

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

**Etiane Oliveira Ponciano de Carvalho**

**Restabelecimento de Energia em Sistemas de  
Distribuição Considerando a Existência de Geração  
Distribuída**

**São Carlos**

**2020**



**Etiane Oliveira Ponciano de Carvalho**

**Restabelecimento de Energia em Sistemas de  
Distribuição Considerando a Existência de Geração  
Distribuída**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Augusto  
London Junior

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

**São Carlos  
2020**

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

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

083r      Oliveira Ponciano de Carvalho, Etiane  
Restabelecimento de Energia em Sistemas de  
Distribuição Considerando a Existência de Geração  
Distribuída / Etiane Oliveira Ponciano de Carvalho;  
orientador João Bosco Augusto London Jr. São Carlos,  
2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de  
Concentração em Sistemas Elétricos de Potência --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2020.

1. Restabelecimento de energia. 2. Algoritmo  
evolutivo multiobjetivo. 3. Geração Distribuída. 4.  
Sistema de Distribuição. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ETIANE OLIVEIRA PONCIANO DE CARVALHO**.

Título da dissertação: "Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando a existência de geração distribuída".

Data da defesa: 17/07/2020

### Comissão Julgadora:

### Resultado

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

Aprovada

Prof. Dr. **Jonatas Boas Leite**  
(Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”/UNESP – Ilha Solteira)

Aprovada

Dr. **Renzo Amilcar Vargas Peralta**  
(Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”/UNESP – Ilha Solteira)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:  
Prof. Titular **Ivan Nunes da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**



*Este trabalho é dedicado à minha mãe, Mariene.*





## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe, Mariene, pelo exemplo, força, apoio e carinho, sem ela nada disso seria possível. Ela sempre confiou no meu potencial e me ensinou que tudo é possível quando damos nosso melhor.

À minha vó, Marilene, pelo apoio e carinho todos os dias.

Aos meus amigos, Amanda, Rudíny e Matheus, por me ouvirem em cada momento de dificuldade e alegria e por todo amor, apoio, força e incentivo.

Aos meus novos amigos de São Carlos, Jéssica, Gabriel, Geovane e João H., pelo companheirismo e incentivo.

Ao José Paulo que me ajudou no desenvolvimento de parte desse trabalho.

Ao professor João Bosco pela oportunidade, acreditar no meu trabalho e paciência.

Ao professor Arnulfo que me ajudou a conseguir essa oportunidade e acreditou no meu trabalho.

Aos colegas do LACOSEP pelo companheirismo e apoio.

A todos os profissionais do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação pelo profissionalismo e dedicação.

À Escola de Engenharia de São Carlos por todo suporte.

À CNPq pelo apoio financeiro.



## RESUMO

CARVALHO, E. O. P. **Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição Considerando a Existência de Geração Distribuída**. 2020. 124p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Este trabalho visa dar continuidade aos estudos já realizados pelo grupo de pesquisa do LACOSEP, referentes ao tratamento do problema de restabelecimento de energia em Sistemas de Distribuição (SDs) de grande porte (com milhares de linhas, barras de carga e chaves seccionadoras), através da utilização de Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos (AE-MOs) juntamente com a Representação Nó-Profundidade (utilizada para armazenamento e tratamento da topologia elétrica dos SDs). Esses estudos possibilitaram o desenvolvimento de métodos permitindo a obtenção de planos de restabelecimento de energia em SDs de grande porte, sem a exigência de simplificação alguma em relação à quantidade de linhas, chaves e barras da rede, considerando diversas características práticas do problema (existência de consumidores prioritários, características de operação de diferentes tipos de chaves seccionadoras, determinação da sequência de chaveamento, entre outras). Entretanto, nenhum desses métodos possibilitou o tratamento do problema de restabelecimento com a existência de geradores distribuídos considerando ilhamento intencional. Nesse contexto propõe-se, nesta dissertação de mestrado, o desenvolvimento e implantação, em computador, de uma metodologia para o tratamento do problema de restabelecimento de energia em SDs de grande porte, agregando aos métodos já desenvolvidos pelo grupo LACOSEP os procedimentos necessários para considerar a presença de geração distribuída. A metodologia proposta é validada através de diversas simulações computacionais com SDs reais de grande porte.

**Palavras-chave:** Restabelecimento de energia, Algoritmo evolutivo multiobjetivo, Geração Distribuída, Sistema de Distribuição.



## ABSTRACT

CARVALHO, E. O. P. **Service Restoration in Distribution Systems considering the existence of Distributed Generation.** 2020. 124p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

This work aims to continue the studies already carried out by the LACOSEP research group, regarding the treatment of energy restoration problems in large Distribution Systems(DSs) (those with thousands of lines, buses and switches) making use of Evolutionary Multiobjective Algorithms (MOEAs) associated with Non-Depth Representation (used for storage and treatment of the topology of DSs). These studies enabled the development of methods that allow the obtaining of energy restoration plans in large DSs, without simplifying the number of lines, switches and buses of the DSs, considering several practical characteristics of the problem (existence of priority consumers, different types of switches, determination of the switching sequence, among others). However, none of these methods made it possible to deal with restoration problem considering the presence of distributed generators taken onto account the possibility of intentional islanding. In this context, it is proposed, in this master's thesis, the development and implementation, on the computer, of a methodology for treating problems of energy restoration in large-scale DSs, adding to the methods already developed by the LACOSEP group the procedures necessary to consider the presence of distributed generation. The proposed methodology is validated through several computer simulations with DSs presented in the literature and a real large DS.

**Keywords:** Service Restoration, Multi-Objective Evolutionary Algorithm, Distributed Generation, Distribution Systems.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resultados de DEC e FEC no Brasil considerando o período de 2010 a 2019 . . . . .	24
Figura 2 – Ilustração de um Sistema de Distribuição . . . . .	26
Figura 3 – Exemplo de restabelecimento de energia via RR . . . . .	28
Figura 4 – Exemplo de fronteiras de Pareto para dois objetivos 1 e 2 . . . . .	50
Figura 5 – Representação de um Sistema de Distribuição enumerado corretamente para aplicação do VDI . . . . .	51
Figura 6 – Exemplo de um SD típico . . . . .	54
Figura 7 – Exemplo do Operador PAO . . . . .	55
Figura 8 – Exemplo do Operador CAO . . . . .	55
Figura 9 – Exemplo do Operador LRO . . . . .	56
Figura 10 – Fluxograma Simplificado da Metodologia Base. . . . .	61
Figura 11 – Gerador Distribuído no Fluxo de Potência com modo de controle PV . . . . .	67
Figura 12 – Fluxo de Potência com barras PV . . . . .	70
Figura 13 – Situação 1 . . . . .	71
Figura 14 – Situação 2 . . . . .	72
Figura 15 – Situação 3 . . . . .	72
Figura 16 – Situação 3 com Gd sem capacidade <i>black start</i> . . . . .	74
Figura 17 – Sistema exemplo após o setor faltoso e a microrrede serem isolados . . . . .	74
Figura 18 – Ilhamento Intencional . . . . .	75
Figura 19 – Fluxograma da Metodologia Proposta . . . . .	79
Figura 20 – Configuração pré-falta do SD de 53 barras no formato setor e chave. . . . .	85
Figura 21 – Configuração pré-falta do SD de 70 barras. . . . .	93





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de parâmetros de sincronização . . . . .	42
Tabela 2 – Características dos indivíduos finais obtidos nas 35 simulações para faltas no setor 2.532 do SD de Londrina . . . . .	65
Tabela 3 – Tempos médios de execução da metodologia base aplicada ao SD de Londrina . . . . .	66
Tabela 4 – Dados dos sistemas de distribuição utilizados nos testes experimentais .	82
Tabela 5 – Restrições do problema e tempos utilizados para simulações . . . . .	82
Tabela 6 – Parâmetros utilizados nos testes . . . . .	83
Tabela 7 – Parâmetros dos Gds adicionados no SD de 53 barras . . . . .	84
Tabela 8 – Número de casos solucionados no sistema de 53 barras . . . . .	86
Tabela 9 – Resultados das simulações do Setor 2 . . . . .	86
Tabela 10 – Resultados das simulações do Setor 12 . . . . .	87
Tabela 11 – Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 10 para o caso de falta no setor 12 . . . . .	88
Tabela 12 – Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 10 para o caso de falta no setor 12 . . . . .	88
Tabela 13 – Resultados das simulações do Setor 23 . . . . .	89
Tabela 14 – Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 13 para o caso de falta no setor 23 . . . . .	89
Tabela 15 – Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 13 para o caso de falta no setor 23 . . . . .	90
Tabela 16 – Resultados das simulações do Setor 26 . . . . .	90
Tabela 17 – Tempos médios de simulações em segundos para o sistema de 53 barras	91
Tabela 18 – Resultados das simulações do Setor 46 . . . . .	91
Tabela 19 – Parâmetros dos Gds adicionados no SD de 70 barras . . . . .	92
Tabela 20 – Número de casos solucionados no sistema de 70 barras . . . . .	94
Tabela 21 – Resultados das simulações do Setor 2 do sistema de 70 barras . . . . .	94
Tabela 22 – Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 21 para o caso de falta no setor 2 . . . . .	95
Tabela 23 – Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 21 para o caso de falta no setor 2 . . . . .	95
Tabela 24 – Resultados das simulações do Setor 13 do sistema de 70 barras . . . . .	96
Tabela 25 – Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 24 para o caso de falta no setor 13 . . . . .	97
Tabela 26 – Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 24 para o caso de falta no setor 13 . . . . .	97

Tabela 27 – Resultados das simulações do Setor 33 do sistema de 70 barras . . . . .	98
Tabela 28 – Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da para o caso de falta no setor 33 . . . . .	99
Tabela 29 – Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da para o caso de falta no setor 33 . . . . .	99
Tabela 30 – Tempos médios de simulações em segundos para o sistema de 70 barras	100
Tabela 31 – Parâmetros dos Gds adicionados no SD de Londrina . . . . .	100
Tabela 32 – Dados do sistema Londrina na configuração pré-falta . . . . .	101
Tabela 33 – Número de casos solucionados no sistema de Londrina . . . . .	101
Tabela 34 – Resultados das simulações do Setor 749 . . . . .	102
Tabela 35 – Resultados das simulações do Setor 839 . . . . .	103
Tabela 36 – Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 35 para o caso de falta no setor 839 . . . . .	104
Tabela 37 – Informações da sequência de chaveamento da solução 2.b da Tabela 35 para o caso de falta no setor 839 . . . . .	105
Tabela 38 – Resultados das simulações do Setor 919 . . . . .	106
Tabela 39 – Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 38 para o caso de falta no setor 919 . . . . .	106
Tabela 40 – Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 38 para o caso de falta no setor 919 . . . . .	107
Tabela 41 – Resultados das simulações do Setor 1587 . . . . .	108
Tabela 42 – Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 41 para o caso de falta no setor 1587 . . . . .	109
Tabela 43 – Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 41 para o caso de falta no setor 1587 . . . . .	110
Tabela 44 – Resultados das simulações do Setor 2532 . . . . .	111
Tabela 45 – Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 44 para o caso de falta no setor 2532 . . . . .	112
Tabela 46 – Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 44 para o caso de falta no setor 2532 . . . . .	113
Tabela 47 – Tempos médios de simulações em segundos para o sistema de Londrina	113

