (em kW) demandada em cada nó;
- O número de consumidores conectados a cada nó;
- A função de dano média de cada nó (em US\$/kWh);
- A taxa de faltas (λ , em faltas/ano) de cada seção de alimentador existente entre dois nós;
- O tempo médio de reparo de faltas (r , em horas/falta) de cada seção de alimentador existente entre dois nós;
- A localização de cada equipamento de proteção e manobra no alimentador (como disjuntores, religadores, fusíveis, chaves NA e NF);
- O tempo de manobras de chaveamentos (s_k no caso de aberturas de chaves NF e s_{NO} no caso de transferência de carga por fechamento de chave NA).
- As coordenadas X e Y (em km) de cada nó no plano onde se encontram;
- O tempo de manobra de uma chave seccionadora;
- A capacidade do MEG utilizado;
- A velocidade média do MEG utilizado.

P.2: Início da simulação analítica qualitativa de faltas

A primeira seção passível de faltas será analisada, de modo que o algoritmo, por meio de busca em grafo, buscará os efeitos desta falta no alimentador. A princípio, esta simulação analítica se referirá a uma análise qualitativa, ou seja, constatar-se-á, por meio de valores lógicos booleanos, o que acontece com cada consumidor na ocasião desta falta (ou seja, quais serão impactados, e dentre estes, quais podem ser restaurados, e por qual método). Detalhes quantitativos serão analisados mais à frente.

P.3: Geração de valores booleanos

Nesta seção, será apresentado o raciocínio que rege a parte qualitativa da simulação analítica desenvolvida para esta tese. Serão definidos alguns valores lógicos booleanos e algumas matrizes relacionadas a essa prática, que deverão ser gerados pelo algoritmo para cada consumidor j do alimentador a cada situação de falta i .

Os valores booleanos simplesmente indicarão o que acontece com cada nó do alimentador j em cada situação de falta i , de forma puramente qualitativa (1: verdadeiro; 0: falso). Impactos quantitativos decorrentes dessas faltas, que acarretarão variações em índices de confiabilidade e em custos, serão futuramente calculados em outros passos, a partir desses valores booleanos gerados, e consistirão no aspecto quantitativo da simulação analítica.

Identificando como j a variável de cada consumidor, dentre todos os n consumidores presentes nesse alimentador ($j = 1, 2, \dots, n$), e como i a variável de cada uma das seções passíveis de faltas analisada pelo algoritmo, dentre todas as L seções que existem no alimentador ($i = 1, 2, \dots, L$), serão definidas matrizes booleanas de dimensões (L, n) , consolidadas na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Definições de matrizes booleanas.

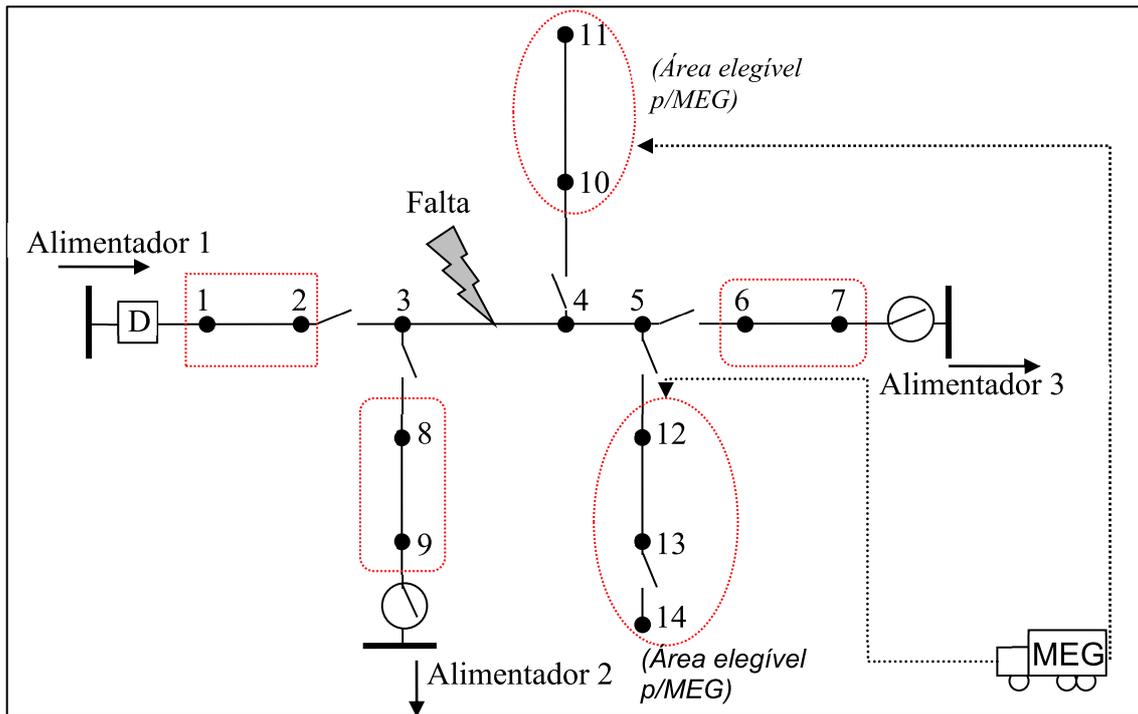
| Matriz | Definição |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B_P (P: "protection") | Indica quais consumidores j sofrerão interrupção de energia quando a falta i ocorre. Assim, $B_P(i, j) = 1$ será atribuído para todos os consumidores j que estão a jusante do dispositivo de proteção que atua na ocorrência da falta i . Caso contrário, $B_P(i, j) = 0$. |
| B_U (U: "upstream") | Indica quais consumidores j poderão ter seus fornecimentos restaurados por manobra de restauração por chave a montante do ponto de falta. Se há chaves NF simultaneamente a montante do ponto de falta e a jusante do dispositivo de proteção que atuou, esta chave NF pode ser aberta, isolando a área de falta do dispositivo de proteção, que poderá ser resetado. Isto faz com que o fornecimento seja restaurado para todos os consumidores j que não estão a jusante da chave NF aberta dessa maneira. Assim, $B_U(i, j) = 1$ será atribuído para todos os consumidores j restaurados dessa forma durante a ocorrência dessa falta i . Caso contrário, $B_U(i, j) = 0$. |
| B_D (D: "downstream") | Indica quais consumidores j poderão ter seus fornecimentos restaurados por manobra de transferência de carga a outros alimentadores adjacentes ao alimentador simulado. Se o consumidor j está localizado em uma área do alimentador que possui simultaneamente uma chave NF a jusante da área de falta e uma chave NA separando essa área do consumidor de um alimentador adjacente, de forma que a chave NF possa ser aberta para isolar a área de falta da área do consumidor e a chave NA possa ser fechada (caso as restrições de tensão e carga sejam atendidas), a transferência de carga poderá ser efetuada. Nesse caso, $B_D(i, j) = 1$ será atribuído para todos os consumidores j restaurados dessa forma durante a ocorrência |

| | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | <p>dessa falta i. Caso contrário, $B_D(i, j) = 0$.</p> |
| B_{MEG} | <p>Indica quais consumidores j se encontram em áreas passíveis de serem restauradas por MEG durante a ocorrência de falta i. Isto ocorre quando o consumidor j está em uma área do alimentador que, podendo ser isolada da área de falta por chave NF, ainda não tenha sido restaurada por outros métodos. Será definido que esse consumidor se encontra em uma área topologicamente viável para a conexão com MEG, já que não há restrições quanto às características posicionais dessa área em relação a uma possível conexão com um MEG. Neste caso, $B_{MEG}(i, j) = 1$ será atribuído para todos os consumidores j. É necessário observar que este ainda é um critério preliminar para se analisar áreas elegíveis para conexão com MEG. Critérios como número de MEGs disponíveis para uso nesta falta (necessário pois uma mesma falta pode conduzir, por exemplo, a duas áreas topologicamente elegíveis mas que irão disputar um único MEG disponível), ou capacidade do MEG (pois uma área topologicamente elegível pode possuir demanda de energia elétrica superior à capacidade do MEG), serão analisados em outro passo do algoritmo, e possuirão explicação própria no presente texto. Caso contrário, $B_{MEG}(i, j) = 0$.</p> |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Figura 2-6 mostra o mesmo exemplo de alimentador que foi apresentado na Figura 2-1. Essa situação exemplificará a geração de booleanos relativos à falta analisada.

Figura 2-6 - Exemplo de geração de valores booleanos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Supondo que, das L faltas que serão simuladas, a falta entre as seções 3 e 4 retratada seja a de número $i = 3$. Neste caso:

- Área de falta: região composta pelos consumidores do conjunto $\{3, 4, 5\}$. Tais consumidores não podem ser separados do ponto de falta devido à inexistência de chaves NF entre a falta e eles, de forma que eles seguem impossibilitados de serem restaurados por qualquer meio, sofrendo com isso a interrupção em seu tempo total, até que a falta seja extinta e a situação do alimentador normalizada;
- O primeiro dispositivo de proteção a montante da falta é o disjuntor, de forma que ele atuará e provocará a interrupção no fornecimento de energia a todos os nós a ele jusantes, ou seja, consumidores pertencentes ao conjunto $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13\}$. Portanto, os booleanos $B_P(3, j)$ serão iguais a 1 para todo $j = 1, 2, \dots, 12, 13$ (reparar que a linha da matriz de booleanos B_P é 3 pois ela se refere

à análise da falta em tela, que é $i = 3$. As colunas serão referentes aos booleanos referentes a cada consumidor sob tal situação de falta);

- Os consumidores do conjunto $\{1, 2\}$ podem ser restaurados por manobra de restauração a montante da área de falta, porque a chave NF entre os nós 2 e 3 pode ser aberta, de modo a se isolar a área de falta da área a montante desta, e o disjuntor que seguia aberto pode então ser fechado. Portanto, $B_U(3, j) = 1$ para $j = 1, 2$;

- Os consumidores do conjunto $\{6, 7, 8, 9\}$ podem ser restaurados por manobra de restauração a jusante da área de falta por transferência de carga a outros alimentadores. Note que as chaves NF entre os nós 5 e 6 e entre os nós 3 e 8 podem ser abertas, de forma a isolar as áreas contendo os conjuntos de consumidores $\{6, 7\}$ e $\{8, 9\}$ da área de falta. Em sequência, as chaves NA podem ser fechadas, o que permite a transferência de carga dos conjuntos de consumidores $\{6, 7\}$ e $\{8, 9\}$ para os alimentadores 2 e 3, respectivamente. Portanto, $B_D(3, j) = 1$ para $j = 6, 7, 8, 9$;

- Os consumidores dos conjuntos $\{10, 11\}$ e $\{12, 13\}$ são *a priori* elegíveis para restauração por conexão a um MEG, haja vista que eles são consumidores que ainda não foram restaurados por nenhuma manobra, ao mesmo tempo em que se encontram em regiões que podem ser isoladas da área de falta por meio da abertura de chaves NF (chaves entre as seções 4 e 10 e entre as seções 5 e 12). Portanto, $B_{MEG}(3, j) = 1$ para $j = 10, 11, 12, 13, 14$.

Portanto, os valores booleanos das matrizes B_P , B_U , B_D e B_{MEG} são atualizados quanto à linha 3 de cada uma dessas matrizes durante a análise qualitativa da falta $i = 3$. Lembrando que todas essas matrizes são de dimensões (L, n) , sendo as faltas $i = 1, 2, \dots, L$ e os consumidores $j = 1, 2, \dots, n$, tem-se que, a cada análise de uma nova falta, a linha correspondente das matrizes de booleanos é atualizada, gerando a análise qualitativa do que ocorre com os consumidores sob cada situação de falta nas seções do

alimentador simulado. Ou seja, cada falta i gera um vetor-linha de booleanos, posicionado na linha i da matriz de booleanos.

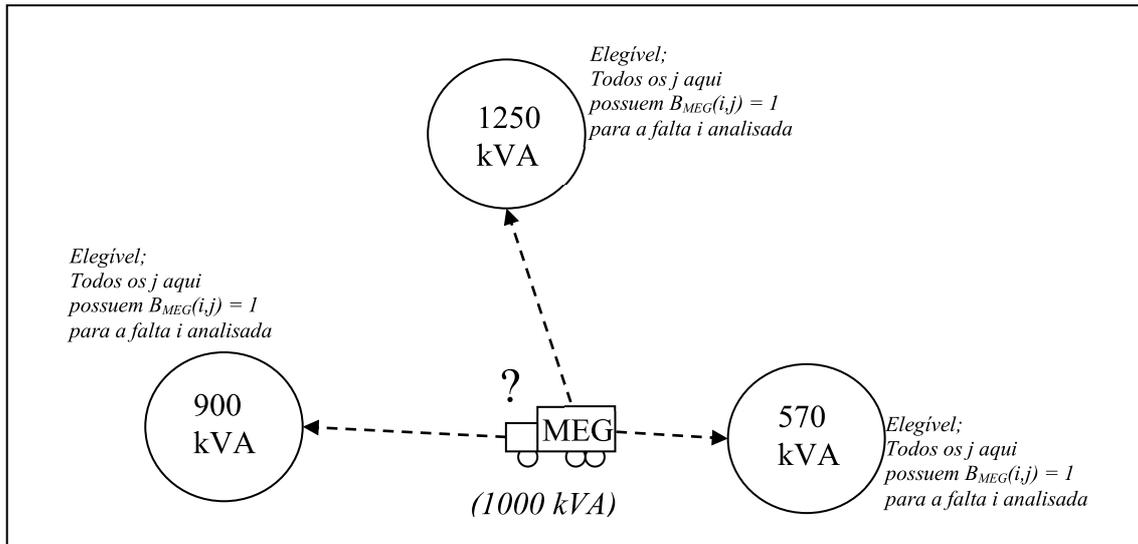
P.4: Teste de melhor conexão com o MEG

Antes que i seja atualizado para $i + 1$ e uma nova falta seja testada, com geração de booleanos próprios que integrarão a próxima linha das matrizes de booleanos B_P , B_U , B_D e B_{MEG} , é necessário que, neste ponto, sejam definidos quais consumidores serão de fato conectados com o MEG, isto é, qual(is) das áreas elegíveis para conexão com MEG (que são as áreas que contém consumidores j com booleanos $B_{MEG}(i, j) = 1$ para a falta analisada) receberá(ão), efetivamente, conexão com o MEG. Isto é necessário para que se saiba os pontos de conexão do MEG no alimentador, de forma a se mapear tais pontos para, depois, ser implementada uma estratégia de escolha da posição inicial do MEG, conforme já foi discutido neste capítulo.

É necessário, para tal, definir um novo tipo de variável booleana, com sua correspondente matriz. Deve ser recordado que $B_{MEG}(i, j) = 1$ apenas estabelece quais são os consumidores j elegíveis *a priori* para a restauração com MEG, de um ponto de vista unicamente posicional (áreas ainda não restauradas e que são favoráveis à conexão com MEG quanto à existência de chaves NF que podem isolá-las da área de falta). Como já foi explicado, isto não garante ainda que tais áreas serão de fato restauradas por MEG. Portanto, é necessário que se estabeleça uma série de testes para que se avalie quais consumidores serão realmente conectados ao MEG.

Por exemplo, suponha que um MEG de 1000 kVA esteja disponível para uso durante determinada situação de falta, e que nesta situação existam três combinações de áreas do alimentador que sejam *a priori* elegíveis para a restauração por MEG ($B_{MEG}(i, j) = 1$ para os consumidores j presentes nessas três áreas). Suponha, também, que as cargas dessas três combinações sejam 570 kVA, 900 kVA e 1250 kVA, conforme Figura 2-7. Obviamente, é impossível que todos os consumidores que receberam booleano $B_{MEG}(i, j) = 1$ nessa situação possam ser restaurados por MEG.

Figura 2-7 - Estabelecimento de uma lógica de algoritmo para que o MEG escolha a melhor combinação de área para conexão, dentre todas as elegíveis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

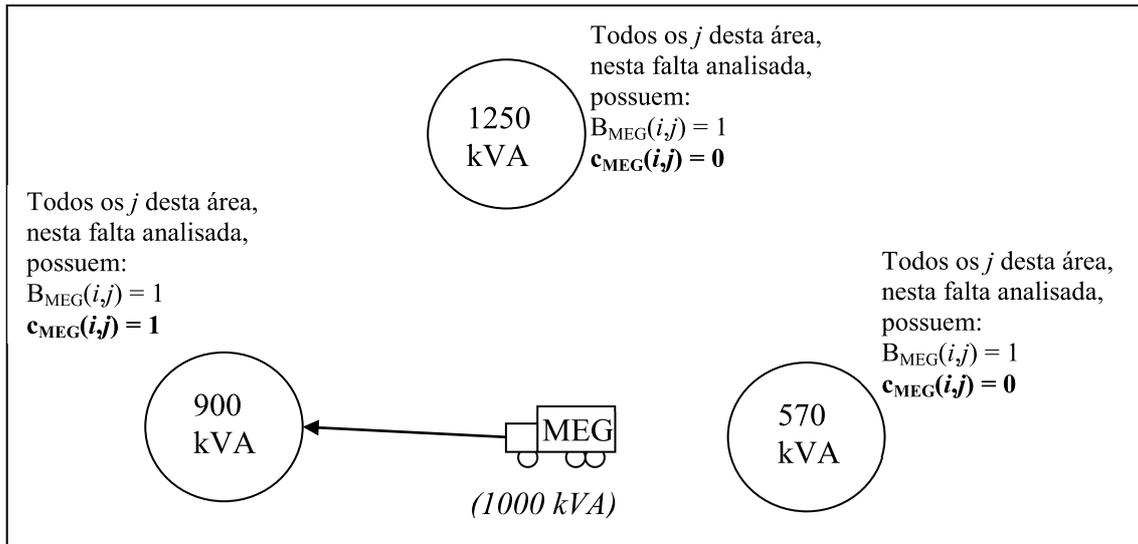
Assim, a maneira definida para se determinar qual(is) dessas três áreas será restaurada é que o algoritmo proceda à seguinte análise:

- dispor as combinações de cargas em cada área em ordem de carga total decrescente (nesse caso do exemplo, seria a seguinte ordenação: 1250 kVA, 900 kVA e 570 kVA);
- eliminar as combinações cujas cargas excedem aos limites do MEG (nesse caso do exemplo, a combinação de 1250 kVA seria desconsiderada, sobrando na listagem 900 kVA e 570 kVA);
- dar prioridade à primeira combinação da lista, haja vista que será a restauração de maior carga dentro da capacidade do MEG (nesse caso do exemplo, a combinação de 950 kVA é que seria a escolhida para restauração).

Portanto, neste passo, o algoritmo roda o teste para a melhor conexão com o MEG disponível, realizando as análises de carga e capacidade para as áreas que possuem consumidores j com valores booleanos $B_{MEG(i, j)} = 1$ para a falta i analisada. A área elegível com maior carga dentro da capacidade do MEG receberá a confirmação de restauração por MEG por meio da ativação de valor booleano $c_{MEG(i, j)} = 1$ para todos os consumidores j contidos nessa

combinação contemplada, enquanto as outras áreas, mesmo sendo elegíveis topologicamente, receberão $c_{MEG}(i, j) = 0$, conforme Figura 2-8. Maiores detalhes de como isso é realizado computacionalmente se encontram no Apêndice B.

Figura 2-8 - Após o crivo realizado pelos passos de escolha de conexão dentre os elegíveis, booleanos de confirmação são gerados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

P.5: Atualização de MEGspot

Uma vez gerada a confirmação de quais consumidores j serão de fato restaurados por MEG, o algoritmo irá armazenar a informação de conexão do MEG durante a falta i analisada na primeira coluna e uma matriz denominada MEGspot, de dimensões $L \times 2$.

Será definido que o primeiro nó mais a montante da área restaurada é que será o local de conexão do MEG com a área por ele restaurada, haja vista que este é o nó de tal área que é o mais próximo possível da chave NF que será aberta para a efetuação da conexão com o MEG. Assim, no exemplo da Figura 2-6, se a área a ser restaurada durante a falta $i = 3$ for a área que contém os consumidores $\{12, 13, 14\}$, $MEGspot(3, 1) = 12$, já que este é o nó da área mais próximo da chave NF aberta para se proceder ao seu isolamento.

Já a segunda coluna da matriz MEGspot irá armazenar a carga total restaurada nessa situação, ou seja, a soma das cargas individuais dos nós contidos na área restaurada. Se nesse mesmo exemplo da Figura 2-6, a área

restaurada {12, 13, 14} for tal que a carga conectada ao nó 12 é de 450 kVA, a carga conectada ao nó 13 é de 420 kVA e a carga conectada ao nó 14 é de 100 kVA, a área restaurada possuirá uma carga total $450 + 420 + 100 = 970$ kVA, de modo que $MEGspot(3, 2) = 970$.

Em suma, nesse exemplo, a terceira linha de MEGspot (terceira pois é referente aos dados de conexão com MEG vigentes na situação de falta $i = 3$) seria preenchida por um vetor-linha (12, 970), simbolizando que o MEG será conectado no nó 12, e ele suprirá uma carga de 970 kVA.

A importância de se gerar a matriz MEGspot enquanto a análise qualitativa de booleanos é realizada a cada falta ficará mais clara quando proceder-se à escolha da melhor posição inicial do MEG no alimentador, o que será explanado na próxima seção. Mas adianta-se que, sabendo o ponto de conexão do MEG em cada situação de falta e quais foram as cargas demandadas nessas conexões (respectivamente, primeira e segunda colunas de MEGspot), a análise da posição inicial ideal do MEG no contexto do alimentador poderá ser feita sem maiores dificuldades, pois já será sabido para quais coordenadas ele deverá se deslocar na ocorrência de cada falta e qual potência será dele exigida em cada um desses casos – mesmo antes de se proceder ao acúmulo de impactos nos índices de confiabilidade dos pontos, o que evidencia a vantagem de se separar a análise qualitativa das faltas da análise quantitativa, nessa simulação com MEG.

P.6: Checagem de último evento de falta

Neste ponto, as matrizes booleanas B_P , B_U , B_D , B_{MEG} e C_{MEG} , e a matriz de dados de conexão MEGspot estão todas definidas em suas linhas i , de acordo com o que ocorreu após a análise qualitativa da situação da falta i . É checado, então, se este é o último evento de falta a ser analisado na simulação analítica.

Em caso negativo, o valor de falta é então incrementado e novos blocos de vetor-linha são gerados para todas essas matrizes, retornando o algoritmo para o passo **P.3**, que irá proceder à análise da falta $i + 1$. Isso acontece até o ponto em que todas as L faltas são analisadas, de modo que todas as matrizes completem seus preenchimentos, o que encerra a parte qualitativa da simulação analítica de faltas, e prepara o algoritmo para os próximos passos:

seleção da posição inicial do MEG, e posteriormente análise da parte quantitativa da simulação analítica de faltas.

Em caso positivo (o que significa que as matrizes B_P , B_U , B_D , B_{MEG} , C_{MEG} e $MEGspot$ estão definidas em todas as suas linhas e colunas), o algoritmo passa para o ponto **P.7**.

P.7: Calcular as coordenadas do COLF

Neste ponto, as matrizes de booleanos da análise qualitativa e a matriz $MEGspot$ para todas as situações de restauração por MEG já se encontram finalizadas para o alimentador simulado. Assim, alguns parâmetros relevantes podem ser calculados. O primeiro deles será a melhor posição inicial para estacionar o MEG para atender o alimentador em estudo, ou seja, em quais coordenadas ele deve se posicionar para atender as áreas a serem restauradas no caso de faltas de modo a tornar o processo o mais eficiente possível.

Para tal, foi criado neste trabalho o conceito de “COLF” (*Center of MEG Operations weighted by their Loads and Failure rates*). O COLF indicará as coordenadas (x, y) no alimentador onde o MEG deverá ser estacionado para futuros usos, e é definido como o centro das coordenadas que receberam conexão com o MEG no contexto das simulações de faltas dos passos anteriores, sendo que essas coordenadas de conexão serão pesadas pelas cargas de restauração (já que, quanto maior a carga restaurada, mais importante ela é no contexto de melhoria de custos de confiabilidade) e pelas taxas de falha que levaram a essas manobras de restauração por MEG (já que, quanto maior essa taxa, mais vezes no ano um MEG será provavelmente enviado para esses pontos).

O COLF pode ser calculado utilizando-se as informações armazenadas na matriz $MEGspot$ em conjunto com as informações sobre coordenadas de pontos existentes no conjunto de dados iniciais fornecido ao algoritmo ana sua entrada de dados. Assim, sabendo-se a numeração de um nó, consegue-se obter suas coordenadas. Particularmente, lembrando que $MEGspot(i, 1)$ armazena o nó onde houve conexão com MEG durante a falta i , as coordenadas desse nó podem então ser buscadas nos dados iniciais. Essas coordenadas serão chamadas de $x_{MEGspot(i, 1)}$ e $y_{MEGspot(i, 1)}$. Lembrando que

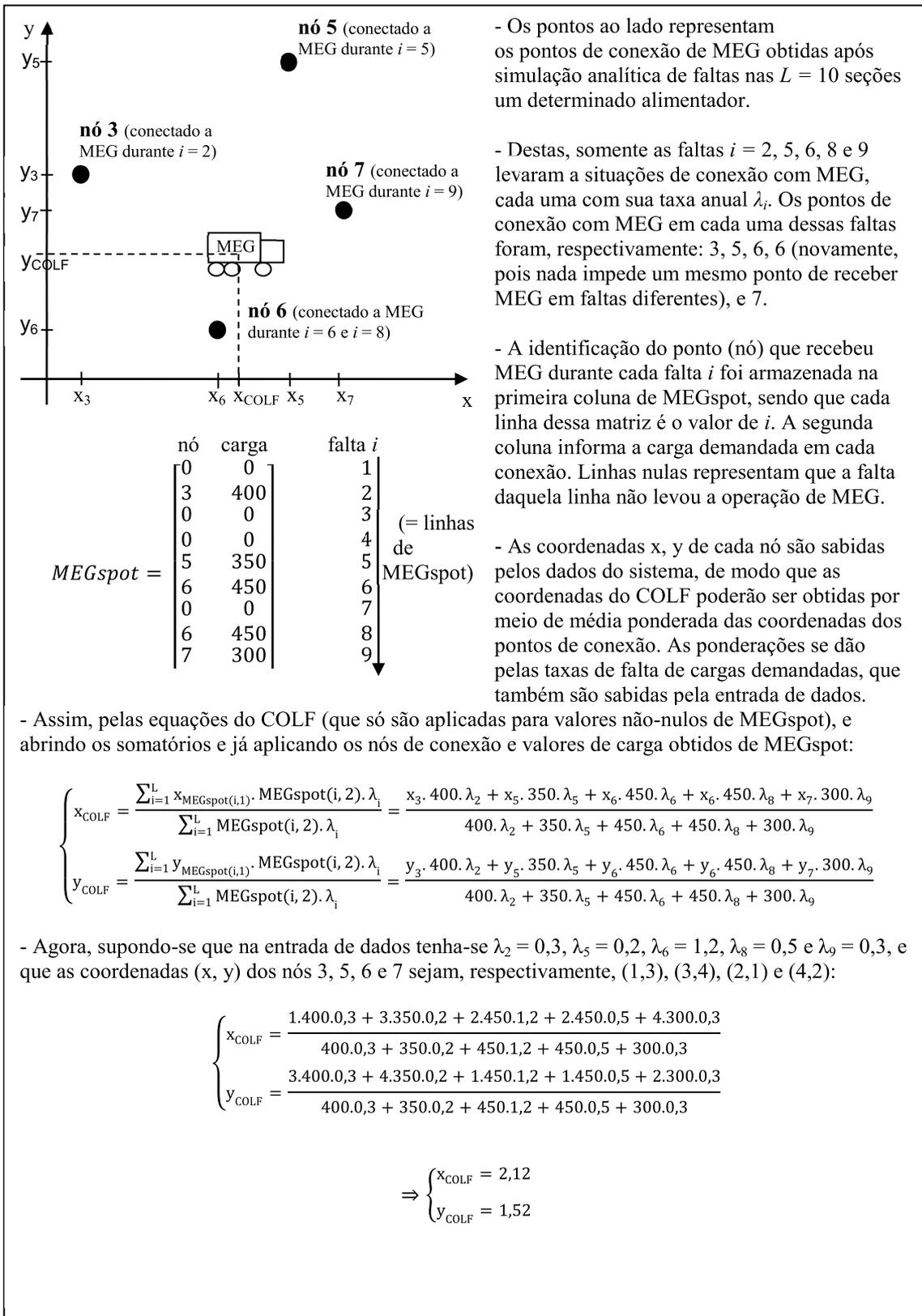
MEGspot($i, 2$) armazena o total de carga dos nós que foram restaurados durante o evento de falta i , e que λ_i é a taxa de falha desse evento, é possível então calcular esse centro de coordenadas pesadas por carga e taxa (COLF) através das equações (2-1):

$$x_{COLF} = \frac{\sum_{i=1}^L x_{MEGspot(i,1)} \cdot MEGspot(i, 2) \cdot \lambda_i}{\sum_{i=1}^L MEGspot(i, 2) \cdot \lambda_i} \quad (2-1)$$

$$y_{COLF} = \frac{\sum_{i=1}^L y_{MEGspot(i,1)} \cdot MEGspot(i, 2) \cdot \lambda_i}{\sum_{i=1}^L MEGspot(i, 2) \cdot \lambda_i}$$

As equações (2-1) só são aplicadas a casos de faltas i que levaram ao uso de MEG. Os casos de falta em que não ocorrerem conexões com MEG não influenciam no valor de COLF. Ademais, a Figura 2-9 ilustra a lógica do uso do COLF com um exemplo.

Figura 2-9 - Exemplo de cálculo de COLF



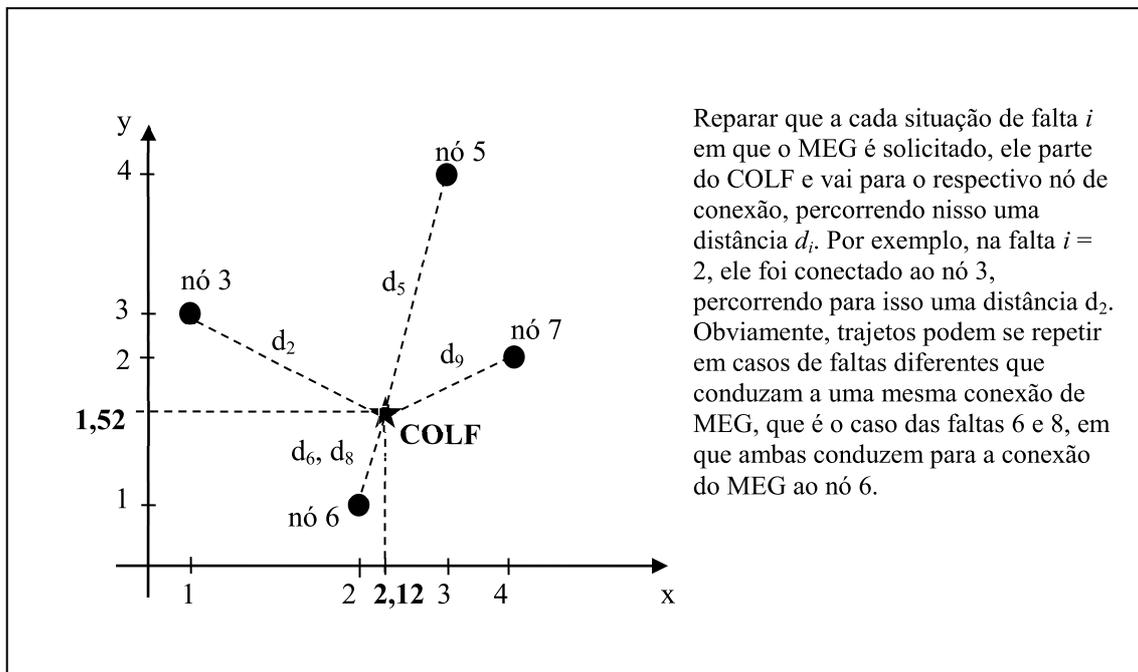
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

P.8: Calcular os tempos de deslocamento do MEG

Uma vez obtido o COLF, ter-se-á a posição inicial do MEG, ou seja, de onde ele partirá de modo a ser conectado em cada solicitação. Como também dispõe-se das coordenadas dos pontos onde o MEG foi conectado na ocasião de cada falta i (as já mencionadas $x_{MEGspot(i, 1)}$ e $y_{MEGspot(i, 1)}$), a distância entre o ponto de conexão do MEG e a posição inicial do MEG no caso da falta i é dada pela equação (2-2), oriunda da geometria analítica (distância entre dois pontos). Isto pode ser visto graficamente com os mesmos dados do exemplo anterior, em que, calculado o COLF, as distâncias d_i que o MEG deverá percorrer em cada situação de falta i são mostradas na Figura 2-10.

$$d_i = \sqrt{(x_{MEGspot(i,1)} - x_{COLF})^2 + (y_{MEGspot(i,1)} - y_{COLF})^2} \quad (2-2)$$

Figura 2-10 - Exemplo de cálculo de distâncias do COLF aos pontos de conexão a cada falta em que o MEG é utilizado.



* Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Obtidos os valores d_i , e chamando de v_{MEG} a velocidade média de deslocamento do MEG, consegue-se então encontrar o tempo de viagem entre o ponto inicial (COLF) e o ponto final (nó ao qual o MEG será conectado na ocorrência da falta i), através da equação (2-3):

$$t_{MEG,Var} = \frac{d_i}{v_{MEG}} \quad (2-3)$$

Tal tempo de deslocamento foi denominado $t_{MEG,Var}$ por se tratar de intervalos de tempo variáveis, já que as distâncias d_i que levaram a esses deslocamentos variam a cada conexão com MEG a pontos distintos do alimentador. Contudo, o intervalo de tempo realmente corrido entre a ocorrência da falta e a conexão com o MEG não depende unicamente dessa parcela variável de tempo oriunda do deslocamento; ela deve abarcar também uma parcela fixa de tempo, a qual leva em consideração intervalos de tempo considerados fixos para a operação do MEG (como preparo da equipe antes do deslocamento e procedimentos de conexão no local). Chamando de $t_{MEG,Fix}$ esse tempo, finalmente calcula-se o tempo total decorrido para a conexão do MEG com a área por ele restaurada, através da equação (2-4):

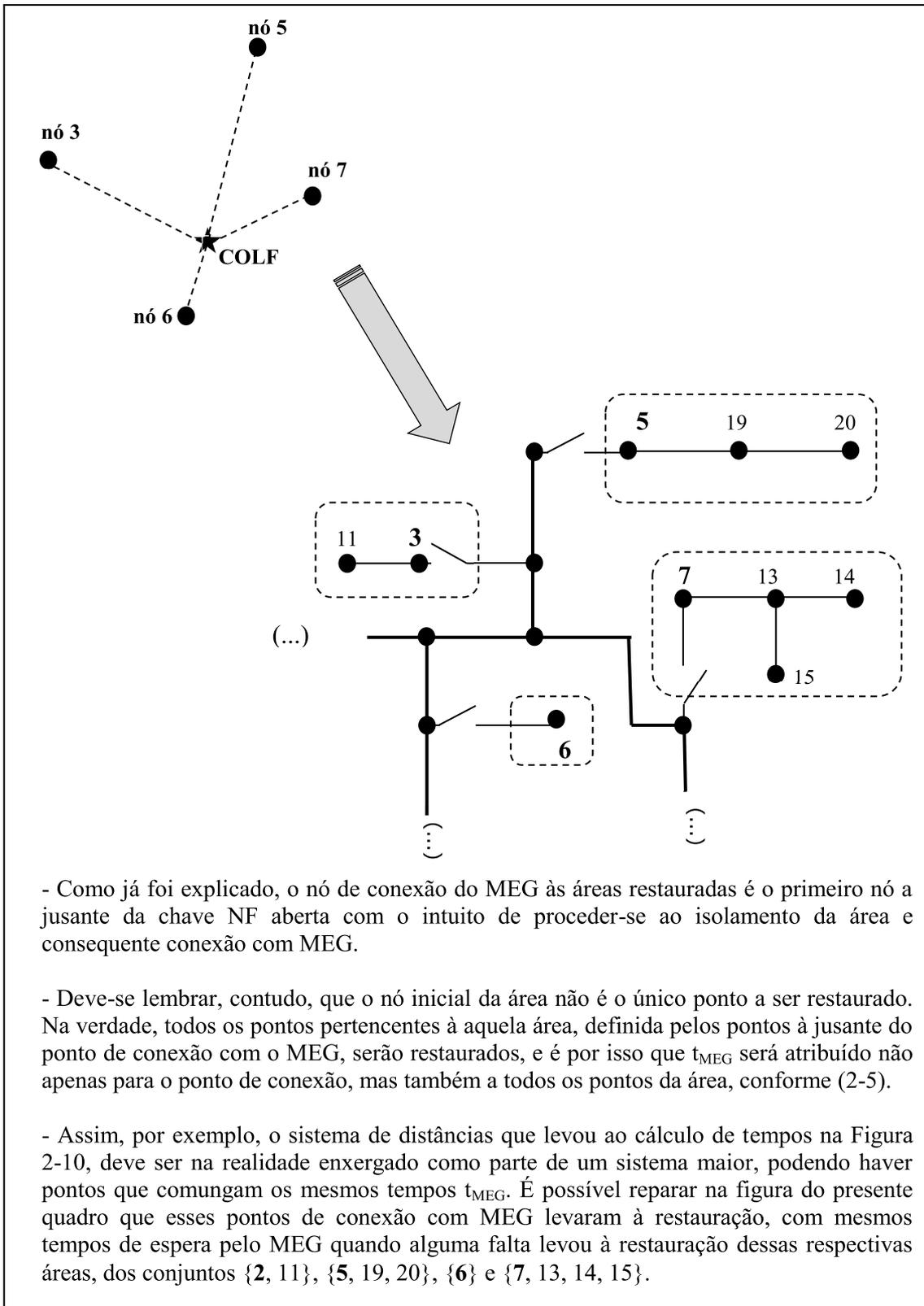
$$t_{MEG,i} = \frac{d_i}{v_{MEG}} + t_{MEG,Fix} \quad (2-4)$$

O intervalo de tempo para uma conexão MEG-área restaurada, calculado pela equação (2-4), é então atribuída para cada componente j pertencente a essa área. O algoritmo realiza essa tarefa analisando quais são os consumidores j que receberam booleano $c_{MEG}(i, j) = 1$, pois eles são os consumidores restaurados. Este entendimento pode se fazer mais claro a partir da análise da Figura 2-11. Assim:

$$\text{Se } c_{MEG}(i, j) = 1: \quad (2-5)$$

$$t_{MEG(i,j)} = t_{MEG,i}$$

Figura 2-11 - Exemplo da lógica de atribuição do mesmo tempo de deslocamento do MEG a todos os pontos da área formada pela abertura da chave associada ao ponto de conexão com o MEG.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Eis portanto, o benefício de terem sido separadas a parte qualitativa da quantitativa-cumulativa no contexto da simulação analítica de faltas: a posição inicial otimizada do MEG, bem como seus tempos de deslocamento até os pontos aos quais ele será conectado em casos de faltas, teve seu cálculo viabilizado antes mesmo de os impactos individuais nos índices de confiabilidade começarem a ser contabilizados. Ressalta-se que isto é fundamental neste trabalho, haja vista que seria impossível acumular tempos de interrupção sofridos pelos consumidores que seriam restaurados por MEG a cada falta, sem que se soubesse de antemão de onde o MEG partiria quando solicitado – o que, por sua vez, depende da análise prévia de todas as faltas. Essa lógica circular, já mencionada neste documento, era um problema intrínseco ao sistema de simulações analíticas pesquisadas na literatura, mas que resta contornada com a disjunção entre os aspectos qualitativos e quantitativos que é proposta no presente trabalho.