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEMO	Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo
AEMT	Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BE	Busca Exaustiva
BL	Busca Local
BS	Black-start
CCM	Chave Controlada Manualmente
CCR	Chave Controlada Remotamente
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
ENS	Energia Não Suprida
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
LACOSEP	Laboratório de Análise Computacional de Sistemas Elétricos de Potência da Universidade de São Paulo
Gd	Gerador Distribuído
GD	Geração Distribuída
NA	Normalmente Aberta
NF	Normalmente Fechada
NSGA-II	<i>Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PNS	Potência Não Suprida
PRE	Plano de Restabelecimento de Energia
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RNP	Representação Nó-Profundidade
SD	Sistema de Distribuição



## LISTA DE SÍMBOLOS

$I_i^{(k)}$	Corrente demandada pela barra $i$ na iteração $k$
$V_i^{(k-1)}$	Tensão da barra $i$ na iteração $k - 1$
$Y_i$	Soma dos elementos <i>shunt</i> conectados ao nó $i$
$S_i$	Potência aparente da barra $i$
$J_L^{(k)}$	Corrente da linha $L$ na iteração $k$
$Z_L$	Impedância em série da linha $L$
$Z_V$	Matriz de Sensibilidade PV
$I_q$	Matriz das parcelas de corrente reativa
$\Delta V$	Matriz das diferenças entre as magnitudes de tensão controlada nas barras PV
$\theta_{Vi}$	Ângulo da tensão do nó $i$
$\varepsilon$	Energia Não Suprida durante o tempo de operação de uma configuração
$\psi$	Número total de manobras para obtenção de uma configuração
$\Delta t_4$	Intervalo de tempo necessário para a execução das ações de reparo nos setores em falta
$G$	Configuração radial do SD
$G^e$	Porção de $G$ energizada
$G^{ne}$	Porção de $G$ não energizada
$A(G^e)$	Matriz de incidência da rede de $G^e$
$B(G^e)$	Carregamento máximo da subestação de $G^e$
$V(G^e)$	Máxima queda de tensão relativa de $G^e$
$X(G^e)$	Carregamento máximo da rede de $G^e$
$seq(G)$	Sequência de chaveamento de $G$
$c(G^e)$	Vetor de correntes complexas nas barras de carga e subestações de $G^e$

$x(G^e)$	Vetor de correntes de linha complexas de $G^e$
$v(G^e)$	Vetor de tensões nodais complexas de $G^e$
$Y_x(G^e)$	Matriz diagonal de admitâncias da rede $G^e$
$\bar{x}_j$	Limite superior para magnitude de corrente em uma linha
$\bar{b}_j$	Limite superior de corrente injetada por uma subestação
$\delta$	Máxima queda de tensão relativa permitida
$\Omega_I$	Conjunto formado por todas as configurações intermediárias de G
$g$	Configuração intermediária do SD
$g^e$	Porção de $g$ energizada
$g^{ne}$	Porção de $g$ não energizada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação</b>	<b>23</b>
<b>1.2</b>	<b>O Problema</b>	<b>25</b>
1.2.1	Sistema de Distribuição	25
1.2.2	Restabelecimento de energia em Sistemas de Distribuição	26
<b>1.3</b>	<b>Objetivo</b>	<b>29</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização da Dissertação</b>	<b>30</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>33</b>
<b>2.1</b>	<b>Panorama geral</b>	<b>33</b>
<b>2.2</b>	<b>Contribuições do grupo de pesquisa do LACOSEP</b>	<b>34</b>
<b>2.3</b>	<b>Métodos que consideram a existência de Geração Distribuída</b>	<b>36</b>
<b>2.4</b>	<b>Estudos sobre microrredes</b>	<b>41</b>
<b>2.5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>44</b>
<b>3</b>	<b>EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	<b>47</b>
<b>3.1</b>	<b>Metas-heurísticas</b>	<b>47</b>
<b>3.2</b>	<b>Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos</b>	<b>48</b>
<b>3.3</b>	<b>Dominância de Pareto</b>	<b>49</b>
<b>3.4</b>	<b>Fluxo de Potência de Varredura Direta-Inversa</b>	<b>50</b>
3.4.1	Modelagem da Carga	52
<b>3.5</b>	<b>Representação Nó-Profundidade</b>	<b>53</b>
<b>3.6</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>56</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA BASE</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>Enunciado formal do problema</b>	<b>57</b>
<b>4.2</b>	<b>Metodologia Base</b>	<b>60</b>
4.2.1	Leitura de dados	61
4.2.2	Obtenção da configuração inicial	61
4.2.3	Busca Exaustiva (BE) considerando apenas chaves NAs do <i>Tier 1</i>	62
4.2.4	Busca Local (BL)	62
4.2.5	Processo Evolutivo	63
4.2.6	Seleção das Soluções Finais	64
4.2.7	Contribuições da Metodologia Base	64
<b>4.3</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA</b>	<b>67</b>

<b>5.1</b>	<b>Modelagem dos Geradores Distribuídos no Fluxo de Potência . . . .</b>	<b>67</b>
<b>5.2</b>	<b>Inclusão de Geração Distribuída no problema de restabelecimento .</b>	<b>69</b>
<b>5.3</b>	<b>Enunciado formal do problema com Geração Distribuída . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>5.4</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>6.1</b>	<b>Considerações Iniciais . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>6.2</b>	<b>Sistemas de distribuição e parâmetros utilizados nas simulações . .</b>	<b>81</b>
6.2.1	Sistema Teste 1 - 53 barras . . . . .	84
6.2.2	Sistema Teste 2 - 70 barras . . . . .	92
6.2.3	Sistemas real de grande porte . . . . .	100
<b>6.3</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>115</b>
<b>7.1</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>115</b>
<b>7.2</b>	<b>Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>116</b>
<b>7.3</b>	<b>Publicações . . . . .</b>	<b>117</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>119</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

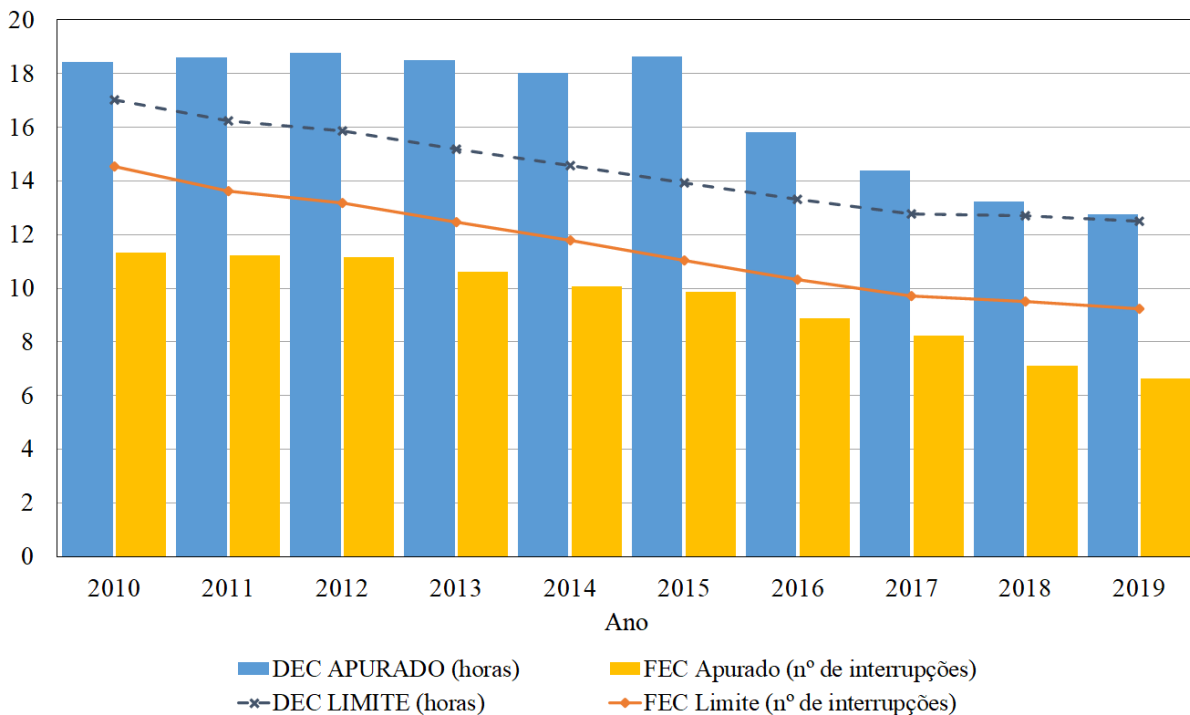
Interrupções no fornecimento de energia nos Sistemas de Distribuição (SDs) são inevitáveis e podem ser provocadas por diversos fatores, como, por exemplo, uma operação de manutenção da rede ou a atuação de dispositivos de proteção devido à ocorrência de faltas permanentes. Nesse contexto vale destacar que, em razão de os SDs operarem na configuração radial, eles possuem baixa confiabilidade em termos de continuidade do fornecimento de energia. Ou seja, a continuidade do fornecimento depende do correto funcionamento de todos os equipamentos entre a fonte e a carga. Dessa forma, a atuação de dispositivos de proteção, em decorrência de faltas permanentes, vai interromper o fornecimento de energia para todos os consumidores localizadas à jusante desses dispositivos, mesmo aqueles localizados em regiões cujas redes elétricas não foram afetadas pelas faltas (ZIDAN et al., 2017).

Face ao exposto, faltas permanentes em SDs causam prejuízos para concessionárias de energia e consumidores, sendo responsáveis por impactos na economia devido às perdas na linha de produção, danos nos equipamentos, perdas de alimentos perecíveis, entre outros. Além disso, existem os impactos sociais, tendo como exemplo, temperaturas desconfortáveis no ambiente de trabalho e nos lares e risco para a saúde e segurança (LINARES; REY, 2013). Para garantir que os SDs funcionem dentro de certos padrões de qualidade e continuidade de fornecimento de energia, agências reguladoras foram instituídas para fiscalizar os serviços prestados pelas distribuidoras de energia elétrica. No caso do Brasil, tem-se a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

De acordo com o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), a ANEEL é encarregada de estipular os limites para os indicadores coletivos de continuidade, conhecidos como DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). No caso de violação dos limites, as distribuidoras deverão efetuar uma compensação aos consumidores afetados (ANEEL, 2018). A Figura 1 apresenta os indicadores DEC e FEC anual no Brasil, entre os anos de 2010 a 2019. Destaca-se que os valores apurados do indicador DEC, nos últimos 10 anos, não ficaram dentro dos limites permitidos.

Por consequência, as concessionárias têm investido em soluções para automatizar a operação, visando melhorar os indicadores de continuidade de energia e aumentar a confiabilidade das suas redes de distribuição. Sendo assim, com o intuito de reduzir o pagamento de compensações e aumentar a satisfação dos consumidores, as distribuidoras

Figura 1: Resultados de DEC e FEC no Brasil considerando o período de 2010 a 2019



Fonte: Elaborada pela autora.

buscam a redução dos indicadores por meio do restabelecimento de energia, sendo a Reconfiguração de Rede (RR) uma forma de abordar esse problema. Esse processo de RR consiste na mudança da topologia do SD por meio de operações em chaves seccionadoras Normalmente Abertas (NAs) e Normalmente Fechadas (NFs). Quando aplicado ao problema de restabelecimento de energia, o processo de RR tem como principal objetivo restabelecer o maior número de cargas saudáveis desligadas (cargas que não foram afetadas diretamente pela falta, ou seja, encontram-se à jusante ou montante do setor<sup>1</sup> faltoso), mantendo as restrições operacionais dentro dos limites permitidos e preservando a estrutura radial (SHEN et al., 2018).

O problema de restabelecimento por RR é desafiador, visto que leva em consideração diversos fatores e variáveis, um exemplo disso é o conflito entre seus principais objetivos, que visa, simultaneamente, minimizar o número de setores restauráveis<sup>2</sup> e o número de manobras de chaveamento. Ademais, muitos aspectos práticos precisam ser considerados durante o processo de restabelecimento, tais como, privilegiar consumidores prioritários, considerar

<sup>1</sup> Um setor consiste de um agrupamento de barras de carga, subestação ou de passagem, interconectados por chaves seccionadoras.

<sup>2</sup> Setores saudáveis que foram desligados devido ao isolamento da falta e são restauráveis, pois existem chaves NAs capazes de restabelecê-los

diferentes níveis de prioridade, considerar a possibilidade de cortes de carga, prover uma sequência de chaveamento e priorizar manobras de chaves controladas remotamente. Além disso, com o aumento da penetração de Geração Distribuída (GD) nos SDs é necessário considerá-las na solução do problema de restabelecimento, uma vez que geradores distribuídos (Gds) tem um papel importante devido a diferentes motivos, como aumento da energia fornecida, viabilidade econômica, minimização de impactos ambientais, necessidade de sistemas elétricos mais flexíveis e os significativos avanços das tecnologias.

Dessa forma, a inclusão de GD no problema de restabelecimento pode auxiliar na procura de um adequado Plano de Restabelecimento de Energia (PRE), que consiste, essencialmente, em uma sequência de manobras em chaves seccionadoras da rede para reconfigurar o sistema. Tradicionalmente, as distribuidoras impõem que a GD seja automaticamente desligada quando uma falta ocorre no SD. Essa desconexão é aplicada para cancelar os efeitos do Gd nas correntes de falta e também para evitar a operação ilhada. Entretanto, a desconexão automática dos Gds durante as faltas reduzem os benefícios esperados e dificultam a obtenção de um adequado PRE (ZIDAN et al., 2017). Por exemplo, no caso de uma falta no sistema o Gd pode suprir cargas locais durante o processo de RR, minimizando o número de manobras e fornecendo oportunidade para que outras cargas sejam restabelecidas. Além disso, a formação de microrredes pode melhorar a resiliência do SD e permitir que o sistema restabeleça mais áreas sem energia rapidamente (SHEN et al., 2018). A norma *IEEE Standard 1547-2018* (IEEE, 2018) sugere a implementação de ilhamento intencional de setores sem energia, alimentados por Gds em caso de faltas no sistema elétrico, e fornece instruções para o design, operação e integração desses sistemas.

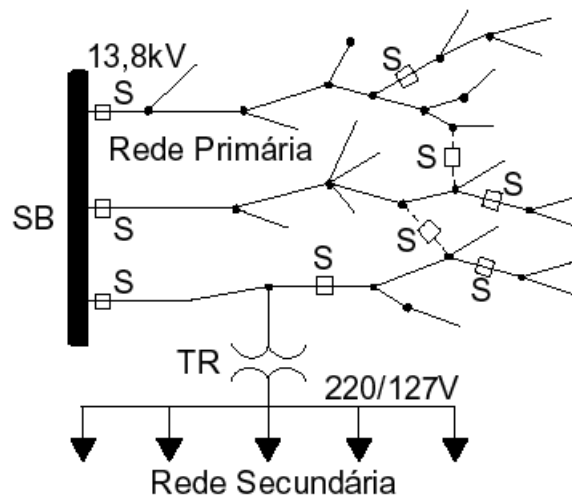
## 1.2 O Problema

### 1.2.1 Sistema de Distribuição

Os SDs são compostos basicamente de linhas (cabos), equipamentos de proteção, transformação e manobra e são usualmente divididos em duas redes elétricas: a Rede (ou Sistema) de Distribuição Primária, ou de média tensão, e a Rede (ou Sistema) de Distribuição Secundária, ou de baixa tensão. A Figura 2 apresenta um SD dividido em Rede Primária e Secundária, onde SB é o barramento de uma subestação, TR é um transformador e S representa chaves seccionadoras.

Apesar de serem usualmente planejadas formando malhas, as redes de distribuição primária são operadas na configuração radial, ou seja, sem a formação de malhas (ou anéis). Isso facilita o ajuste da proteção e o gerenciamento do sistema, porém diminui a confiabilidade em relação à continuidade do fornecimento de energia elétrica. Em razão disso, esses sistemas são projetados com possibilidade de transferência de blocos de cargas entre circuitos (alimentadores), agrupando vários pontos de carga em blocos (setores) separados por chaves seccionadoras que operam no estado NA ou NF. Dessa forma, através

Figura 2: Ilustração de um Sistema de Distribuição



Fonte: Santos (2009)

do processo conhecido como RR, ou seja, da abertura e fechamento de chaves seccionadoras alterando a topologia elétrica da rede, torna-se possível isolar setores com defeito e realizar a troca de cargas entre alimentadores e subestações (SEs). Importa lembrar, conforme ilustrado na Figura 2, que a rede primária fornece energia aos consumidores primários (industriais de médio porte, conjuntos comerciais, grandes hospitais, shopping centers, instalações de iluminação pública, etc.) e aos transformadores de distribuição que, por sua vez, suprem as redes secundárias.

Face ao exposto, o processo de RR pode ser utilizado para solução de diversos problemas relacionados com a operação e planejamento de SDs, como, por exemplo, o problema de restabelecimento de energia após a ocorrência de faltas permanentes que será abordado neste trabalho ((SANTOS et al., 2010); (CAMILLO et al., 2016); (CARRANO et al., 2016); (MARQUES; DELBEM; LONDON, 2018) e (FERNANDES et al., 2018)).

### 1.2.2 Restabelecimento de energia em Sistemas de Distribuição

Eventos que provocam a interrupção do fornecimento de energia elétrica em SDs, como, por exemplo, a atuação de equipamentos de proteção em decorrência de faltas permanentes, atingem cargas localizadas no setor sob falta e nos setores à jusante a este, bem como nos setores à montante até o dispositivo de proteção que atuou. Todavia, nem todas estas cargas sem fornecimento precisam, necessariamente, permanecer sem energia elétrica durante o período de recuperação da falha. Isto porque, devido à presença de chaves NAs e NFs, é possível restabelecer o fornecimento às setores restauráveis e restringir a interrupção somente àquelas pertencentes ao setor sob falta e setores não restauráveis,

através do processo de RR.

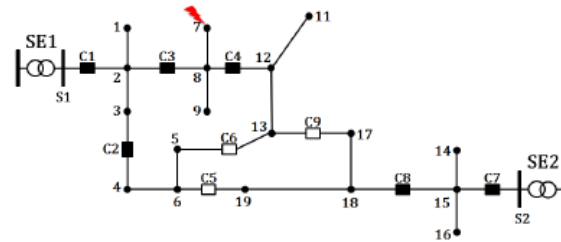
Nestes casos, chaves NFs devem ser operadas para isolar os setores sob falta. Uma vez realizado esse isolamento, as cargas localizadas em setores sadios (sem falta), interrompidos devido ao isolamento dos setores em falta, ficam livres para serem reconectados a outros alimentadores por meio de operações de chaves NAs. Entretanto, dependendo da quantidade de cargas transferidas para um novo alimentador, do nível de tensão desse alimentador, do seu carregamento e do carregamento da subestação na qual está conectado, é possível que as restrições operacionais não sejam atendidas por essa nova configuração da rede. Assim sendo, serão necessárias manobras adicionais em chaves NFs e NAs para que seja implantada uma configuração da rede na qual as restrições de operação também sejam satisfeitas. No caso de sistemas que, no estado normal, operam com carregamentos próximo do limite, pode ser necessário deixar sem fornecimento cargas menos prioritárias, isto é, rejeitar cargas para possibilitar o atendimento das restrições operacionais.

Com a finalidade de ilustrar como o problema de restabelecimento de energia pode ser tratado por meio do processo de RR, considere a Figura 3, na qual é apresentada a rede primária de um SD com dois alimentadores, seis chaves NFs, três chaves NAs, duas subestações e barras de passagem e de carga, nas quais estão conectados transformadores de distribuição (MARQUES, 2013).

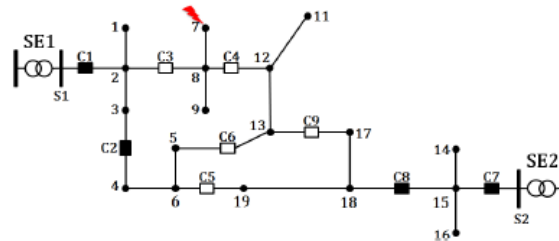
Considere a ocorrência de uma falta na barra 7 do alimentador conectado à subestação SE1, conforme a Figura 3(a). Observa-se que, com a isolação do setor sob falta, formado pelas barras 7, 8 e 9, por meio da abertura das chaves NFs C3 e C4, as cargas conectadas às barras 11, 12 e 13 também terão o seu fornecimento de energia interrompido, conforme ilustrado na Figura 3(b), mesmo sendo cargas sãs (não pertencentes ao setor sob falta). Vale lembrar que, devido à presença de dispositivos de proteção, como religadores automáticos e chaves fusíveis, a chave aberta à montante do setor em falta pode não ser a chave mais próxima desse setor. Conseqüentemente, existe a possibilidade de setores saudáveis, a montante do setor em falta, terem ficado também sem energia em virtude da abertura do dispositivo de proteção. No exemplo considerado isso ocorreria se a chave C1 fosse um religador automático e C3 uma chave de manobra. Dessa forma, na ocorrência da falta na barra 7, os setores formados pelas barras 1, 2 e 3 e 4, 5 e 6 ficariam também sem fornecimento de energia até a realização dos seguintes procedimentos: (i) localização do setor em falta e abertura da chave de manobra à montante e mais próxima desse setor (C3); (ii) fechamento do dispositivo seccionador de proteção (C1) que tinha sido aberto, restaurando os setores saudáveis desligados à montante do setor em falta; (iii) isolamento do setor em falta (abrindo C4); (v) restaurar os setores saudáveis à jusante do setor em falta, conforme ilustrado na Figura 3(c), por meio do fechamento da chave NA C9.