P.9: Calcular os índices individuais FIC_j e DIC_j

Após a consumação da parcela qualitativa da simulação analítica de faltas, o algoritmo tem armazenados todos os valores booleanos (indicativos do que ocorre com cada ponto sob situação de cada falta, em forma de matrizes $L \times n$) e os intervalos de tempo de conexão com MEG quando eles são usados (também de acordo com cada falta).

O algoritmo possui então todos os dados necessários para que se possa avaliar esses impactos agora de uma forma quantitativa, o que é feito neste passo **P.9** e no passo **P.10**.

Os índices FIC_j e DIC_j de cada consumidor são calculados respectivamente através das equações (2-6) e (2-7):

$$\begin{bmatrix} FIC_1 \\ FIC_2 \\ \vdots \\ FIC_n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^L \begin{bmatrix} \lambda_i \cdot B_{P(i,1)} \\ \lambda_i \cdot B_{P(i,2)} \\ \vdots \\ \lambda_i \cdot B_{P(i,n)} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} DIC_1 \\ DIC_2 \\ \vdots \\ DIC_n \end{bmatrix} = \\
& = \sum_{i=1}^L \begin{bmatrix} \lambda_i \cdot r_i \cdot B_P(i,1) - \lambda_i \cdot (r_i - s_k) \cdot B_U(i,1) - \lambda_i \cdot (r_i - s_{NO}) \cdot B_D(i,1) - \lambda_i \cdot (r_i - t_{MEG(i,1)}) \cdot c_{MEG(i,1)} \\ \lambda_i \cdot r_i \cdot B_P(i,2) - \lambda_i \cdot (r_i - s_k) \cdot B_U(i,2) - \lambda_i \cdot (r_i - s_{NO}) \cdot B_D(i,2) - \lambda_i \cdot (r_i - t_{MEG(i,2)}) \cdot c_{MEG(i,2)} \\ \vdots \\ \lambda_i \cdot r_i \cdot B_P(i,n) - \lambda_i \cdot (r_i - s_k) \cdot B_U(i,n) - \lambda_i \cdot (r_i - s_{NO}) \cdot B_D(i,n) - \lambda_i \cdot (r_i - t_{MEG(i,n)}) \cdot c_{MEG(i,n)} \end{bmatrix} \quad (2-7)
\end{aligned}$$

A lógica de tais equações é a seguinte:

- cada linha dessas equações corresponde ao cálculo de um índice de confiabilidade individual FIC_j e DIC_j de um consumidor j . As n linhas representam, portanto, o cálculo para todos os consumidores;
- cada linha para cálculo de um valor individual FIC_j ou DIC_j consiste na soma de todos os impactos de todas as L faltas ($i = 1, 2, \dots, L$) observados pelo ponto de vista desse consumidor j ;
- cada falta impacta cada consumidor de formas diferentes, porque durante a falta i , cada consumidor j : pode ou não ter fornecimento interrompido; e, se interrompido, pode ou não ser restaurado; e, se restaurado, por qual meio (restauração a montante, a jusante ou por MEG). É fácil quantificar esses impactos nos índices individuais dispondo dos booleanos B_P , B_U , B_D e c_{MEG} . A seguir está a lógica utilizada.

- todo consumidor j que sofreu uma interrupção sustentada de fornecimento devido à falta i deve passar por um incremento $+\lambda_i$ em seu valor de FIC_j , enquanto os que não sofreram não devem receber tal incremento. Isto é computado pela equação (2-6) através da ativação ou não desses incrementos de acordo com o booleano de impacto $B_P(i, j)$ que acompanha esses incrementos. Se, num exemplo qualquer, de todas as $L = 5$ faltas num alimentador, apenas as faltas 1, 3 e 4 impactaram o consumidor $j = 2$, $B_P(i, 2) = 1$ para $i = 1, 3$ e 5 e $B_P(i, 2) = 0$ para $i = 2$ e 4 , e logo seu FIC_2 será calculado pela 2ª linha da equação de FIC_j (com $j = 2$) como sendo o seguinte processamento:

$$FIC_2 = \sum_{i=1}^5 \lambda_i \cdot B_P(i,2)$$

$$FIC_2 = \lambda_1 \cdot B_P(1,2) + \lambda_2 \cdot B_P(2,2) + \lambda_3 \cdot B_P(3,2) + \lambda_4 \cdot B_P(4,2) + \lambda_5 \cdot B_P(5,2)$$

$$FIC_2 = \lambda_1 \cdot 1 + \lambda_2 \cdot 0 + \lambda_3 \cdot 1 + \lambda_4 \cdot 0 + \lambda_5 \cdot 1$$

$$FIC_2 = \lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5 \quad (\text{faltas/ano})$$

Observa-se que a matriz de *FIC* fará esse cálculo para todos os *n* consumidores, gerando assim todos os *FIC_j*.

- todo consumidor *j* que sofreu uma interrupção sustentada de fornecimento devido à falta *i* deve passar por um incremento em seu valor de *DIC_j*, enquanto os que não sofreram não devem receber tal incremento. Esse valor de incremento depende de λ_i , r_i e de possíveis manobras de restauração que podem reestabelecer o fornecimento de energia para *j* antes que a falta *i* seja reparada e o alimentador volte à situação original. Tem-se então que:

- se *j*, com seu fornecimento interrompido, não puder ter seu fornecimento restaurado, o acréscimo em *DIC_j* será de $+\lambda_i r_i$ horas;
- mas, se for possível restaurar *j*, o acréscimo será de apenas o tempo decorrido até que ele seja restaurado.

Se nesse último caso for considerado que o intervalo de tempo total de interrupção pode ser visto como o intervalo de tempo pré-restauração somado ao intervalo de tempo pós-restauração:

$$t_{\text{total de uma interrupção}} = t_{\text{pré-restauração}} + t_{\text{pós-restauração}}$$

Então é fácil também compreender-se que o tempo real de impacto em *DIC_j* de um restaurado pode ser visto como o tempo total subtraído do intervalo pós-restauração:

$$t_{\text{pré-restauração}} = t_{\text{total de uma interrupção}} - t_{\text{pós-restauração}}$$

Assim, é possível equacionar esse acréscimo em DIC_j de um impactado como sendo o total $+ \lambda_i r_i$ descontado do excesso pós-restauração caso ele seja restaurado, já que o tempo pré-restauração corresponde ao intervalo em que j estará, de fato, em situação de fornecimento interrompido.

- Assim, por exemplo, se em um alimentador em que o número de seções de falta analisadas é $L = 5$ há um consumidor $j = 3$ que, devido à sua localização no alimentador, está em situação tal que:

- durante a falta $i = 1$ foi impactado de forma integral (sem restaurações), seus booleanos gerados para essa falta foram $B_P(1, 3) = 1$; $B_U(1, 3) = B_D(1, 3) = c_{MEG}(1, 3) = 0$;

- durante a falta $i = 2$ não foi impactado, seus booleanos gerados para essa falta foram $B_P(2, 3) = B_U(2, 3) = B_D(2, 3) = c_{MEG}(2, 3) = 0$;

- durante a falta $i = 3$ foi impactado, mas depois de certo tempo foi restaurado por chaveamento a montante da área de falta, seus booleanos gerados para essa falta foram $B_P(3, 3) = 1$; $B_U(3, 3) = 1$; $B_D(3, 3) = c_{MEG}(3, 3) = 0$;

- durante a falta $i = 4$ foi impactado, mas depois de certo tempo foi restaurado por chaveamento a jusante da área de falta com manobra de transferência de carga, seus booleanos gerados para essa falta foram $B_P(4, 3) = 1$; $B_U(4, 3) = 0$; $B_D(4, 3) = 1$; $c_{MEG}(4, 3) = 0$;

- durante a falta $i = 5$ foi impactado, mas depois de certo tempo foi restaurado por conexão com MEG, seus booleanos gerados para essa falta foram $B_P(5, 3) = 1$; $B_U(5, 3) = B_D(5, 3) = 0$; $c_{MEG}(5, 3) = 1$.

Nesse exemplo, a DIC_3 será processada pela 3ª linha da equação (2-7), de DIC_j para $j = 3$, da seguinte forma:

$$DIC_3 = \sum_{i=1}^5 [\lambda_i \cdot r_i \cdot B_P(i,3) - \lambda_i \cdot (r_i - s_k) \cdot B_U(i,3) - \lambda_i \cdot (r_i - s_{NO}) \cdot B_D(i,3) - \lambda_i \cdot (r_i - t_{MEG(i,3)}) \cdot c_{MEG(i,3)}]$$

Abre-se aqui o somatório³, a fim de se analisar o que ocorre com cada uma das faltas i :

$$\begin{aligned} DIC_3 = & \lambda_1 \cdot r_1 \cdot B_P(1,3) - \lambda_1 \cdot (r_1 - s_k) \cdot B_U(1,3) - \lambda_1 \cdot (r_1 - s_{NO}) \cdot B_D(1,3) - \lambda_1 \cdot (r_1 - t_{MEG(1,3)}) \cdot c_{MEG(1,3)} + \\ & + \lambda_2 \cdot r_2 \cdot B_P(2,3) - \lambda_2 \cdot (r_2 - s_k) \cdot B_U(2,3) - \lambda_2 \cdot (r_2 - s_{NO}) \cdot B_D(2,3) - \lambda_2 \cdot (r_2 - t_{MEG(2,3)}) \cdot c_{MEG(2,3)} + \\ = & + \lambda_3 \cdot r_3 \cdot B_P(3,3) - \lambda_3 \cdot (r_3 - s_k) \cdot B_U(3,3) - \lambda_3 \cdot (r_3 - s_{NO}) \cdot B_D(3,3) - \lambda_3 \cdot (r_3 - t_{MEG(3,3)}) \cdot c_{MEG(3,3)} + \\ & + \lambda_4 \cdot r_4 \cdot B_P(4,3) - \lambda_4 \cdot (r_4 - s_k) \cdot B_U(4,3) - \lambda_4 \cdot (r_4 - s_{NO}) \cdot B_D(4,3) - \lambda_4 \cdot (r_4 - t_{MEG(4,3)}) \cdot c_{MEG(4,3)} + \\ & + \lambda_5 \cdot r_5 \cdot B_P(5,3) - \lambda_5 \cdot (r_5 - s_k) \cdot B_U(5,3) - \lambda_5 \cdot (r_5 - s_{NO}) \cdot B_D(5,3) - \lambda_5 \cdot (r_5 - t_{MEG(5,3)}) \cdot c_{MEG(5,3)} \end{aligned}$$

Aplicam-se os booleanos calculados anteriormente neste exemplo:

$$\begin{aligned} & \lambda_1 \cdot r_1 \cdot 1 - \lambda_1 \cdot (r_1 - s_k) \cdot 0 - \lambda_1 \cdot (r_1 - s_{NO}) \cdot 0 - \lambda_1 \cdot (r_1 - t_{MEG(1,3)}) \cdot 0 + \\ & + \lambda_2 \cdot r_2 \cdot 0 - \lambda_2 \cdot (r_2 - s_k) \cdot 0 - \lambda_2 \cdot (r_2 - s_{NO}) \cdot 0 - \lambda_2 \cdot (r_2 - t_{MEG(2,3)}) \cdot 0 + \\ DIC_3 = & + \lambda_3 \cdot r_3 \cdot 1 - \lambda_3 \cdot (r_3 - s_k) \cdot 1 - \lambda_3 \cdot (r_3 - s_{NO}) \cdot 0 - \lambda_3 \cdot (r_3 - t_{MEG(3,3)}) \cdot 0 + \\ & + \lambda_4 \cdot r_4 \cdot 1 - \lambda_4 \cdot (r_4 - s_k) \cdot 0 - \lambda_4 \cdot (r_4 - s_{NO}) \cdot 1 - \lambda_4 \cdot (r_4 - t_{MEG(4,3)}) \cdot 0 + \\ & + \lambda_5 \cdot r_5 \cdot 1 - \lambda_5 \cdot (r_5 - s_k) \cdot 0 - \lambda_5 \cdot (r_5 - s_{NO}) \cdot 0 - \lambda_5 \cdot (r_5 - t_{MEG(5,3)}) \cdot 1 \end{aligned}$$

Resolvendo as multiplicações pelos valores 0 e 1:

$$DIC_3 = \underbrace{\lambda_1 \cdot r_1}_{\substack{\text{impacto} \\ \text{total} \\ \text{de } i=1}} + \underbrace{\lambda_3 \cdot r_3 - \lambda_3 \cdot (r_3 - s_k)}_{\substack{\text{impacto total de } i=3 \\ \text{subtraído do impacto} \\ \text{em excesso por tempo} \\ \text{pós-restauração por} \\ \text{chaveamento, de tempo } s_k}} + \underbrace{\lambda_4 \cdot r_4 - \lambda_4 \cdot (r_4 - s_{NO})}_{\substack{\text{impacto total de } i=4 \\ \text{subtraído do impacto} \\ \text{em excesso por tempo} \\ \text{pós-restauração por} \\ \text{chaveamento, de tempo } s_{NO}}} + \underbrace{\lambda_5 \cdot r_5 - \lambda_5 \cdot (r_5 - t_{MEG(5,3)})}_{\substack{\text{impacto total de } i=5 \\ \text{subtraído do impacto} \\ \text{em excesso por tempo} \\ \text{pós-restauração por} \\ \text{MEG, de tempo } t_{MEG(5,3)}}$$

Resolvendo os parênteses, anulam-se alguns valores:

$$DIC_3 = \lambda_1 \cdot r_1 + \lambda_3 \cdot r_3 - \lambda_3 \cdot r_3 + \lambda_3 \cdot s_k + \lambda_4 \cdot r_4 - \lambda_4 \cdot r_4 + \lambda_4 \cdot s_{NO} + \lambda_5 \cdot r_5 - \lambda_5 \cdot r_5 + \lambda_5 \cdot t_{MEG(5,3)}$$

Finalmente, sobra apenas o cômputo dos impactos pelos intervalos de tempo em que realmente ocorreu interrupção de j durante as 5 faltas:

³ Tal somatório é todo realizado em uma única linha, de forma serial. Neste documento, teve seu equacionamento desmembrado em mais de uma linha, pela limitação de largura da página.

$$\begin{aligned}
 DIC_3 = & \underbrace{\lambda_1 \cdot r_1}_{\text{impacto total de } i=1} + \underbrace{\lambda_3 \cdot S_k}_{\text{impacto de } i=3 \text{ somente pelo tempo até } j=3 \text{ ser restaurado por chaveamento a montante da área de falta}} + \underbrace{\lambda_4 \cdot S_{NO}}_{\text{impacto de } i=4 \text{ somente pelo tempo até } j=3 \text{ ser restaurado por manobra de transferência de carga}} + \underbrace{\lambda_5 \cdot t_{MEG(5,3)}}_{\text{mpacto de } i=5 \text{ somente pelo tempo até } j=3 \text{ ser restaurado por conexão com MEG}}
 \end{aligned}$$

P.10: Calcular os índices globais FEC, DEC e o os custos de confiabilidade

FEC e DEC podem ser calculados, respectivamente, por meio de médias ponderadas⁴ de FIC e DIC, de modo que, obtidos (2-6) e (2-7) no passo **P.9**, o algoritmo pode realizar os cálculos dados pelas equações (2-8) e (2-9), em que c_j corresponde ao número de consumidores conectados ao nó j :

$$FEC = \frac{\sum_{j=1}^n c_j \cdot FIC_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \tag{2-8}$$

$$DEC = \frac{\sum_{j=1}^n c_j \cdot DIC_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \tag{2-9}$$

Cumpramos ressaltar que, sobre os pares SAIFI e FEC, SAIDI e DEC, costuma-se na literatura considerar que os valores numéricos de tais índices são coincidentes. Portanto, neste trabalho, será tomado também como pressuposto que há igualdade entre tais pares de índices.

2.4 OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE CHAVES CONSIDERANDO MEGS

O algoritmo desenvolvido ao longo da seção anterior, que culminou no fluxograma exposto na Figura 2-5, consiste numa simulação analítica de faltas que tem por objetivo calcular índices de confiabilidade, custos de alimentadores

⁴ A ponderação é feita pelo número de consumidores c_j conectados àquele nó j , haja vista que todos eles compartilham do mesmo FIC_j calculado. Obviamente, quanto maior o número de consumidores conectados a um mesmo nó, mais eles influenciam no índice global do alimentador, de modo que a ponderação leva isto em conta.

e posicionamento ótimo de MEG num alimentador, de acordo com a alocação de chaves desse alimentador.

Numa situação de otimização, cujo intuito é encontrar a alocação de chaves que obedeça a um critério de minimização de custos, essa simulação analítica de faltas deve ser aplicada a várias soluções candidatas, de forma que os resultados possam ser comparados a fim de encontrar-se a melhor solução. No caso do problema proposto nesta tese, matematicamente, o objetivo da otimização passa a ser a minimização do custo total anual desenvolvido na equação (C-10), do Apêndice C, objetivo este que é expresso na equação (2-10):

$$\text{Objetivo: } \min(\text{Custo}_{total}) = \min\left(C \cdot CC + M \cdot MEG + \sum_{j=1}^n P_j \cdot FDC_j \cdot DIC_j\right) \quad (2-10)$$

Os termos que compõem essa função objetivo são:

C: número de chaves normalmente fechadas (NF) presentes no alimentador, permitindo manobras de isolamento de áreas de falta e restauração de fornecimento de energia. Há de se destacar aqui que apenas as chaves NF influirão como possível custo adicional de investimento anual em confiabilidade. As chaves normalmente abertas (NA), que separam o alimentador analisado de outros adjacentes e que permitem manobras de transferência de carga, possuem alocação fixa devido à geometria dos alimentadores vizinhos; as chaves NA costumam ser fixadas nos pontos de maior proximidade física entre os alimentadores adjacentes. Se as chaves NA não variam em número ou posição, elas não modificarão o custo relativo das soluções candidatas testadas na otimização;

CC: custo anual de uma chave NF (em US\$/ano). Considerações acerca do valor numérico desse custo são feitas no Apêndice C;

M: número de MEGs disponíveis para uso no alimentador;

MEG: custo anual de um MEG (em US\$/ano). Considerações acerca do valor numérico desse custo são feitas no Apêndice C;

j: unidade consumidora;

DIC_j : duração de interrupção individual da unidade consumidora j (em h/ano);

P_j : carga do consumidor j (em kW);

FDC_j : função de dano do consumidor j (em US\$/kWh), que representa o custo associado ao nó, representativo das perdas econômicas oriundas da falta de energia elétrica. Considerações acerca do valor numérico desse custo são feitas no Apêndice C.

Há de se ressaltar que:

a) Os valores CC , MEG , P_j e FDC_j são termos constantes para cada alimentador;

b) O valor de M poderá variar entre 0 e 1. A posição do possível MEG que confere $M = 1$ é variável;

c) O valor de C é variável, podendo assumir uma gama de valores inteiros, de acordo com o número de chaves seccionadoras NF presentes no alimentador;

d) O número de chaves NF, as suas localizações no alimentador, o valor de M e as posições iniciais dos MEGs são todos fatores que influenciam as DIC_j dos consumidores, já que todos esses parâmetros influenciam nos intervalos anuais de interrupção dos consumidores – como já visto na descrição do problema.

A função objetivo sugere, então, que dentre as várias possibilidades de alocação de chaves e MEGs num alimentador, existe uma solução ótima que minimizará os custos globais de operação anuais desse alimentador. Portanto, num conjunto de várias soluções candidatas, a função objetivo de cada uma deveria ser calculada, de forma a serem comparadas e, finalmente, o custo mínimo ser encontrado. Associado a esse custo mínimo, estará o alimentador com a configuração de chaves e MEGs ótima.

Há, contudo, uma dificuldade associada a isso: o problema de alocação de chaves possui caráter combinatório e não-linear, tendo um número extremamente grande de combinações possíveis. Isto faz com que um método de busca exaustivo, que analise toda e qualquer solução candidata a ótima, seja inviável. Por exemplo, um alimentador que possua 30 seções que possam

receber chaves (em nenhuma, uma ou ambas as suas extremidades) teria um total de $2^{60} = 1.152.921.504.606.846.976$ candidatos para serem analisados⁵.

Essa dificuldade pode ser contornada com o auxílio de algoritmos heurísticos. Ao invés de testar toda a infinidade de soluções candidatas, de forma computacional bruta, algum algoritmo heurístico pode ser implementado para que apenas um número reduzido de soluções seja testado, com alta probabilidade de se encontrar uma solução que seja, pelo menos, quase ótima.

Vários algoritmos heurísticos já foram utilizados, com sucesso, no problema de alocação de chaves. No contexto deste trabalho, optar-se-á por algoritmos genéticos. Tal opção por algoritmos genéticos justifica-se pelo fato de que a modelagem a ser utilizada, que associará a cada solução candidata uma sequência de *bits* 0 ou 1 representando a existência ou não de chave em cada seção do alimentador casa perfeitamente com a formulação geral dos algoritmos genéticos, posto que é possível enxergar cada solução candidata como um cromossomo binário. Outra vantagem é que as buscas pelas soluções ótimas são baseadas nas tentativas anteriores de solução (gerações anteriores), de modo a se preservar boas características das soluções de modo que a qualidade geral das soluções só tenda a melhorar. Na verdade, o uso de algoritmos genéticos já se provou robusto e eficaz quando aplicado em problemas de otimização de redes de distribuição, como referido na Revisão Bibliográfica desta tese.

Assim, gerações de cromossomos são montadas, os quais representam soluções candidatas referentes a alimentadores com diferentes alocações de chaves, cada um com sua aptidão graduada pela função objetivo do problema. Tais cromossomos passam por operações de *crossover* e possíveis mutações (que tendem a quebrar estagnações ou buscar genes melhores que possivelmente ainda não existiam no conjunto de soluções candidatas), até que a melhor solução seja desenvolvida.

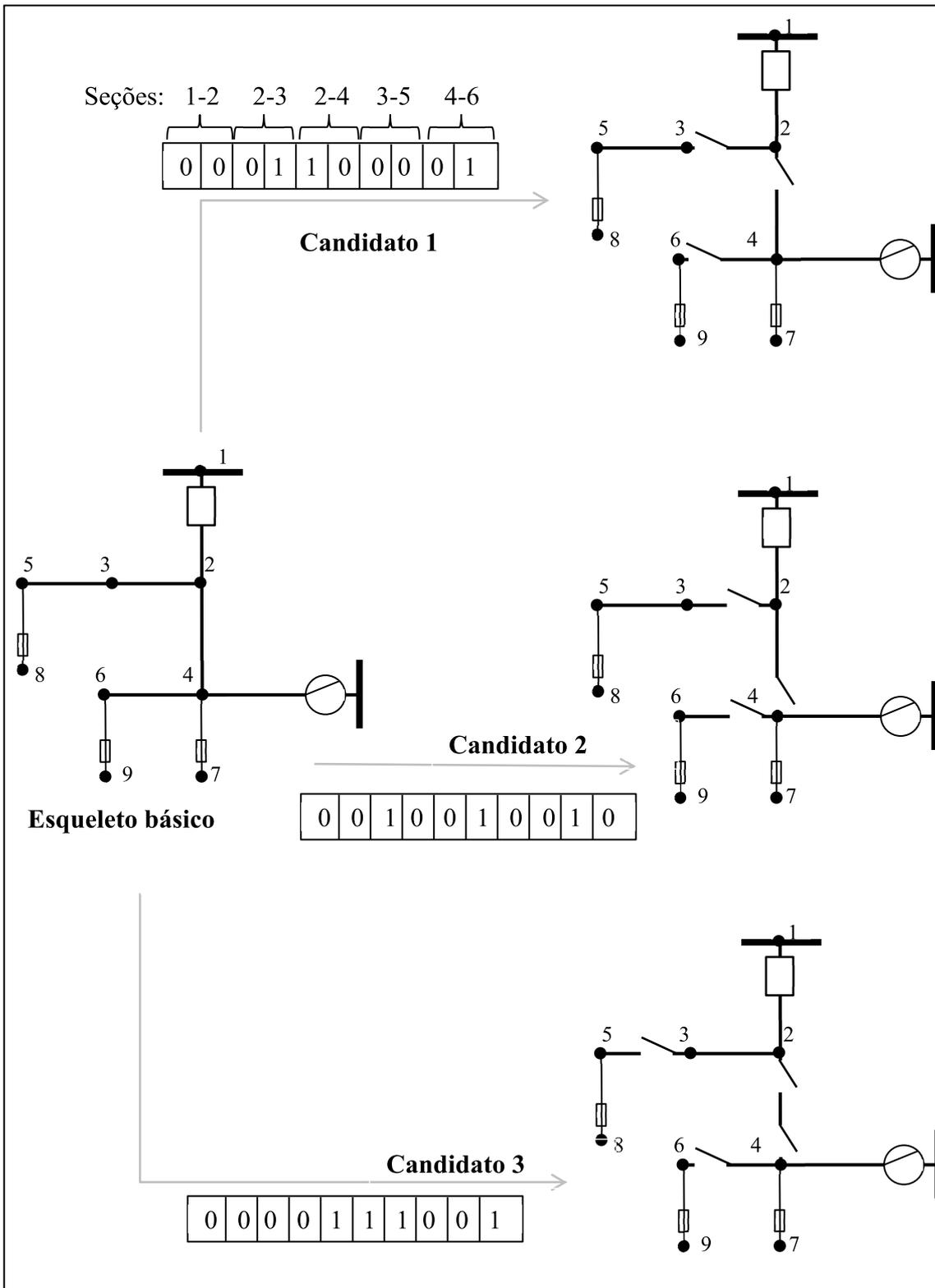
Todas as soluções candidatas a ótima, que passarão pelo processo de avaliação de aptidão do algoritmo genético, possuem algumas características

⁵ Em cada seção, seria possível alocar ou não uma chave em um extremo (2 possibilidades para esse extremo) e alocar ou não uma chave no outro extremo (também 2 possibilidades para esse extremo), o que gera 2^2 possibilidades para cada seção. Um total de 30 seções teria, portanto, $2^2 \cdot 2^2 \cdot 2^2 \dots 2^2$ (30 multiplicações) possibilidades de alocação de chaves, o que resultaria um total de 2^{60} .

em comum. Tais características em comum conferem um “esqueleto” básico a todas as soluções candidatas, de forma que as variações que ocorrem entre elas deverão ser expressas por meio da variação de bits de cromossomos. Já esse esqueleto básico consiste em dados intrínsecos ao alimentador, que deverão ser fornecidos pelo usuário ao algoritmo genético em uma etapa de entrada de dados.

Analise-se, por exemplo, a Figura 2-12. Um esqueleto básico de um alimentador consiste no apanhado das informações referentes às posições dos nós desse alimentador, do posicionamento fixo de seus dispositivos de proteção (como disjuntores, fusíveis e religadores), do posicionamento fixo de suas chaves normalmente abertas, dos dados de carga e número de consumidores nos nós e dos parâmetros de confiabilidade do alimentador (taxas de falha e tempos de reparo das seções, e tempos de chaveamento). Essas informações são comuns a todas as soluções candidatas, que poderão diferenciar-se umas das outras simplesmente pela alocação de suas chaves seccionadoras normalmente fechadas – o que por sua vez pode ser transcrito na forma de cromossomos binários, de tamanho $2L$ (sendo L o número de seções do alimentador, e o fator 2 indicativo da possibilidade de se alocar chaves nas duas extremidades de cada seção) que indicarão a alocação particular de chaves NF de cada solução candidata.

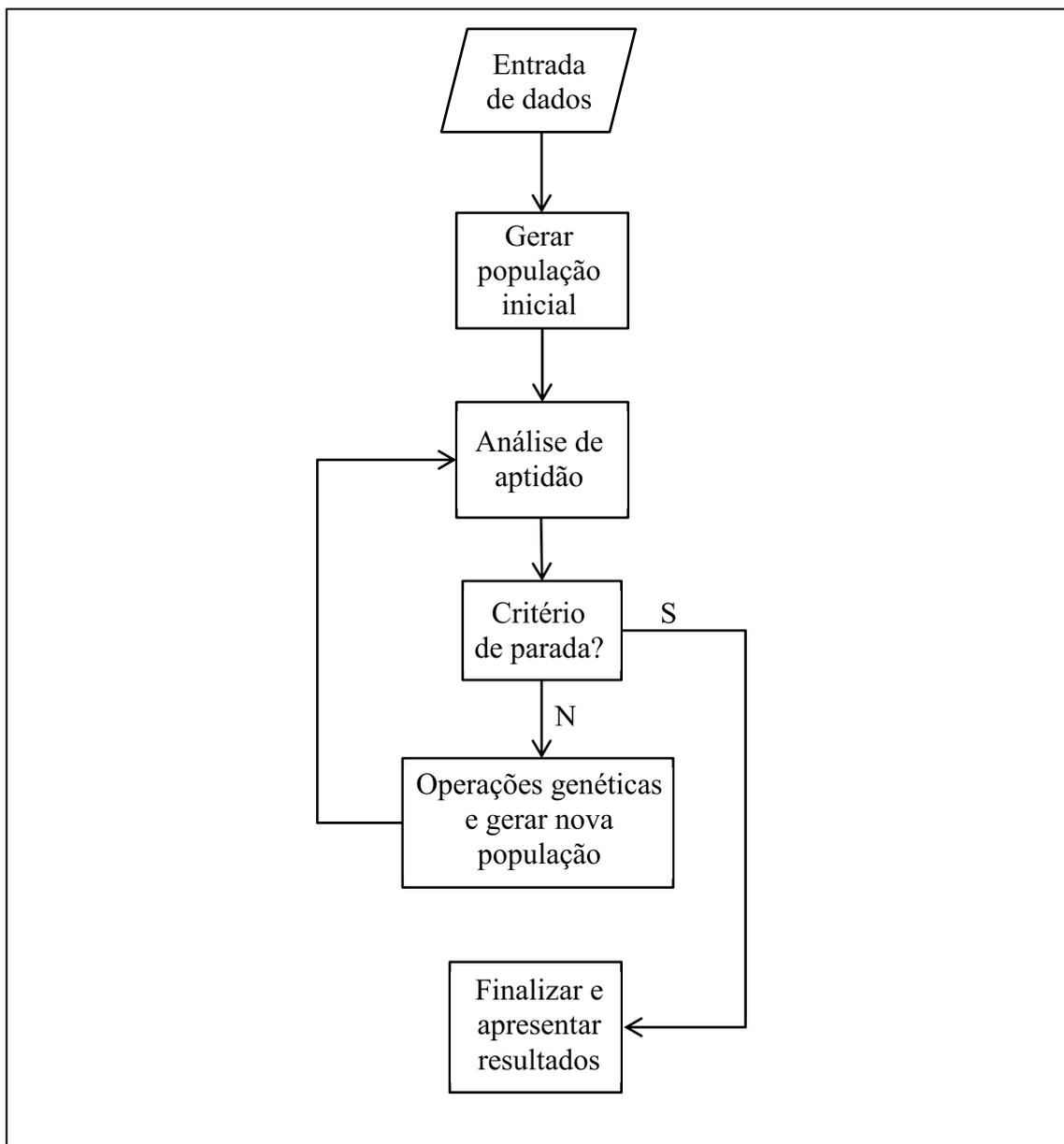
Figura 2-12 - Esquema exemplificativo*.



*Esquema exemplificativo de como as soluções candidatas podem ser vistas como variações de um “esqueleto básico” comum. Uma seqüência de bits, de tamanho $2L$, indica a alocação de chaves nesse alimentador, sendo suficiente para representar as soluções candidatas formadas a partir do esqueleto básico. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

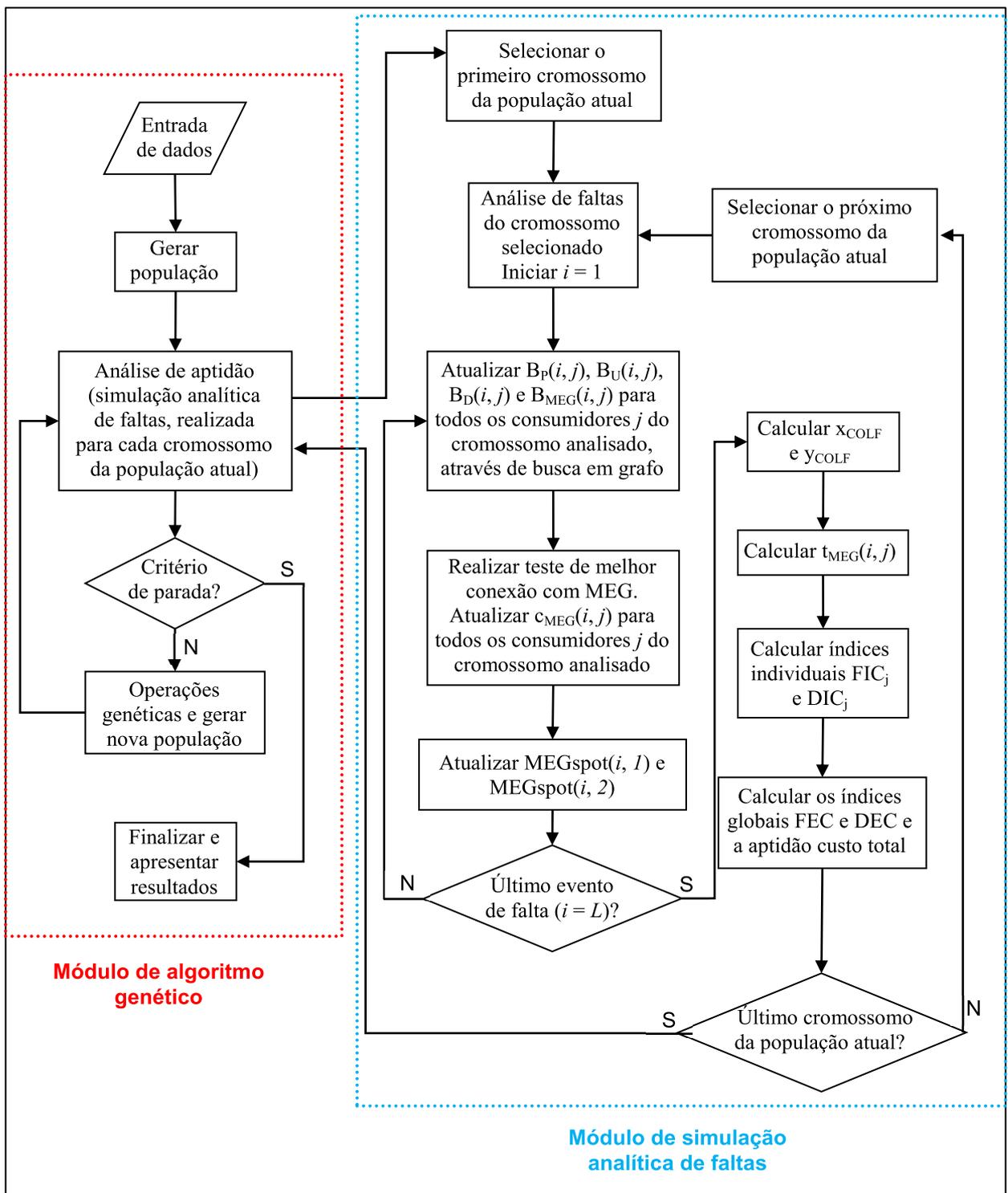
Desta forma, o algoritmo genético deverá, a partir da entrada de dados, codificar as soluções candidatas em cromossomos de tamanho $2L$, realizar testes de aptidão nessas soluções e perfazer operações genéticas, com o intuito de melhorar as gerações de soluções, até que o critério de parada do algoritmo seja encontrado, e a solução ótima (ou, no mínimo, quase ótima) seja obtida. A parte genética do algoritmo desenvolvido neste trabalho está esquematizada no fluxograma exibido na Figura 2-13. Enfim, unindo-se o fluxograma de simulação analítica de faltas da Figura 2-5 com o da etapa de otimização exibido na Figura 2-13, finalmente tem-se o fluxograma do algoritmo completo, exibido na Figura 2-14.