Importante destacar que, tendo em vista que para restauração dos setores saudáveis à montante do setor em falta já se sabe naturalmente quais chaves devem ser operadas e a

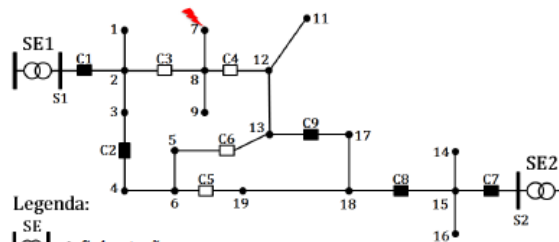
Figura 3: Exemplo de restabelecimento de energia via RR







(a) Configuração anterior à ocorrência da falta.



(b) Configuração posterior a ocorrência da falta e com o setor faltoso isolado.



Legenda:  
 → Subestação  
 → Chave Fechada  
 → Chave Aberta  
 → Barra (de carga e de passagem)

(c) Configuração final, com o setor em falta isolado e as cargas à jusante restabelecidas.

Fonte: Marques (2013)

sequência de sua operação (abertura da chave NF mais próxima à montante do setor em falta e fechamento da chave que foi aberta pelo sistema de proteção), logo, a restauração desses setores é muito mais simples que a restauração dos setores localizados à jusante (MARQUES, 2018). Destaca-se, ainda, que para restauração dos setores à montante tem-se a garantia de que tal ação não irá comprometer a segurança e os limites de operação da rede, pois estas manobras irão, tão somente, restaurar esta parte do alimentador à sua configuração operacional pré-falta. Entretanto, esses limites podem ser desrespeitados em relação à reconfiguração obtida para restauração dos setores saudáveis à jusante do setor em falta, isto em função da quantidade de cargas transferidas entre trechos de um mesmo alimentador e entre alimentadores.

Face ao exposto, assim como a maioria dos trabalhos tratando do problema de

---

restabelecimento de energia, este trabalho irá focar na restauração dos consumidores saudáveis localizados à jusante dos setores em falta. De uma maneira geral, uma solução para o problema de restabelecimento, também chamado de Plano de Restabelecimento de Energia (PRE), envolve as seguintes necessidades gerais (MARQUES; DELBEM; LONDON, 2018):

- a) Minimizar o montante de setores restauráveis;
- b) Minimizar o número de manobras em chaves;
- c) Manter a estrutura radial da rede;
- d) Manter os limites operacionais da rede e dos equipamentos;
- e) Ausência de sobrecargas ao longo da rede e subestações;
- f) Obtenção em tempo real.

Entanto, faz-se necessário considerar também aspectos práticos do problema, como, por exemplo:

- a) Priorizar o fornecimento de energia aos Consumidores Prioritários (CPs), tais como, hospitais e centros de saúde, centros de comando de segurança pública, indústrias e grandes supermercados;
- b) Considerar a existência de diversos níveis de prioridade de atendimento entre os consumidores, inclusive entre os CPs. Por exemplo: o fornecimento de energia para um hospital é mais prioritário do que o atendimento de um supermercado;
- c) Considerar a possibilidade de selecionar cargas para serem deixadas fora de serviço, quando a capacidade reserva dos alimentadores próximos aos setores restauráveis não for suficiente para permitir a reconexão de todos os consumidores (note que este aspecto do problema também exige a consideração dos níveis de prioridade de atendimento);
- d) Prover uma sequência por meio da qual as chaves possam ser operadas de modo a reconectar os consumidores restauráveis no menor intervalo de tempo e a priorizar a restauração de CPs fora de serviço, sem violar os limites operacionais nas configurações pelas quais a rede operará temporariamente;
- e) Priorizar a operação de chaves controladas remotamente (CCRs) que, ao contrário das chaves controladas manualmente (CCMs), não exigem o deslocamento de equipes de campo e por isso podem ser operadas de maneira mais rápida e econômica que as CCMs.

### 1.3 Objetivo

Conforme mencionado anteriormente, este trabalho visa dar continuidade aos estudos já realizados pelo grupo de pesquisa Laboratório de Análise Computacional de

Sistemas Elétricos de Potência (LACOSEP), referentes ao tratamento do problema de restabelecimento de energia em SDs de grande porte (com milhares de linhas, barras de carga e chaves seccionadoras). Vislumbrou-se a possibilidade de aperfeiçoar os métodos já desenvolvidos pelo grupo, a partir da inclusão de procedimentos para tratamento do problema considerando a presença de Gds.

Vale ressaltar que de acordo com a revisão realizada, embora tenham sido desenvolvidos e publicados métodos para solução do problema de restabelecimento de energia considerando a existência de Gds, metodologia alguma reúne todos os atributos da metodologia desenvolvida recentemente pelo grupo de pesquisa do LACOSEP (FERNANDES, 2019), como por exemplo, lida com SDs de grande porte sem simplificação alguma, considera quatro níveis de prioridade, chaves remotas e manuais (priorizando chaves remotas), determina uma sequência de chaveamento, entre outros.

Ressalta-se, então, que este trabalho vislumbra contribuições significativas para área em pauta, tendo em vista estar sendo proposto o desenvolvimento e implantação, em computador, de uma metodologia para tratamento do problema de restabelecimento de energia em SDs de grande porte, considerando todas as chaves e barras de carga desses sistemas, agregando procedimentos para solução do problema considerando a existência de GD. Importante destacar que, para validar a metodologia proposta, serão realizadas simulações computacionais com SDs reais de grande porte.

#### **1.4 Organização da Dissertação**

O [Capítulo 1](#) abordou a motivação e os objetivos deste trabalho e os seguintes capítulos desta dissertação estão divididos da seguinte forma:

- [Capítulo 2](#): apresenta uma breve explicação sobre o problema de restabelecimento, a revisão bibliográfica dos trabalhos realizados nesta área, os trabalhos que abordam o problema com a inclusão da GD e, além disso, as contribuições realizadas pelo grupo de pesquisa do LACOSEP;
- [Capítulo 3](#): aborda alguns embasamentos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho, com a finalidade de facilitar a compreensão da metodologia que será utilizada como base e a metodologia proposta;
- [Capítulo 4](#): expõe uma breve explicação sobre a metodologia base desenvolvida por [Fernandes \(2019\)](#) que será utilizada neste trabalho;
- [Capítulo 5](#): apresenta a metodologia proposta para inclusão da GD no problema de restabelecimento;
- [Capítulo 6](#): a metodologia é aplicada a sistemas testes e ao sistema real de grande porte, os resultados destas simulações serão apresentadas e comentadas;



- [Capítulo 7](#): expõe as considerações finais, contribuições da metodologia proposta e os trabalhos futuros.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Panorama geral

Ante o exposto no [Capítulo 1](#), o processo de obtenção de um adequado PRE é um problema de otimização combinatória e, de uma forma geral, os métodos desenvolvidos para sua solução podem ser divididos em dois grandes grupos: os baseados em abordagens tradicionais, como os métodos de programação matemática ([ROMERO et al., 2016](#); [LOPEZ et al., 2018](#)), e os baseados em técnicas alternativas, isto é, busca heurística ([DIMITRIJEVIC; RAJAKOVIC, 2015](#)), sistemas especialistas ([CHEN; LIN; TSAI, 2002](#)), metas-heurísticas ([KUMAR; DAS; SHARMA, 2008](#))([SANTOS et al., 2010](#))([CARRANO et al., 2016](#)) ([SANCHES et al., 2014](#))([MARQUES et al., 2017](#)) e Sistemas Multiagentes ([LIN et al., 2011](#))([LEITE; MANTOVANI, 2017](#))([HAFEZ; OMRAN; HEGAZY, 2018](#)). A busca por técnicas alternativas é motivada em função das dificuldades encontradas pelas abordagens tradicionais para tratar do problema de restabelecimento de energia em SDs envolvendo o processo de RR, lembrando ainda da exigência da obtenção da solução em tempo real. Isto acontece em razão de esse problema apresentar, em geral, funções objetivos difíceis de serem expressas de uma forma precisa e que são, em geral, não suaves, pois possuem muitas não-linearidades e descontinuidades. Além disso, o elevado número de variáveis do problema pode levar a uma explosão combinatória, dificultando ainda mais a utilização de programação matemática para SDs de grande porte (com milhares de linhas, barras de carga e chaves seccionadoras) ([CAMILLO et al., 2016](#))([CARRANO et al., 2016](#))([PERALTA; LEITE; MANTOVANI, 2019](#)).

De uma forma geral, a maioria dos métodos desenvolvidos para solução do problema de restabelecimento de energia são limitados para aplicação em SDs pequenos, quando comparados com SDs reais que possuem dezenas de subestações, centenas de alimentadores e milhares de chaves e barras. Para superar essa limitação, alguns métodos fazem uso de simplificações na representação dos SDs, desconsiderando algumas chaves e barras de carga. Entretanto, nesses casos a solução obtida para o SD simplificado pode não ter o mesmo efeito para o SD real em operação, comprometendo a confiabilidade desses métodos. Nesse contexto, importa destacar os métodos desenvolvidos em [Chen, Lin e Tsai \(2002\)](#), [Lin et al. \(2011\)](#) e [Carrano et al. \(2016\)](#), além dos métodos desenvolvidos pelo grupo de pesquisadores do LACOSEP, como em [Santos et al. \(2010\)](#), [Marques, Delbem e London \(2018\)](#) e [Camillo et al. \(2016\)](#). Isto em razão de esses métodos terem sido validados em SDs reais, sem a exigência de simplificação alguma em relação ao número de barras e chaves.

O método apresentado em [Lin et al. \(2011\)](#) baseia-se em Sistemas Multiagentes, que dependem de toda uma infraestrutura específica para serem implementados (em função de os mesmos basearem-se no conceito de elementos dotados de capacidade de

tomarem decisões isoladas e/ou conjuntamente). Por outro lado, o método desenvolvido em [Chen, Lin e Tsai \(2002\)](#) baseia-se em sistemas inteligentes, ou seja, em estratégias que buscam representar computacionalmente o conhecimento dos operadores da rede elétrica e o modo como eles lidam com o problema de restabelecimento com a finalidade de, com base neste conhecimento, tomar decisões em contingências futuras. Contudo, a extração deste conhecimento é uma tarefa difícil. Ademais, a aplicação de métodos baseados em sistemas inteligentes pode tornar-se inviável ou limitada em redes cuja filosofia de operação é diferente daquela para a qual tais métodos foram desenvolvidos ([KUMAR; DAS; SHARMA, 2008](#)).