Figura 2-13 - Fluxograma do módulo genético do algoritmo desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 2-14 - Fluxograma completo do algoritmo desenvolvido neste trabalho.

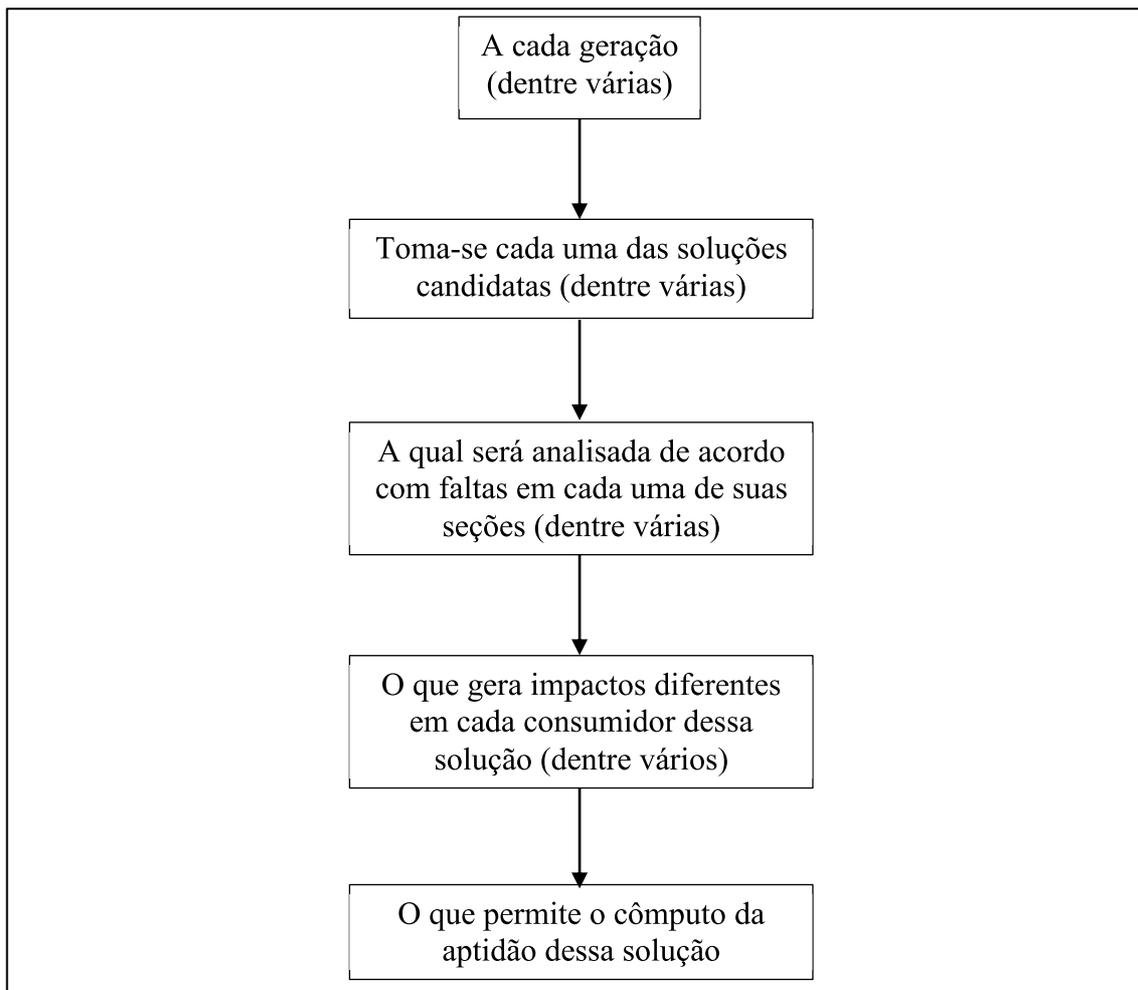


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

É importante que se vislumbre a dimensão do que ocorre a cada passo do algoritmo genético, ou seja, ao longo de cada geração. A Figura 2-16 ajuda nesse entendimento. No decorrer do algoritmo genético, existem gerações, que

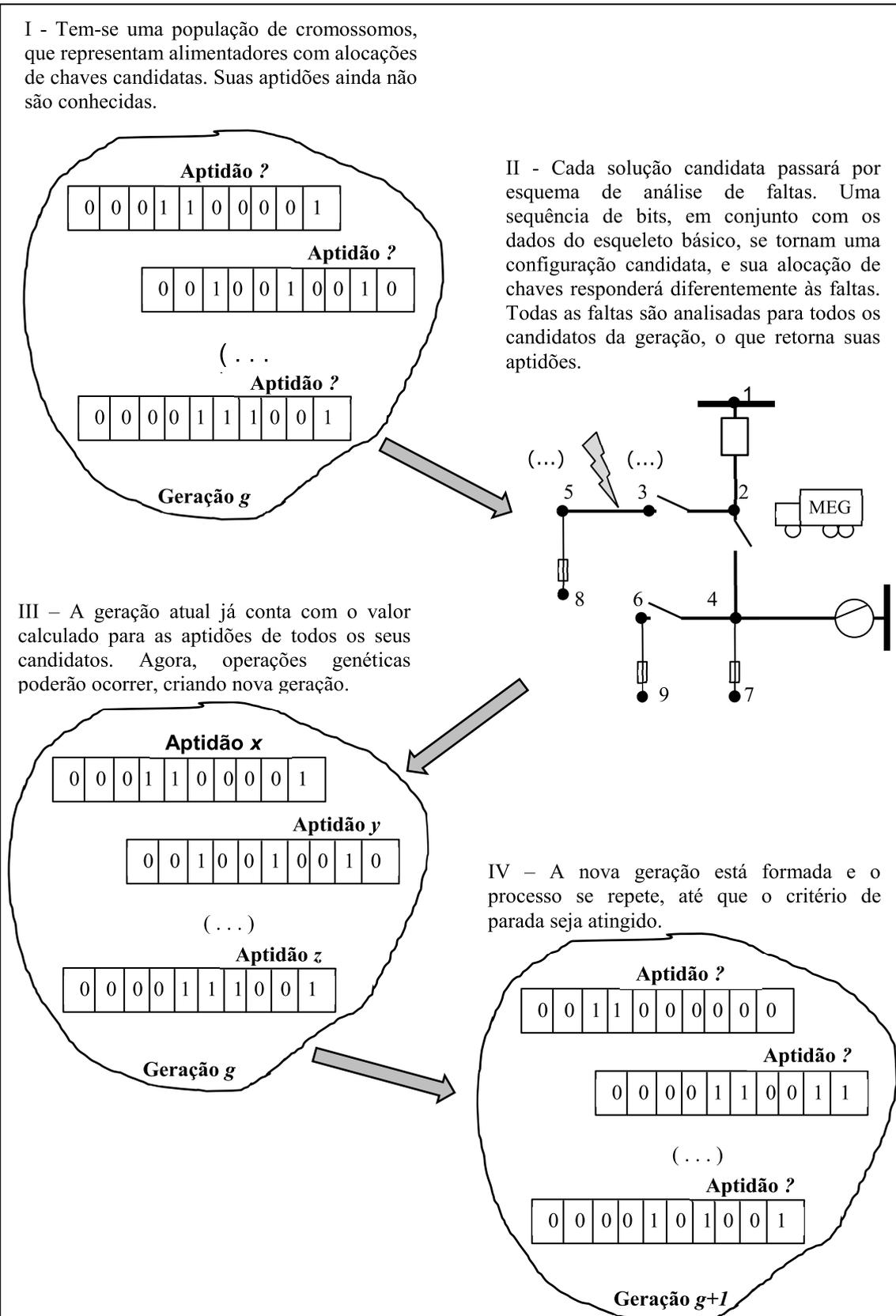
possuem soluções, as quais terão aptidões que dependem da análise das faltas em cada seções, que impactam de forma diferente cada consumidor da solução analisada. Categorizando em níveis de profundidade, ter-se-ia, resumidamente, a hierarquia retratada na Figura 2-15.

Figura 2-15 - Níveis de profundidade da análise completa*.



* Cada geração tem várias soluções, cada solução é passível de várias faltas, cada falta impacta diferentemente cada consumidor. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 2-16 - Representação esquemática do que ocorre ao longo do passo de uma geração do algoritmo genético



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

2.5 EXTENSÃO DO ALGORITMO PARA MAIS DE UM MEG POR ALIMENTADOR

Embora o algoritmo desenvolvido e mostrado até agora tenha se concentrado na alocação de apenas um MEG por alimentador analisado (o que acreditamos que talvez seja a situação mais possível de vir a acontecer na prática), é possível estender seu uso para um número maior de MEGs por alimentador.

Para tanto, as seguintes modificações são feitas, no contexto do fluxograma retratado na Figura 2-5:

- no passo **P.4**, após o algoritmo encontrar a combinação de áreas elegíveis com maior carga a ser restaurada pelo MEG, ele busca outra combinação de áreas elegíveis que, não tendo ainda sido restauradas pelo primeiro MEG, possuam a maior carga dentre as que restaram;
- no passo **P.5**, é gerado uma segunda matriz MEGspot (MEGspot2), referente ao segundo MEG. Ela armazenará, de forma semelhante ao que foi feito para o caso do primeiro MEG utilizado, os dados referentes às restaurações efetuadas pelo segundo MEG;
- no passo **P.7**, opcionalmente, um segundo COLF (COLF2) é calculado. Isto é opcional pois, na prática, muito provavelmente seria mais interessante para a concessionária de energia manter os MEGs todos em uma única garagem, que seria representada pelo primeiro COLF.

Os novos consumidores restaurados recebem, portanto, decrementos em suas DIC_j , levando conseqüentemente a menores valores de DEC e custos de interrupção – embora o custo de um MEG adicional talvez deva ser incluído no cômputo dos custos totais, a depender da disponibilidade de MEGs da concessionária.

Naturalmente, outros MEGs além de dois podem ser acrescentados, de forma análoga.

2.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, o problema geral de uso de MEG como dispositivo melhorador de custos e índices de confiabilidade foi apresentado.

Em seguida, foi mostrado o “método analítico booleano qualitativo-quantitativo” de simulação de faltas para análise de confiabilidade, criado nesta tese.

Foi mostrado também o conceito do COLF, que consiste numa estratégia de pré-posicionamento de um MEG numa rede de distribuição que possibilita melhor desempenho deste, desenvolvido nesta tese.

Foram mostrados como os índices de confiabilidade individuais, os coletivos e os custos de confiabilidade são calculados pelo algoritmo desenvolvido.

Depois, foi mostrado como se organiza o algoritmo genético utilizado no processo de otimização pretendido. O fluxograma geral do algoritmo desenvolvido foi apresentado, sendo que ele contém dois módulos: um módulo de simulação analítica de faltas e um módulo de otimização, realizado por algoritmo genético.

Por fim, foi mostrada uma forma de se expandir o algoritmo para a inserção de mais de um MEG por alimentador.

Essa estrutura geral será utilizada no Capítulo 3, que trará simulações e resultados referentes a alimentadores de teste e reais.

3. RESULTADOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os principais resultados obtidos com a aplicação do algoritmo desenvolvido neste trabalho, em todo ou em parte.

Inicialmente, os sistemas utilizados para as simulações serão apresentados, bem como seus dados mais relevantes.

Em seguida, as simulações que foram conduzidas serão apresentadas em sinopse de forma tabular, de maneira resumida, para que o leitor possa entender o objetivo de cada uma das simulações, bem como orientar-se de acordo com a complexidade desejada em cada uma das simulações.

Por fim, as simulações serão apresentadas, com explicações e conclusões parciais que puderam ser tiradas de cada uma delas.

Convém informar que, em nenhuma fonte consultada acerca dos dados dos sistemas que serão simulados, figuraram as coordenadas dos nós desses sistemas. Essa informação é necessária nesta tese, haja vista que, nas simulações conduzidas com presença de MEG, tais coordenadas são imprescindíveis no cômputo de suas posições iniciais e deslocamentos. Destarte, o que foi feito para contornar essa falta de dados sobre as coordenadas dos nós, foi utilizar os comprimentos das seções dos alimentadores, entre dois nós, para se estimar suas coordenadas. Se em um grafo representando um alimentador, são conhecidos os comprimentos dos seus traços, é possível que se estime as coordenadas relativas entre seus nós: basta que se adote um nó referencial e, com as distâncias conhecidas entre eles, se registre suas coordenadas. Na realidade, esta forma de se computar coordenadas é razoavelmente acurada: supondo que sua forma coincide com a forma do sistema original, o método só perde precisão quando ângulos não retos estão presentes no alimentador (de forma que esses ângulos devem ser estimados). Considera-se que, numa aplicação prática, os dados de coordenadas sejam coletados para que os resultados sejam os mais fiéis possíveis.

Ressalta-se que, neste trabalho, os conceitos de SAIFI e FEC, e SAIDI e DEC, serão utilizados de forma intercambiável respectivamente entre si, haja vista a equivalência entre eles, e levando em conta que os dados encontrados na literatura estrangeira dizem respeito aos conceitos de SAIFI e SAIDI, enquanto os alimentadores brasileiros práticos utilizam os conceitos de FEC e DEC.

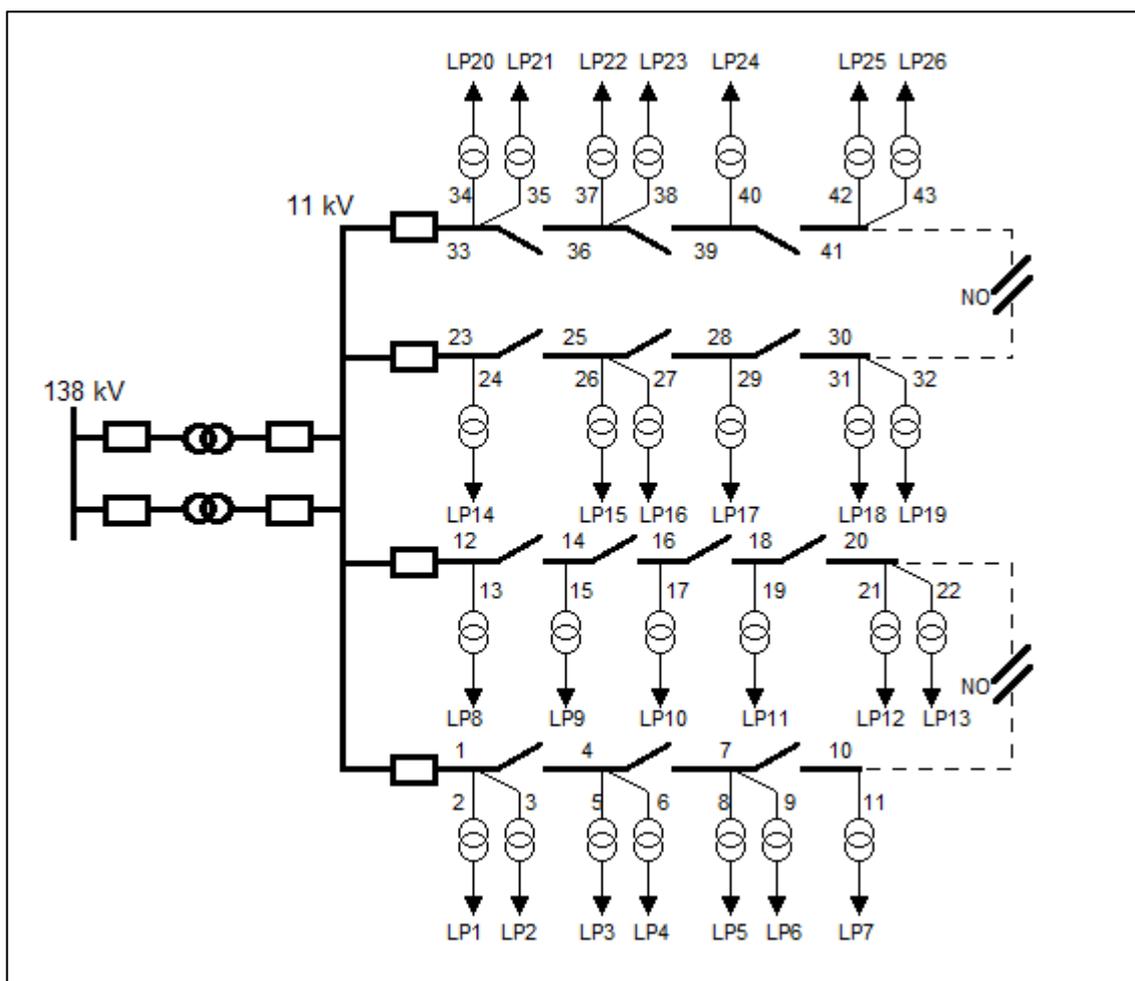
Além disso, todas as simulações foram conduzidas no aplicativo MATLAB R2018a®, utilizando-se um computador pessoal IntelCore® i7 de 8Gb.

3.2 DADOS DOS SISTEMAS UTILIZADOS

3.2.1 RBTS-Bus 5

De acordo com BILLINTON *et al.* (1991), o Subcomitê de Aplicação de Métodos Probabilísticos do IEEE (*IEEE Application of Probability Methods Subcommittee*) publicou em 1979 um Sistema Teste de Confiabilidade (RTS), que mostrou-se uma ferramenta valiosa na avaliação de algoritmos e técnicas capazes de analisar a confiabilidade em sistemas de potência, sobretudo em sistemas de geração e transmissão. Esta base levou os autores a desenvolverem um sistema teste de distribuição, denominado *RBTS*, dedicado a fornecer informações referentes à confiabilidade de sistemas de distribuição. Tal sistema possui seis barramentos em uma mesma subestação, sendo que destes seis barramentos, dois são descritos em BILLINTON *et al.* (1991) e os outros quatro são descritos em JONNAVITHULA e BILLINTON (1996). Nesta seção, será descrito e simulado o Barramento N° 5 (*RBTS - BUS 5*) desse sistema, sendo que este barramento possui quatro alimentadores, conforme caracterizado pela topologia da Figura 3-1.

Figura 3-1 – RBTS-BUS 5.



Fonte: (BILLINTON *et al.*, 1991)

O RBTS-BUS 5 representa um sistema de distribuição urbano de 11 kV, consistindo em unidades consumidoras de vários tipos, conforme apresentado na Tabela 3-1. Das referências mencionadas, também podem ser obtidos vários dados concernentes à topologia original da rede e aos parâmetros históricos ou considerados de seus equipamentos, de acordo com a Tabela 3-1, a Tabela 3-2 e a Tabela 3-3, enquanto a Tabela 3-4 foi extraída de BILLINTON (1994). Além disso, é estabelecido que, em todos os ramais finais (contendo pontos de carga, ou LP: *load points*), existem fusíveis a montante dos transformadores de distribuição. Além dos dados mencionados em relação à topologia da rede, são fornecidos em JONNAVITHULA e BILLINTON (1996) os índices de confiabilidade SAIFI, SAIDI e EENS referentes a esse sistema de distribuição, como mostrado na Tabela 3-5.

Tabela 3-1 - Dados de consumidor do *RBTS BUS 5*

| Número de pontos de carga | Pontos de carga (LP) | Tipo de consumidor | Carga por ponto de carga, kW (pico) | Carga por ponto de carga, kW (média) | Número de consumidores |
|---------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| 4 | 1-2, 20, 21 | Residencial | 762,5 | 426,9 | 210 |
| 4 | 4, 6, 15, 25 | Residencial | 745,0 | 417,1 | 240 |
| 5 | 26, 9-11, 13 | Residencial | 574,0 | 321,3 | 195 |
| 5 | 3, 5, 8, 17, 23 | Instalações do governo | 1110,0 | 624,7 | 1 |
| 5 | 7, 14, 18, 22, 24 | Comercial | 740,0 | 408,9 | 15 |
| 3 | 12, 16, 19 | Escritórios | 616,7 | 378,6 | 1 |
| Total | 26 | | 20000 | 11290 | 2858 |

Fonte: (JONNAVITHULA e BILLINTON, 1996)

Tabela 3-2 - Comprimentos e numeração dos alimentadores do *RBTS BUS 5*

| Comprimento do alimentador (km) | Número da seção do alimentador |
|---------------------------------|-------------------------------------------|
| 0,5 | 1-6-9-13-14-18-21-25-27-31-35-36-39-42 |
| 0,65 | 4-7-8-12-15-16-19-22-26-28-30-33-37-40 |
| 0,8 | 2-3-5-10-11-17-20-23-24-29-32-34-38-41-43 |

Fonte: (JONNAVITHULA e BILLINTON, 1996)

Tabela 3-3 - Parâmetros históricos de confiabilidade do *RBTS BUS 5*

| Parâmetros históricos de confiabilidade | | | | | |
|-----------------------------------------|---------------------|------------------|--------------------|--------------|-------------|
| | Linhas aéreas 11 kV | Trafos 138/11 kV | Trafos 11/0.415 kV | Disj. 138 kV | Disj. 11 kV |
| Taxa anual de falhas (falha/km.ano) | 0,065 | 0,01 | 0,015 | 0,006 | 0,006 |
| Tempo médio de reparo (h/falha) | 5 | 200 | 200 | 8 | 4 |
| Tempo troca p/ reserva | - | 15 | 10 | - | - |
| Tempo médio de chaveamento (h) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Fonte: (JONNAVITHULA e BILLINTON, 1996)

Tabela 3-4 - Custos médios de interrupção por duração de interrupção, para os consumidores do *RBTS-Bus 5*.

| Duração da interrupção | 1 min | 20 min | 1 h | 4 h | 8 h |
|------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|
| Custo (US\$/kW) | 0,525 | 1,607 | 4,295 | 16,585 | 41,163 |

Fonte: (JONNAVITHULA e BILLINTON, 1996)

Tabela 3-5 - Índices de confiabilidade do sistema *RBTS BUS 5* - JONNAVITHULA e BILLINTON (1996).

| Índice de confiabilidade do sistema | Valor |
|-------------------------------------|-------|
| SAIFI (falhas/ano.consumidor) | 0,23 |
| SAIDI (horas/ano.consumidor) | 3,55 |
| EENS (MWh/ano) | 40,1 |

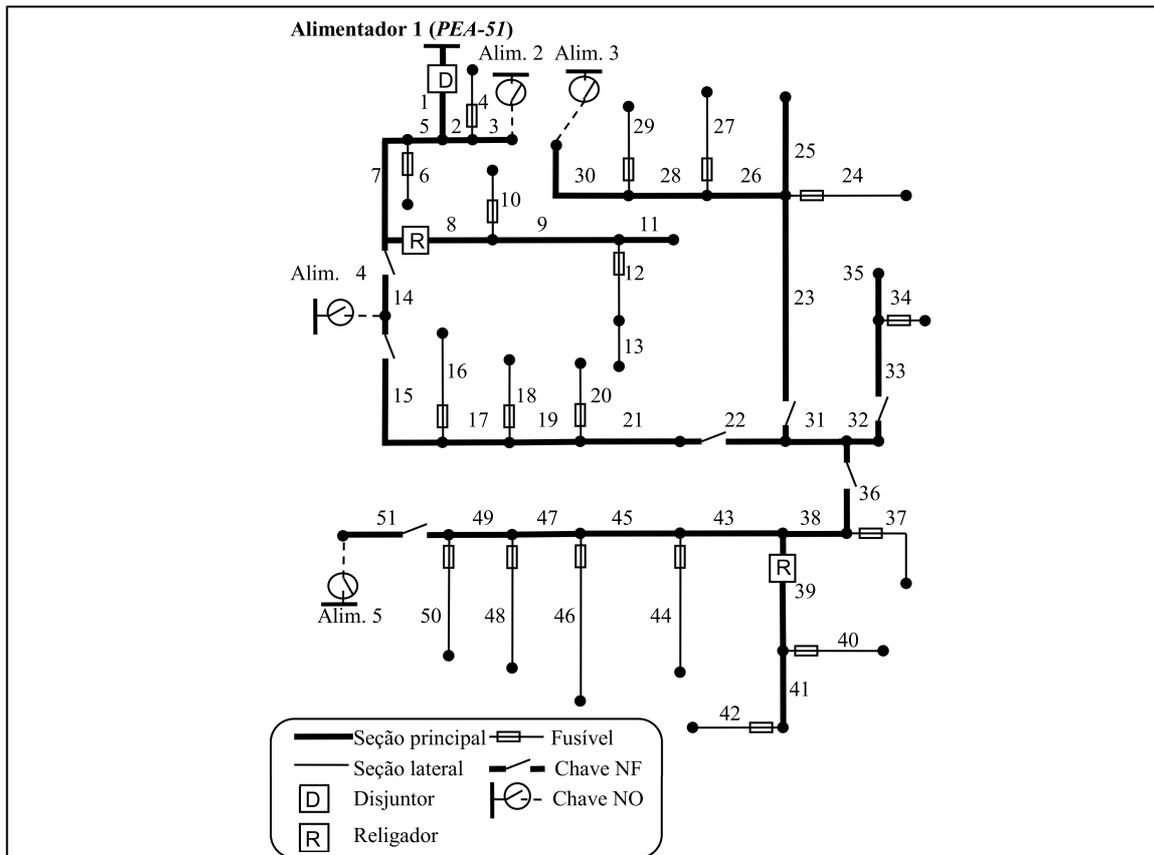
Fonte: (JONNAVITHULA e BILLINTON, 1996)

3.2.2 PEA-51

Consiste num alimentador com 51 seções e 44 pontos de carga, sendo parte de uma rede de distribuição real da *PEA: Provincial Electricity Authority of Thailand*, tratado daqui por diante como *PEA-51*. Esse alimentador possui em seus arredores outros quatro alimentadores, separados dele por meio de chaves normalmente abertas, que permitem manobras de transferência de carga em alguns casos de contingência no *PEA-51*, conforme a Figura 3-2.

Vários dados interessantes relativos à análise de confiabilidade do *PEA-51* figuram em TIPPACHON e RERKPREEDAPONG (2009), e alguns destes dados serão compilados aqui. O comprimento de cada seção, o número de consumidores e a carga média conectada em cada seção estão listados na Tabela 3-6.

Figura 3-2: PEA-51



Fonte: (TIPPACHON e RERKPREEDAPONG, 2009)

Outros detalhes seguem:

- Taxas de faltas sustentadas: $\lambda = 0,17$ faltas/km.ano;
- Tempo médio de reparo de uma falta: 2 h;
- Tempo médio de chaveamentos e transferências de cargas: 0,5 h;
- A porcentagem de tipos de cargas conectadas nesse alimentador é 85% de unidades residenciais e 15% de pequenas unidades industriais, sendo que, no próprio trabalho desenvolvido por TIPPACHON e RERKPREEDAPONG (2009), já é calculado o FDC utilizado, o qual será utilizado na função objetivo do processo de otimização deste trabalho, com o valor de FDC = 1,865 US\$/kWh. O custo anual de uma chave NF também foi extraído do mesmo trabalho, como sendo US\$ 2500,00/ano. A opção por se utilizar valores de função de dano e custos de chaves referenciados a um mesmo trabalho tende a uniformizar o valor do dólar a uma mesma época, além de alinhar os custos à região na qual o alimentador se encontra;

- Os índices de confiabilidade da rede original são apresentados na Tabela 3-7.

Tabela 3-6 – Comprimento (comp), carga média (L) e número de consumidores (Nº cons) em cada seção do PEA-51.

| Seção | Comp (km) | L (kVA) | Nº cons | Seção | Comp (km) | L (kVA) | Nº cons |
|-------|-----------|---------|---------|-------|-----------|---------|---------|
| 1 | 3,4 | 0 | 0 | 27 | 0,9 | 110 | 80 |
| 2 | 0,5 | 0 | 0 | 28 | 4,2 | 590 | 120 |
| 3 | 0,1 | 0 | 0 | 29 | 0,7 | 90 | 93 |
| 4 | 0,4 | 150 | 55 | 30 | 2,3 | 170 | 145 |
| 5 | 0,5 | 0 | 0 | 31 | 2,8 | 480 | 65 |
| 6 | 1 | 220 | 89 | 32 | 1,5 | 2400 | 80 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 33 | 1,3 | 210 | 102 |
| 8 | 3 | 1250 | 145 | 34 | 0,6 | 50 | 20 |
| 9 | 0,5 | 90 | 85 | 35 | 0,5 | 100 | 30 |
| 10 | 0,3 | 90 | 1 | 36 | 0,1 | 0 | 0 |
| 11 | 1,2 | 445 | 200 | 37 | 2,5 | 100 | 65 |
| 12 | 1 | 720 | 2 | 38 | 3,2 | 480 | 50 |
| 13 | 1 | 30 | 55 | 39 | 0,8 | 500 | 1 |
| 14 | 0,3 | 0 | 0 | 40 | 3 | 450 | 220 |
| 15 | 2,9 | 150 | 55 | 41 | 2,7 | 150 | 95 |
| 16 | 3 | 50 | 57 | 42 | 3 | 110 | 125 |
| 17 | 1,7 | 60 | 105 | 43 | 9,3 | 60 | 167 |
| 18 | 1,3 | 310 | 243 | 44 | 3,5 | 150 | 141 |
| 19 | 2 | 340 | 147 | 45 | 1,2 | 50 | 21 |
| 20 | 1,4 | 30 | 47 | 46 | 2 | 140 | 93 |
| 21 | 1 | 2130 | 107 | 47 | 0,9 | 36 | 106 |
| 22 | 0,4 | 250 | 30 | 48 | 1,3 | 60 | 90 |
| 23 | 2,3 | 780 | 117 | 49 | 1,3 | 30 | 17 |
| 24 | 4 | 610 | 135 | 50 | 5 | 160 | 145 |
| 25 | 0,7 | 80 | 95 | 51 | 2 | 1350 | 67 |
| 26 | 1,5 | 60 | 50 | | | | |

Fonte: (TIPPACHON e RERKPREEDAPONG, 2009)

Tabela 3-7 – Índices de confiabilidade da rede original

| | |
|--------------|-------|
| SAIFI | 8,67 |
| SAIDI | 10,02 |

Fonte: (TIPPACHON e RERKPREEDAPONG, 2009)

3.2.3 BRA-134

Em SILVA *et al.* (2007), é mostrada uma rede de distribuição de energia elétrica localizada no Brasil, dotada de 134 barras - embora não haja menção sobre em qual cidade específica ela se encontra. Daqui em diante, tal rede será

denominada *BRA 134*, e sua topologia é a mostrada na Figura 3-3. Alguns dados concernentes a essa rede de distribuição também são apresentados no referido material. Em SILVA *et al.* (2004), apresentam-se valores de taxa de faltas sustentadas, número de consumidores e carga conectada aos nós de algumas das seções desse alimentador, sendo que tais valores seguem reproduzidos na Tabela 3-8. Porém, cabe ressaltar, que: *i*) nem todos os dados do alimentador foram contemplados, o que significa que não se tem informações sobre taxas de faltas de outras seções, que não aquelas registradas na tabela; e *ii*) na própria dissertação de mestrado do autor (SILVA (2002)), a mesma tabela é reproduzida e é comentado que tais dados de taxas de faltas são estimados empiricamente, de modo que não são dados reais. Desta forma, na presente tese de doutorado, será adotado que as taxas de faltas das seções não contempladas pela Tabela 3-8 serão calculadas da seguinte forma: somam-se todos os valores de λ da tabela; divide-se o resultado pelo valor conjugado do comprimento de todas as seções da tabela; desta forma obtém-se a média de taxa de faltas por quilômetro estimada para essa rede, que pode ser então multiplicada pelos comprimentos individuais das seções não contempladas na tabela, de forma que as taxas de faltas das outras seções poderão ser calculadas com a média das estimativas empíricas realizadas em SILVA (2002) para as seções tabeladas desse alimentador.

Na literatura pesquisada, não havia dados acerca de funções de dano para os consumidores do sistema BRA-134. Destarte, adotar-se-á o valor médio de 4 US\$/kWh para as simulações conduzidas com este sistema. Este valor se suporta nas seguintes hipóteses:

I – Por se tratar de um sistema brasileiro, é interessante que valores de função de dano sejam aplicados de acordo com o perfil brasileiro. Esta análise pode ser suportada pelas pesquisas brasileiras de impacto de interrupção de energia, apresentadas em SCHILLING *et al.* (1994) e reproduzidas na Tabela C-2, na Tabela C-3 e na Tabela C-4;

II – Porém, haja vista que esse estudo foi realizado há um tempo, há de levar em consideração pelo menos a inflação acumulada no período, medida pelo IPCA (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo);

III – Como o valor de uma chave seccionadora, utilizada neste trabalho, e outros valores associados a análises de confiabilidade baseiam-se em

pesquisas realizadas em trabalho de 2006 (em SOHN *et al.*), e levando-se em conta que boas análises financeiras devem ser realizadas reduzindo-se valores a uma mesma data específica, convém corrigir os valores de função de dano supracitadas no item I com inflação acumulada no período até 2006;

IV – Adiciona-se, a esse contexto, que de 1994 a 1995 houve mudança de câmbio no contexto brasileiro, com a inserção do Plano Real, que substituiu o Cruzeiro pelo Real e trouxe profundas análises complexas no que tange valores inflacionais;

V – Como essas análises econômicas mais aprofundadas não constituem o foco deste trabalho, far-se-á a correção pelo IPCA apenas do Real, de forma que a correção realizada será feita de 01/1995 a 01/2006, que, pelos dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Calculadora de IPCA – <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php> – acesso em 02/02/2020), possuiu um percentual total de 150,91% de aumento devido ao IPCA;

VI – Supondo-se que o sistema *BRA-134* é composto por consumidores 60% residenciais, 18% comerciais e 22% industriais, e utilizando-se os valores das tabelas retro mencionadas de SCHILLING *et al.* (1994), é possível estimar um valor médio de função de dano de consumidor, referente ao período de geração dos dados dessas tabelas, dado por:

$$60\% \cdot 1,10 + 18\% \cdot 1,81 + 22\% \cdot 2,80 = 1,60 \text{ US\$/kWh}$$

VII – Corrige-se então esse valor pelo IPCA acumulado no período 1995-2006, pelas razões já descritas, e obtém-se então o valor aproximado de 4 US\$/kWh, que será o utilizado para esse sistema:

$$1,6 + 150,91\% \cdot 1,6 = 4,0 \text{ US\$/kWh}$$

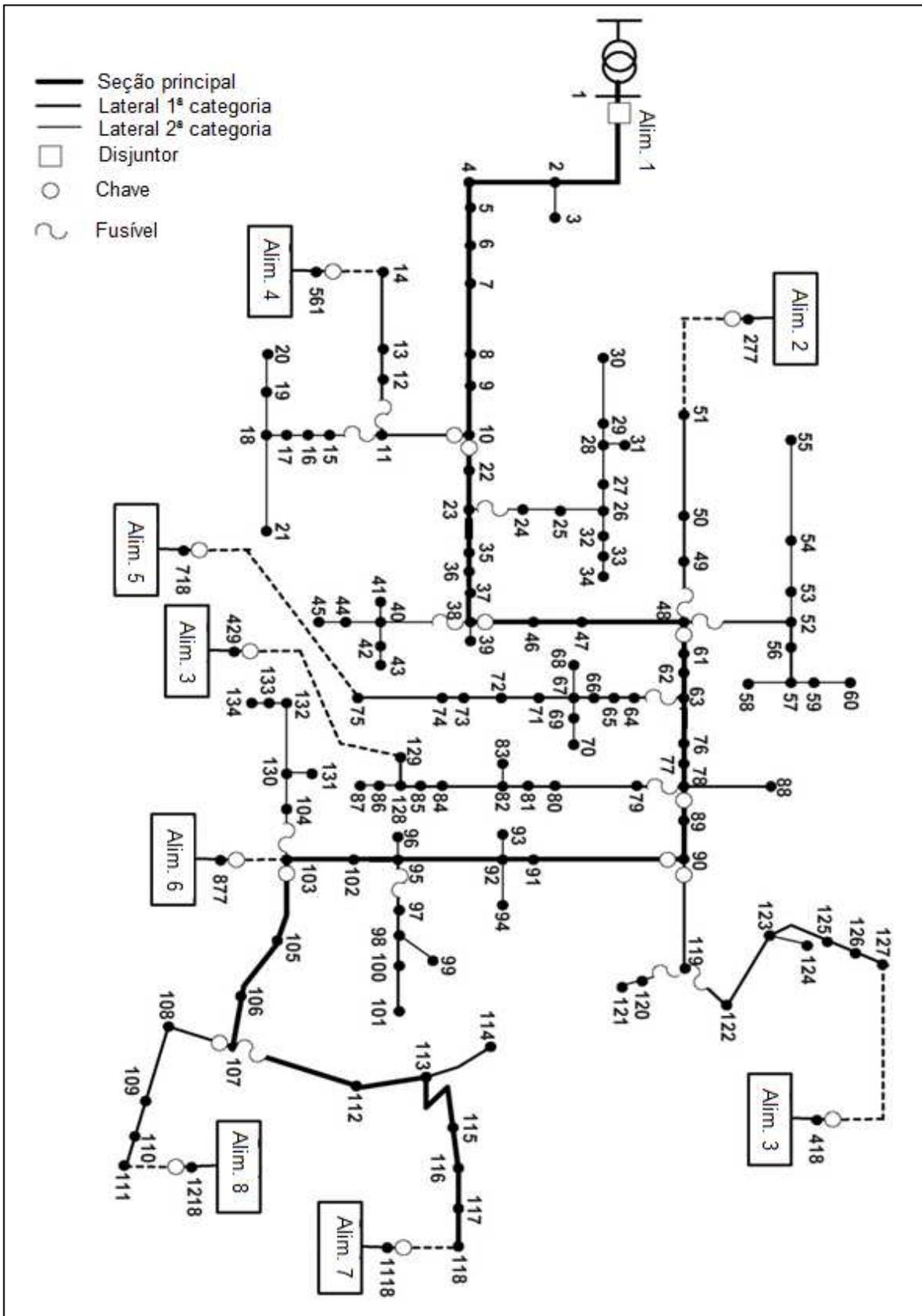
Tabela 3-8 - Alguns dados do alimentador *BRA-134*.

| Seção | Λ | N | L |
|--------------|----------|----------|----------|
| 35-36 | 0,315 | 345 | 275 |
| 47-48 | 0,52 | 397 | 542,5 |
| 89-90 | 0,072 | 27 | 0 |
| 90-91 | 0,063 | 75 | 420 |
| 102-103 | 0,41 | 13 | 75 |
| 103-105 | 0,05 | 21 | 150 |

| | | | |
|---------|-------|----|-------|
| 106-107 | 0,22 | 9 | 0 |
| 107-112 | 0,315 | 11 | 75 |
| 113-115 | 0,52 | 4 | 30 |
| 115-116 | 0,095 | 6 | 135 |
| 10-11 | 0,164 | 30 | 450 |
| 17-18 | 0,09 | 6 | 187,5 |
| 18-21 | 0,072 | 1 | 112,5 |
| 23-24 | 0,063 | 41 | 810 |
| 38-40 | 0,41 | 12 | 382,5 |
| 48-52 | 0,05 | 24 | 370 |
| 63-64 | 0,22 | 57 | 760 |
| 78-79 | 0,41 | 47 | 845 |
| 78-88 | 0,64 | 1 | 75 |
| 90-119 | 0,095 | 9 | 142,5 |
| 119-122 | 0,164 | 4 | 0 |
| 122-123 | 0,09 | 13 | 495 |
| 95-97 | 0,215 | 10 | 207,5 |
| 98-99 | 0,32 | 1 | 75 |
| 104-130 | 2,25 | 4 | 45 |
| 130-132 | 0,51 | 5 | 157,5 |
| 107-108 | 0,08 | 3 | 0 |
| 108-109 | 0,815 | 6 | 337,5 |
| 113-114 | 0,9 | 1 | 600 |

Fonte: (SILVA *et al.*, 2007)

Figura 3-3 - Topologia original do BRA-134.



Fonte: (SILVA *et al.* 2007).

3.3 SINOPSE DAS SIMULAÇÕES

As simulações⁶ conduzidas neste capítulo seguem, em forma de sinopse, na Tabela 3-9.

Tabela 3-9 - Sinopse das simulações conduzidas⁷

| Sim. | Sistema | Otim.? | MEG? | Objetivos |
|------|-------------------|--------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | <i>RBTS-Bus5</i> | Não | Não | Validação da parte do algoritmo referente à simulação analítica de faltas proposta. Geração de valores extras. |
| 2 | <i>PEA-51</i> | Não | Não | Validação da parte do algoritmo referente à simulação analítica de faltas proposta. Geração de valores extras. |
| 3 | <i>BRA-134</i> | Não | Não | Validação da parte do algoritmo referente à simulação analítica de faltas proposta. Geração de valores extras. |
| 4 | <i>RBTS-Bus 5</i> | Sim | Não | Análise da alocação otimizada de chaves seccionadoras no sistema, sem presença de MEG. Chaves podem ser localizadas em ambos os extremos de cada seção elegível. |
| 5 | <i>PEA-51</i> | Sim | Não | Análise da alocação otimizada de chaves seccionadoras no sistema, sem presença de MEG. Chaves podem ser localizadas em ambos os extremos de cada seção elegível. |
| 6 | <i>BRA-134</i> | Sim | Não | Análise da alocação otimizada de chaves seccionadoras no sistema, sem presença de MEG. Chaves podem ser localizadas em ambos os extremos de cada seção elegível. |
| 7 | <i>PEA-51</i> | Sim | Não | Análise da alocação otimizada de chaves |

⁶ Obviamente, não haverá variações nos índices SAIFI das configurações otimizadas em relação às originais, haja vista que a realocação de chaves seccionadoras é incapaz de variar o número de falhas por ano que cada consumidor perceberá. Portanto, coluna de valores SAIFI serão suprimidas das tabelas de resultados, por não trazer informações novas. A variação nas alocações de chaves e inserções de MEGs mudam apenas índices de confiabilidade que dependem das durações de interrupções (como SAIDI) e, consequentemente, custos de confiabilidade, os quais também dependem dos períodos de interrupção.

⁷ (Sim.: simulação; Otim.: realização da etapa de otimização de alocação de chaves; MEG: presença ou não de MEG; *: a otimização de chaves é primeiramente realizada sem a análise de inserção de MEGs, sendo estes alocados no sistema somente após a fixação da alocação de chaves).

| | | | | |
|----|-----------|-----|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | seccionadoras no sistema, sem presença de MEG. Chaves podem ser localizadas apenas no início de cada seção elegível. |
| 8 | PEA-51 | Sim | Não | Análise da alocação otimizada de chaves seccionadoras no sistema, sem presença de MEG. Chaves podem ser localizadas em ambos os extremos de cada seção elegível, mas o número original de chaves será mantido. |
| 9 | PEA-51 | Sim | Não | Análise de alocação otimizada de chaves seccionadoras no sistema, sem presença de MEG. Chaves podem ser localizadas em ambos os extremos de cada seção elegível. Serão utilizados diferentes valores de custo de interrupção para alguns consumidores individuais. |
| 10 | PEA-51 | Sim | Não | Análise de alocação otimizada de chaves seccionadoras no sistema, sem presença de MEG. Chaves podem ser localizadas em ambos os extremos de cada seção elegível. Serão utilizados diferentes valores de custo de interrupção para alguns consumidores individuais. O índice SAIDI será limitado a um valor específico. |
| 11 | RBTS-Bus5 | Não | Sim, sem \$ | Análise do impacto em confiabilidade do sistema quando um MEG está disponível para uso, sem custo adicional para o alimentador. Aplicação do conceito de COLF. |
| 12 | RBTS-Bus5 | Não | Sim, com \$ | Análise do impacto em confiabilidade e em custos do sistema quando um MEG está disponível para uso, com custo adicional para o alimentador. Aplicação do conceito de COLF. |
| 13 | PEA-51 | Não | Sim, sem \$ | Análise do impacto em confiabilidade do sistema quando um MEG está disponível para uso, sem custo adicional para o alimentador. Aplicação do conceito de COLF. |
| 14 | PEA-51 | Não | Sim, com \$ | Análise do impacto em confiabilidade e em custos do sistema quando um MEG está disponível para |

| | | | | |
|----|-------------------|-----|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | uso, com custo adicional para o alimentador. Aplicação do conceito de COLF. |
| 15 | <i>BRA-134</i> | Não | Sim, sem \$ | Análise do impacto em confiabilidade do sistema quando um MEG está disponível para uso, sem custo adicional para o alimentador. Aplicação do conceito de COLF. |
| 16 | <i>BRA-134</i> | Não | Sim, com \$ | Análise do impacto em confiabilidade e em custos do sistema quando um MEG está disponível para uso, com custo adicional para o alimentador. Aplicação do conceito de COLF. |
| 17 | <i>RBTS-Bus 5</i> | Sim | Sim, sem \$ | Análise do método completo: otimização de chaves, levando-se em conta a disponibilidade de um MEG no caso de faltas; MEG sem custo adicional para o alimentador. |
| 18 | <i>PEA-51</i> | Sim | Sim, sem \$ | Análise do método completo: otimização de chaves, levando-se em conta a disponibilidade de um MEG no caso de faltas; MEG sem custo adicional para o alimentador. |
| 19 | <i>BRA-134</i> | Sim | Sim, sem \$ | Análise do método completo: otimização de chaves, levando-se em conta a disponibilidade de um MEG no caso de faltas; MEG sem custo adicional para o alimentador. |
| 20 | <i>RBTS-Bus 5</i> | Sim | Sim, com \$ | Análise do método completo: otimização de chaves, levando-se em conta a disponibilidade de um MEG no caso de faltas; MEG possui custo adicional para o alimentador. |
| 21 | <i>PEA-51</i> | Sim | Sim, com \$ | Análise do método completo: otimização de chaves, levando-se em conta a disponibilidade de um MEG no caso de faltas; MEG possui custo adicional para o alimentador. |
| 22 | <i>BRA-134</i> | Sim | Sim, com \$ | Análise do método completo: otimização de chaves, levando-se em conta a disponibilidade de um MEG no caso de faltas; MEG possui custo adicional para o alimentador. |
| 23 | <i>PEA-51</i> | Não | Sim | Análise de sensibilidade de variações de parâmetros do MEG: variações na capacidade do |

| | | | | |
|----|--------|------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | MEG (P_{MEG}). |
| 24 | PEA-51 | Não | Sim | Análise de sensibilidade de variações de parâmetros do MEG: variações na velocidade média do MEG (v_{MEG}). |
| 25 | PEA-51 | Não | Sim | Análise de sensibilidade de variações de parâmetros do MEG: variações na parcela fixa do tempo de entrega de MEG ($t_{MEG\ Fix}$). |
| 26 | PEA-51 | Sim* | Sim, sem \$ | Análise de uso de MEG somente após a otimização: primeiro, o alimentador passará por otimização de chaves, sem presença de MEG, de modo que a solução otimizada não levou em conta essa possibilidade de usar MEG durante falta; depois, um MEG sem custos adicionais foi disponibilizado para o alimentador. |
| 27 | PEA-51 | Sim* | Sim, com \$ | Análise de uso de MEG somente após a otimização: primeiro, o alimentador passará por otimização de chaves, sem presença de MEG, de modo que a solução otimizada não levou em conta essa possibilidade de usar MEG durante falta; depois, um MEG com custos adicionais foi disponibilizado para o alimentador. |
| 28 | PEA-51 | Não | Sim | A velocidade utilizada pelo MEG não é uma média, sendo dependente da ocasião da falta. |
| 29 | PEA-51 | Não | Sim, sem \$ | Serão disponibilizados 2 MEGs para o alimentador, sendo que o segundo será pré-alocado no COLF do primeiro. |
| 30 | PEA-51 | Não | Sim, sem \$ | Serão disponibilizados 2 MEGs para o alimentador, sendo que o segundo terá seu próprio COLF. |
| 31 | PEA-51 | Não | Sim, com \$ | Serão disponibilizados 2 MEGs para o alimentador, sendo que o segundo será pré-alocado no COLF do primeiro. |
| 32 | PEA-51 | Não | Sim, com \$ | Serão disponibilizados 2 MEGs para o alimentador, sendo que o segundo terá seu próprio COLF. |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.4 SIMULAÇÕES DE VALIDAÇÃO E GERAÇÃO DE VALORES ÚTEIS (MÓDULO DE SIMULAÇÃO ANALÍTICA DE FALTAS)

Nesta seção, os três sistemas apresentados serão simulados apenas na parte do algoritmo correspondente à simulação analítica de faltas. Isto fará com que índices de confiabilidade desses sistemas possam ser encontrados a partir de seus dados gerais e parâmetros históricos de confiabilidade pelo método booleano qualitativo-quantitativo proposto. O objetivo será encontrar valores de SAIFI e SAIDI para os alimentadores utilizando-se o método proposto; então, os resultados poderão ser comparados com os valores originais apresentados pelos três sistemas. Espera-se então que tais valores sejam coincidentes, mostrando a eficácia do método proposto para gerar índices de confiabilidade.

Exceção a essa comparação será para o caso do alimentador *BRA-134*, que em nenhum local foi encontrado seu valor original de SAIDI; e, além disso, os valores das taxas de faltas λ para a maioria das suas seções tiveram de ser calculadas por não figurarem na literatura. De qualquer forma, os valores serão úteis para comparação entre configurações de chaves quando as topologias forem modificadas (isto é, as otimizadas ou com presença de MEG).

Além disso, serão calculados os custos totais dos alimentadores originais, de acordo com a Equação (C-10), para que os custos das configurações modificadas possam ser comparados com as originais, de acordo com a função objetivo definida neste trabalho. Obviamente, esses valores não poderão ser comparados com originais, uma vez que eles não existem nas fontes consultadas, haja vista que a função objetivo utilizada neste trabalho não foi utilizada nas referências originais.

E, finalmente, o índice de confiabilidade EENS da rede original do *RBTS-Bus 5* também será calculado como forma de validação do algoritmo, já que este índice para tal sistema teste segue na referência onde tal sistema foi encontrado, buscando verificar se o sistema de cálculo de índices de confiabilidade proposto possui acurácia.

Enfim, os resultados de validação (e geração de valores úteis para efeitos de comparações futuras com outras simulações) seguem registrados a seguir: *RBTS-Bus 5* (Tabela 3-10), *PEA-51* (Tabela 3-11), *BRA-134* (Tabela 3-12).

Tabela 3-10: Resultados de validação e geração de valores úteis obtidos para a configuração original do *RBTS-Bus 5* (*: não se aplica/sem referência).

| <i>RBTS-Bus 5</i> | SAIFI (falhas/ano) | SAIDI (h/ano) | EENS (MWh/ano) | Custos (US\$/ano) |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|
| Original | 0,23 | 3,55 | 40,1 | * |
| Simulação 1 | 0,23 | 3,54 | 40,0 | 202.310,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 3-11: Resultados de validação e geração de valores úteis obtidos para a configuração original do *PEA-51* (*: não se aplica/sem referência).

| <i>PEA-51</i> | SAIFI (falhas/ano) | SAIDI (h/ano) | Custos (US\$/ano) |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Original | 8,67 | 10,02 | * |
| Simulação 2 | 8,67 | 10,00 | 212.970,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 3-12: Resultados de validação e geração de valores úteis obtidos para a configuração original do *BRA-134* (*: não se aplica/sem referência).

| <i>BRA-134</i> | SAIFI (falhas/ano) | SAIDI (h/ano) | Custos (US\$/ano) |
|-----------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Original | * | * | * |
| Simulação 3 | 8,07 | 7,66 | 322.250,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.5 SIMULAÇÕES DE OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE CHAVES SECCIONADORAS, SEM A PRESENÇA DE MEGS

3.5.1 Simulações sem restrições

Os sistemas foram simulados quanto à alocação otimizada de suas chaves seccionadoras, sem a presença de MEGs, com vias de análise e validação do módulo genético no contexto do algoritmo proposto e

comparações diversas com outras futuras simulações. As chaves puderam ser alocadas conforme quatro possibilidades por seção, isto é, *i*) seção sem chaves; *ii*) seção com chave apenas em sua extremidade inicial; *iii*) seção com chave apenas em sua extremidade final; e *iv*) seção com chaves em ambas suas extremidades. Os resultados seguem na Tabela 3-13. Ressalta-se que os valores de SAIFI não foram incluídos nessa tabela pois não houve alteração nas frequências de interrupções (o que já era esperado, haja vista que a mudança na alocação de chaves é incapaz de alterar as frequências de interrupções; apenas as durações de interrupções dos que são restaurados devido às novas possibilidades de manobras podem variar, o que varia, por exemplo, o índice SAIDI).

Comparando-se os resultados obtidos com os resultados obtidos para as alocações originais de chaves, conforme Tabela 3-14, percebe-se que em todos os casos, houve redução significativa de custos (o que já era um efeito esperado devido à simulação de otimização de custos visando justamente redução desses valores); porém, é interessante notar que, em exceção ao *RBTS-Bus 5*, houve também redução de SAIDI nas simulações. Isto é altamente benéfico, haja vista que as alocações otimizadas para os sistemas reais *PEA-51* e *BRA-134* não apenas tiveram menores custos totais, como também se mostraram consideravelmente mais confiáveis.

Tabela 3-13 - Simulações de otimização de alocação de chaves seccionadoras, sem a presença de MEGs.

| Sistema/simulação | Chaves no início das seções: | Chaves no final das seções: | SAIDI (h/ano) | Custo (US\$/ano) |
|------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| <i>RBTS-Bus5</i> (Simulação 4) | 7 – 39 | 16 – 28 | 3,70 | 188.870,00 |
| <i>PEA-51</i> (Simulação 5) | 14 – 22 – 26 – 33 – 36 – 43 | 7 – 19 – 23 – 28 – 31 – 38 – 45 – 51 | 5,64 | 177.730,00 |
| <i>BRA-134</i> (Simulação 6) | 46 – 61 – 92 – 106 | 11 – 23 – 48 – 90 – 109 | 5,46 | 281.060,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 3-14 - Comparações entre os pares de simulações 1-4, 2-5 e 3-6.

| Sistema | SAIDI | Custo |
|--------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|
| <i>RBTS-Bus 5</i> (Simulação 1) | 3,54 | 202.310,00 |
| <i>RBTS-Bus 5</i> (Simulação 4) | 3,70 (aumento de 4,52%) | 188.870,00 (redução de 6,64%) |
| <i>PEA-51</i> (Simulação 2) | 10,00 | 212.970,00 |
| <i>PEA-51</i> (Simulação 5) | 5,64 (redução de 43,6%) | 177.730,00 (redução de 16,55%) |
| <i>BRA-134</i> (Simulação 3) | 7,66 | 322.250,00 |
| <i>BRA-134</i> (Simulação 6) | 5,46 (redução de 28,72%) | 281.060,00 (redução de 12,78%) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Outros detalhes acerca das simulações conduzidas neste item:

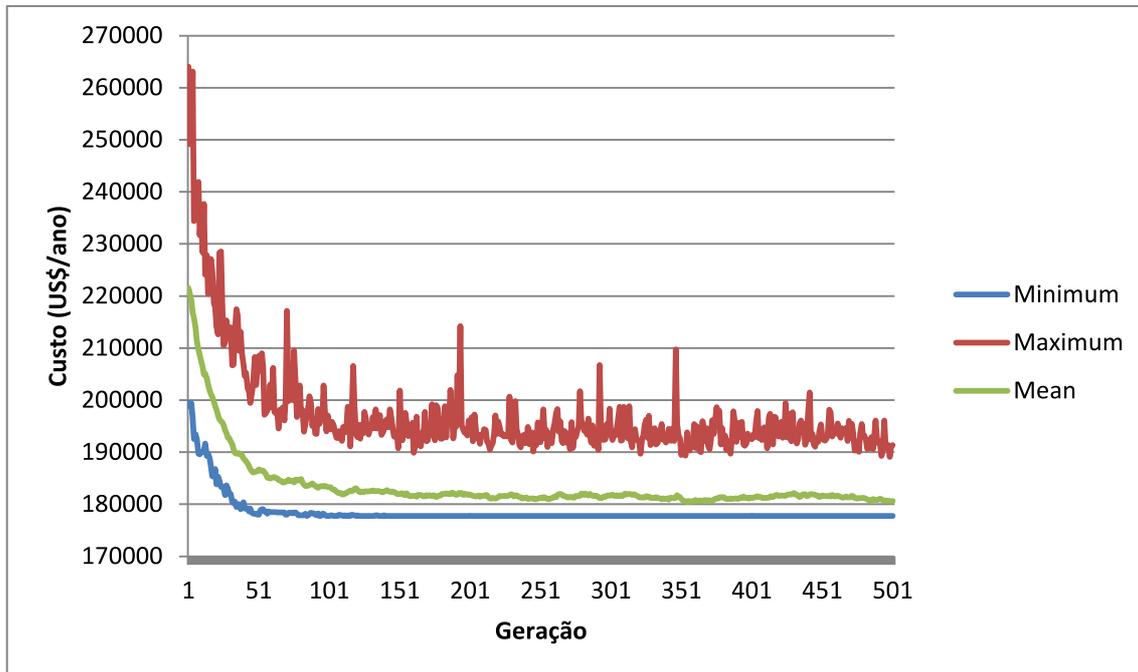
- o gráfico da Figura 3-4 mostra como os valores máximos, mínimos e médios de custo entre os cromossomos de cada geração se comportaram no contexto da Simulação 5, quando permite-se que as gerações tenham um valor máximo de 500. A estagnação do valor mínimo, que foi associado ao cromossomo mais apto, pôde ser obtida com cerca de 110 gerações. Um padrão como esse foi observado em todas as simulações realizadas neste trabalho. A análise desses padrões, nessas e em outras simulações, ajudou o autor a escolher e ajustar os parâmetros utilizados no algoritmo genético, até que as melhores soluções pudessem ser obtidas rapidamente.

- a eficiência computacional do método proposto também foi verificada. Os períodos de tempo necessários para as simulações foram da ordem de segundos. Por exemplo, a Simulação 5, com 200 gerações e 500 cromossomos na população inicial, requereu 50,7 segundos para sua realização. Ressalta-se que esse modelo foi desenvolvido para aproveitar a própria estrutura genética para se modelar as possibilidades de alocação de

chaves a 4 estados, aumentando apenas o número de bits em cada cromossomo testado, em vez de utilizar aumento do número de nós no alimentador – o que seria uma possibilidade mais clássica de simular novas alocações de chaves, o que “quebraria” cada seção em mais nós, permitindo alocação de chaves entre esses nós, mas potencialmente aumentando o tempo de simulação. De forma a se entender a variação de tempo necessária para a simulação do método proposto e da inclusão de possibilidades de alocação de chaves em ambos os extremos de cada seção pelo método de inserção de novos nós, foi testada uma simulação adicional em que nós extras foram criados em cada seção elegível para recebimento de chaves do sistema *PEA-51*, ao invés de ampliar-se o número de bits por cromossomo. Nesse caso, os resultados de custo e SAIDI obtidos foram exatamente os mesmos da Simulação 5, mas o tempo de simulação aumentou de 50,7 segundos para 59,3 segundos – o que representa um aumento considerável, de aproximadamente 17%.

Enfim, os resultados das Simulações 4, 5 e 6 mostram que o algoritmo genético utilizado, além de ser eficaz para a minimização dos custos, pode conduzir também a melhores índices de confiabilidade e é também eficiente do ponto de vista computacional.

Figura 3-4 - Gráfico ilustrando o comportamento dos valores mínimo, máximo e médio de custos entre os cromossomos de cada uma de 500 gerações simuladas no contexto da Simulação 5



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.5.2 Simulações com restrições e variações diversas

Ainda na linha das simulações de otimização sem MEGs, com vias de analisar a estrutura do algoritmo genético utilizado e suas possibilidades, outras simulações foram conduzidas para o *PEA-51*. Elas incluem a análise de restrições e variações diversas:

Simulação 7: As chaves poderão ser localizadas apenas no início de cada seção elegível. Esta simulação visa comparar o desempenho do algoritmo genético proposto quando a otimização é realizada a dois estados, ou seja, ou não há chave numa seção elegível, ou há chave no início dessa seção. Isto será feito associando-se a cada seção elegível a receber chave um único alelo no cromossomo representativo da solução candidata, de modo que cada solução terá um cromossomo de tamanho L (sendo L o número de seções passíveis de receberem chave, diferentemente do valor $2L$ utilizado no método completo proposto neste trabalho). Todos os outros parâmetros referentes ao *PEA-51* serão mantidos.

Simulação 8: As chaves poderão ser localizadas em ambos os extremos de cada seção elegível, mas o número original de chaves será mantido – que no caso são 7 chaves. Isto será feito impondo-se um fator de penalidade para qualquer solução que possua um número de chaves diferente de 7. Este cenário pode ser importante do ponto de vista prático, já que muitas concessionárias de energia podem estar interessadas em soluções otimizadas que mantenham o mesmo número de equipamentos de manobra que já estavam disponíveis para o alimentador previamente – ou seja, não será necessária a aquisição, instalação e manutenção de novas chaves. No caso de empresas públicas, por exemplo, a aquisição de novas chaves pode mostrar-se inconveniente em determinados momentos – como no caso de necessidade de processos licitatórios. Assim, um bom algoritmo de otimização de alocação de chaves deve poder fixar de forma fácil o número de chaves utilizadas ao número original.

Simulação 9: Serão utilizados diferentes valores de custo de interrupção para alguns consumidores individuais. Na verdade, os dados referentes a cargas, número de consumidores e funções de dano associados aos nós do alimentador variarão bastante em relação aos dados originais, com o intuito de avaliar-se como a alocação de chaves se dará num alimentador que possua polos industriais separados de áreas residenciais e comerciais. Neste contexto, será considerado que:

- as áreas a jusante dos dois religadores (nós aos finais das seções 8, 9, 10, 11, 12 e 13, e nós aos finais das seções 39, 40, 41 e 42; consistirão em dois polos de consumidores do tipo industrial. Cada nó desses polos representará um consumidor individual de carga 500 kW e altos custos de interrupção, de 10 US\$/kWh;

- todos os outros nós que possuam cargas serão agora considerados como grupos de consumidores do tipo residencial. Cada um desses nós será associado a 10 consumidores, com uma carga total de 50 kW por nó, e custos de interrupção baixos, de 1 US\$/kWh.

Simulação 10: Serão utilizados os mesmos dados de consumidores da Simulação 9, mas com a adição da restrição de que apenas soluções com valores de SAIDI menores ou iguais a 6,0 serão consideradas viáveis.

Os resultados das simulações 7, 8, 9 e 10 são mostrados na Tabela 3-15:

Tabela 3-15 - Resultados das simulações de otimização, sem MEG, mas com restrições e variações diversas.

| Sistema/simulação | Chaves no início das seções: | Chaves no final das seções: | SAIDI (h/ano) | Custo (US\$/ano) |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Simulação 7 | 7 – 14 – 21 – 23 – 26 – 31 – 33 – 36 – 43 – 45 – 51 | - | 6,05 | 185.800,00 |
| Simulação 8 | 14 – 26 – 31 – 36 – 43 | 21 – 49 | 6,54 | 190.470,00 |
| Simulação 9 | 11 – 14 – 23 – 41 – 43 | 7 – 38 | 7,93 | 281.660,00 |
| Simulação 10 | 11 – 14 – 23 – 28 – 41 – 43 – 45 | 7 – 19 – 31 – 38 | 5,85 | 286.010,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os seguintes comentários acerca dessas simulações podem ser tecidos:

- A Simulação 7 é a otimização do posicionamento de qualquer número de chaves, mas restringe as alocações apenas ao início de cada seção elegível - o que, como já explicado neste trabalho, é o que costuma ser feito nos algoritmos clássicos de otimização de alocação de chaves encontrados na literatura. Se comparados aos valores obtidos pela alocação original, é possível observar que esta simulação levou a uma boa redução nos custos, tendo sido notada também uma considerável redução no índice SAIDI – mas, evidentemente, levou a piores resultados em comparação com a Simulação 5, que analisou a possibilidade de alocação de chaves nos dois extremos de cada seção. Como afirmado anteriormente, o método proposto neste artigo permite que as simulações sejam realizadas em um ou ambos os extremos das seções

da rede, o que amplia as possibilidades de se obter soluções melhores de forma considerável. Ademais, obviamente a Simulação 7 levou um tempo menor de simulação em comparação com a Simulação 5 (43,8 segundos no caso da Simulação 7 e 50,7 segundos no caso da Simulação 5); mas é possível entender que esse aumento no tempo computacional é plenamente justificável face à redução de custos possibilitada pela Simulação 5, o que faz com que a possibilidade de alocação de chaves em ambas as extremidades de cada seção elegível possa ser vista como bem interessante do ponto de vista prático;

- A Simulação 8 consiste na solução que passou por um processo de otimização com a restrição de que o número de chaves presentes deveria ser fixo em 7 (que é o número original de chaves). Como foi explicado anteriormente, esse tipo de análise pode ser interessante para as concessionárias de distribuição, que dependendo da ocasião poderiam não estar interessadas em variar o número de chaves presentes na rede, interessando-se apenas em aproveitar ao máximo as chaves já existentes. Como afirmado anteriormente, o método proposto nesta tese permite que o usuário facilmente escolha quantas chaves devem ser alocadas na solução ideal, o que permite a obtenção de ótimos locais com esse número determinado de chaves.

- As Simulações 9 e 10 têm resultados que não podem ser comparados diretamente com outras simulações, devido ao uso de diferentes funções de dano e valores de carga para diferentes tipos de consumidores. Na realidade, as Simulações 9 e 10 só podem ser diretamente comparadas entre si. O intuito principal dessas simulações era avaliar o uso do método proposto sob condições de diferentes funções de dano para diferentes consumidores. Como afirmado anteriormente, a função objetivo usada nesta tese pode facilmente usar diferentes valores para cada nó presente no alimentador, o que é evidenciado pelo componente FDC_j na equação (2-10). Essa análise de diferentes valores de FDC para diferentes consumidores, ao invés do uso de uma média geral de FDC para todos os consumidores, pode ser muito importante em cenários de casos reais, porque alguns determinados consumidores ou algumas determinadas áreas de uma cidade podem ter cargas mais importantes que outros - como o caso de hospitais ou alguns tipos

de indústrias. No caso da Simulação 9, é um fato interessante que, na solução otimizada nessas condições, ambos os polos industriais (as áreas a jusante dos dois religadores, presentes nas seções 8 e 39) possuem chaves NF em torno dos nós iniciais dos religadores (final da seção 7 e início da seção 14 para o primeiro polo industrial, e final da seção 38 e início da seção 43, para o segundo polo industrial), o que aumenta as possibilidades dessas duas áreas serem restauradas em caso de faltas, levando à preservação do fornecimento de energia a ambos os polos industriais. Além disso, esses polos agora têm também uma chave NF em suas últimas seções principais (seções 11 e 41), o que melhora a confiabilidade desses polos no caso de faltas que ocorrem a jusante de ambos os religadores. Além disso, notou-se que, como os valores de função de dano de consumidores residenciais e suas respectivas cargas eram bastante baixos nessa simulação, o algoritmo identificou que não valia a pena priorizar as durações de interrupção dos consumidores das áreas residenciais, o que é percebido pelo posicionamento de chaves seccionadoras que praticamente só priorizam as áreas industriais. Há uma única chave que não está diretamente próxima a nenhum dos dois polos industriais (chave no início da seção 23), mas que de qualquer maneira permite que qualquer falha na seção 23 ou a jusante desta, possa ser isolada, permitindo um caminho claro de restauração a montante para os polos industriais e também para alguns clientes residenciais. Observa-se, também, que o fato de negligenciar os consumidores residenciais, embora tenha levado a uma situação de menor custo para essas condições, levou a um alto valor de SAIDI nesta simulação. Isto nos motivou a tentar frear esse aumento de SAIDI, de modo que o intuito da Simulação 10 foi simular as mesmas condições de consumidores da Simulação 9, com a diferença de que foi imposta agora uma restrição ao valor máximo de SAIDI – esse índice precisa ser agora menor que 6,0. Isto simulará a condição de que um alimentador com polos industriais precise ter os custos mais baixos possíveis, mas sem penalizar seus clientes residenciais com altos períodos de interrupção. Naturalmente, o custo do alimentador obtido como resultado nesta simulação é superior ao da Simulação 9, que não tinha restrições na avaliação de seus custos; mas o SAIDI agora está abaixo do limite imposto. De fato, o aumento no custo foi de apenas 1,54%, enquanto a redução no SAIDI foi de 26,23%, o que significa um grande benefício social. A

alocação de chaves nessas condições é interessante, pois a mesma alocação da Simulação 9 foi usada (chaves no início das seções 11, 14, 23, 41 e 43 e no final das seções 7 e 38) em conjunto com 4 novas chaves, posicionadas no início das seções 28 e 45 e no final das seções 19 e 31. Essa nova configuração permite manobras de chaveamento para restauração dos dois polos industriais na maioria das faltas que podem ocorrer neste alimentador, aliada a novas manobras de restauração gerais para uma grande variedade de consumidores residenciais. Observa-se que as 4 novas chaves podem agora dividir a seção principal em vários segmentos, permitindo mais esquemas de isolamentos de faltas e, conseqüentemente, várias manobras de restauração de consumidores residenciais.

3.6 SIMULAÇÕES DE INSERÇÃO DE MEG, COM E SEM CUSTOS, MAS SEM OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE CHAVES

Os sistemas foram simulados quanto às variações em custos totais e SAIDI quando um MEG era adicionado ao sistema, como possibilidade de uso em caso de faltas. Nestes casos, não houve otimização de alocação de chaves. Os MEGs foram simulados com e sem custos adicionais, para cada um dos três sistemas, com suas respectivas alocações de chaves originais, e os valores de COLF foram gerados para as alocações de chaves originais de cada sistema. O objetivo destas simulações consiste na análise de uso de MEGs nas configurações de alocação de chaves originais de cada sistema, e os resultados seguem na Tabela 3-16.

Tabela 3-16 - Simulações dos sistemas em suas alocações originais de chaves quando um MEG está disponível para uso a cada falta (MEG com e sem custos adicionais).

| Sistema/simulação | MEG tem custo? | COLF (x; y) em km | SAIDI (h/ano) | Custo (US\$/ano) |
|-------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| <i>RBTS-Bus5</i> (Simulação 11) | Não | (2,51; 3,02) | 3,40 | 188.110,00 |
| <i>RBTS-Bus5</i> | Sim | (2,51; 3,02) | 3,40 | 201.610,00 |

| | | | | |
|-----------------------------------------|-----|-------------------|------|------------|
| (Simulação 12) | | | | |
| <i>PEA-51</i> (Simulação 13) | Não | (16,21; 6,17) | 7,01 | 198.830,00 |
| <i>PEA-51</i> (Simulação 14) | Sim | (16,21; 6,17) | 7,01 | 212.330,00 |
| <i>BRA-134</i> (Simulação 15) | Não | (17,82; 16,75) | 6,08 | 285.840,00 |
| <i>BRA-134</i> (Simulação 16) | Sim | (17,82; 16,75) | 6,08 | 299.340,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Sobre estas simulações, os seguintes comentários fazem-se interessantes:

- o uso de MEGs levou a soluções que eram melhores que as originais em todos os casos, tanto em custos quanto SAIDI. Isto prova o grande potencial que MEGs têm de impactar positivamente tanto os índices de confiabilidade quanto os custos operacionais de alimentadores. Obviamente, os custos totais foram muito melhores quando foi considerado um MEG sem custos adicionais para os alimentadores; mas, mesmo se os MEGs tivessem de ter seus custos calculados com a parcela adicional de US\$ 13.500,00 ao ano para cada alimentador, ainda assim os valores seriam compensatórios, em maior ou menor grau – a depender do sistema.