Dessa forma, acreditamos que os métodos propostos em [Carrano et al. \(2016\)](#) e pelo grupo de pesquisa do LACOSEP são mais viáveis para aplicação em SDs reais de grande porte. Visto que, em função de serem baseados em Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos (AEMOs), eles são mais flexíveis, podendo ser aplicados independentemente da infraestrutura e da filosofia de operação do SDs. O método proposto em [Carrano et al. \(2016\)](#) baseia-se em uma versão modificada do AEMO SPEA 2 (do inglês, *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2*) e foi validado para um SD real da Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (CEMIG), formado por 5 alimentadores, 714 barras e 121 chaves. A primeira metodologia desenvolvida pelos grupo LACOSEP fazendo uso de AEMOs, apresentada em [Santos et al. \(2010\)](#), foi validada no SD real da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) da cidade de São Carlos-SP, em operação em 1994, composto por 6 subestações, 46 alimentadores, 3.860 barras e 632 chaves (509 NFs e 123 NAs).

Esse AEMO foi utilizado então como base para desenvolvimento de um método de RR ainda mais eficiente, apresentado em [Camillo et al. \(2016\)](#), validado no SD real da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) da cidade de Londrina/PR, em operação em 2014, composto por 7 subestações, 68 alimentadores, 21.642 barras e 3.553 chaves (3.196 NFs e 357 NAs). Os métodos desenvolvidos pelo grupo do LACOSEP possuem uma flexibilidade muito grande no sentido de inclusão de características importantes para o problema sem perda de eficiência. Isto em razão de serem baseados em AEMO em Tabelas ([BENAYOUN; MONTGOLFIER; TERGNY, 1971](#)) e na estrutura de dados denominada Representação Nó-Profundidade (RNP) ([DELBEM et al., 2004](#)), utilizada para armazenamento e tratamento da topologia elétrica dos SDs. Tendo em vista que esses métodos serão utilizados como base para o desenvolvimento deste trabalho, apresentam-se sucintamente, a seguir, as suas principais características.

## **2.2 Contribuições do grupo de pesquisa do LACOSEP**

O primeiro AEMO baseado no método de Tabelas e na RNP foi apresentado em ([SANTOS et al., 2010](#)). Esse método, denominado Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas (AEMT), trabalha em paralelo com várias subpopulações armazenadas em

tabelas, onde as melhores soluções (configurações do SD), para cada característica do problema (objetivos e restrições técnicas do problema), são armazenadas em suas respectivas tabelas. Esse método foi desenvolvido para solução dos problemas de redução de perdas e restabelecimento de energia via o processo de RR. Para avaliar cada solução candidata gerada durante o processo evolutivo, o AEMT faz uso de um eficiente fluxo de potência do tipo Soma de Correntes (SHIRMOHAMMADI et al., 1988) com RNP e cargas elétricas representadas segundo o modelo "Corrente Constante com a Tensão" (SANTOS et al., 2008).

Além disso, o AEMT emprega um algoritmo eficiente para contagem do número de operações de manobras, que não exige o armazenamento, para cada configuração, do estado das chaves presentes no SDs. Testes realizados no SD real da cidade de São Carlos-SP, e nas suas versões duplicada, quadriplicada e octuplicada, demonstraram a capacidade do AEMT em fornecer um conjunto de soluções em tempos compatíveis à aplicação em tempo real, sem a necessidade de simplificação alguma da rede elétrica, em termos da quantidade de barras e chaves, e sem incorrer no problema de explosão combinatória (SANTOS et al., 2010). Ao longo dos últimos anos, diversas melhorias foram realizadas no AEMT para aumentar a sua eficiência na exploração do espaço de busca e para possibilitar o tratamento de características práticas do problema (CAMILLO et al., 2016) (MARQUES; DELBEM; LONDON, 2018) (FERNANDES, 2019).

Em uma dissertação de mestrado finalizada recentemente (FERNANDES, 2019), foi possível a obtenção de um método que permite:

- Tratamento de redes reais de grande porte, sem a exigência de simplificação alguma;
- Considerar a existência de vários níveis de prioridade de atendimento entre os consumidores e priorizar o atendimento deles de acordo com a sua prioridade;
- Fornecer uma sequência por meio da qual as chaves possam ser operadas a fim de isolar os setores em falta e reconectar o maior número de consumidores restauráveis executando-se o mínimo de manobras em chaves e considerando níveis de prioridade;
- Selecionar cargas menos prioritárias para permanecerem desligadas, ou para serem cortadas, nas situações em que não é possível obter uma solução que restaure todas as cargas;
- Priorizar a operação de chaves controladas remotamente (CCR);
- A realização de uma etapa determinística concentrada na região problema (setores restauráveis) priorizando PREs que não provoquem desligamentos temporários.

Apesar de considerar diversas características práticas, esse método não considera a presença de GD. Vale destacar, entanto, que o grupo já realizou alguns estudos para

avaliar o efeito da presença de GD para solução desse problema. Em [Marques et al. \(2014\)](#) concluiu-se que os Gds contribuem para o aumento da quantidade de soluções factíveis geradas. Porém, em cenários considerando uma demanda mais pesada, esse aumento não foi tão expressivo. Entretanto, nesse estudo foram considerados geradores injetando exclusivamente potência ativa, ou seja, operando com fator de potência unitário. Contudo, os geradores podem trabalhar com outros modos de controle ([FREITAS et al., 2005](#)), que podem trazer ainda mais benefícios.

A fim de melhor entender os resultados encontrados em [Marques et al. \(2014\)](#), [Fernandes et al. \(2018\)](#) verificou a influência da presença destes considerando outro modo de controle. Dentre as conclusões apresentadas, destacam-se:

- Os algoritmos de restabelecimento de energia podem ser favorecidos pela consideração de variáveis controláveis de Gds. Os benefícios vão desde o aumento do número de soluções factíveis até a diminuição do número de manobras. Estes efeitos, no entanto, variam muito com a posição dos Gds, distribuição das cargas na rede e outras características particulares de cada sistema. Vale lembrar que os testes realizados fizeram uso de um SD de pequeno porte. Logo, em um sistema real outros impactos podem ser observados;
- Apesar das vantagens, o aumento no espaço de busca é considerável e deve ser levado em conta o custo computacional extra, já que esses programas devem operar em tempo real. Há ainda a necessidade de incluir os limites dos geradores na modelagem do problema, a fim de garantir que eles não sejam danificados.

Assim como os demais artigos publicados na literatura no contexto de restabelecimento de energia com a presença de GD, alguns dos quais serão comentados na próxima subseção, as análises realizadas e publicadas nos artigos supracitados são estáticas e não consideram a operação em modo ilhado.

### **2.3 Métodos que consideram a existência de Geração Distribuída**

Com a crescente dependência de eletricidade para as tarefas diárias e serviços vitais à sociedade, como, por exemplo, transporte, comércio, comunicação, serviços de saúde, água e serviço de emergência, existe uma urgente necessidade para tornar o sistema elétrico resiliente, visando reduzir os impactos de desastres naturais e mudanças climáticas na qualidade de vida, atividades econômicas e segurança nacional ([TON; WANG, 2015](#)). O termo resiliência, segundo *Presidential Policy Direction 21 (PPD-21)* ([TON; WANG, 2015](#)), é definido como a habilidade de se preparar e adaptar às condições de mudanças, resistir e se recuperar rapidamente das interrupções. Portanto, o interesse em transformar o SD em resiliente intensificou as pesquisas sobre microrredes e GD, uma vez que, as

microrredes podem agir como fontes de energia para cargas prioritárias quando a energia das distribuidoras não estiver disponível e os Gds podem auxiliar no alívio dos alimentadores.

Em [Schneider et al. \(2017\)](#) apresenta-se um método para avaliar a viabilidade do uso de microrredes como recurso de resiliência em três configurações: como um recurso local, como um recurso comunitário e como um recurso *black start*<sup>1</sup>, onde essas configurações permitirão uma contribuição para uma infraestrutura com maior resiliência.

Logo, o aumento do grau de penetração de Gds em SDs possibilitou o início de estudos abordando a presença dos mesmos nesse cenário e, também, o planejamento e a operação de microrredes ([LASSETER, 2011](#)). Microrrede é definida como um grupo de recursos energéticos distribuídos, incluindo geração distribuída e sistemas de armazenamento de energia, e cargas que funcionam localmente como uma única entidade de controle, podendo variar entre redes grandes e complexas a redes de pequeno porte e simples. Essas microrredes podem operar tanto conectada a rede quanto isolada. Quando conectada a rede, existe um ponto de interconexão ou de acoplamento com a rede, conhecido como Ponto de Acoplamento Comum (PAC), e a microrrede precisa ser capaz de fazer uma transição perfeita para o modo ilhado. Nota-se que a capacidade de ilhamento das microrredes, combinado com sua capacidade de *black start*, aumenta a segurança dos SDs em tempos de contingências ([FARROKHABADI et al., 2020](#)).

Face ao exposto, no contexto do problema de restabelecimento de energia, dependendo do local onde ocorreu a falta, dos tipos e da localização dos Gds, o procedimento de solução do problema deve considerar diferentes situações. Nesse sentido, em [Xiaoyu, Mingchao e Yinghui \(2014\)](#) o tratamento para Gds considerou: (i) A capacidade do Gd ser utilizado como backup; (ii) A posição que o Gd se encontra, dentro ou fora da área afetada pela falta; e (iii) Diferentes tipos de GD, que implica na utilização de diferentes modelos matemáticos.

Segundo a localização do Gd quando ocorre a falta, o procedimento de solução do problema de restabelecimento deve considerar as seguintes possibilidades:

- Situação 1 - Gds localizados nos setores em falta;
- Situação 2 - Gds situados nos setores que foram desligados em função da identificação e isolamento dos setores em falta;
- Situação 3 - Gds que estão localizados em alimentadores que não foram afetados diretamente pela falta.

Cada uma dessas situações exige um tratamento diferenciado para os geradores para obtenção de PREs. Para Situação 1, os Gds serão desligados e assim permanecerão

<sup>1</sup> A capacidade *black start* é o processo de restaurar uma usina para operação sem depender de fontes de energia externas ([SUN et al., 2019](#)).

durante todo o período de recuperação da falha. No caso da Situação 2, algumas normas não permitem que esses Gds funcionem de modo ilhado, então serão tratados da mesma maneira que a Situação 1 (ZIDAN et al., 2017). No entanto, a norma IEEE Std 1547 incentiva a operação em modo isolado (IEEE, 2018). Na Situação 3, os Gds poderão permanecer ligados durante todo o processo de reconfiguração de rede. Vale ressaltar, ainda, que após a identificação e isolamento de setores em falta as três situações supracitadas podem estar presentes simultaneamente, dificultando ainda mais a solução do problema de restabelecimento.

Encontram-se, na literatura, diferentes abordagens para as análises supracitadas. De uma forma geral os trabalhos presentes na literatura podem ser divididos em dois grupos:

- Grupo 1: Trabalhos que consideram a modelagem estática da rede elétrica, que podem ser subdivididos em:
  - 1.1 Permitem somente a operação de Gds em modo conectado, conforme Shirazi e Jadid (2019), Hafez, Omran e Hegazy (2018), Lopez et al. (2018) e Chen et al. (2015);
  - 1.2 Permitem a operação em modo conectado e ilhado, conforme Peralta, Leite e Mantovani (2019), Arif et al. (2018), Vargas et al. (2015), Pereira et al. (2014) e Lo, Wang e Lu (2009).
- Grupo 2: Trabalhos que levam em consideração a operação ilhada e incluem as restrições dinâmicas da rede no problema de restabelecimento de energia, conforme apresentado nos trabalhos de Chen et al. (2018a), Xu et al. (2018), Wang et al. (2017) e Sharma, Srinivasan e Trivedi (2015).

Destacam-se, a seguir, detalhes de algumas das pesquisas supracitadas com o intuito de ressaltar os procedimentos utilizados para tratamento do problema de restabelecimento considerando a presença de GD.

Shirazi e Jadid (2019) propõe uma metodologia baseada em multiagentes, no contexto de redes inteligentes, tendo em vista a presença de GD, onde uma rede neural artificial foi considerada para prever a geração com fator de potência unitário. O PRE foi construído com base em dados locais, considerando as condições do sistema, restrições operacionais e localização de falha. Outro sistema multiagente, proposto em Hafez, Omran e Hegazy (2018), utiliza regras de sistemas especialistas, considerando a prioridade dos clientes e a presença de Gds, atuando somente em modo conectado e controle PQ.

Devido à difícil monitoração em tempo real das demandas de carga, em virtude da ausência de medições em tempo real na maioria dos alimentadores dos SDs, as estratégias



para obtenção de PREs são fortemente afetadas. Portanto, em [Chen et al. \(2015\)](#) relata-se um modelo robusto de tomada de decisão levando em consideração as incertezas das cargas e dos Gds, sem considerar o modo de operação isolado. Em [Lopez et al. \(2018\)](#), a metodologia proposta define a sequência de chaveamento, mas não admite operação ilhada, no entanto, ao restabelecer o setor, que foi afetado pela falta, onde o Gd está localizado, o mesmo retorna ao funcionamento.

Considerando os artigos que consideram o modo de operação ilhado para microrredes no problema de restabelecimento, na metodologia multiagentes proposta em [Lo, Wang e Lu \(2009\)](#), o Gd é religado caso seja possível aliviar o carregamento do alimentador para que mais cargas possam ser reconectadas. Caso contrário, o Gd permanecerá desligado. Entretanto, quando o Gd encontra-se em um região que não possa ser restabelecida, devido a falta de chaves NAs para manobrar os setores, o Gd poderá atuar ilhado, caso seja capaz de suprir as cargas.

Em [Pereira et al. \(2014\)](#), o problema de restabelecimento é formulado como um problema de programação não linear inteira mista e um algoritmo de Busca Tabu é utilizado para resolver o modelo apresentado. Nesse trabalho, a geração distribuída é considerada no problema, com possibilidade de operar em modo isolado.

Por outro lado, [Vargas et al. \(2015\)](#) apresentam uma nova abordagem baseada em uma formulação matemática, para o problema de restabelecimento automática de SDs com Gd (modo conectado ou isolado), fazendo uso da RNP e da meta-heurística Busca Tabu. Essa metodologia garante uma sequência de chaveamento, onde as restrições operacionais são garantidas para configuração final e para todas as configurações intermediárias.

Além disso, em [Peralta, Leite e Mantovani \(2019\)](#) propõe-se a associação do restabelecimento de energia com os dispositivos de controle Volt/VAR, como reguladores de tensão e banco de capacitores, usando a arquitetura centralizada para melhorar a resposta do sistema no estado restaurativo <sup>2</sup> por meio da meta-heurística Busca Tabu Reativa com Vizinhança Variável. Além de considerar cargas de aquecimento, considera ainda a condição de *could load pickup*<sup>3</sup>.

Ademais, a consideração de Gds podendo ser utilizados para formar microrredes isoladas, quando alguma região não for restabelecida por meio de manobras. Os Gds possuem a funcionalidade de *black start* e não podem ultrapassar 50% da sua capacidade máxima no instante da falta, de tal forma que garanta uma margem de segurança para evitar oscilações de potência. Neste trabalho, o Gd com maior capacidade será considerada

---

<sup>2</sup> Estado atingido quando uma emergência é eliminada por desligamento manual ou automático de partes do sistema, efetuado pelo centro de controle ou por dispositivos locais. As restrições operacionais são obedecidas, mas o sistema não está intacto.

<sup>3</sup> Sob a condição *cold load pickup*, a diversidade da carga é perdida, resultando em uma demanda inicial excessiva, onde o carregamento da rede pode exceder e, como consequência, causar queda de tensão e possivelmente uma re-interrupção.

como nova barra de referência (barra slack) na microrrede isolada, utilizando operadores da RNP (PERALTA; LEITE; MANTOVANI, 2019).

Arif et al. (2018) propõe um método de dois estágios para o gerenciamento de interrupções nos SDs, considerando eventos climático extremos, onde múltiplas faltas ocorrem. O primeiro estágio consiste no agrupamento de tarefas de reparo de componentes danificados com base na localização das equipes de manutenção e na disponibilidade de recursos, para melhorar a eficiência computacional na solução de problemas de gerenciamento. O segundo estágio consiste em co-otimizar o reparo, a reconfiguração e o despacho de GD para maximizar as cargas religadas e minimizar o tempo de reparo. O problema de restabelecimento é formulado como um programa linear inteiro misto, considerando as restrições de operação do sistema e equipes de manutenção.

O problema de restabelecimento é modelado como múltiplos passos em Chen et al. (2018a), considerando eventos climáticos extremos, com diversas faltas e sem subestações para alimentar as cargas, ou seja, somente microrredes são responsáveis pelo suprimento de energia. A energização das cargas ocorre passo a passo para que não sejam violadas as restrições operacionais em cada chaveamento, incorporando a operação de chaves remotas, Gds, sistema de armazenamento de energia e considerando o comportamento de carga sob a condição de *could load pickup*.

Sharma, Srinivasan e Trivedi (2015) propõem uma abordagem de Sistema Multiagentes considerando microrredes, podendo atuar em modo conectado ou isolado, e investigando os impactos de veículos elétricos no problema de restabelecimento, onde os agentes negociam entre si para determinar a configuração da microrrede e condições de operação dos veículos e Gds. Outro método Multiagente, totalmente descentralizado, é proposto por Li et al. (2019), combinando restabelecimento de energia por RR com ilhamento intencional de Gds, mitigando significativamente a variação de cargas e intermitência de Gds.

Considerando uma situação crítica no sistema, ou seja, ocorreu a perda da subestação, Xu et al. (2018) propõem uma metodologia focando na melhora da resiliência, que utiliza microrredes para suprir cargas prioritárias no SD depois de um grande desastre. Tendo em vista a situação citada anteriormente, Wang et al. (2019) analisa a ocorrência de múltiplas faltas, onde as microrredes operam de modo ilhado e Gds que não são capazes de suprir cargas são desligados. Esse estudo considera a coordenação de múltiplas fontes, incluindo microrredes, em múltiplos locais, para explorar melhor os benefícios dessa coordenação.

No problema de restabelecimento em Huang, Yang e Taylor (2016) utiliza-se um algoritmo genético, considerando Gds com e sem a capacidade *black start*, com a possibilidade de ilhamento intencional de microrredes, com múltiplos Gds, e, também, inclusão de carga controláveis. Nesse trabalho, não há a priorização do ilhamento de

microrredes, portanto, depende da localização da falta, por exemplo, se a falta afeta muitos consumidores e para religar uma maior quantidade necessita-se de Gds em modo ilhado para aliviar os alimentadores vizinhos ou se o ilhamento prejudica a restauração de mais consumidores, ele não é considerado. Nesse caso, a sequencia de chaveamento não é obtida em [Huang, Yang e Taylor \(2016\)](#), somente apresenta-se a configuração final.

A reconfiguração de rede, em [Chen et al. \(2018b\)](#), considera um SD trifásico desequilibrado e propõem uma sequência de chaveamento com Gd despacháveis, tendo em vista as restrições de potência ativa e reativa, taxa de variação de potência ativa e desequilíbrio de corrente. Geradores sem capacidade *black start* podem ser religados somente quando reconectados a rede e, uma vez religado, o gerador não pode ser desligado, ou seja, o setor do Gd não pode ser desenergizado. As faltas consideradas nesse trabalho são extremas, onde perde-se a alimentação pela rede elétrica, portanto, os Gds são as únicas fontes de energia. Após a falta todas as chaves são abertas e as cargas são restabelecidas sequencialmente. Então, após a falta, as microrredes são isoladas (podendo haver cargas ou não no setor) e, com chaveamentos, mais cargas serão agregadas respeitando os limites das taxas de variações de potência ativa dos geradores ([CHEN et al., 2018b](#)).

Em [Shen et al. \(2020\)](#) apresenta-se um esquema hierárquico para o tratamento de restauração de redes, onde cada setor tem seu controle e sub-problema e o sistema central recebe informações sobre esses setores. Nesse trabalho, considera-se a presença de GD, mas não é considera a possibilidade de ilhamento intencional, portanto quando o Gd está na área afetada, ele é desligado e quando retorna ao sistema é religado, reduzindo a demanda do seu setor. Além disso, a sequencia de chaveamento para se obter a solução final é apresentada e para casos reais com 95 chaves, a solução foi obtida em menos de dois minutos.

## 2.4 Estudos sobre microrredes

Conforme dito anteriormente, microrrede é definida como um grupo de recursos energéticos distribuídos e cargas que funcionam localmente como uma única entidade de controle ([FARROKHABADI et al., 2020](#)), formando regiões bem delimitadas em um SD (com um ou mais PAC) ([PARHIZI et al., 2015](#)). Adicionalmente, as microrredes podem operar em modo paralelo, conectadas ao alimentador principal, ou em modo isolado, desconectada do alimentador. Visto que durante a operação isolada os níveis de tensão e frequência devem ser mantidos dentro dos limites impostos pelas agências reguladoras, o conjunto de geradores e armazenadores de energia deve possuir capacidade de injeção grande o suficiente para suprir as cargas das microrredes e ser capaz de controlar tensão e frequência dentro ilha([HOOSHYAR; IRAVANI, 2017](#)).