- Foi desenvolvida uma forma gráfica de representar quais áreas serão restauradas por MEG de acordo com quais seções sofrem falta. Utilizou-se, para isso, traços para representar seções em falta e circulações para representar áreas restauradas por MEG, sendo que áreas circuladas com determinada cor serão restauradas devido a faltas em seções marcadas por traços da mesma cor. Assim, no caso do *PEA-51*, a forma gráfica correspondente às Simulações 13 e 14 é aquela mostrada na Figura 3-5, que por sua vez está associada aos dados da Tabela 3-17. Algumas observações merecem destaque nessa análise: *i)* algumas áreas podem ser restauradas com diferentes conjuntos de faltas, o que é o caso, por exemplo, da área referente ao nó 34, a qual pode ser restaurada em conjunto com os nós da área 33 (nós 33 e 35), no caso de faltas nas seções 22, 31 e 32, ou de forma

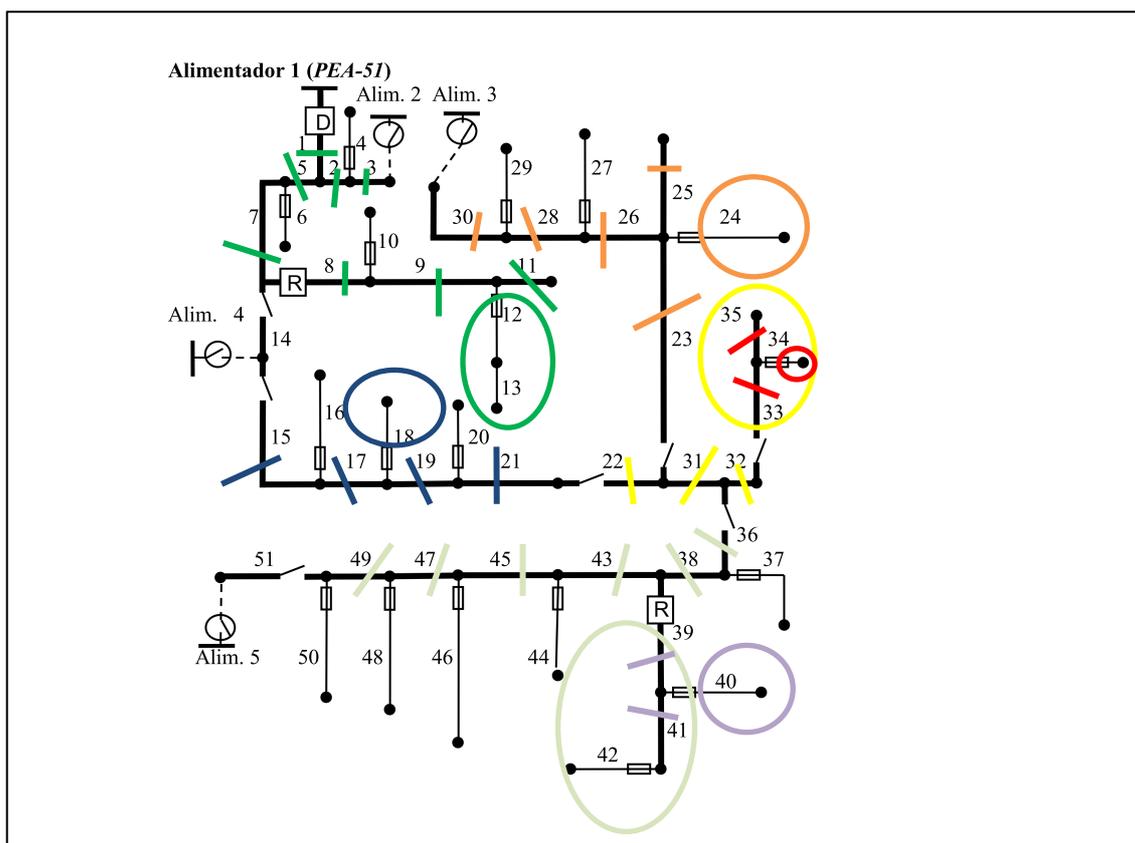
individual, no caso de faltas nas seções 33 e 35; *ii*) faltas nas seções 36, 38, 43, 45, 47 e 49 levam a uso de MEG para restauração das áreas 39 (nós 39 e 41) e 42, com uma carga total de 760 kVA, sendo que a estas áreas não se pode juntar a área 40 (de carga 450 kVA), pois isto extrapolaria a capacidade de 1000 kVA do MEG utilizado – mas, no caso de faltas nas seções 39 e 41, a área 40 pode ser restaurada individualmente; *iii*) a Tabela 3-18 mostra a distância percorrida pelo MEG no caso de cada falta, partindo de sua posição inicial (que é o COLF, considerada como melhor posição inicial) até o ponto de conexão com o MEG no caso da ocorrência dessas faltas, o que corresponde ao nó mais a montante dentre as áreas restauradas no caso de cada uma das faltas.

- Simulou-se a variação em SAIDI que ocorreria para o sistema *PEA-51* caso fossem utilizadas outras posições iniciais para o MEG, além do COLF. Como o alimentador é modelado num plano, como se fosse um mapa 2D, foram usadas para simulações as coordenadas dos cantos do mapa (inferiores, superiores, esquerdos e direitos), do centro geométrico e do início do Alimentador 1, onde está posicionado o disjuntor. Os resultados são mostrados na Tabela 3-19. Está claro que nenhuma das posições iniciais diversas do COLF levaram a uma melhor solução em SAIDI (e consequentemente a maiores custos, pois, como não há variações nos números de chaves e equipamentos, e levando em conta que as funções de dano nesse casos são homogêneas, maiores SAIDIs levariam a maiores custos de interrupção mantendo-se intactos os custos de equipamentos, e logo a maiores custos totais). Isto mostra que o COLF consiste numa boa estratégia de pré-posicionamento para o MEG. Em que pese não haver prova matemática de que o COLF seja o melhor ponto inicial global para colocação do MEG, a realização de uma busca exaustiva por todos os pontos de um plano 2D é impossível, haja vista que o espaço é uma variável contínua⁸. O uso do COLF se mostra

⁸ Poder-se-ia argumentar que o espaço 2D poderia ser dividido em coordenadas com incrementos a intervalos fixos, por exemplo, a cada 50 metros. Porém, isso geraria um custo computacional considerável quando o método completo fosse utilizado, pois uma busca por otimização pelo melhor ponto inicial de alocação do MEG teria que ser realizada a cada solução candidata de cada geração de um algoritmo genético, ou seja, haveria uma otimização complexa para cada candidato de uma outra otimização complexa, o que é altamente indesejável.

uma estratégia extremamente eficaz, por poder ser facilmente obtido utilizando-se conceitos matemáticos simples e determinísticos.

Figura 3-5: Áreas de restauração por MEG no *PEA-51*, de acordo com a localização das faltas (áreas circuladas com determinada cor serão restauradas devido a faltas nas seções marcadas com a mesma cor).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 3-17 - Áreas de restauração por MEG no *PEA-51*, de acordo com a localização das faltas, e carga total restaurada nessas áreas.

| Faltas nas seções | Áreas restauradas | Carga total (kVA) |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------|
| 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 11 | 12 (engloba nós 12 e 13) | 750 |
| 15, 17, 19, 21 | 18 | 310 |
| 22, 31, 32 | 33 (engloba nós 33 e 35) e 34 | 360 |
| 23, 25, 26, 28, 30 | 24 | 610 |
| 36, 38, 43, 45, 47, 49 | 39 (engloba nós 39 e 41) | 760 |

| | | |
|--------|----------|-----|
| | 41) e 42 | |
| 33, 35 | 34 | 50 |
| 39, 41 | 40 | 450 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 3-18 – Distâncias (em km) percorridas pelo MEG, do COLF até o ponto de conexão (que é a área restaurada mais a montante), em relação a cada falta que origina tal restauração.

| Falta na seção | Distância (em km) | Falta na seção | Distância (em km) |
|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| 1 | 2,8183 | 27 | - |
| 2 | 2,8183 | 28 | 4,1573 |
| 3 | 2,8183 | 29 | - |
| 4 | - | 30 | 4,1573 |
| 5 | 2,8183 | 31 | 4,1441 |
| 6 | - | 32 | 4,1441 |
| 7 | 2,8183 | 33 | 4,7358 |
| 8 | 2,8183 | 34 | - |
| 9 | 2,8183 | 35 | 4,7358 |
| 10 | - | 36 | 1,5929 |
| 11 | 2,8183 | 37 | - |
| 12 | - | 38 | 1,5929 |
| 13 | - | 39 | 2,7946 |
| 14 | - | 40 | - |
| 15 | 3,6948 | 41 | 2,7946 |
| 16 | - | 42 | - |
| 17 | 3,6948 | 43 | 1,5929 |
| 18 | - | 44 | - |
| 19 | 3,6948 | 45 | 1,5929 |
| 20 | - | 46 | - |
| 21 | 3,6948 | 47 | 1,5929 |
| 22 | 4,1441 | 48 | - |
| 23 | 4,1573 | 49 | 1,5929 |
| 24 | - | 50 | - |
| 25 | 4,1573 | 51 | - |
| 26 | 4,1573 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 3-19 - Variações em SAIDI do PEA-51 de acordo com algumas variações na posição inicial do MEG.

| Posição inicial | SAIDI |
|------------------------------------------|-------|
| (0; 0) = canto inferior esquerdo do mapa | 7,2 |

| | |
|-----------------------------------------------|------|
| (21,3; 0) = canto inferior direito do mapa | 7,08 |
| (21,3; 15,9) = canto superior direito do mapa | 7,12 |
| (0; 15,9) = canto superior esquerdo do mapa | 7,22 |
| (10,75; 9,5) = início do Alimentador 1 | 7,06 |
| (10,65; 7,95) = centro geométrico | 7,05 |
| (16,21; 6,17) = COLF | 7,01 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.7 SIMULAÇÕES COMPLETAS: OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE CHAVES, LEVANDO-SE EM CONTA DISPONIBILIDADE DE MEG

Nesta seção, o método completo será utilizado, ou seja: a alocação de chaves de cada sistema será otimizada, sendo que, durante o processo interno de simulação analítica de faltas (o qual ocorre durante o processo de testagem de candidatos na otimização), haverá um MEG disponível para manobras de restauração a cada situação de falta. Desta forma, o fluxograma completo da Figura 2-14 será seguido pelo algoritmo. Os resultados seguem na Tabela 3-20.

Tabela 3-20 - Resultados das simulações completas (otimização de alocação de chaves, sendo que no processo de análise de aptidão de cada solução candidata, há um MEG disponível para uso em cada situação de falta).

| Sistema/simulação | MEG tem custo? | Chaves nas seções | COLF (x; y) em km | SAIDI (h/ano) | Custo (US\$/ano) |
|-------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| <i>RBTS-Bus5</i> (Simulação 17) | Não | Início: 7 – 18 – 28 – 39 | (2,37; 2,96) | 3,62 | 173.660,00 |
| <i>RBTS-Bus5</i> (Simulação 18) | Sim | Início: 7 – 18 – 28 – 39 | (2,37; 2,96) | 3,62 | 187.260,00 |
| <i>PEA-51</i> (Simulação 19) | Não | Início: 14 – 22 – 26 – | (13,26; 6,06) | 4,9 | 163.040,00 |

| | | | | | |
|-----------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|------------|
| | | 33 – 43 – 45 Fim: 7 – 19 – 23 – 28 – 31 – 36 – 38 – 45 – 51 | | | |
| <i>PEA-51</i> (Simulação 20) | Sim | Início: 14 – 22 – 26 – 33 – 43 – 45 Fim: 7 – 19 – 23 – 28 – 31 – 36 – 38 – 45 – 51 | (13,26; 6,06) | 4,9 | 176.540,00 |
| <i>BRA-134</i> (Simulação 21) | Não | Início: 11 – 38 – 61 – 92 Fim: 48 – 90 – 109 | (14,53; 14,94) | 5,32 | 275.360,00 |
| <i>BRA-134</i> (Simulação 22) | Sim | Início: 11 – 38 – 61 – 92 Fim: 48 – 90 – 109 | (14,53; 14,94) | 5,32 | 288.860,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os resultados mostram impactos positivos expressivos tanto nos índices de confiabilidade quanto nos custos totais dos alimentadores. As comparações entre várias das simulações seguem de forma consolidada para cada sistema, na Figura 3-6, na Figura 3-7 e na Figura 3-8. Foram incluídas, em ordem, barras representativas dos custos e índices SAIDI das alocações originais, das alocações otimizadas sem MEG, das alocações com MEG mas não otimizadas

(sem e com custo adicional pelo MEG), e das alocações otimizadas com MEG (sem e com custo adicional pelo MEG).

A análise dos resultados permite que se façam os seguintes comentários:

- ao se comparar as alocações originais com as alocações que seguem o método proposto (isto é, otimização com MEG), é possível notar que mesmo nos casos em que o MEG teve um custo adicional para a concessionária, ainda assim o seu custo foi compensado por grandes decréscimos em custos de interrupção – o que foi associado também a uma redução drástica de SAIDI, o que indica que o uso do método proposto pode melhorar consideravelmente os alimentadores práticos, tanto em custos quanto em confiabilidade;

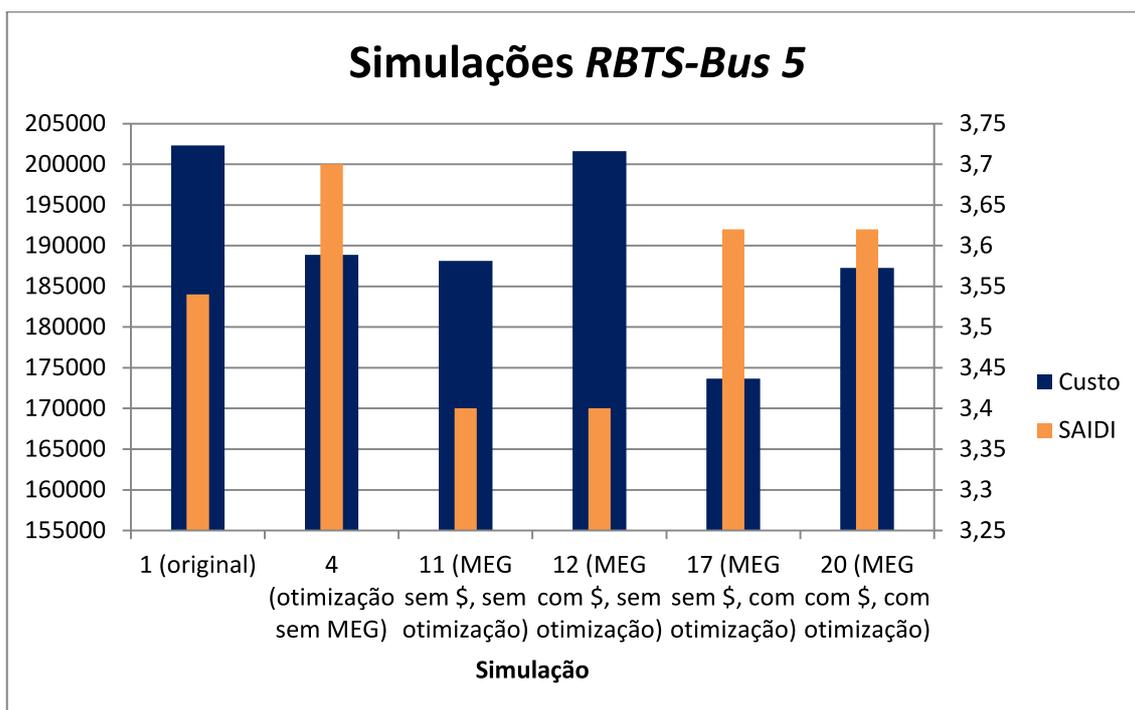
- ao se comparar as alocações otimizadas sem MEG com as alocações que seguem o método proposto (isto é, otimização com MEG), é possível notar que o método proposto conseguiu reduções ainda maiores em SAIDI e em custos. Na verdade, apenas no caso do *BRA-134* em que há custos adicionais pelo uso do MEG é que o custo total da otimização com MEG se mostrou ligeiramente maior que o custo total da otimização sem MEG – em todos os outros casos, mesmo o custo adicional do MEG pôde ser compensado pela massiva redução de custos de interrupção, que foi acompanhada pelas reduções em SAIDI. Obviamente, quando é considerada a possibilidade do MEG sem custos adicionais, as soluções se mostram expressivamente melhores, tanto em custos quanto em SAIDI;

- ao se comparar as alocações sem otimização mas com MEG com as alocações que seguem o método proposto (isto é, otimização com MEG), é possível observar volumosas reduções de custos em todos os casos, e redução de SAIDI em quase todos os casos (exceto no caso do *RBTS-Bus 5*, cuja alocação original possuía chaves em todas as seções, o que faz sentido resultar em uma situação de SAIDI mais baixa ao adicionar-se um MEG a essa alocação original). Isto mostra que, se um alimentador é planejado de forma ótima para receber a disponibilidade de um MEG, ao invés de simplesmente manter as chaves em sua alocação original quando um MEG é a ele adicionado, reduções consideráveis em custos podem ser obtidas, o que demonstra a eficácia do método proposto;

- já era de se esperar que as melhores soluções possíveis para otimização de custos em todos os casos fosse quando é realizada otimização com MEG sem custos adicionais pelo uso do MEG. Isto nos leva a pensar que as concessionárias poderiam se beneficiar com alimentadores mais econômicos (e mais confiáveis) caso deixassem MEGs disponíveis para uso para restaurações no caso de faltas nesses alimentadores, sendo que esses MEGs deveriam ter os menores custos extras possíveis para as concessionárias. Há de se lembrar que, neste trabalho, os custos anuais de US\$ 13.500 por um MEG foram aferidos considerando usos exclusivos para dois alimentadores, ou seja: dois alimentadores pagariam os custos integrais de um MEG por meio do custeamento anual referente a confiabilidade. Porém, se uma concessionária de energia já possui um MEG, com alguma outra destinação específica (por exemplo, aluguel para eventos ou uso em situações de maior demanda de energia, situações essas que podem pagar o MEG de outra forma), não seria necessário considerar os custos integrais do MEG como parcelas integrantes do custeamento de confiabilidade, de forma que a situação de MEG de custo nulo⁹ poderia ser uma situação prática. Nesse caso, as soluções ótimas obtidas são muito melhores do que os outros cenários.

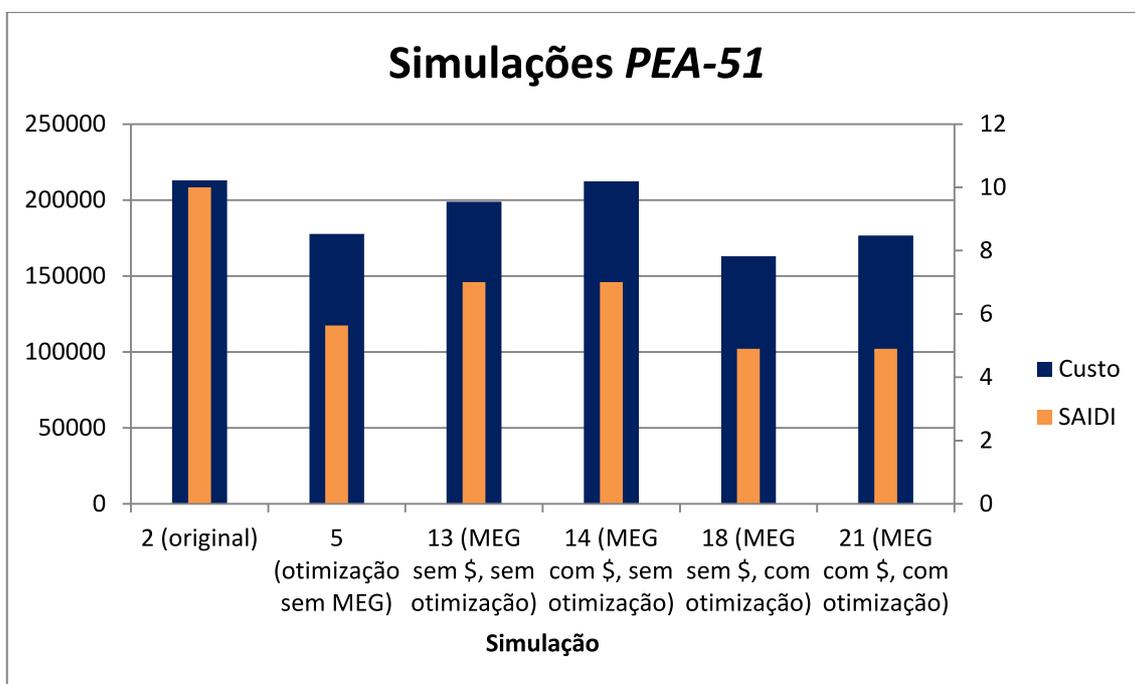
⁹ É necessário entender que “MEG de custo nulo” é um termo utilizado aqui para expressar que não há custos de MEG no cálculo dos custos de confiabilidade do alimentador, pois esse custo já foi absorvido de outra forma pela concessionária de energia. Bastaria utilizar, no caso de faltas, algum MEG já disponível da concessionária, sem a necessidade de haver um MEG dedicado exclusivamente a esse fim.

Figura 3-6 – Comparações*.



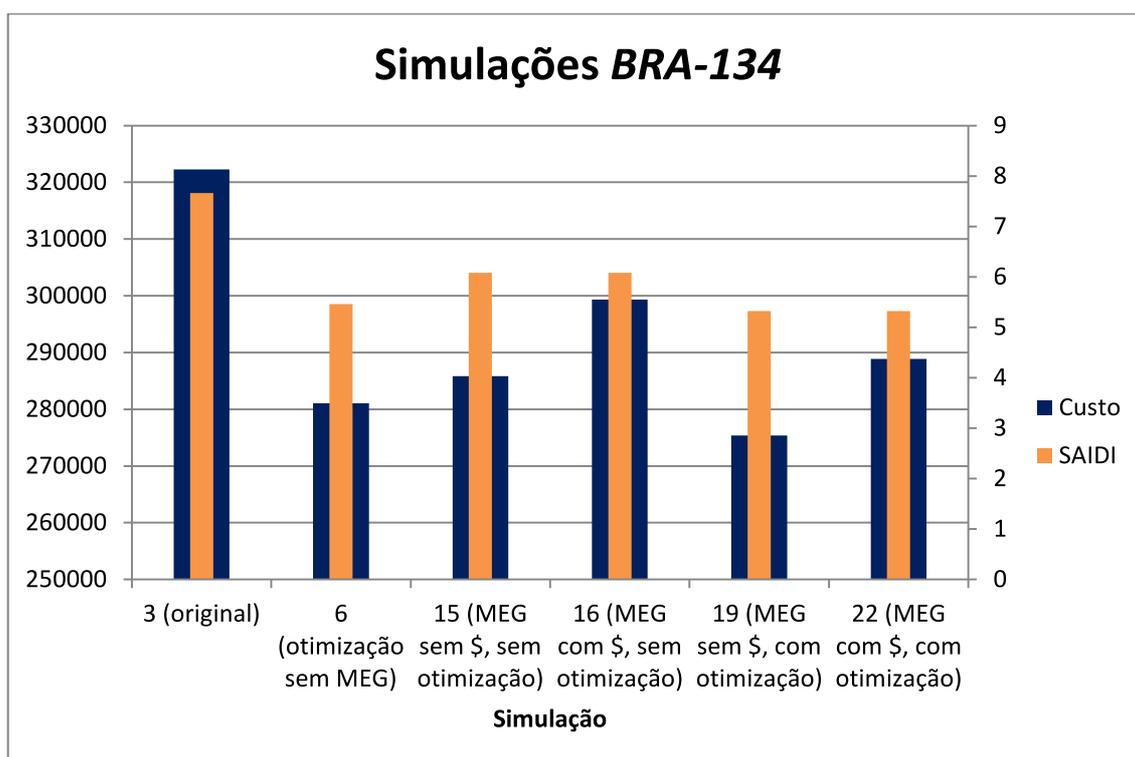
*Comparações de resultados para o RBTS-Bus 5 (coluna de base mais larga: custo, com graduação no eixo da esquerda; coluna de base mais estreita: SAIDI, com graduação no eixo da direita). Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 3-7 – Comparações*.



*Comparações de resultados para o PEA-51 (coluna de base mais larga: custo, com graduação no eixo da esquerda; coluna de base mais estreita: SAIDI, com graduação no eixo da direita). Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 3-8 – Comparações*.



*Comparação de resultados para o BRA-134 (coluna de base mais larga: custo, com graduação no eixo da esquerda; coluna de base mais estreita: SAIDI, com graduação no eixo da direita). Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.8 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE: VARIAÇÕES DE PARÂMETROS DO MEG

Algumas simulações foram conduzidas com o alimentador *PEA-51* com o intuito de analisar qual a influência da variação de alguns parâmetros do MEG nos custos e índices de confiabilidade. A alocação original de chaves do *PEA-51* foi utilizada, de forma que um MEG de parâmetros variáveis foi simplesmente adicionado a esse alimentador.

Desta forma, foram simuladas situações com variações na capacidade do MEG (P_{MEG}), em sua velocidade média (v_{MEG}), e na parcela fixa do tempo de entrega de MEG ($t_{MEG\ Fix}$). Os resultados de variações em SAIDI com essas variações seguem na Tabela 3-21, na Tabela 3-22 e na Tabela 3-23, correspondendo, respectivamente, às Simulações 23, 24 e 25.

Essas alterações mostram os seguintes resultados:

- Com valores maiores de capacidade do MEG, há uma tendência do SAIDI diminuir, porque áreas com maiores cargas vão podendo ser

restauradas. Mas essa relação matemática não é contínua: como as áreas restauradas pelo MEG possuem valores discretos de carga somada, pode haver situações em que os MEGs com maior capacidade não provocam alteração em SAIDI, porque o aumento de sua potência ainda não foi suficiente para restaurar novas combinações de cargas. Isso pode ser visto na Tabela 3-21, nas situações em que os MEGs com capacidade de 1400 kVA e 1600 kVA produziram o mesmo resultado na melhoria da confiabilidade. A variação de capacidade nesse caso não foi capaz de restaurar novas combinações de cargas das áreas do alimentador. Mas, como também pode ser visto, um MEG de 1800 kVA reduziu o índice SAIDI, porque essa capacidade passou a ser suficiente para alimentar áreas que não podiam ser alimentadas com a capacidade anterior do MEG;

- Quanto maior a velocidade média do MEG, mais o SAIDI tende a diminuir, como pode ser visto na Tabela 3-22. Nesse caso, as mudanças não refletiram grandes variações no SAIDI, porque as distâncias envolvidas entre o COLF e os pontos de conexão não são muito grandes – o que ressalta, mais uma vez, a eficácia do COLF como uma excelente estratégia de pré-posicionamento do MEG, haja vista que outros pontos mais afastados do COLF implicariam maiores acréscimos no índice SAIDI nos casos de menores velocidades médias do MEG;

- Quanto menor a parcela fixa no tempo de entrega do MEG, o SAIDI tende a diminuir, como pode ser visto na Tabela 3-23. Essas variações percentuais impactaram o SAIDI mais intensamente do que no caso de variação de velocidade. O motivo é o mesmo descrito anteriormente: as distâncias envolvidas entre o COLF e os pontos de conexão não são muito grandes; portanto, a parte fixa do tempo total de t_{MEG} gera impactos maiores do que os tempos de viagem, os quais dependem das distâncias envolvidas. Obviamente, se a velocidade do MEG for bem reduzida, o impacto será grande: ao simular um caso de $v_{MEG} = 5$ km/h, o SAIDI resulta em 7,20 h/ano, o que é um aumento considerável. Mas entende-se que essa velocidade média é lenta o suficiente para não ser considerada como um caso que reflita a realidade¹⁰;

¹⁰ A caminhada humana tem velocidade média entre 5 km/h e 6,5 km/h. Por mais intensos que sejam os tráfegos, é possível inferir que na vasta maior parte dos casos práticos, a velocidade

- Os valores COLF mudaram apenas quando a capacidade do MEG foi alterada. Isso ocorreu porque este consiste no único caso de variação de parâmetros do MEG em que áreas diferentes foram selecionadas para conexão com o MEG em caso de faltas, haja vista as novas possibilidades de restauração de combinações de áreas de cargas maiores, o que levou a novos pontos de conexão para restauração e, conseqüentemente, diferentes valores de COLF. Alterações na velocidade do MEG ou no deslocamento de tempo fixo não levaram a diferentes áreas selecionadas para as conexões do MEG, dessa forma não afetando o COLF¹¹, como mostrado na Tabela 3-22 e na Tabela 3-23. Mas as alterações na capacidade do MEG podem alterar muito o COLF – seja quando a capacidade do MEG aumenta, de forma a se gerarem novas combinações de restaurações de maior carga, seja quando a capacidade do MEG diminui, de forma a se diminuir as possibilidades de restauração. Nesse sentido, os COLFs para as capacidades do MEG de 400, 1000 e 1800 kVA são mostrados geometricamente na Figura 3-9. Em que pese esta figura não estar em uma escala 100% precisa, ela é suficiente para se entender as mudanças no COLF quando mudam-se as áreas servidas por ele, quando a capacidade do MEG varia.

Tabela 3-21 – Resultados da Simulação 23: variações na capacidade de um MEG, disponibilizado para a alocação original de chaves do PEA-51.

| Simulação | P_{MEG} (kVA) | SAIDI (h/ano) | COLF |
|-----------------------|------------------------------|----------------------|---------------|
| -60% P _{MEG} | 400 | 8,28 | (11,80; 5,57) |
| -40% P _{MEG} | 600 | 7,06 | (17,01; 6,00) |
| -20% P _{MEG} | 800 | 7,05 | (16,21; 6,17) |
| Simulação original | 1000 | 7,01 | (16,21; 6,17) |
| +20% P _{MEG} | 1200 | 6,92 | (16,12; 5,96) |
| +40% P _{MEG} | 1400 | 6,79 | (16,10; 5,90) |
| +60% P _{MEG} | 1600 | 6,79 | (16,10; 5,90) |
| +80% P _{MEG} | 1800 | 6,66 | (15,66; 6,25) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

média do MEG durante seus deslocamentos será consideravelmente maior que a velocidade de uma caminhada humana.

¹¹ Os parâmetros v_{MEG} e $t_{MEGfixo}$ não alteraram o COLF nas faixas simuladas – porém, em casos extremos de velocidades baixíssimas ou parcelas fixas de entrega de MEG elevadíssimas, poderia haver alterações no COLF. Imagine-se, por exemplo, um caso em que $v_{MEG} = 0,001$ km/h. Essa velocidade quase-nula faria com que o tempo gasto pelo MEG para restaurar as áreas extrapolasse o próprio tempo de restauração da falta, o que tornaria o uso do MEG dispensável – e, portanto, naquele caso específico de falta, não haveria restauração por MEG, o que dispensaria aquele caso do cômputo do COLF.

Tabela 3-22 – Resultados da Simulação 24: variações na velocidade de um MEG, disponibilizado para a alocação original de chaves do PEA-51.

| Simulação | v_{MEG} (km/h) | SAIDI (h/ano) | COLF |
|-----------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| -60% v _{MEG} | 12 | 7,07 | (16,21; 6,17) <i>(O COLF não muda ao variar-se a velocidade média do MEG nessa faixa)</i> |
| -40% v _{MEG} | 18 | 7,04 | |
| -20% v _{MEG} | 24 | 7,02 | |
| Simulação original | 30 | 7,01 | |
| +20% v _{MEG} | 36 | 7,01 | |
| +40% v _{MEG} | 42 | 7,00 | |
| +60% v _{MEG} | 48 | 7,00 | |
| +80% v _{MEG} | 54 | 6,99 | |

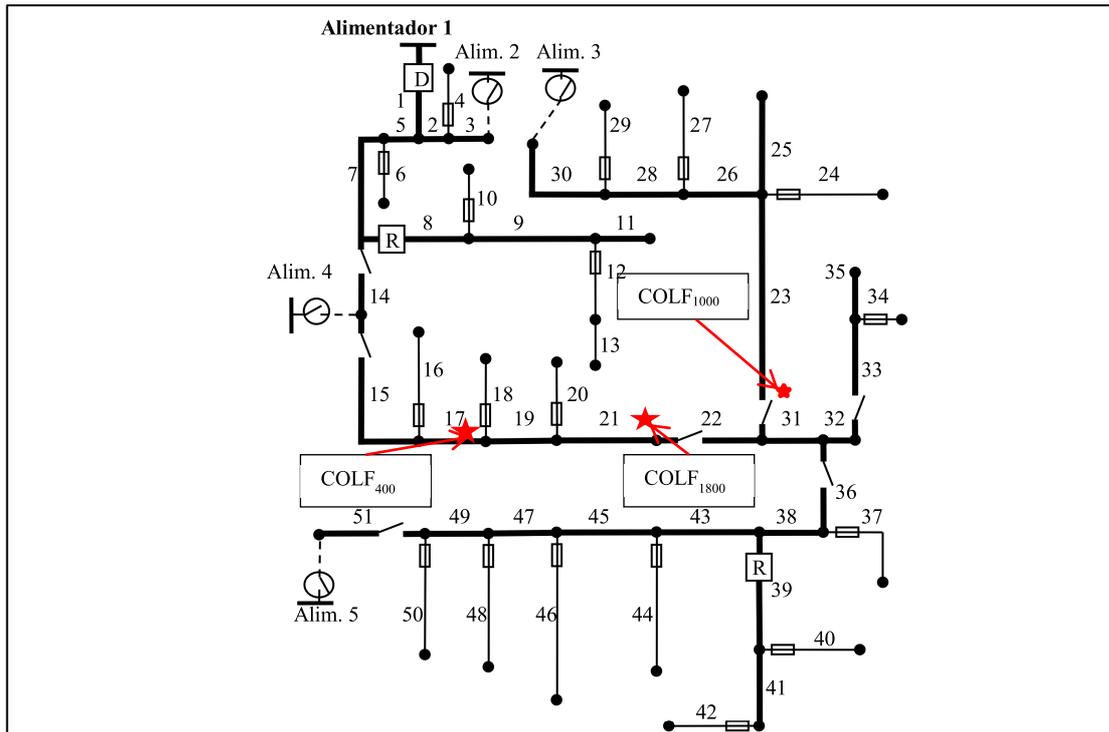
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 3-23 – Resultados da Simulação 25: variações na parcela fixa do tempo de entrega de um MEG, disponibilizado para a alocação original de chaves do PEA-51.

| Simulação | t_{MEGFix} (min) | SAIDI (h/ano) | COLF |
|--------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| -60% t _{MEGFix} | 12 | 6,89 | (16,21; 6,17) <i>(O COLF não muda ao variar-se a parcela fixa de tempo de entrega do MEG nessa faixa)</i> |
| -40% t _{MEGFix} | 18 | 6,93 | |
| -20% t _{MEGFix} | 24 | 6,97 | |
| Simulação original | 30 | 7,01 | |
| -20% t _{MEGFix} | 36 | 7,05 | |
| -40% t _{MEGFix} | 42 | 7,09 | |
| -60% t _{MEGFix} | 48 | 7,13 | |
| -80% t _{MEGFix} | 54 | 7,17 | |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 3-9 - Variações de COLF quando se altera a capacidade do MEG disponível para uso no PEA-51 (em sua alocação original de chaves).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.9 SIMULAÇÕES DE OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE CHAVES SEM MEG, COM POSTERIOR INSERÇÃO DE MEG

O fluxograma do método proposto é bem claro no que tange o fato de que um MEG é considerado disponível para uso no caso de faltas já durante o próprio processo de otimização e escolha da melhor solução candidata, ou seja: a alocação das chaves seccionadoras se moldam à possibilidade de uso de MEG, o que garante que o máximo desempenho seja extraído tanto do MEG quanto das chaves, no processo de minimização de custos totais de confiabilidade do alimentador. Isto foi realizado para as Simulações de 17 a 22.

Porém, em cada uma das duas simulações realizadas na presente seção, será feita, inicialmente, a otimização em relação a chaves, sem MEG, do alimentador *PEA-51* (conforme Simulação 5); somente após a escolha do alimentador mais apto em relação apenas à alocação de chaves, é que um MEG será disponibilizado para uso em faltas.

Assim, é como se o alimentador fosse planejado para uma situação de otimização de alocação de chaves, sem que se soubesse que um MEG seria, futuramente, disponibilizado para ele; e, só depois de ser fixada a alocação de chaves nessa configuração otimizada, é que um MEG seria disponibilizado para usos futuros.

Estas simulações têm o intuito de avaliar como se comparam o desempenho dos alimentadores, medido a partir de custos e SAIDI, quando a inserção de um MEG é realizada somente após a otimização exclusiva de chaves, em relação ao método proposto em sua integralidade, em que a otimização de chaves é realizada simultaneamente com o uso de MEG a cada falta. Os resultados seguem na Tabela 3-24, e gráficos de comparações entre estas simulações e aquelas que utilizam o método proposto seguem na Figura 3-10.

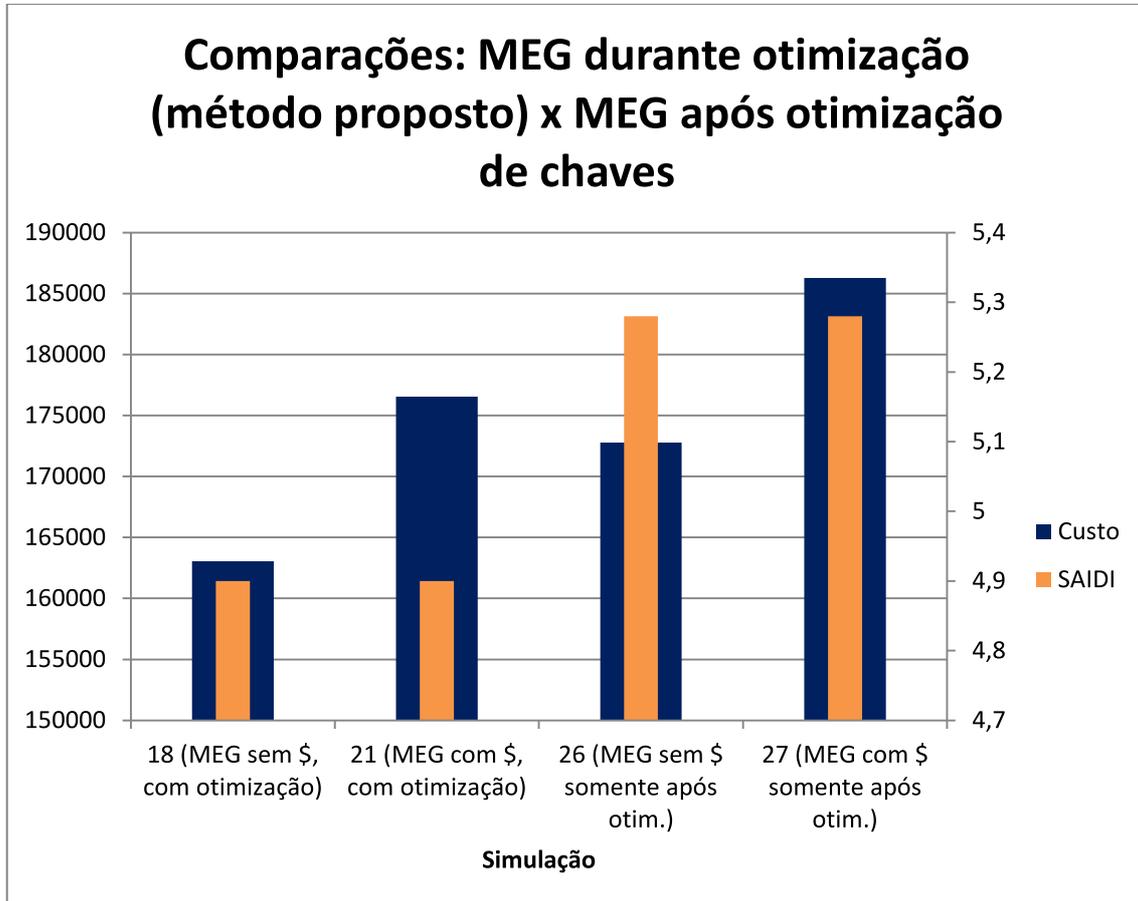
Tabela 3-24 - Resultados: primeiramente, otimiza-se a alocação de chaves, sem a presença de MEGS; somente depois, um MEG é adicionado ao alimentador.

| Sistema/simulação | MEG tem custo? | Chaves nas seções | COLF (x; y) em km | SAIDI (h/ano) | Custo (US\$/ano) |
|----------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| <i>PEA-51</i> (Simulação 26) | Não | Início: 14 – 22 – 26 – 33 – 36 – 43 Fim: 7 – 19 – 23 – 28 – 31 – 38 – 45 – 51 | (13.25, 6.05) | 5,28 | 172.770,00 |
| <i>PEA-51</i> (Simulação 27) | Sim | Início: 14 – 22 – 26 – 33 – 36 – 43 Fim: 7 – 19 – 23 – 28 – | (13.25, 6.05) | 5,28 | 186,270.00 |

| | | | | | |
|--|--|----------------------|--|--|--|
| | | 31 – 38 – 45 – 51 | | | |
|--|--|----------------------|--|--|--|

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 3-10 – Comparações*.



* Comparações entre o método proposto, que consiste em otimizar a alocação de chaves já considerando que há um MEG disponível para uso durante cada falta, com uma otimização inicial somente de chaves, sem MEG, com posterior disponibilização de MEG após otimização (coluna de base mais larga: custo, com graduação no eixo da esquerda; coluna de base mais estreita: SAIDI, com graduação no eixo da direita).
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

As comparações realizadas e mostradas na Figura 3-10 permitem que os seguintes comentários sejam feitos:

- a utilização de MEG após a otimização de chaves, ainda que produza resultados bem melhores do que os resultados para a alocação original de chaves do *PEA-51* (tanto em custos quanto SAIDI), ainda assim não atingiu todo o impacto positivo que a otimização de chaves já levando em consideração a disponibilização de MEG (método proposto) pôde proporcionar;

- o método proposto produziu redução de 7,2% em SAIDI (de 5,28 h/ano para 4,9 h/ano), de 5,63% em custos quando o MEG não possui custos extras para a concessionária (de 172.770,00 US\$/ano para 163.040,00 US\$/ano) e de 5,22% em custos quando o MEG possui custos extras (de 186.270,00 US\$/ano para 176.540,00 US\$/ano). Isto tudo mostra que a otimização simultânea de chaves com uso de MEGs associado ao uso do COLF consiste numa excelente estratégia de melhoria de confiabilidade, levando a soluções que podem extrair um maior desempenho dos equipamentos de melhoria de confiabilidade do alimentador.

3.10 SIMULAÇÃO COM MEGS POSSUINDO DIFERENTES VELOCIDADES POR FALTA

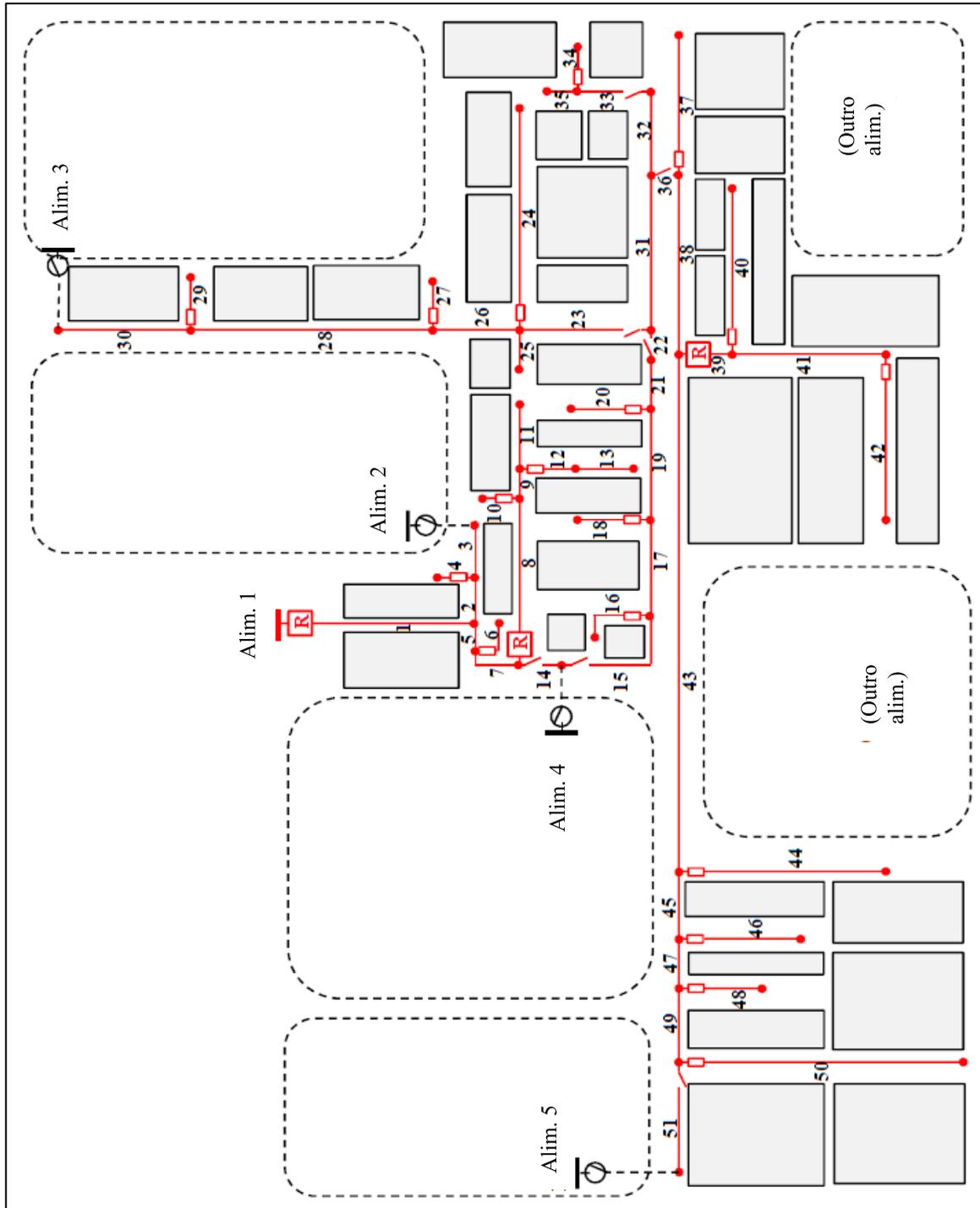
Embora o método proposto defina uma velocidade média para o MEG em qualquer ocasião de falta, é possível facilmente modificar o parâmetro v_{MEG} para cada situação de falta em específico. Para tanto, ao invés de definir um único v_{MEG} no passo **P.8** do fluxograma da Figura 2-5, é possível que o usuário insira um vetor $v_{MEG, i}$ de velocidades dependentes da localização da falta. Esse vetor pode, por exemplo, ser pré-determinado (com base em conhecimentos empíricos sobre as condições de trânsito e acesso locais); ou ser estocástico dentro de uma faixa de valores, a fim de importar a natureza probabilística do problema de tráfego; ou, ainda, usar outros algoritmos, específicos para resolver o problema de tráfego.

No contexto desta última opção apresentada, a presente simulação utilizará o Algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) para resolver o problema de tráfego pelo menor caminho, e assim obter as velocidades variáveis para cada localização de conexão do MEG no contexto do *PEA-51*. Para tanto, faz-se necessário que se tenha mais detalhes acerca das esquinas e ruas no entorno desse alimentador; destarte, apresentamos a Figura 3-11, que mostra as vias no contexto do *PEA-51*. Considerou-se que todas as vias são de mão-dupla, e que todas as esquinas perfazem ângulos retos.

Os resultados de como essa simulação impacta a DEC do alimentador encontram-se na Tabela 3-25. É preciso destacar que não houve otimização da alocação de chaves; esta simulação simplesmente inseriu um MEG no contexto do alimentador já existente, com o intuito de mostrar a versatilidade em se

individualizar as velocidades do MEG para cada caso. De qualquer modo, a otimização poderia ser feita com esse adendo.

Figura 3-11 - Detalhes das vias no contexto do PEA-51.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Tabela 3-25 - Variações de DEC de acordo com as condições de velocidade do MEG fornecidas pelo algoritmo de Dijkstra.

| Simulação 28: condições de tráfego | DEC (h/ano) |
|-------------------------------------------|--------------------|
| Tráfego leve | 7,00 |
| Tráfego médio | 7,04 |
| Tráfego pesado | 7,06 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

3.11 SIMULAÇÕES COM DOIS MEGS DISPONÍVEIS

Conforme mostrado na seção 2.5 desta tese, o algoritmo permite modificações no sentido de permitir a análise para mais de um MEG disponível para um mesmo alimentador. Serão conduzidas nesta seção quatro simulações, envolvendo MEGs com e sem custos, e também a opção de o segundo MEG utilizado partir de um próprio COLF (o qual depende apenas dos usos de MEG2, de forma independente do MEG1) ou do COLF já calculado do 1º MEG. Os resultados de tais simulações seguem na Tabela 3-26.

Tabela 3-26 - Resultados das simulações com dois MEGs

| Simulação | COLF2 | DEC (h/ano) | Custos totais (US\$/ano) |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|---------------------------------|
| Simulação 29 (MEG1 e MEG2 com custos; MEG2 parte COLF1) | COLF2 = COLF1 = (16,21; 6,17) | 6,67 | 221.750,00 |
| Simulação 30 (MEG1 e MEG2 com custos; MEG2 parte do próprio COLF2) | COLF2 = (16,84; 5,71) | 6,66 | 220.950,00 |
| Simulação 31 (MEG1 e MEG2 sem custos; MEG2 parte COLF1) | COLF2 = COLF1 = (16,21; 6,17) | 6,67 | 194.750,00 |
| Simulação 32 (MEG1 e MEG2 sem custos; MEG2 parte do próprio COLF2) | COLF2 = (16,84; 5,71) | 6,66 | 193.950,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A Tabela 3-27 mostra as áreas e respectivas cargas restauradas pelo segundo MEG, no caso de cada falta, para as simulações de 29 a 32. Note que todas elas convergem para as mesmas restaurações, sendo que suas variações concentram-se, apenas, nos custos e COLFs. Faz-se interessante uma análise concomitante da Tabela 3-17 com a Tabela 3-27, para que se entenda como cada um dos MEGs disponíveis (primeiro e segundo) será utilizado no caso de cada falta.

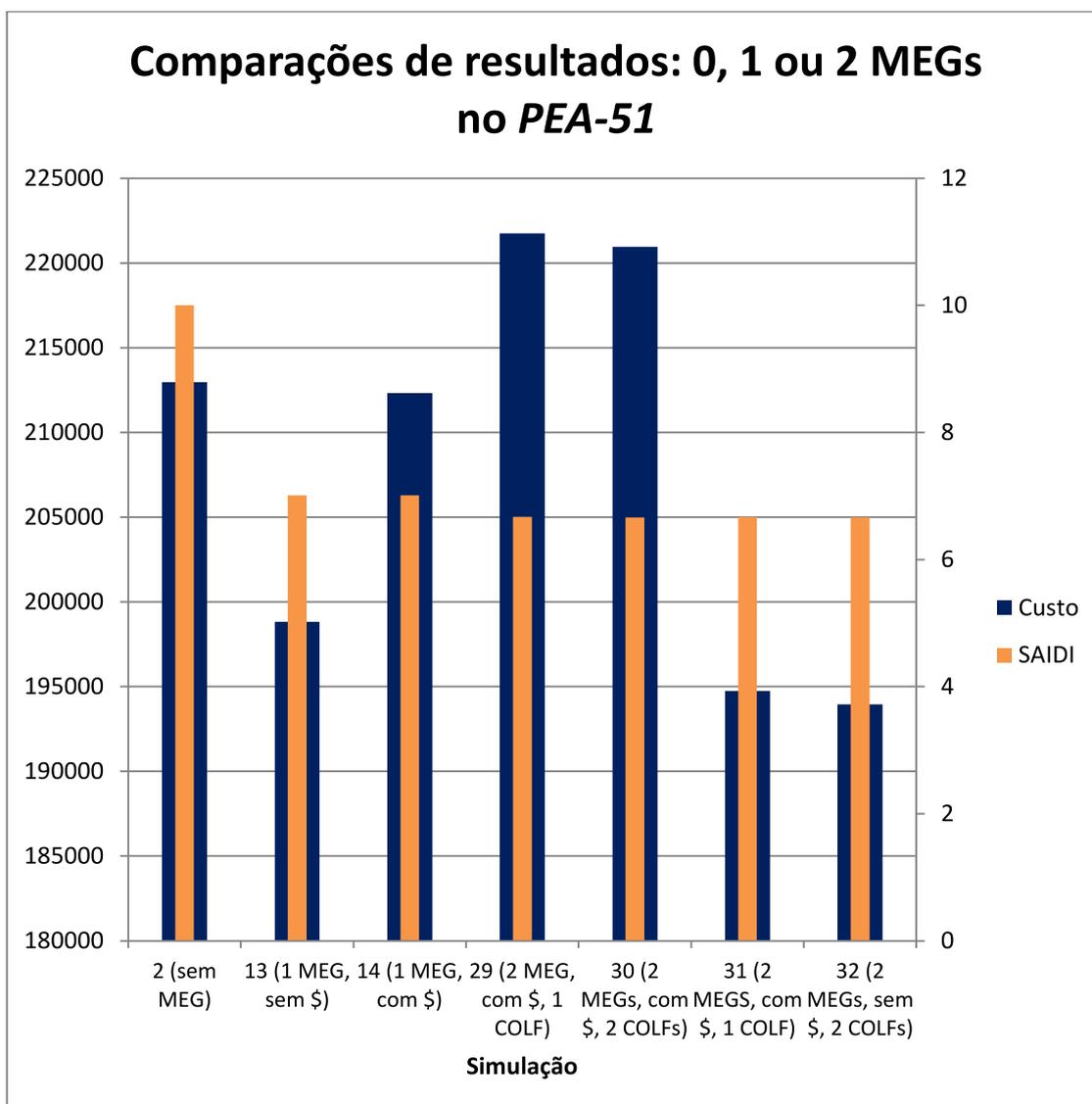
Tabela 3-27 - Áreas de restauração pelo 2º MEG no *PEA-51*, de acordo com a localização das faltas, e carga total restaurada nessas áreas.

| Faltas nas seções | Áreas restauradas pelo 2º MEG | Carga total restaurada pelo 2º MEG (kVA) |
|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1, 2, 3, 5, 7 | 6 | 220 |
| 8, 9, 11 | 10 | 90 |
| 15, 17, 19, 21 | 16 | 50 |
| 23, 25, 26, 28, 30 | 27 | 110 |
| 36, 38, 43, 45, 47, 49 | 40 | 450 |
| 39, 41 | 42 | 110 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

No que concerne comparações entre resultados, as simulações com inserção de 2º MEG podem ser diretamente comparadas com a simulação do sistema *PEA-51* sem MEG (Simulação 2) e as simulações do sistema *PEA-51* com apenas um MEG (simulações 13 e 14), todos com a alocação original de chaves desse sistema. Tais comparações podem ser mais bem visualizadas na Figura 3-12.

Figura 3-12 – Comparações*.



*Comparações acerca do uso de nenhum, um ou dois MEGs para o PEA-51; com ou sem custos; e com o segundo MEG partindo de um próprio COLF ou do COLF do primeiro MEG. Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

As conclusões que podem ser tiradas acerca dos resultados supracitados são as seguintes:

- por motivos óbvios, a melhor solução tanto em custos quanto em SAIDI seria a disponibilização de dois MEGs sem custos adicionais para a concessionária, sendo que o 2º MEG partisse de um próprio COLF. Essa solução promove uma melhoria generalizada na confiabilidade da rede, pois mais consumidores poderão ter seus fornecimentos restaurados no caso de faltas;

- as soluções em que o segundo MEG parte de um próprio COLF2 se mostraram melhores do que aquelas em que o segundo MEG parte do COLF1. Isto é justificado pelo fato de que o COLF2 é calculado de acordo com apenas o uso de MEG2, ou seja: leva em conta apenas as vezes que o MEG2 é utilizado, gerando uma pré-alocação mais eficiente para esse dispositivo. Porém, pode-se considerar que, na prática, dificilmente será vantajoso para a concessionária ter duas (ou mais) garagens distintas para seus MEGs, ainda mais em sistemas pequenos. Obviamente, em sistemas maiores, em que vários alimentadores sejam considerados interligados em um mesmo sistema de dezenas de quilômetros quadrados de área, talvez o desmembramento de COLFs seja de fato atrativo, mas isto dependeria de cada caso e das instalações já existentes da concessionária;

- se por um lado a disponibilização de um MEG com custo pôde ser melhor em custos do que a solução original, por outro lado a disponibilização de dois MEGs com custos com o sistema gerou um custo superior ao da solução original – embora tenha havido grande decréscimo em SAIDI. Isto revela que a redução nos custos de interrupção, nesse caso, não compensou os custos de 2 MEGs para o alimentador. Porém, deve-se lembrar que dificilmente na prática os custos dos MEGs serão totalmente devidos aos seus usos no caso de faltas, pois como já discutido, a concessionária de energia poderia utilizar MEGs ociosos, adquiridos inicialmente para outras finalidades.

3.12 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados resultados de diversas simulações realizadas. Vários cenários e diferentes parâmetros foram testados em três alimentadores, sendo um deles um alimentador de testes bem conhecido na literatura específica de confiabilidade de redes (*RBTS-Bus 5*) e os outros dois alimentadores reais (*PEA-51* e *BRA-134*), que também já foram explorados em trabalhos envolvendo confiabilidade de redes de distribuição.

Foram simulados:

- os alimentadores em suas alocações de chaves originais;

- a otimização exclusiva da alocação de chaves, sem uso de MEG;
- cenários com diferentes restrições e variações associadas ao processo de otimização de chaves (fixação de número de chaves, limite de SAIDI, diferentes funções de dano de interrupção para consumidores);
- a disponibilização de MEG para os alimentadores, sem e com custos adicionais, mantendo-se suas alocações originais de chaves;
- a testagem de diferentes pontos iniciais de partidas do MEG, comparando-as com a estratégia proposta do COLF;
- o método completo proposto, em que a otimização de chaves é realizada já levando-se em conta que um MEG está disponível para uso a cada falta, o que propicia uma estratégia de altíssima eficiência para uso de chaves e MEG;
- variações de parâmetros do MEG, com finalidade de se analisar os impactos desses parâmetros na qualidade das soluções; e
- otimização inicial apenas de chaves, sem MEGs envolvidos, com posterior disponibilização de MEG, após a fixação das chaves pelo seu processo de otimização;
- expansão do método para mais de um MEG disponibilizado por alimentador.

Os resultados obtidos, em conjunto com as análises e comparações realizados durante o capítulo, mostraram que:

- o método proposto permite expressivas reduções de custos para os alimentadores;
- mesmo que a função objetivo utilizada seja referente a custos totais, o índice de confiabilidade SAIDI pôde também ser drasticamente reduzido utilizando-se o método proposto, o que gera soluções duplamente eficientes;
- o método de otimização proposto possui boa eficiência computacional, utilizando de forma inteligente a própria estrutura binária de cromossomos na busca de soluções otimizadas. Ainda nesse sentido, a modelagem de seções a quatro estados (sem chaves, com chave em uma ou outra extremidade, ou chaves em ambas as extremidades) mostra-se interessante do ponto de vista prático, e não provocou expressivos aumentos em tempos de simulação se comparados com métodos clássicos de inserção de nós nas seções para simular-se essas novas possibilidades;

- o algoritmo genético utilizado permite, de maneira facilitada, flexibilizações, imposições e restrições diversas, levando a resultados de otimizações que obedecem a diferentes critérios e opções realizadas pelo usuário;

- o uso do COLF mostra-se uma ferramenta simples e robusta no que tange a estratégia de alocação do MEG, de forma que os tempos de entrega do MEG nos casos de manobras de restauração pode ser muito reduzido;

- mesmo que os MEGs tenham custos extras para as concessionárias, ainda assim esses custos podem ser compensados pela diminuição dos custos anuais dos alimentadores, e que se esses MEGs não tiverem custos adicionais para as concessionárias de energia (caso eles já tenham outras finalidades e sejam usados eventualmente para confiabilidade no caso específico de faltas que ocorram nesses alimentadores), as reduções de custos são ainda mais expressivas, permitindo-se que os alimentadores sejam bem mais econômicos e eficientes que as situações originais;

- o método permite a análise de mais de um MEG disponível por alimentador, o que pode gerar soluções bem robustas no que tange seus níveis de confiabilidade.

4. CONCLUSÕES

4.1 CONCLUSÕES GERAIS

Neste trabalho, foi desenvolvido um método de otimização de custos e índices de confiabilidade de redes de distribuição quando um gerador móvel de emergência está disponível para uso na ocasião de faltas que ocorrem nas seções dos alimentadores.

O método proposto consiste num processo baseado em algoritmo genético que visa otimizar a alocação de chaves seccionadoras em alimentadores. Neste contexto, cada alocação de chaves é transcrita pelo algoritmo na forma de cromossomos binários, havendo uma relação biunívoca entre as possibilidades de alocações e as codificações dos cromossomos. Esses cromossomos passam a ser as soluções candidatas a ótimas, tendo cada uma delas uma aptidão, que é aferida pelo custo de confiabilidade do alimentador que os cromossomos representam. Cada um destes custos de confiabilidade, por sua vez, é calculado por um módulo de simulação analítica de faltas, que ao mesmo tempo calcula as respostas dos alimentadores às faltas que podem ocorrer em suas seções e computa a melhor posição inicial para se alocar um MEG nesse alimentador – o que é feito por meio do fator COLF. Uma geração inicial de soluções candidatas é criada pelo algoritmo, é analisada e passa por operações genéticas, visando criar novas gerações, que possuam indivíduos melhores. Isto é processado até que o critério de parada seja satisfeito.

Durante os capítulos desta tese, foram mostrados importantes aspectos econômicos referentes ao problema, além de pormenores do algoritmo genético utilizado e do método de análise de combinações de áreas para restauração por MEG. O método com todas as suas possibilidades foi apresentado.

Finalmente, foram simulados três alimentadores, sendo um de testes e outros dois reais, em vários cenários diferentes. Mais de 30 simulações foram apresentadas, e os resultados indicaram que o método proposto poderia levar

a situações extremamente benéficas no que tange custos e índices de confiabilidade de alimentadores.

Dentre as conclusões que puderam ser observadas, ressaltam-se as seguintes:

- o método proposto permite expressivas reduções de custos para os alimentadores, podendo também apresentar consideráveis diminuições no índice SAIDI de tais alimentadores;

- o método de otimização proposto possui boa eficiência computacional;

- o algoritmo genético utilizado permite, de maneira facilitada, flexibilizações, imposições e restrições diversas;

- o COLF consiste numa ferramenta simples e robusta para alocação do MEG;

- ainda que os MEGs tenham custos extras para as concessionárias, esses custos podem ser compensados pela diminuição dos custos anuais dos alimentadores. Ademais, caso esses MEGs não tenham custos adicionais para as concessionárias de energia, as reduções de custos totais são ainda mais expressivas, o que leva a alimentadores bem mais econômicos e confiáveis que os originais;

- o método pode ser expandido para análise de mais de um MEG por alimentador, o que pode conduzir a soluções extremamente robustas no que concerne seus níveis de confiabilidade.

4.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE PARA A LITERATURA

Considera-se como contribuições para a literatura:

- a ideia de que MEGs podem ser utilizados por concessionárias de distribuição com o intuito de reduzirem custos anuais de confiabilidade dos alimentadores, bem como melhorarem seus índices de confiabilidade;

- o método analítico booleano qualitativo-quantitativo de simulação de faltas para análise de confiabilidade, que foi desenvolvido nesta tese para uso nas simulações, mas que pode ser replicado para análises de confiabilidade

com outros objetivos, tendo se mostrado uma ferramenta robusta e computacionalmente eficaz de simulação de faltas;

- o conceito de COLF como estratégia de posicionamento inicial de um MEG no contexto de um alimentador, desenvolvido nesta tese;

- o conceito de áreas conjugadas e o respectivo método de combinações de áreas, que, embora tenha sido criado nesta tese com o intuito de analisar qual a melhor combinação de áreas que passará pela restauração por MEG, pode vir a ser útil em outras análises que envolvam restauração de consumidores por outros métodos;

- as conclusões que foram tiradas sobre o uso de MEGs em diferentes cenários nas simulações conduzidas, que não foram encontradas em nenhum trabalho na literatura.

4.3 TRABALHOS FUTUROS

Existem melhorias que podem ser feitas no método proposto. Algumas delas são:

- ✓ Incluir alocação de religadores, o que pode impactar ainda mais beneficemente os custos e índices de confiabilidade das redes, além de permitir a análises associadas a faltas momentâneas;
- ✓ Realizar simulações em conjuntos de mais alimentadores conjugados de forma adjacente, de forma que os MEGs possam ser compartilhados entre diferentes alimentadores de um mesmo sistema de distribuição.

APÊNDICE A Algumas considerações acerca do método de simulação de faltas escolhido para esta tese

Como já foi mencionado, um método de simulação de faltas deve ser conduzido para cada solução candidata que será analisada quando ocorrer o processo de otimização do alimentador, haja vista que as soluções candidatas deverão ser avaliadas conforme seus graus de confiabilidade e custos a elas associados.

No âmbito da análise de confiabilidade de redes de distribuição, observa-se na literatura que três métodos se destacam pela recorrência: **modelagem de estados de Markov, simulação analítica e simulação de Monte Carlo.**

As simulações analíticas de faltas com fins de cálculo de índices de confiabilidade encontradas na literatura, como em BROWN (2009) e RODRIGUES *et al.* (2019), geram acúmulos de impactos em cada consumidor à medida que as faltas vão sendo analisadas pelo algoritmo. Porém, sua implementação do jeito convencional esbarra num problema quando dispositivos móveis, como MEGs, são utilizados para melhoria de confiabilidade. Isto porque, diferentemente de outros tipos de geração distribuída, fixos, o MEG possui mobilidade, o que pressupõe pontos de partida e de chegada diferentes entre si. E mais: a cada uso, possivelmente os pontos de chegada serão também distintos entre si, uma vez que a cada situação de falta o MEG poderá ser usado em um ponto diferente. Isto gera um problema, pois, numa simulação analítica convencional que considerasse o uso de MEG, ter-se-ia o seguinte:

- ao ocorrer uma falta, haverá um momento em que se procurará por possíveis lugares de restauração por MEG;
- em caso de haver tal possibilidade, o MEG deve ser deslocado para lá, demandando certo tempo nesse deslocamento (esse tempo será chamado de t_{MEG}). Este tempo deve ser sabido, de forma a se gerar o decremento nos tempos de interrupção dos pontos j restaurados;
- mas para se conhecer esse tempo t_{MEG} , deve-se primeiro conhecer o deslocamento que o MEG deve realizar, que por sua vez demanda que se saiba sua posição inicial;

- mas a posição inicial do MEG, que deve ser otimizada, depende que já se saiba todos os pontos onde ele possivelmente será conectado, uma vez que são os seus pontos de uso que determinarão sua estratégia de posicionamento inicial;
- mas então saber essa posição inicial depende que a simulação analítica de faltas já tenha ocorrido, o que é impossível (pois a primeira falta ainda está sendo avaliada).

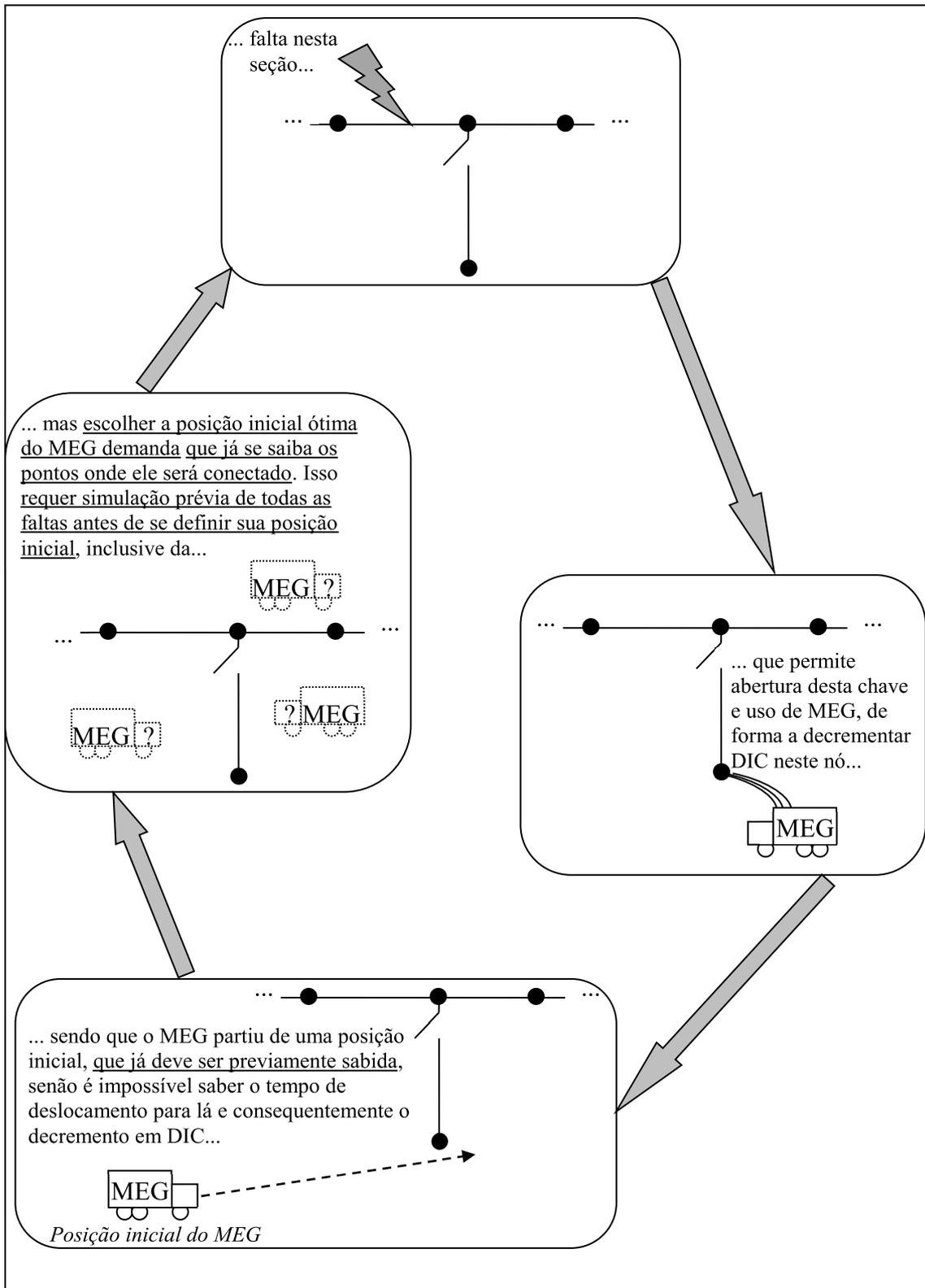
Percebe-se, então, que se for utilizada a simulação analítica de faltas para cálculos de confiabilidade em seu aspecto convencional, cai-se numa lógica circular: **é necessário a cada falta que se conheça a posição inicial do MEG, mas para que se saiba a posição inicial do MEG, é necessário que já tenha sido realizada a simulação de todas as faltas.**

Esta lógica circular também pode ser mais bem entendida a partir da Figura A-1.

Devido às características da simulação analítica de faltas com fins de cálculos de confiabilidade, em seu aspecto convencional, ela foi designada como “simulação analítica quantitativa-cumulativa”, já que que a cada falta, quantidades relativas aos impactos vão sendo acumuladas.

Como já foi visto, a lógica circular presente na simulação analítica quantitativa cumulativa inviabiliza o seu uso quando dispositivos móveis. De forma a se contornar tal lógica circular, uma nova forma de se conduzir uma simulação analítica foi desenvolvida para este trabalho, a qual será denominada, por suas características, de “simulação analítica booleana qualitativa-quantitativa”. Ela se baseará em um método que desmembra a simulação analítica em duas etapas: uma *qualitativa* (que irá associar valores booleanos 0 ou 1 que descrevem simplesmente se um consumidor sofreu ou não uma falta, e em caso positivo foi ou não restaurado antes da mitigação da falta) e uma *quantitativa* (que calculará os impactos em índices de confiabilidade e em custos de acordo com o que se passou com cada consumidor). A superposição desses efeitos, qualitativos e quantitativos, geram os resultados em índices de confiabilidade e custos, que são os resultados esperados após uma simulação analítica de faltas com fins de análise de confiabilidade.

Figura A-1 - O problema da lógica circular quando se usa métodos de simulação analítica quantitativa para simular faltas em que haja um dispositivo móvel envolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

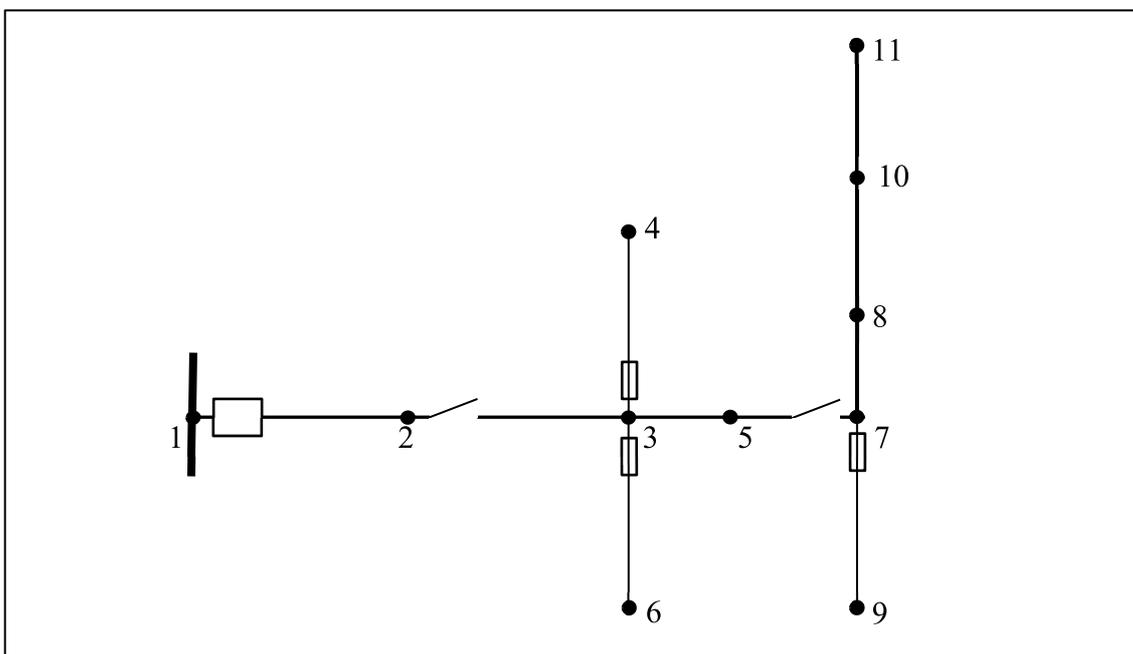
APÊNDICE B Método de escolha de áreas

Neste apêndice, será explicado como o algoritmo proposto escolhe, dentre as áreas elegíveis para conexão com MEG, a(s) área(s) que de fato será(ão) por ele restauradas. Esta explicação é complementar ao que foi exposto no Capítulo 2, quando tal método de escolha foi aplicado no contexto de geração dos booleanos $C_{MEG}(i, j)$.