Para garantir uma maior probabilidade de um ilhamento intencional tecnicamente viável, onde não ocorra o desligamento do Gd por instabilidade na microrrede, são

necessários ajustes das proteções, no PAC e para os Gds. Conforme [IEEE \(2018\)](#) para acontecer o ilhamento intencional, o dispositivo de proteção no PAC Gd deve detectar a falta e deve atuar dentro de 2 segundos, isolando a microrrede. Existem dois meios pelos quais um sistema de ilhamento intencional pode acontecer: programado ou não programado.

Ilhas intencionais programadas são formadas por meio da ação manual do operador do sistema da área ou outros meios de despacho operacional que desencadeiam a transição de paralela e sincronizada com a Área do SD, para operar como um sistema isolado([IEEE, 2018](#)). Ilhas intencionais não programadas são formadas automaticamente a partir da detecção local de condições anormais nas interconexões com o SD e, em seguida, a ação automática do relé, isolando rapidamente a ilha intencional do restante da rede([IEEE, 2018](#)). Nesta dissertação considerou-se o ilhamento intencional não programado no problema de restabelecimento.

A microrrede isolada pode ser reconectada ao SD, quando as condições de sincronização forem obedecidas no PAC. As condições estão descritas na [Tabela 1\(IEEE, 2018\)](#).

Tabela 1: Limites de parâmetros de sincronização

Potência total de Gd (kVA)	Diferença de frequência ( $\Delta f, Hz$ )	Diferença de tensão ( $\Delta V, \%$ )	Diferença do ângulo de fase ( $\Delta \Phi, ^\circ$ )
0-500	0.3	10	20
>500-1500	0.2	5	15
>1500	0.1	3	10

Fonte: [IEEE \(2018\)](#)

Face ao exposto, devido a possibilidade de manter a continuidade do sistema elétrico por meio de microrredes isoladas, despertou-se o interesse da comunidade acadêmica em explorar esse assunto. Portanto, diversos trabalhos, tais como, [Lima \(2018\)](#), [Faria et al. \(2019\)](#), [Xavier \(2019\)](#) e [Farrokhhabadi et al. \(2020\)](#), foram desenvolvidos visando a proteção e estabilidade de microrredes, considerando o modo de operação conectado a rede, modo ilhado e, também, a transição entre esses dois modos de operação.

Em [Lima \(2018\)](#) foi proposta uma metodologia que possibilita ajustar as proteções, tendo como objetivo assegurar a transição entre modo conectado e o modo ilhado, viabilizar o ilhamento intencional e avaliar a probabilidade de sucesso deste, considerando a geração síncrona. Neste trabalho o esquema de detecção de ilhamento foi programado para enviar o sinal de alteração do modo de controle PQ do Gd para controlar a frequência e a tensão

na ilha (controle V- f). Essa metodologia consiste na seleção do ajuste que proporcione a detecção do ilhamento (proteção no PAC) em tempo capaz de mudar os modos de controle do Gd antes que sua proteção de frequência atue.

A metodologia em [Lima \(2018\)](#) combina os conceitos dos métodos das curvas de desempenho e de restrição, juntamente com Intervalo de Coordenação de Ilhamento e Desbalanço Crítico de Potência Ativa, para definir a região viável e inviável do ilhamento intencional. Conclui-se que independente dos níveis de injeção e/ou consumo de potência ativa na rede, o ilhamento se tornou mais favorável para situações onde o desbalanço de potência ativa era pequeno ([LIMA, 2018](#)).

O trabalho de [Faria et al. \(2019\)](#) analisa a dinâmica da microrrede, o funcionamento dos dispositivos de proteção utilizados no PAC, e a proteção local do gerador. Entende-se que a diferença entre a potência ativa injetada durante a operação do Gd em paralelo a rede e a demanda das cargas da microrrede precisa ser menor que 500kW, caso contrário a proteção local é sensibilizada na operação ilhada, podendo causar o desligamento do gerador. Além do mais, a potência reativa é também importante, logo, o regulador automático de tensão precisa mudar a operação para controlar a magnitude da tensão ou invés de manter a injeção de potência reativa constante.

Dessa forma, a análise de operação ilhada leva à conclusão que a coordenação entre dispositivos de proteção para ilhamento intencional não é suficiente para garantir o aumento do índice de continuidade. Portanto, segundo [Faria et al. \(2019\)](#), a operação continuada da microrrede depende também do equilíbrio entre a potência injetada pela GD antes do ilhamento e a demanda da microrrede. Logo, é interessante que o Gd mantenha a injeção de potência próxima à demanda da microrrede, mesmo durante a operação paralela. Outra possibilidade é aumentar a sensibilidade dos reguladores de velocidade e incluir uma verificação da magnitude da tensão para controlar a injeção de energia reativa da GD, garantindo assim a magnitude da tensão do Gd e a adequação da frequência durante a operação em modo ilhado da microrrede ([FARIA et al., 2019](#)).

O trabalho de [Xavier \(2019\)](#) estuda a estratégia de proteção e controle para interconexão e ilhamento intencional de Gds durante distúrbios na rede elétrica, garantindo sua operação segura e dentro dos limites estabelecidos. Por outro lado, em [Farrokhadi et al. \(2020\)](#) é apresentado um resumo do relatório *IEEE PES Task Force(TF)* sobre Definições, Análise e Modelagem de Estabilidade de Microrredes, que define conceitos e identifica questões relevantes relacionadas à estabilidade nas microrredes.

Portanto, tendo em vista a importância do ilhamento intencional para total aproveitamento das vantagens da GD, diversos trabalhos visam o estudo da proteção e estabilidade para ilhamento intencional seguro. Dessa forma, nesta dissertação de mestrado o foco não está no tratamento dinâmico do problema, mas sim no auxílio do ilhamento intencional para o problema de restabelecimento de energia, uma vez que os trabalhos supracitados

definem as condições que garantem que o ilhamento pode ocorrer de maneira segura e viável.

O foco desta dissertação é analisar como a presença de Gd e o ilhamento intencional influenciam o problema de restabelecimento de energia. Dessa forma, a área da microrrede será delimitada e conhecida, portanto, parte-se do pressuposto que os dispositivos de proteção no PAC atuam para isolar a microrrede em até de 2 segundos (IEEE, 2018), depois de detectada a falta, e o dispositivo de proteção local do gerador irá desligá-lo caso ocorra uma instabilidade no mesmo.

Ao analisar os trabalhos de Faria et al. (2019) e Lima (2018), conclui-se a importância de se considerar o desbalanço de potência ativa, então, nesta pesquisa de mestrado será considerado um limite para a diferença entre a potência ativa do Gd e das cargas presentes na microrrede. Ou seja, para garantir que acontecerá um ilhamento viável, a metodologia proposta considera um determinado limite para essa diferença, conforme será apresentado nos próximos capítulos. Nesse trabalho, considera-se o controle sob a geração e será sempre mantida próximo a carga exigida pelas cargas da microrrede, para não acontecer um grande desbalanço de potência ativa.

Além disso, ao se conectar mais cargas na microrrede é necessário considerar um limite de variação na potência ativa para não causar a atuação do dispositivo de proteção local do gerador. Destaca-se que essa taxa de variação de potência ativa também é considerada nos seguintes trabalhos: Chen et al. (2018a), Chen et al. (2018b), Chen et al. (2019) e Prabawa e Choi (2020). A taxa de variação de potência ativa (em inglês *ramp rate*) expressa a taxa que uma unidade geradora aumenta ou diminui sua geração, geralmente expressa por megawatts por minuto (MW/min) (IEEE, 1993).

Além disto, para geradores sem a capacidade de *black start*, considera-se que existe um sistema de proteção anti-ilhamento, ou seja, quando ocorre a falta, esse gerador se desconecta fisicamente da rede. Esse gerador retorna ao funcionamento somente quando for ser restabelecido, podendo acontecer durante os chaveamentos do processo de RR, caso contrário somente quando a falta for eliminada e o sistema voltar a sua configuração original.

## 2.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a revisão de trabalhos desenvolvidos e os principais trabalhos do grupo de pesquisa LACOSEP tratando do problema de restabelecimento de energia em SDs, que foram utilizados como base para desenvolvimento deste trabalho. Além disso, foram apresentados os mais recentes trabalhos no tema restabelecimento de energia considerando a existência de GD, abordado de diferentes maneiras. Logo, os trabalhos mais recentes destacam a importância da penetração de GD nos sistemas de

distribuição e a necessidade de sua consideração no problema de restabelecimento, que pode vir a auxiliar a resolução do mesmo.





### 3 EMBASAMENTO TEÓRICO

O desenvolvimento deste trabalho envolve diversos conceitos relacionados à otimização e análise estática de redes elétricas. Neste capítulo serão então apresentados alguns desses conceitos, necessários para entendimento da metodologia utilizada como base para desenvolvimento deste trabalho bem como da metodologia proposta.

Na Seção 3.1 serão abordados estudos sobre metas-heurísticas; na Seção 3.2 serão introduzidos os algoritmos evolutivos Multiobjetivos em tabelas de subpopulação; na Seção 3.3 será tratada a Dominância de Pareto e, por fim, na Seção 3.4 será abordada o fluxo de potência de Varredura Direta Inversa, uma vez que é necessário a inclusão dos GDs no fluxo de potência da metodologia base.

#### 3.1 Metas-heurísticas

Em programação matemática, os modelos matemáticos aplicados representam explicitamente as principais restrições operacionais do problema de restabelecimento de energia, como por exemplo, as leis de Kirchhoff, a capacidade dos cabos e equipamentos, a queda de tensão, o carregamento da rede, entre outros. No entanto, a aplicação de programação matemática está limitada a problemas de pequeno porte, uma vez que, devido à enorme quantidade de variáveis envolvidas na modelagem dos problemas de restabelecimento considerando sistemas de médio e grande portes tornam-se computacionalmente inviáveis. Dado que esse problema é combinatorial ao número de chaves do SD, dessa forma o número de soluções possíveis aumenta exponencialmente com o número de chaves (SANTOS, 2009).

Face ao exposto, algoritmos baseados em metas-heurísticas têm sido sugeridos como alternativas para resolver problemas de otimização. Metas-heurísticas são algoritmos para otimização combinacional baseados em um processo de busca, inspirados por processos biológicos, inteligência artificial, entre outros. As abordagens metas-heurísticas visam avaliar uma solução globalmente ótima ou soluções aproximadas, em vez de uma solução ótima local (MORI, 1999). As metas-heurísticas podem ser maneiras eficientes de utilizar a tentativa e erro para produzir soluções aceitáveis para um problema complexo em um tempo razoável. No entanto, não existe garantia que a melhor solução global será encontrada (GANDOMI et al., 2013).

Os principais componentes de qualquer algoritmo meta-heurístico são: intensificação e diversificação. Diversificação significa gerar soluções diversas para explorar o espaço de busca na escala global, enquanto a intensificação significa focar na busca em uma região local, explorando a informação de que uma boa solução atual é encontrada nesta região.