A. Conceito de área, conectividade entre áreas e área não-restaurável

Inicialmente, com auxílio de uma figura são mostrados alguns conceitos importantes para o entendimento do que é realizado pelo algoritmo – sobretudo, o conceito de “área” utilizado neste trabalho. Considere a Figura B-1, que mostra um alimentador de exemplo, contendo 11 nós, além de um disjuntor, duas chaves seccionadoras NF e três chaves-fusíveis.

Figura B-1: Alimentador de exemplo para ilustração do conceito de área.



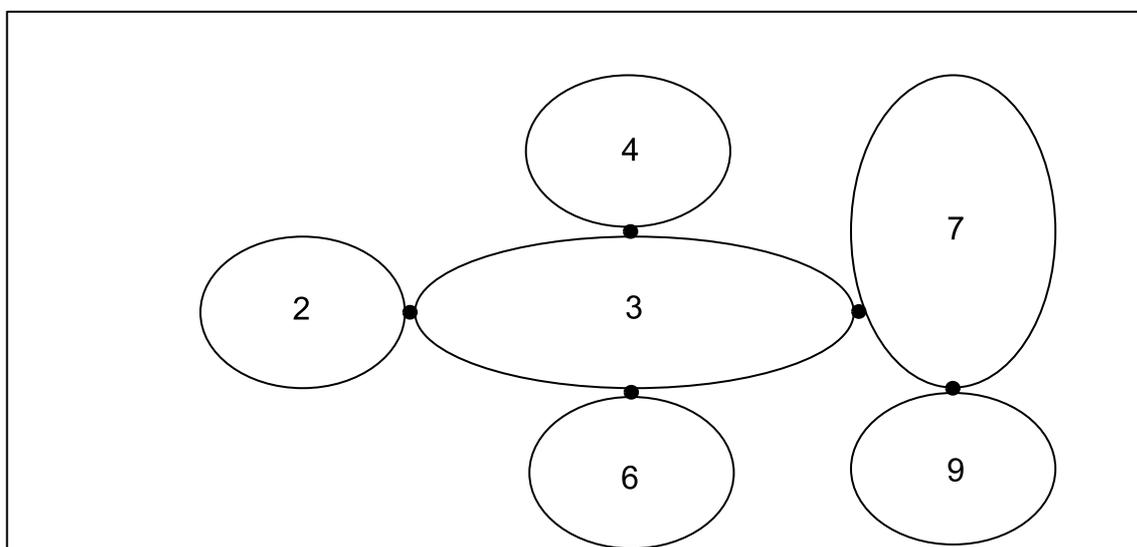
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Define-se uma “área” da seguinte forma:

- abrem-se todos os dispositivos que podem ser abertos nesse alimentador com fins de manobra (disjuntores, religadores, chaves, chaves-fusíveis);
- define-se “área” como o conjunto de pontos e seções entre esses pontos que, após abertura dos dispositivos no passo anterior, permanecem conectados entre si;
- designar-se-á cada área assim formada pelo nome de seu nó mais a montante, sendo que cada área engloba os nós que estão ali presentes;
- excluir-se-á da análise o nó 1, por se tratar de nó que não precisa ser analisado nas tentativas de restauração de cargas.

Percebe-se que, com essas definições, o alimentador de exemplo da Figura B-1 pode ser entendido como possuindo 6 áreas, com as denominações dadas a partir de seus nós mais a montante, conforme pode ser observado na Figura B-2.

Figura B-2: Alimentador de exemplo, dividido em áreas.



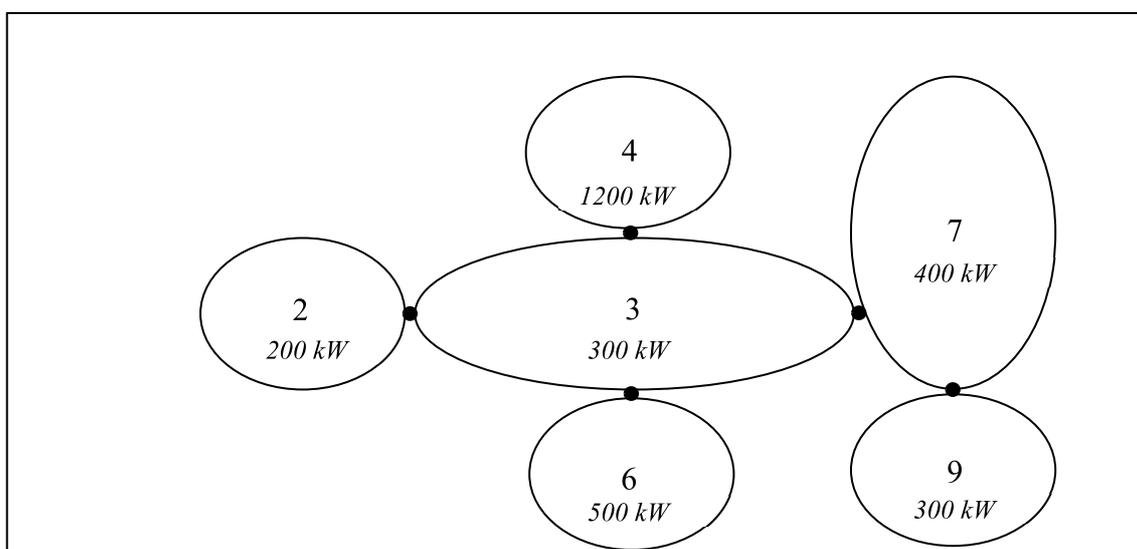
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Uma vez que se entende um alimentador a partir dessas definições de áreas, outros entendimentos decorrem a partir daí. Por exemplo, o conceito de conectividade de áreas – isto é, se uma área faz ou não conexão com outra. É claro que, para que duas áreas sejam conectáveis, deve haver pelo menos

uma seção do alimentador que possa intersectar essas duas áreas por meio de chaveamento. De uma forma mais conveniente, pode-se dizer que uma área x é conectável a outra área y se, e somente se, algum dos nós englobados por x é conectável a algum dos nós englobados por y . Assim, percebe-se pela Figura B-2, associada à Figura B-1, que a área 3 é conectável à área 7 porque um dos nós englobados pela área 3 (no caso, o nó 5) é conectável a um dos nós englobados pela área 7 (no caso, o nó 7).

Define-se aqui, também, o conceito de “carga de área”. A carga de cada área é calculada simplesmente somando-se as cargas de cada nó englobado por aquela área. Assim, no exemplo da Figura B-2, se ao nó 3 está conectada uma carga de 200 kW e ao nó 5 está conectada uma carga de 100 kW, a carga da área 3 (que engloba os nós 3 e 5) é calculada como sendo 300 kW. Esse cômputo é realizado para todas as áreas, o que retorna suas cargas – como é mostrado, por exemplo, na Figura B-3.

Figura B-3: Cargas de áreas.

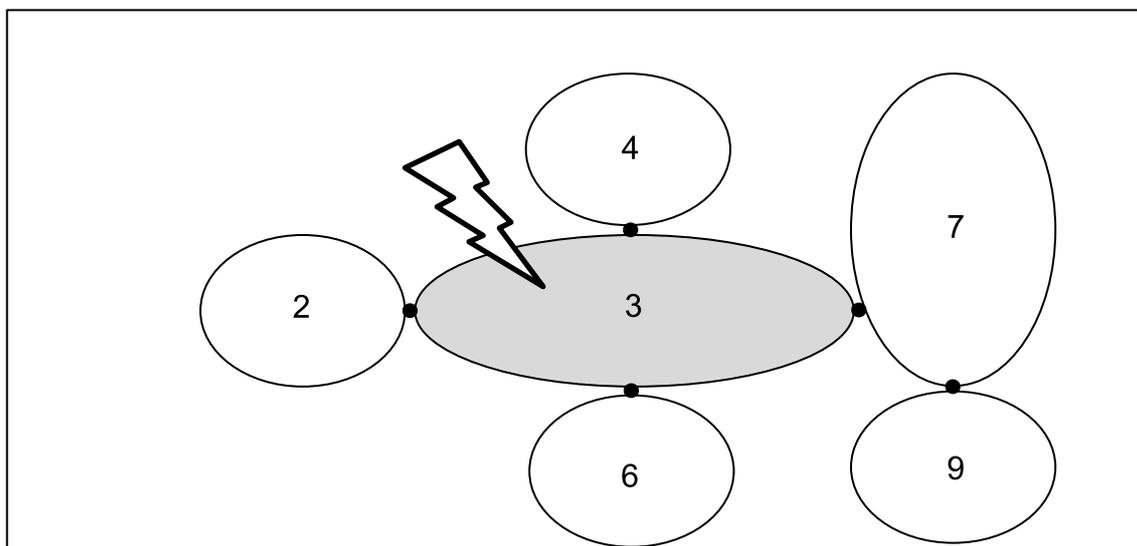


Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Outra definição útil aqui é o conceito de “área não-restaurável”. Uma área é dita “não-restaurável” quando nela ocorre uma falta, haja vista que, não sendo possível diminuí-la ainda mais por chaveamentos, seria impossível restaurar qualquer de seus nós englobados enquanto tal falta estiver vigente pois sempre haveria conexão entre esses nós e o ponto de falta. Analisa-se,

por exemplo, a Figura B-4: se uma falta ocorre na área 3, nenhum dos nós englobados por essa área pode ser restaurado, de forma que a área 3 se torna, para essa falta, uma área não-restaurável.

Figura B-4: Quando numa área ocorre uma falta, ela é dita não-restaurável, haja vista que ela não é separável por chaveamento do ponto de falta. Nesta figura, “3” se tornou uma área não-restaurável.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Se uma área não-restaurável é impossível de ser restaurada enquanto a falta existir, por outro lado percebe-se que nem toda área restaurável será, de fato, restaurada. O conceito de “restaurável” denota uma *possibilidade*, e não uma afirmação. No caso concreto do exemplo dado na Figura B-4 (e vendo esta figura concomitantemente com o alimentador que a originou, mostrado na Figura B-1), percebe-se que a ocorrência de uma falta em qualquer ponto englobado pela área 3, torna-a não-restaurável; já os pontos englobados pela área 2 podem ser restaurados por chaveamento a montante da falta; já os pontos englobados pelas áreas 4, 6, 7 e 9 só poderiam ser restauráveis por chaveamento a jusante da falta, com transferência de carga por meio de fechamento de uma chave NA que separasse essas áreas de um outro alimentador (o que não existe nesse caso e portanto está descartado), ou por conexão com MEG. Assim, tem-se que as áreas 4, 6, 7 e 9, embora sejam *a priori* restauráveis, só serão de fato restauradas, nesse caso, na ocasião em que forem conectadas a algum MEG. Supondo que só haja 1 MEG disponível na ocorrência dessa falta, e que, realizado o teste de melhor conexão com o

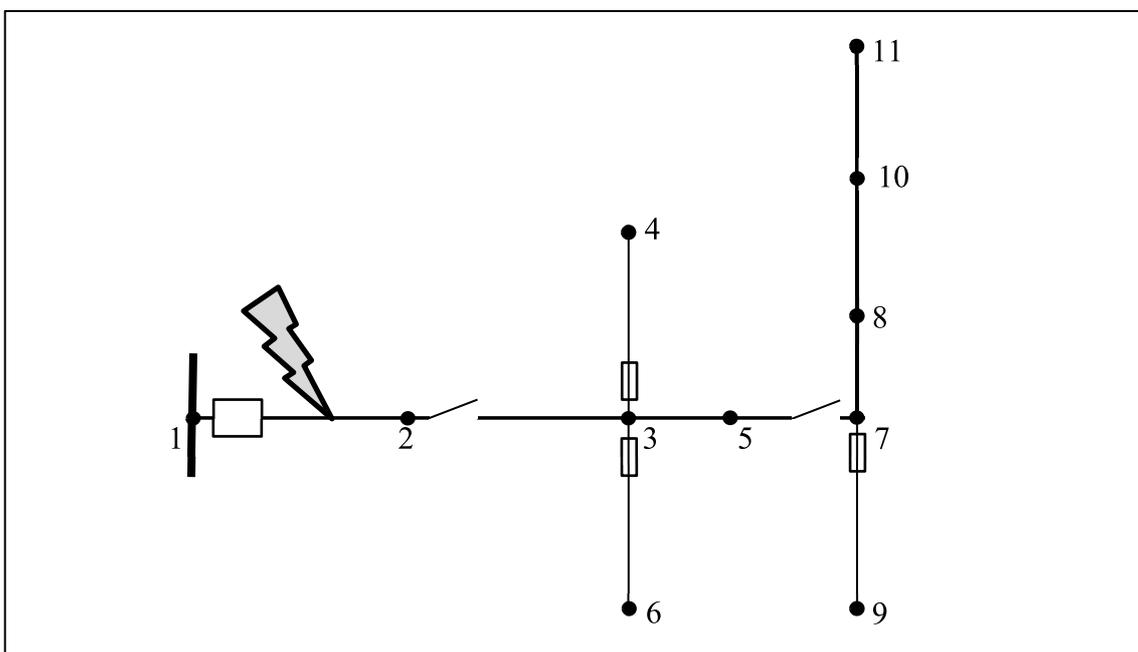
MEG, a área 6 seja a eleita, somente ela será restaurada – dentre todas as áreas restauráveis por MEG.

B. Escolha da(s) área(s) que será(ão) restaurada(s) por MEG na ocasião de uma falta

Será apresentado como é realizado o teste de melhor conexão com MEG, dentre as áreas restauráveis por MEG, na ocasião de uma falta sustentada que ocorre num alimentador.

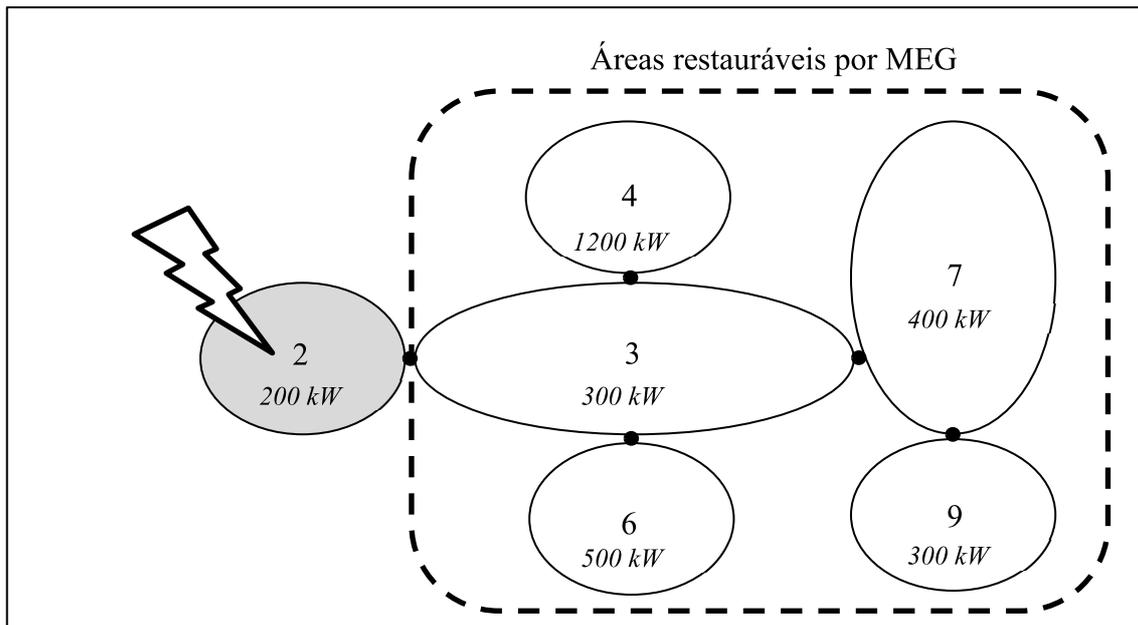
Com esse intuito, examine a Figura B-5. Uma falta ocorre entre os nós 1 e 2 do alimentador apresentado. É possível entender essa situação sob a ótica dos conceitos de área explicados: a área 2 torna-se uma área não-restaurável, e, como não há possibilidades de manobras de transferência de carga para que as outras áreas sejam restauráveis, todas elas passam a ser restauráveis apenas por MEG, como ilustra a Figura B-6.

Figura B-5: Falta ocorrendo na seção entre os nós 1 e 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Figura B-6: A área 2 torna-se não-restaurável devido a uma falta que ocorre dentre seus limites. As outras áreas passam a ser restauráveis por MEG.



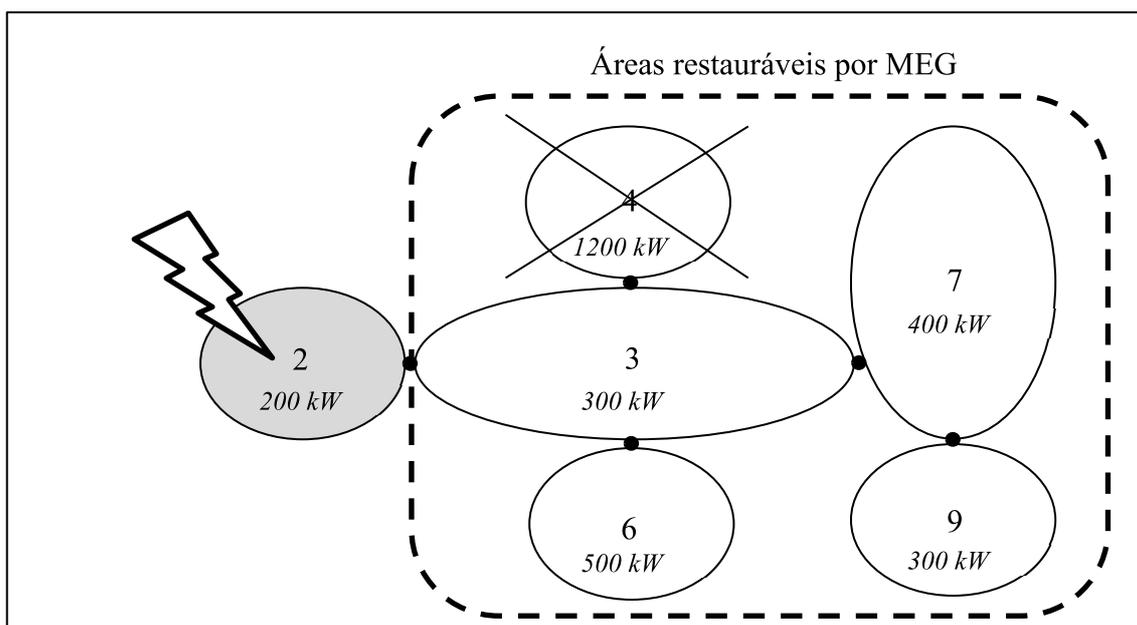
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Para se escolher qual área será efetivamente restaurada por MEG, cálculos devem ser realizados e alguns critérios devem ser satisfeitos. O que o algoritmo desenvolvido neste trabalho realiza será mostrado nos próximos itens.

B.1: Corte preliminar das áreas que extrapolam a carga restaurável

Inicialmente, todas as áreas que possuem carga superior à capacidade do MEG deverão ser desconsideradas. Suponha-se, neste exemplo, que o MEG tenha capacidade de 1000 kW. Desta forma, a área 4 já seria desconsiderada, sobrando-se para escolha as áreas 3, 6, 7 e 9, conforme Figura B-7.

Figura B-7: A área 4 torna-se não-selecionável, por ter carga superior à capacidade do MEG.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

B.2: Geração das combinações a uma, duas e três áreas

Uma análise preliminar da Figura B-7, quando se deseja encontrar qual das áreas que sobram será realmente restaurada por um MEG de 1000 kW, leva inicialmente a pensar que a melhor escolha para restauração é a área 6 (área individual que possui maior carga dentro da capacidade do MEG).

Porém, nada impede que se escolha, na prática, restaurar as áreas 3, 7 e 9, que totalizariam 1000 kW. É necessário que se repare que a separação de partes do alimentador em áreas é um artifício que facilita a análise, mas não significa que só se possa restaurar uma área por vez. Como as áreas são, na prática, separáveis por chaves, as chaves que separam as áreas 2, 4 e 6 da área 3 poderiam ser abertas, mantendo-se fechadas as chaves que separam as áreas 3, 7 e 9 entre si. Desta forma, conectando-se o MEG, por exemplo, à área 3, então também as áreas 7 e 9 seriam restauradas.

Levando-se em conta essa possibilidade de restaurar mais de uma área (o que pode ser feito desde que as áreas assim restauradas sejam conectáveis entre si e obedeçam à capacidade do MEG), o algoritmo desenvolvido neste trabalho realiza as combinações a um, dois e três das áreas elegíveis. Além disso, as cargas das áreas presentes nas combinações são somadas e testes

de conectividade entre todas essas áreas são realizados. Assim, no caso concreto da Figura B-7, tem-se as combinações, cargas e testes de conectividade dadas conforme Tabela B-1. Dentro da capacidade do MEG, a combinação de áreas com maior carga e que tenha áreas conectáveis entre si consiste nas áreas 3, 7 e 9 – combinação esta que evidenciará, enfim, quais áreas serão, de fato, restauradas pelo MEG na ocasião da falta analisada.

A conectividade de todas as áreas de uma combinação é condição necessária para sua restauração por MEG, haja vista que um mesmo MEG só poderá restaurar tal combinação caso haja caminho entre todas essas áreas.

Tabela B-1 - Combinações a uma, duas e três áreas do exemplo.

| | Combinações possíveis | Carga total | Há conectividade entre todas as áreas? |
|---------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|
| A uma área | 3 | 300 | Sim |
| | 6 | 500 | Sim |
| | 7 | 400 | Sim |
| | 9 | 300 | Sim |
| A duas áreas | 3, 6 | 800 | Sim |
| | 3, 7 | 700 | Sim |
| | 3, 9 | 600 | Não |
| | 6, 7 | 900 | Não |
| | 6, 9 | 800 | Não |
| | 7, 9 | 700 | Sim |
| A três áreas | 3, 6, 7 | 1200 | Sim |
| | 3, 6, 9 | 1100 | Não |
| | 3, 7, 9 | 1000 | Sim |
| | 6, 7, 9 | 1200 | Não |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Neste trabalho, fixou-se que seriam levadas em conta as combinações apenas até três áreas. Esta escolha foi feita principalmente porque um número maior de combinações oneraria computacionalmente o algoritmo. É preciso lembrar que esta análise de áreas é feita repetidas vezes no decorrer do algoritmo (uma vez a cada possível falta i dentre L faltas possíveis, de cada solução candidata presente na geração atual do algoritmo genético, de cada geração do número total de gerações). Se por um lado o alimentador que foi

usado de exemplo neste capítulo, mostrado na Figura B-1, possui poucos nós e áreas, por outro lado um alimentador de grandes dimensões pode possuir um número bem maior de áreas elegíveis para conexão com MEG. Se fossem testadas todas as combinações possíveis num total de N áreas elegíveis (a uma, duas, três, quatro, cinco, ..., N áreas combinadas), o algoritmo precisaria analisar um número de combinações dado pela equação (B-1), que representa a soma das combinações de N elementos tomados de 1 a N , a qual, expandida e desenvolvida em termos de seus fatoriais, resulta¹² em $2^N - 1$.

$$C_N^1 + C_N^2 + C_N^3 + C_N^4 + \dots + C_N^{N-1} + C_N^N = 2^N - 1 \quad (\text{B-1})$$

Desta forma, num alimentador de médio porte, em que numa dada ocasião de falta trinta áreas poderiam ser restauradas, haveria um total de mais de 1 bilhão de combinações possíveis – caso o algoritmo fizesse a análise completa de todas as combinações. Por outro lado, quando se truncam as combinações a uma, duas ou três áreas, conforme a equação (B-2), o número de combinações analisadas é de apenas 4.525.

$$C_N^1 + C_N^2 + C_N^3 = \frac{N^3 + 5N}{6} \quad (\text{B-2})$$

Se por um lado truncar em no máximo três áreas combinadas para que se analise a restauração por MEG não abarca todas as possibilidades matemáticas, a experiência em simular alimentadores reais neste trabalho revela que este é o caso prático mais recorrente, haja vista que, em praticamente todos os casos simulados, quatro ou mais áreas conectadas extrapolavam a capacidade do MEG e, portanto, não poderiam ser restauradas em conjunto de qualquer maneira.

¹² Uma outra forma equivalente de se chegar ao mesmo resultado é pelo princípio fundamental da contagem. Ao criar as combinações possíveis de N áreas, existem duas possibilidades de escolha para cada uma dessas áreas: ela pode ou não estar inclusa na contagem. Como são N áreas, haveria $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot (\dots) \cdot 2 = 2^N$ possibilidades de dispor essas áreas. Subtraímos, contudo, uma unidade desse total (que corresponderia a não incluir nenhuma área, ou seja, a combinação de zero elementos), o que resulta num total de $2^N - 1$ combinações possíveis de serem analisadas.

APÊNDICE C Custos relativos a confiabilidade

Neste apêndice, serão explicados alguns conceitos acerca de aspectos econômicos concernentes à análise de confiabilidade e à otimização de custos de confiabilidade de redes de distribuição que foram utilizados no Capítulo 2.

A. Introdução

As concessionárias de energia, no geral, monitoram os valores de diferentes índices de confiabilidade de suas redes, em toda a rede e/ou em partes da rede. Os dois índices mais comuns de serem analisados, de acordo com a literatura em geral, são o SAIFI e o SAIDI (no caso do Brasil, seus análogos FEC e DEC). Quando se trata de investimentos em confiabilidade, a redução dos valores de SAIFI e SAIDI possui como consequência praticamente direta a redução dos impactos causados por contingências.

Quando um consumidor experimenta uma interrupção em seu fornecimento em função de uma contingência, costuma-se associar a esse fato um custo, chamado de “custo de confiabilidade do consumidor”. Segundo BROWN (2009), esse custo pode ser entendido como a multa que a concessionária possa vir a pagar pelos prejuízos sofridos pelo consumidor que ficou sob interrupção, ou ainda como o valor que o consumidor estaria disposto a pagar para que não ficasse sob interrupção naquele momento. Anualmente, o custo de confiabilidade do consumidor pode ser muito elevado, principalmente ao levar-se em conta perdas de produção motivadas por falta de energia – isso sem contar os custos referentes a danos sofridos por equipamentos que experimentam as contingências.

O custo de confiabilidade do consumidor pode ser utilizado pelas concessionárias de energia quando estas desejam balancear os custos de investimento em confiabilidade de suas redes com os custos de confiabilidade de seus consumidores. Se quanto maior a confiabilidade da rede, maiores também são os custos de investimento, e se quanto menor a confiabilidade da rede, maiores são os custos de confiabilidade do consumidor, já verifica-se de antemão aqui a existência de um possível problema de otimização, uma vez que a concessionária de energia possui interesse em buscar o ponto de menor

custo global. Esse valor mínimo global define o preço que as concessionárias associam aos índices de confiabilidade.

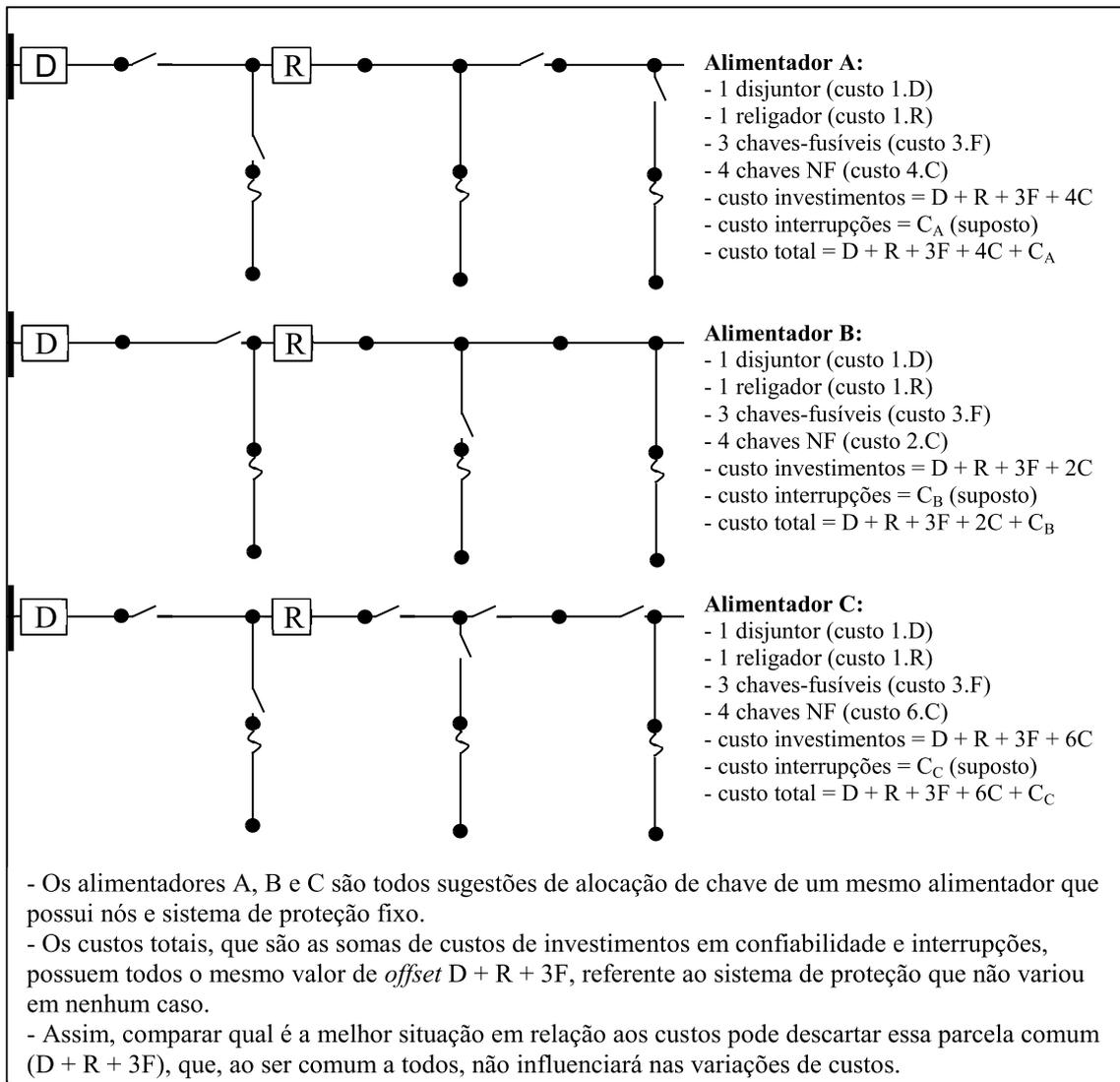
B. Custos de investimentos em confiabilidade

Os custos de investimentos em confiabilidade, em sentido amplo, consistem nos custos associados a dispositivos que possam variar os índices de confiabilidade de um alimentador.

Esses custos são tomados no período de um ano, o que significa que os custos com equipamentos deverão abarcar tanto aquisição (normalizada em intervalos de um ano, dentro dos anos de vida útil do equipamento) quanto manutenção anual. Serão considerados, neste contexto, dispositivos de manobra (chaves seccionadoras NF, as quais são passíveis de diferentes alocações num mesmo alimentador) e MEGs.

Ressalta-se, neste ponto, que os custos com equipamentos de proteção (isto é, os dotados de elementos de extinção de corrente, como disjuntores, fusíveis, religadores) não precisarão ser levados em conta neste cálculo, para os objetivos do presente trabalho. Como o objetivo principal deste trabalho é que custos totais sejam minimizados, os equipamentos de proteção nas soluções candidatas não terão seus posicionamentos realocados, de forma que todas as soluções candidatas quanto às variações com chaves seccionadoras ou MEGs possuirão a mesma configuração de equipamentos de proteção. Assim os custos destes equipamentos não impactarão na escolha da alocação otimizada. Em outras palavras, quaisquer custos de investimentos em confiabilidade que sejam fixos para a concessionária representam, em termos econômicos anuais, meramente um *offset* de custo comum a todas as soluções candidatas, podendo ser desprezado na escolha da solução ótima pelo algoritmo, conforme Figura C-1.

Figura C-1 - Ilustração do porquê de dispositivos de proteção fixos não necessitarem ser contabilizados para efeitos de comparações de custos totais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O valor anual de uma chave seccionadora, estimado do ponto de vista de uma concessionária, já é bem documentado, como em (SOHN *et al.* 2006) e (TIPPACHON *et al.* 2009). O valor usado neste trabalho será concordante com o dos trabalhos supracitados, assumindo-se portanto que cada unidade de chave seccionadora possua o valor de US\$ 1500,00/ano. Ressalta-se que a escolha deste valor, baseado em tais trabalhos, não apenas é benéfica por se tratar de um valor já usado em pesquisas científicas correlatas, como também é interessante acerca do fato de que o valor de função de dano de consumidor (valor em US\$/kWh de interrupção), que será futuramente definido e utilizado também no presente trabalho, será retirado da mesma fonte pesquisada, o que manterá a proporção econômica entre tais valores.

Contudo, não foram encontrados, na literatura pesquisada, estudos sobre o custo anual de um gerador móvel de emergência. Portanto, será apresentada aqui uma estimativa deste custo, baseada na análise de equipamentos similares. Para este propósito, será utilizado o método do Custo Anual Equivalente, como encontrado CASAROTTO e KOPITTKKE (2010). Considera-se então:

- custo de aquisição de um gerador móvel de emergência como sendo US\$ 70.000;

- custos anuais de manutenção e operação do gerador móvel de emergência como sendo US\$ 12.000;

- vida útil de um gerador móvel de emergência como sendo 15 anos.

O método do Custo Anual Equivalente então determina que todos os custos durante a vida útil do equipamento podem ser vistos como custos anuais uniformes:

$$V_a = 70000 \frac{0,2 * (1 + 0,2)^{15}}{(1 + 0,2)^{15} - 1} + 12000 \cong US\$ 27000$$

Baseado neste método, o custo anual de um gerador móvel de emergência ao longo de sua vida útil para a concessionária de energia é de US\$ 27.000/ano.

Porém, outro fator deve ser considerado aqui: diferentemente de dispositivos estáticos do alimentador (como todos os dispositivos de proteção que só podem ser associados àquele alimentador em específico por estarem fixos a ele), um único gerador móvel de emergência pode ser utilizado em mais de um alimentador. Isto significa, por exemplo, que uma mesma concessionária de energia que controla mais de um alimentador pode utilizar um mesmo gerador móvel de emergência para melhoria de confiabilidade de mais de um de seus alimentadores. Isto depende basicamente das distâncias entre os alimentadores, de forma que o tempo de despacho do gerador até as áreas a serem restauradas seja razoável (menor que o tempo de reparo da falta em si e de forma compensatória). Como os custos da função objetivo deste trabalho são todos referentes a um único alimentador, o custo de um gerador móvel de emergência por alimentador deve ser então compartilhado pelos diversos alimentadores. Assim, o custo assumido de um gerador móvel de emergência

para um alimentador em específico deverá ser o custo anual equivalente do gerador dividido pelo número a de alimentadores que ele pode servir:

$$\text{Custo} \frac{\text{MEG}}{\text{alimentador servido}} = \frac{27000}{a} \quad (\text{C.1})$$

Neste trabalho, será considerado que um único gerador móvel de emergência pode ser despachado para dois alimentadores diferentes que estejam adjacentes, o que significa que o custo anual por alimentador de um gerador será considerado como:

$$\text{MEG} = \frac{27000}{2} = \text{US\$ } 13500$$

C. Custos com interrupções

Quando um consumidor sofre uma interrupção em seu fornecimento de energia, existe um custo associado a essa interrupção. Em países cujo modelo de distribuição de energia é decorrente de serviço público através de concessionárias, como o Brasil, o custo com interrupções pode ser visto como multas que podem ser geradas contra as concessionárias por perdas econômicas comprovadamente sofridas pelas unidades consumidoras, e decorrentes da quebra de continuidade no fornecimento de energia. Anualmente, os custos com interrupções podem ser muito elevados, englobando valores diversos como perdas de produção (e.g. linhas de produção industriais interrompidas), insumos (e.g. materiais que se degradam devido à falta de energia, como carnes em frigoríficos), dados (e.g. informações computacionais perdidas em decorrência da queda de fornecimento de energia) e vendas (e.g. lojas que devem ser fechadas por falta de luz e força).

Numerosos trabalhos já foram conduzidos no intuito de se quantificar o valor financeiro associado a interrupções. Normalmente, tais estudos são conduzidos através de pesquisas de custos associados às interrupções orientados aos consumidores, como mostrado em BILLINTON (1994) e em SOHN *et al.* (2006). Especificamente, trabalho semelhante voltado para os consumidores brasileiros foi conduzido em SCHILLING *et al.* (1994).

Os custos com interrupções variam amplamente e dependem de vários fatores, como o tipo de unidade consumidora, a localização dessa unidade, a duração da interrupção, a época do ano, o dia da semana e a hora do dia (BROWN 2009). As pesquisas de custos associados às interrupções orientadas aos consumidores tentam capturar ao máximo as informações necessárias para as quantificações, mas a quantidade de parâmetros que influenciam nesses custos faz com que modelos completos sejam difíceis de serem obtidos. No entanto, valores médios e estimativas podem fornecer bons resultados em problemas de otimização baseadas em custos (como visto em todas as referências supracitadas acerca do tema e várias outras encontradas na literatura).

De uma forma geral, os custos com interrupções de uma unidade são estimados a partir do produto entre a demanda média esperada da unidade (em kW), o tempo de interrupção (em h) e um parâmetro denominado “função de dano do consumidor” (em US\$/kWh) que representa o custo associado à unidade consumidora representativo das perdas econômicas oriundas da falta de energia elétrica.

Apresentam-se, a seguir, tabelas referentes a funções de dano de consumidor. A Tabela C-1 foi extraída de SOHN *et al.* (2006), e corresponde a um compilado da análise de várias pesquisas de custos de interrupções que podem ser encontradas na literatura. Já a Tabela C-2, a Tabela C-3 e a Tabela C-4 referem-se àquelas encontradas em SCHILLING *et al.* (1994) e consistem em resultados voltados para os consumidores brasileiros em específico. Ressalta-se que, muito embora os resultados brasileiros desta forma aqui transcritos possam estar defasados, tratam-se dos únicos dados encontrados na literatura com destino específico de análise no mercado brasileiro, de forma que merece destaque neste texto.

Tabela C-1 - Custo de interrupção por tipo de usuário.

| Usuário (tipo) | Duração da interrupção e custo (US\$/kW) | | | | |
|-------------------|------------------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| | 1 min | 20 min | 1 hora | 4 horas | 8 horas |
| Industrial | 1,625 | 3,868 | 9,085 | 25,16 | 55,805 |
| Comercial | 0,381 | 2,969 | 8,552 | 31,317 | 83,008 |

| | | | | | |
|-----------------------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Agricultura | 0,060 | 0,343 | 0,649 | 2,064 | 4,120 |
| Residencial | 0,001 | 0,093 | 0,482 | 4,914 | 15,690 |
| Governamental/ Institucional | 0,004 | 0,369 | 1,492 | 6,558 | 26,040 |
| Escritório | 4,778 | 9,878 | 21,065 | 68,83 | 119,16 |

Fonte: SOHN *et al.* (2006)

Tabela C-2 – Custos de interrupção de energia – consumidores do tipo residencial (US/kWh, maio 1989).

| Região | Média | Desvio padrão | Máximo | 3º quartil | Mediana | 1º quartil | Mínimo | Moda |
|---------------------|--------------|----------------------|---------------|-------------------|----------------|-------------------|---------------|-------------|
| Norte | 1,13 | 1,39 | 13,05 | 1,30 | 0,71 | 0,42 | 0,07 | 0,65 |
| Nordeste | 1,01 | 0,72 | 4,35 | 1,30 | 0,84 | 0,52 | 0,04 | 0,87 |
| Sudeste | 1,09 | 1,03 | 7,61 | 1,33 | 0,78 | 0,46 | 0,07 | 0,87 |
| Sul | 1,33 | 2,19 | 28,27 | 1,41 | 0,82 | 0,51 | 0,10 | 0,54 |
| Centro-Oeste | 1,20 | 1,28 | 10,65 | 1,38 | 0,84 | 0,45 | 0,07 | 1,30 |
| Brasil | 1,11 | 1,04 | 9,32 | 1,33 | 0,82 | 0,49 | 0,15 | 0,87 |

Fonte: (SCHILLING *et al.* 1994)

Tabela C-3 - Custos de interrupção de energia – consumidores do tipo comercial (US/kWh, dezembro 1990).

| Interrupção iniciou-se na faixa: | Duração da interrupção | | | | | |
|-----------------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| | 0-3 | 3-15 | 15-30 | 30-60 | 60-120 | > 120 |
| | mínimo | mínimo | mínimo | mínimo | mínimo | mínimo |
| 0 – 8 h | 0,98 | 1,83 | 2,80 | 2,55 | 2,45 | 2,69 |
| 8 – 18 h | 1,83 | 3,16 | 4,25 | 4,36 | 4,76 | 3,76 |
| 18 – 24 h | 1,81 | 3,03 | 3,92 | 3,77 | 4,10 | 3,14 |

Fonte: (SCHILLING *et al.* 1994)

Tabela C-4 - Custos de interrupção de energia – consumidores do tipo industrial (US/kWh, dezembro 1990).

| Interrupção | Duração da interrupção |
|--------------------|-------------------------------|
|--------------------|-------------------------------|

| iniciou-se na faixa: | 0-3 | 3-15 | 15-30 | 30-60 | 60-120 | > 120 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | mínimo | mínimo | mínimo | mínimo | mínimo | mínimo |
| 0 – 8 h | 2,87 | 1,23 | 1,07 | 0,90 | 0,81 | 0,78 |
| 8 – 18 h | 2,73 | 1,26 | 1,20 | 0,95 | 0,86 | 0,78 |
| 18 – 24 h | 2,80 | 1,14 | 1,06 | 0,83 | 0,75 | 0,78 |

Fonte: (SCHILLING *et al.* 1994)

D. Montagem da função objetivo utilizada no item 2.4 do Capítulo 2.

De forma a se modelar financeiramente o problema, considerar-se-á neste trabalho que o custo com confiabilidade de um alimentador é dado pela soma dos custos de investimento em confiabilidade (ou seja, custos atrelados a chaves seccionadoras e geradores móveis de emergência, a serem pagos pela concessionária que opera e mantém a rede) com os custos decorrentes de interrupções (danos sofridos por consumidores devido às interrupções, que podem ser traduzidos para a concessionária em forma de multas aplicáveis), conforme a equação (C-2):

$$Custo_{total} = Custo_{investimentos} + Custo_{interrupções} \quad (C-2)$$

Serão analisados, nos itens I e II a seguir, como são compostos os termos do lado direito da equação (C-2).

I – Custos de investimentos em confiabilidade ($Custo_{investimentos}$)

Conforme já explicado, somente as chaves seccionadoras e MEGs serão considerados como custos variáveis de investimentos em confiabilidade. Portanto, é possível formular os custos de investimentos de acordo com a equação (C-3).

$$Custo_{Investimentos} = C \cdot CC + M \cdot MEG \quad (C-3)$$

Os termos da equação (C-3) já foram explicados no Capítulo 2.

II – Custos com interrupções (*Custo*_{interrupções})

Se determinado consumidor j possui demanda P_j (kW), função de dano de consumidor FDC_j (kWh) e sofre uma interrupção T_i (h) devido a uma falta i , o custo que j sofre com a interrupção i (indicado por $Custo_{j,i}$) é dado pela equação (C-4):

$$Custo_{j,i} = P_j \cdot FDC_j \cdot T_i \quad (C-4)$$

Agora, se forem somadas as contribuições de interrupções sofridas por j referentes a todas as L faltas esperadas para ocorrerem anualmente na rede, ter-se-á o custo anual de interrupção referente a j (indicado por $Custo_{j,anual}$) dado pela equação (C-5):

$$Custo_{j,anual} = \sum_{i=1}^L P_j \cdot FDC_j \cdot T_i \quad (C-5)$$

Se forem considerados os valores de demanda P_j e função de dano FDC_j como as médias anuais referentes àquele consumidor, tais termos passam a ser constantes, podendo ficar em evidência no somatório, de modo que a equação (C-5) se torna a equação (C-6):

$$Custo_{j,anual} = P_j \cdot FDC_j \cdot \sum_{i=1}^L T_i \quad (C-6)$$

Por definição, a soma das interrupções anualmente esperadas por um consumidor individual j é o índice de confiabilidade DIC desse consumidor, de forma que é possível então reescrever a equação (C-6) como sendo a equação (C-7):

$$Custo_{j,anual} = P_j \cdot FDC_j \cdot DIC_j \quad (C-7)$$

Por outro lado, se for calculado o $Custo_{j,anual}$ para todos os n consumidores da rede, obtém-se o custo com interrupções anuais da rede, dado então pela (C-8):

$$Custo_{interrupções} = \sum_{j=1}^n Custo_{j,anual} \quad (C-8)$$

Aplicando a equação (C-7) na equação (C-8), obtém-se a equação (C-9), que é capaz de calcular o custo anual de interrupções de um alimentador a partir dos valores DIC de seus consumidores:

$$Custo_{interrupções} = \sum_{j=1}^n P_j \cdot FDC_j \cdot DIC_j \quad (C-9)$$

A análise dos itens I e II anteriores permite então que as equações (C-3) e (C-9) sejam finalmente substituídas na equação (C-2). Obtém-se, assim, a (C-10):

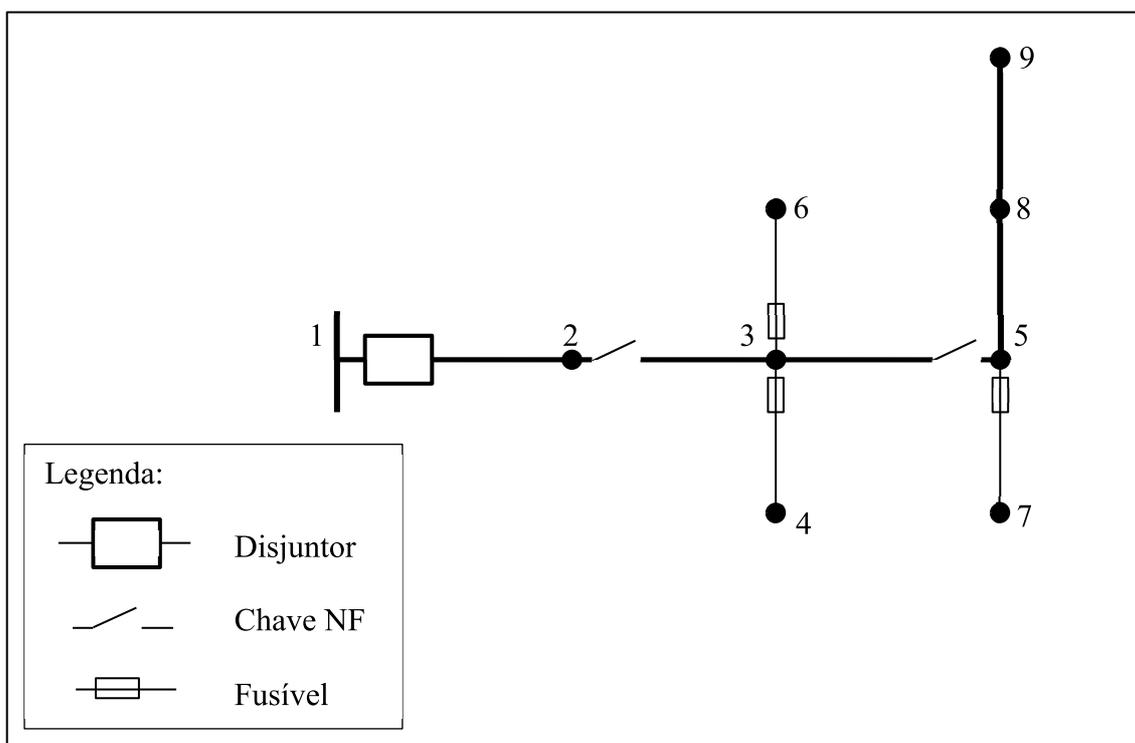
$$Custo_{total} = C \cdot CC + M \cdot MEG + \sum_{j=1}^n P_j \cdot FDC_j \cdot DIC_j \quad (C-10)$$

APÊNDICE D Desenvolvimento de sistemas de teste para verificação de resultados do algoritmo

Dois alimentadores de pequenas dimensões foram criados para que as respostas do algoritmo fossem testadas, e pudessem ter seus resultados conferidos manualmente. A validação da etapa de simulação analítica de faltas, desmembrada em parte qualitativa e quantitativa, pode ser comprovada. Esses sistemas também poderão vir a ser usados por pesquisadores da área de confiabilidade, para realizar estudos diversos e viabilizar comparações.

Sistema 1: sem chave NO

Figura D-1 - Sistema teste, sem chave NO



Fonte: Elaborado pelo autor (2012)

Dados de consumidor:

| De | Para | λ | r | n°cons | P (kVA) | (x, y) | FDC |
|----|------|-----------|---|--------|---------|--------|-------|
| 1 | 2 | 0.5 | 8 | 1 | 250 | (0, 1) | 4.295 |
| 2 | 3 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (1, 1) | 4.295 |
| 3 | 4 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (2, 1) | 4.295 |
| 3 | 5 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (2, 0) | 4.295 |
| 3 | 6 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (3, 1) | 4.295 |
| 5 | 7 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (2, 2) | 4.295 |
| 5 | 8 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (3, 2) | 4.295 |
| 8 | 9 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (3, 3) | 4.295 |

Matriz de conectividade (valor da matriz (m,n)=1 significa conectividade de nó m com nó n):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

Matriz de profundidade de nó (menor profundidade = mais a montante):

| | |
|---|---|
| 1 | 0 |
| 2 | 1 |
| 3 | 2 |
| 4 | 3 |
| 5 | 3 |
| 6 | 3 |
| 7 | 4 |
| 8 | 4 |
| 9 | 5 |

Identificação de faltas i:

| Falta para nó: | Valor de i: |
|----------------|-------------|
| 2 | 1 |
| 3 | 2 |
| 4 | 3 |
| 5 | 4 |
| 6 | 5 |
| 7 | 6 |
| 8 | 7 |
| 9 | 8 |

Booleanos BN (matriz formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Booleanos BP (matriz formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Booleanos BU (matriz formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Booleanos BD (matriz formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Booleanos BMEG (formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

Booleanos ConfirmMEG (formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

Não-Restauráveis (formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Áreas formadas (valor inicial: nome da área; colunas: nós pertencentes às áreas; última coluna: carga da área):

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 |
| 5 | 0 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 750 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Conectividade de áreas (valor da matriz (m,n)=1 significa conectividade da área m com a área n):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

AlocMEG (mostra, a cada falta, o nó onde será feita a conexão com o MEG, suas coordenadas e a carga total restaurada da combinação de áreas)

| Falta | Nó | Conec. | X | Y | Carga total |
|-------|----|--------|---|---|-------------|
| 1 | 3 | | 1 | 1 | 1000 |
| 2 | 5 | | 2 | 0 | 1000 |
| 3 | 0 | | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 5 | | 2 | 0 | 1000 |
| 5 | 0 | | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 7 | | 2 | 2 | 250 |
| 8 | 7 | | 2 | 2 | 250 |

Relatórios de quais áreas (e suas cargas totais) são restauradas pelo MEG a cada falta (lembrar que cada área pode ser formada por mais nós, de acordo com a matriz **Áreas Formadas** anteriormente gerada)

Falta para nó:

2

Carga restaurada pelo MEG:

1000

Áreas MEG Restauradas

3 0 5 0 0

Falta para nó:

3

Carga restaurada pelo MEG:

1000

Áreas MEG Restauradas

0 5 0 7

Falta para nó:

5

Carga restaurada pelo MEG:

1000

Áreas MEG Restauradas

0 5 0 7

Falta para nó:

8

Carga restaurada pelo MEG:

250

Áreas MEG Restauradas

7

Falta para nó:

9

Carga restaurada pelo MEG:

250

Áreas MEG Restauradas

7

COLF X e Y:

1.7143

0.5714

Distância entre pontos de conexão e COLF (por falta):

0.8330

0.6389

0

0.6389

0

0

1.4569

1.4569

FIC: (de cada consumidor j, representado a cada linha)

0
2.5000
2.5000
3.0000
2.5000
3.0000
3.0000
2.5000
2.5000

FEC:

2.6875

DIC: (de cada consumidor j, representado a cada linha)

0
6.0000
4.2639
9.5000
3.7852
9.5000
6.5699
3.7852
3.7852

DEC:

5.8987

Número de chaves NC no sistema:

2

Número de chaves-fusíveis no sistema:

3

Custo anual de chaves, \$/ano:

5000

Custo interrupção anual por nó:

1.0e+04 *

0
0.6442
0.4578
1.0201
0.4064
1.0201
0.7054
0.4064
0.4064

Custo interrupção anual:

5.0669e+04

Custo MEG:

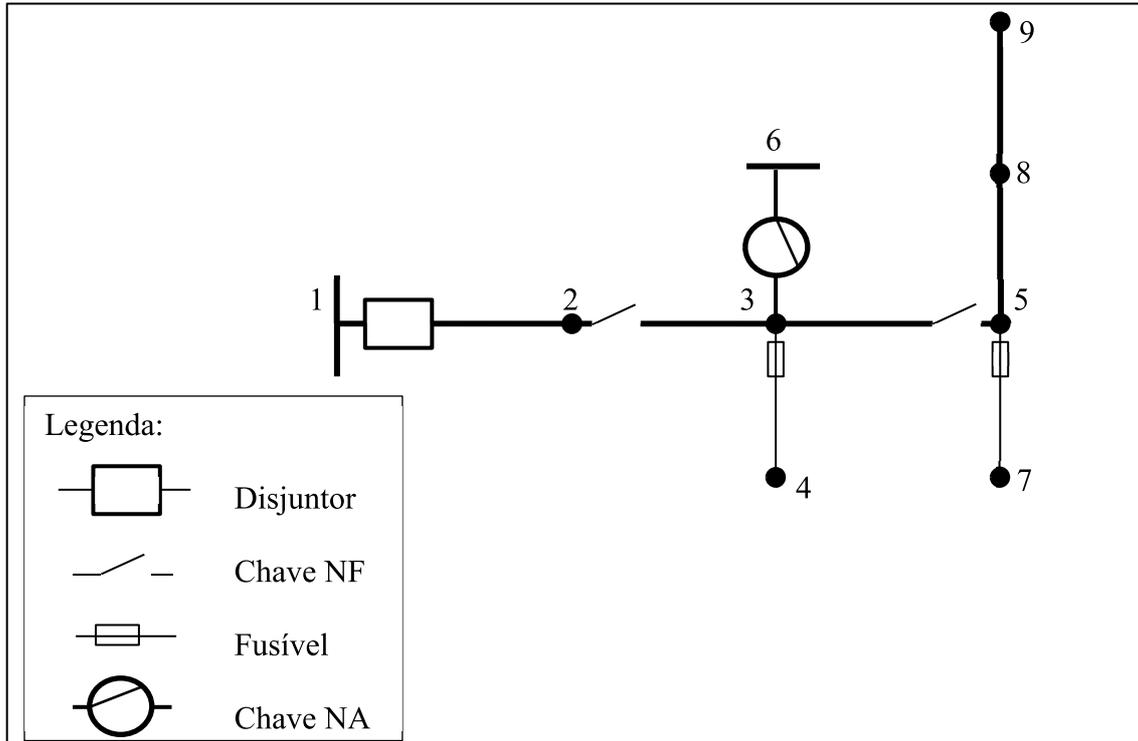
13500

Custo Total:

6.9169e+04

Sistema 2: com chave NO

Figura D-2 - Sistema teste, com chave NO



Fonte: Elaborado pelo autor (2012)

Dados de consumidor:

| De | Para | λ | r | n°cons | P (kVA) | (x, y) | FDC |
|----|------|-----------|---|--------|---------|--------|-------|
| 1 | 2 | 0.5 | 8 | 1 | 250 | (0, 1) | 4.295 |
| 2 | 3 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (1, 1) | 4.295 |
| 3 | 4 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (2, 1) | 4.295 |
| 3 | 5 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (2, 0) | 4.295 |
| 5 | 7 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (2, 2) | 4.295 |
| 5 | 8 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (3, 2) | 4.295 |
| 8 | 9 | 0.5 | 3 | 1 | 250 | (3, 3) | 4.295 |

Matriz de conectividade (valor da matriz (m,n)=1 significa conectividade de nó m com nó n):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

Matriz de profundidade de nó (menor profundidade = mais a montante):

| Nó | Profundidade |
|----|--------------|
| 1 | 0 |
| 2 | 1 |
| 3 | 2 |
| 4 | 3 |
| 5 | 3 |
| 6 | 3 |
| 7 | 4 |
| 8 | 4 |

Identificação de faltas i :

| Falta para nó: | Valor de i : |
|----------------|----------------|
| 2 | 1 |
| 3 | 2 |
| 4 | 3 |
| 5 | 4 |
| 7 | 6 |
| 8 | 7 |
| 9 | 8 |

Booleanos BN (matriz formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Booleanos BP (matriz formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Booleanos BU (matriz formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Booleanos BD (matriz formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Booleanos BMEG (formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

Booleanos ConfirmMEG (formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

Não-Restauráveis (formada por linhas de falta e colunas de nós consumidores (i, j)):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Áreas formadas (valor inicial: nome da área; colunas: nós pertencentes às áreas; última coluna: carga da área):

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 |
| 3 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 |
| 5 | 0 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 750 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Conectividade de áreas (valor da matriz (m,n)=1 significa conectividade da área m com a área n):

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

AlocMEG (mostra, a cada falta, o nó onde será feita a conexão com o MEG, suas coordenadas e a carga total restaurada da combinação de áreas)

| Falta | Nó Conec. | X | Y | Carga total |
|-------|-----------|---|---|-------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 5 | 2 | 0 | 1000 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 5 | 2 | 0 | 1000 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 7 | 2 | 2 | 250 |
| 8 | 7 | 2 | 2 | 250 |

Relatórios de quais áreas (e suas cargas totais) são restauradas pelo MEG a cada falta (lembrar que cada área pode ser formada por mais nós, de acordo com a matriz **Áreas Formadas** anteriormente gerada)

Falta para nó:

3

Carga restaurada pelo MEG:

1000

Áreas MEG Restauradas

0 5 7

Falta para nó:
5
Carga restaurada pelo MEG:
1000
Áreas MEG Restauradas
0 5 7

Falta para nó:
8
Carga restaurada pelo MEG:
250
Áreas MEG Restauradas
7

Falta para nó:
9
Carga restaurada pelo MEG:
250
Áreas MEG Restauradas
7

COLF X e Y:
2

0.4000

Distância entre pontos de conexão e COLF (por falta):

0
0.4000
0
0.4000
0
0
1.6000
1.6000

FIC: (de cada consumidor j, representado a cada linha)

0
2.5000
2.5000
3.0000
2.5000
0
3.0000
2.5000
2.5000

FEC:

2.6429

DIC: (de cada consumidor j, representado a cada linha)

0
6.0000
4.5000
6.0000
4.0133
0
3.0667
4.0133
4.0133

DEC:

4.5152

Número de chaves NC no sistema:

2

Número de chaves-fusíveis no sistema:

2

Custo anual de chaves, \$/ano:

5000

Custo interrupção anual por nó:

1.0e+03 *

0

6.4425

4.8319

6.4425

4.3093

0

3.2928

4.3093

4.3093

Custo interrupção anual:

3.3938e+04

Custo MEG:

13500

Custo Total:

5.2438e+04

Bibliografia

- AHUJA, R.; MAGNATI, T.; ORLIN, J. Network flows: Theory, algorithms and applications. Prentice Hall, 1994.
- ALAM, A.; PANT, V.; DAS, B. Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates. *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 140, Nov. 2016.
- AOKI, K.; SATOH, T.; ITOH, M.; KUWABARA, H.; KANASASHI, H. Voltage Drop Constrained Restoration of Supply by Switch Operation in Distribution Systems. *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 3, No.3, July 1988.
- ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R.; CARNEIRO, S.; PEREIRA, J. L. R.; GARCIA, P. A. N. A Comparative Study on the Performance of TCIM Full Newton versus Backward-Forward Power Flow Methods for Large Distribution Systems., 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA.
- BENAVIDES, A. J.; RITT, M.; BURIOL, L. S.; FRANCA, P. M. An iterated sample construction with path relinking method: Application to switch allocation in electrical distribution networks. *Computers & Operations Research* 40, 2013.
- BILLINTON, R.; ALLAN, R.N.; SJARIEF, I.; GOEL, L.; SO, K.S. A Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Distribution System Data and Results. *IEEE Trans. Power Systems*, Vo1.6, No. 2, May 1991.
- BILLINTON, R.; ALLAN, R. Reliability Evaluation of Engineering Systems Concepts and Techniques. 2nd. ed. New York: Editora Plenum Press, 1992.
- BILLINTON, R. Evaluation of reliability worth in an electric power system.

- Reliability Eng. And Syst. Safety, 46, 1994.
- BILLINTON, R.; ALLAN, R. Reliability Evaluation of Power Systems. 2nd. ed. New York: Editora Plenum Press, 1994.
- BILLINTON, R.; JONNAVITHULA, S.. Optimal Switching Device Placement in Radial Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996
- BROWN, R. E. Electric Power Distribution Reliability. 2nd edition. CRC Press, 2009
- CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKKE, B. H. Análise de Investimentos. 11ª edição. Editora Atlas, 2010.
- CHE, L.; SHAHIDEHPOUR, M. Adaptive Formation of Microgrids With Mobile Emergency Resources for Critical Service Restoration in Extreme Conditions, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 1, Jan. 2019.
- CHEN, C. S.; LIN, C. H.; CHUANG, H. J.; LI, C. S.; HUANG, M. Y.; HUANG, C. W. Optimal Placement of Line Switches for Distribution Automation Systems Using Immune Algorithm. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS. VOL. 21, NO. 3, AUGUST 2006
- CHOI, J.; KHALSA, A.; KLAPP, D. A.; ILLINDALA, M. S.; SUBRAMANIAM, K. Survivability of Synchronous Generator-Based Distributed Energy Resources for Transient Overload Conditions in a Microgrid. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 6, Nov-Dec. 2018.
- DAI, F. T. Risks of network protection for mobile generator applications. Proc. IET 9th Int. Conf. on Develop. in Power Syst. Protection, Mar. 2008.
- DA SILVA, A. M. L.; SCHMITT, W. F.; CASSULA, A. M. Analytical and Monte Carlo Approaches to Evaluate Probability Distributions of Interruption

Duration. IEEE Trans. Power Systems, Vo1.20, No. 3, August 2005

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische mathematik, vol. 1, pp. 269-271, 1959.

DOMINGUEZ, J. S.; JUNIOR, A. J. C.; DOMINGUEZ, D. S.; FRIAS, D.; IGLESIAS, S. M. Using a Multi-Agent System for Monitoring Indicators of Quality of Service in Power Distribution Networks. IEEE Lat. Am. Trans., vol. 13, no. 4, Apr. 2015.

FERREIRA, G. D.; BRETAS, A. S.; CARDOSO JR., G. Optimal Distribution Protection Design Considering Momentary and Sustained Reliability Indices. Modern Electric Power Systems 2010, Wroclaw, Poland

FERREIRA, G. D.; BRETAS, A. S. A nonlinear binary programming model for electric distribution systems reliability optimization. Electrical Power and Energy Systems 43 (2012)

FLETCHER, R. Practical Methods of Optimization. 2nd. ed. New York: John Wiley Sons, 2001.

GIRÓN, C.; RODRÍGUEZ, F. J.; GIMÉNEZ DE URTASUM, L.; BORROY, S. Assessing the contribution of automation to the electric distribution network reliability. Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 97, Apr. 2018.

HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. Renewb. and Sust. Ener. Reviews, vol. 90, Jul. 2018

IWAI, S.; KONO, T.; HASHIWAKI, M.; KAWAGOE, Y. Use of mobile engine generators as source of back-up power. Proc. IEEE 31st Int. Telecom. Energy Conf., Oct. 2009.

JEONG, C. Y.; CHO, J. G.; BAEK, J. W.; YOO, D. W. A new integrated controller based 100 kVA mobile engine generator for single/three phase

distribution line backup. Proc. IEEE 15th Appl. Power Electron. Conf. and Expo., 2000, vol. 2.

JONNAVITHULA, S.; BILLINTON, R. A Test System For Teaching Overall Power System Reliability Assessment. IEEE Trans. Power Systems, Vol. 11, No. 4, November 1996

JOOSHAKI, M.; ABBASPOUR, A.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; FARZIN, H.; MOEINI-AGHTAIE, M.; LEHTONEN, M. A MILP Model for Incorporating Reliability Indices in Distribution System Expansion Planning. IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 3, May 2019.

KIM, J.; DVORKIN, Y. Enhancing Distribution System Resilience With Mobile Energy Storage and Microgrids. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 5, Sept. 2019.

KWON, S.; PARK, J.; KIM, Y. Optimal Operation of Mobile Energy Storage Devices to Minimize Energy Loss in a Distribution System. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018.

LAVORATO, M., FRANCO, J. F., RIDER, M. J., ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. IEEE Trans. Power Systems, 27, 2012.

LEI, S; WANG, J; CHEN, C; HOU, Y. Mobile Emergency Generator Pre-Positioning and Real-Time Allocation for Resilient Response to Natural Disasters. IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 3, May 2018.

LINDEN, R. Algoritmos Genéticos. 3ª edição. Editora Ciência Moderna. 2012

LÓPEZ, J.C.; LAVORATO, M.; RIDER, M. J. Optimal reconfiguration of electrical distribution systems considering reliability indices improvement.

Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 78, Jun. 2016.

MA, L.; LV, X.; WANG, S.; HIROMI, M. Optimal Switch Placement in Distribution Networks under Different Conditions Using Improved GA. Second International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing (CINC), 2010.

MILOCA, S. A. Planejamento da expansão em redes de distribuição de energia elétrica com indicadores de confiabilidade e base de dados georreferenciada. Tese de Doutorado. Curitiba, Brasil 2012

MIRANDA, V.; RANITO, J. V.; PROENCA, L. M. Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning. IEEE Trans. Power Systems, Vol. 9, No. 4, Nov. 1994.

MISHRA, S.; DAS, D.; PAUL, S. A comprehensive review on power distribution network reconfiguration, Energy Syst. (2016).

MORADI, A.; FOTUHI-FIRUZABAD, M. Optimal Switch Placement in Distribution Systems Using Trinary Particle Swarm Optimization Algorithm. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 23, NO. 1, JANUARY 2008

Padrão IEEE 1366: Guide for Electric Power Distrib. Reliability Indices. IEEE, 2003

PENIDO, D. R. R.; ARAUJO, L. R.; FILHO, M. C. A Fault Analysis Algorithm for Unbalanced Distribution Systems. IEEE Lat. Am. Trans., vol. 13, no. 1, Jan. 2015.

POMBO, A. V.; MURTA-PINA, J.; PIRES, V. F. A multiobjective placement of switching devices in distribution networks incorporating distributed energy resources. Electr. Power Syst. Res., vol. 130, Jan. 2016.

POPOVIC, D.; CIRIC, R.; A Multi-Objective Algorithm for Distribution Network

Restoration. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999

POPOVIĆ, Ž.; BRBAKLIC, B.; KNEŽEVIĆ, S. A mixed integer linear programming based approach for optimal placement of different types of automation devices in distribution networks. Electr. Power Syst. Res., vol. 148, Jul. 2017.

PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Revisão vigência 2015.

QUEVEDO, P. M.; CONTRERAS, J.; MAZZA, A.; CHICCO, G.; PORUMB, R. Reliability Assessment of Microgrids with Local and Mobile Generation, Time-Dependent Profiles, and Intra-Day Reconfiguration. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 54, no. 1, Jan 2018.

RAY, S.; BHATTACHARYA, A.; BHATTACHARJEE, S. Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement. Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 76, Mar. 2016.

RODRIGUES, F. M. Otimização multi-objetivo de redes de distribuição utilizando algoritmos genéticos visando melhoria da confiabilidade. Dissertação de mestrado. Juiz de Fora, Brasil, 2015.

RODRIGUES, F. M.; ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R. Optimization of Reliability through Switch Reconfiguration in Distribution Systems. IEEE Latin America Transactions, 17, 2019.

RESOLUÇÃO Nº 24, DE 27 DE JANEIRO DE 2000. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras.

SARDOU, I. G.; BANEJAD, M.; HOOSHMAND, R.; DASTFAN, A. Modified

- Shuffled Frog Leaping Algorithm for Optimal Switch Placement in Distribution Automation System Using a Multi-Objective Fuzzy Approach. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, vol.6, iss. 6.
- SHANG, J.; SHENG, X.; ZHANG, J. H.; ZHAO, W. The Optimized Allocation of Mobile Emergency Generator Based on the Loads Importance. 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009.
- SCHILLING, M. T.; MASSAUD, A. G.; HERNANDEZ, J. P. Electricity restriction costs. IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, Vol. 141, No. 4, July 1994
- SHIRMOHAMMADI, D. Service Restoration in Distribution Networks Via Network Reconfiguration. IEEE Trans. Power Delivery, Vol.7, No 2, 1992
- SILVA, L. G. W. Alocação otimizada de dispositivos de proteção em sistema de distribuição de energia elétrica. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Maio de 2002
- SILVA, L. G. W.; PEREIRA, R. A. F.; MANTOVANI, J. R. S. Allocation of protective devices in distribution circuits using nonlinear programming models and genetic algorithms. Electric Power Systems Research 69, 2003.
- SILVA, L. G. W.; PEREIRA, R. A. F.; ABBAD, J. R.; MANTOVANI, J. R. S. Optimized placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm. Electric Power Systems Research 78, 2007.
- SOHN, J. M.; NAM, S. R.; PARK, J. K. Value-Based Radial Distribution System Reliability Optimization. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 21, NO. 2, MAY 2006.

- SOUDI, F.; TOMSOVIC, K. Optimized Distribution Protection Using Binary Programming. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, Jan. 1998
- SRINIVASAN, D.; WEN, F.; CHANG, C. S.; LIEW, A. C. A Survey of Applications of Evolutionary Computing to Power Systems. Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems. IEEE Catalog 96TH8152, Jan. 1996
- SULTANA, B.; MUSTAFA, M.; SULTANA, U. Review on reliability improvement and power loss reduction in distribution system via network reconfiguration. Renew Sustain Energy Rev, 66, 2016.
- SUNDHARARAJAN, S.; PAHWA, A. Optimal Design of Secondary Distribution Systems Using a Genetic Algorithm. Proceedings of the 27th Annual North American Power Symposium, IEEE, October 1995.
- TANAKA, M.; ETO, H.; MIZUNO, Y.; MATSUI, N.; KUROKAWA, F. Genetic algorithm based optimization for configuration and operation of emergency generators in medical facility. 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications.
- TENEMAZA, C. E. P.; ORTEGA, E. M. I. State of Art, Reliability In Electrical Distribution Systems Based On Markov Stochastic Model. IEEE Lat. Am. Trans., vol. 14, no. 2, Feb. 2016.
- TIPPACHON, W.; RERKPREEDAPONG, D. Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization. Electric Power Systems Research 79, 2009.
- UCAK, C.; PAHWA, A. An Analytical Approach for Step-by-Step Restoration of Distribution Systems Following Extended Outages. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994

VAZ, R. R. C.; FRANCO, R. A. P.; CORRÊA, H. P.; VIEIRA, F. H. T.; ARAUJO, S. G. Algorithms for Selecting and Interconnecting Switches to Automate Power Grids Considering Continuity Indexes and Reliability. *J Control Autom Electr Syst*, 30, 2019

WILLIS, H. L. *Spatial Electric Load Forecasting*. Marcel Dekker. 1996

XU, Y.; WANG, Y.; HE, J.; SU, M.; NI, P. Resilience-Oriented Distribution System Restoration Considering Mobile Emergency Resource Dispatch in Transportation System. *IEEE Access*, vol. 7, 2019.

XU, N. .; CHUNG, C. Y. Reliability Evaluation of Distribution Systems Including Vehicle-to-Home and Vehicle-to-Grid. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, Jan. 2016.

YEH, E. C.; VENKATA, S. S.; SUMIC, Z. Improved Distribution System Planning Using Computational Evolution. *Proceedings of 1995 IEEE Power Industry Computer Applications Conference*. IEEE, May, 1995.

ZAMBON, E.; BOSSOIS, D. Z.; GARCIA, B. B.; AZEREDO, E. F. A Novel Nonlinear Programming Model for Distribution Protection Optimization. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 24, NO. 4, OCTOBER 2009

ZHOU, L.; FAN, M.; ZHANG, Z. A study on the optimal allocation of emergency power supplies in urban electric network. *Proc. 20th Int. Conf. and Exhib. on Electr. Distrib.*, June 2009.

ZOU, K.; AGALGAONKAR, A. P.; MUTTAQI, K. M.; PERERA, S. An Analytical Approach for Reliability Evaluation of Distribution Systems Containing Dispatchable and Nondispatchable Renewable DG Units. *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 6, Nov. 2014.