Isto está em combinação com a seleção das melhores soluções, a seleção do melhor garante que as soluções irão convergir para a otimização. Por outro lado, a diversificação via aleatorização aumenta a diversidade das soluções, ao mesmo tempo em que impede que as soluções sejam capturadas em ótimos locais. A boa combinação desses dois componentes principais geralmente garante que a solução seja viável (GANDOMI et al., 2013). Embora as metas-heurísticas não garantam a obtenção da solução ótima global, tal como ocorre com os métodos baseados em programação matemática, elas têm sido amplamente utilizadas por diversos motivos, em especial por conta do tempo de processamento reduzido e da simplicidade na compreensão e na implementação dos mesmos. Porém, na maioria dos trabalhos disponíveis na literatura, ambas as abordagens têm sido validadas para redes de pequeno porte, isto é, redes cujas dimensões não são compatíveis com as rede reais, que possuem milhares de barras e centenas de chaves.

### 3.2 Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos

Em virtude das restrições das técnicas de programação matemática, tendo em vista o tempo computacional como citado na seção anterior, os Algoritmos Evolutivos (AEs) são uma meta-heurística que têm tido destaque em problemas de otimização com múltiplos objetivos, em especial aqueles que abrangem objetivos conflitantes (SANTOS, 2009). Existem, na literatura, alguns trabalhos de revisão de AEs multi-objetivos, dentre os quais se destacam: Deb (2001), Coello, Lamont e Veldhuizen (2007), Fonseca e Fleming (1995), Xavier (2019) e Veldhuizen e Lamont (1998).

Uma vez que os objetivos dos problemas de otimização são conflitantes entre si, como, por exemplo, o problema de restabelecimento de energia em SDs, que visa minimizar o número de consumidores desligados e o número de manobras, torna-se difícil definir uma prioridade entre eles. Face ao exposto, definir pesos que ponderem os objetivos, tendo em vista converter o problema multiobjetivo em um mono-objetivo e penalizar as configurações que violem as restrições, torna-se uma tarefa extremamente complexa. Portanto, o AE Multiobjetivo desenvolvido pelo grupo de pesquisa do LACOSEP, cuja primeira versão foi proposta por Santos et al. (2010), trabalha com várias subpopulações em paralelo armazenadas em tabela, onde os melhores indivíduos para cada característica do problema são armazenados em sua respectiva subpopulação. Para obtenção de um algoritmo eficiente computacionalmente, o AEMT faz uso da estrutura de dados RNP, proposta por Delbem et al. (2004), para representar a topologia elétrica do SD, onde seus operadores de cruzamento sempre garantem a radialidade da rede. Essa representação, também, possibilita a utilização de um fluxo de carga computacionalmente eficiente e a capacidade de lidar com SDs de grande porte, comprovada nos trabalhos de Santos et al. (2010), Marques (2018) e Fernandes (2019).

O AEMT baseia-se no princípio proposto por Benayoun, Montgolfier e Tergny

(1971), onde os objetivos são tratados paralelamente, sem a necessidade de penalização e função de ponderação. Segundo Santos et al. (2010), essa estratégia aumenta a diversidade entre as soluções, conseqüentemente, diminui-se a possibilidade do processo de busca ficar preso em ótimos locais. Na metodologia base utilizada nesse trabalho existem 26 tabelas de subpopulação, onde as 10 primeiras baseiam-se no conceito de Tabelas de Multi-Critérios, proposto por Marques, Delbem e London (2018), por meio do qual a seleção dos indivíduos a serem salvos envolve a análise de diferentes critérios. Além disso, as próximas 10 tabelas utilizam a seleção por não-dominância, presente no *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) proposto por Deb et al. (2002), e as últimas 6 são fundamentadas no conceito tradicional de tabelas de subpopulação proposto por Santos et al. (2010), onde um único critério é avaliado.

### 3.3 Dominância de Pareto

Conforme discutido na seção anterior, as soluções finais geradas pelo AEMT são salvas em diferentes tabelas, portanto é necessário a escolha das respostas finais que serão apresentadas para o operador do sistema, ou seja, no final do processo evolutivo não está disponível, automaticamente, uma aproximação do conjunto Pareto-ótimo. No entanto, garante-se uma flexibilidade na escolha dos objetivos a serem avaliados para a composição dessa aproximação (MARQUES, 2018). Na metodologia desenvolvida por Marques (2018), na seleção dos indivíduos não-dominados optou-se por analisar os valores de energia total não suprida e do total de manobras em chaves.

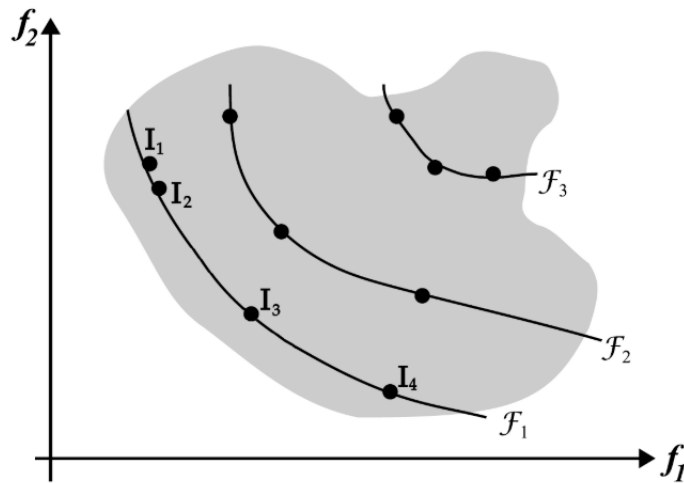
O conjunto Pareto-ótimo é o conjunto de soluções envolvendo o espaço de busca total formado pelas soluções factíveis não-dominadas (DEB, 2001). Sendo que dadas duas soluções  $x$  e  $y$ , diz-se que  $x$  domina a  $y$  se as seguintes condições são satisfeitas:

1. A solução  $x$  é pelo menos igual a  $y$  em todas as funções objetivo;
2. A solução  $x$  é superior a  $y$  em pelo menos uma função objetivo.

Desse modo, existe um conjunto de soluções que possuem vantagem em uma função objetivo, mas que não são melhores em outro objetivo e vice-versa. A fronteira de Pareto é o conjunto de valores das funções objetivo das soluções do conjunto Pareto-ótimo. A Figura 4 representa as Fronteiras de Pareto considerando duas funções objetivo genéricas,  $\mathcal{F}1$  retrata a primeira Fronteira de Pareto,  $\mathcal{F}2$  corresponde a segunda fronteira, cujas soluções são dominadas pelas soluções presentes na primeira fronteira, e assim sucessivamente.

No contexto da otimização multiobjetivo, o princípio extremista de encontrar a solução ótima não pode ser aplicado apenas a um objetivo, quando o restante dos objetivos também é importante. Isso sugere claramente dois objetivos ideais para otimização multiobjetivo: (i) encontrar um conjunto de soluções que se encontram na Fronteira de

Figura 4: Exemplo de fronteiras de Pareto para dois objetivos 1 e 2



Fonte: Marques (2018)

Pareto-ótima, e (ii) encontrar um conjunto de soluções que sejam diversas o suficiente para representar todo o alcance da Fronteira Pareto-ótima (DEB, 2001).

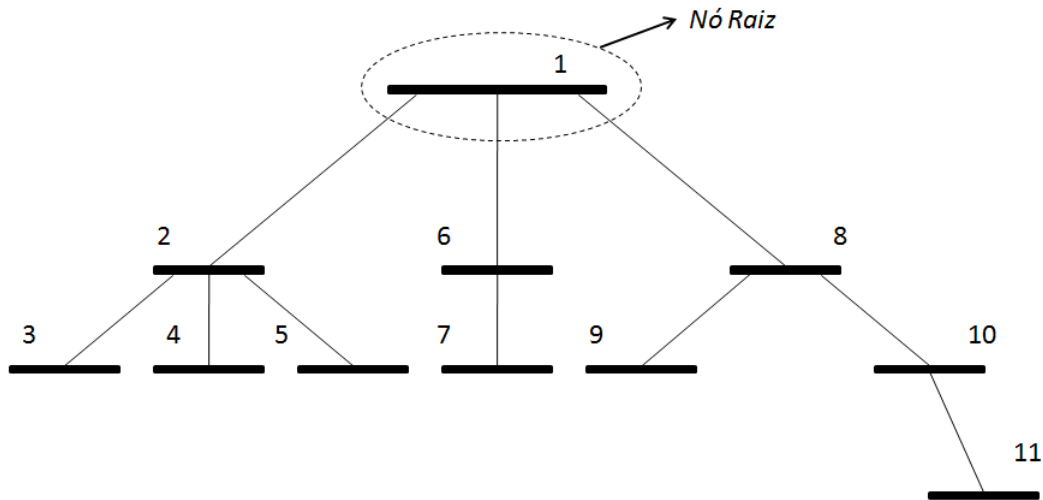
### 3.4 Fluxo de Potência de Varredura Direta-Inversa

O problema de restabelecimento de energia requer que os limites operacionais sejam satisfeitos, dessa forma, para avaliar as soluções geradas através de uma meta-heurística se faz necessário o cálculo do fluxo de carga, para a configuração final e as configurações intermediárias. Isto para obtenção de grandezas elétricas (tensões complexas nas barras e fluxo de potência nas linhas e transformador (SANTOS, 2009)) que definem as condições operacionais da rede.

Em sistemas elétricos de potência, a análise em regime permanente é realizada, tradicionalmente, pela solução do problema não-linear do fluxo de potência através do método de Newton-Raphson, Desacoplado Rápido e seus derivados. No entanto, aproveitando a característica radial dos SDs, um método de solução mais eficiente computacionalmente foi proposto por Shirmohammadi et al. (1988), para lidar com sistemas fracamente malhados ou radiais, conhecido por Varredura Direta/Inversa (VDI). A importante vantagem desse método, comparado aos métodos tradicionais, é a falta de processos de fatoração de matrizes que se tornam mal condicionadas em função das características específicas dos SDs, tendo como exemplo, baixa relação X/R (reatância/resistência), parte da rede com impedâncias relativamente baixas associados com trechos com impedâncias altas e alto número de cargas distribuídas (MARQUEZ, 2014).

Portanto, optou-se por utilizar o método de VDI para calcular o fluxo de potência das configurações geradas pela metodologia desenvolvida pelo grupo de pesquisa do LACOSEP. O método de VDI apresenta um processo iterativo que realiza uma varredura das barras extremas em direção à subestação e inversamente, até que algum critério de convergência seja atingido. Nesse método, se a rede apresentar malhas, primeiramente as interconexões da rede são quebradas para convertê-la em uma rede radial. Dessa forma, uma rede radial é resolvida de maneira mais eficiente computacionalmente pela aplicação direta das Leis de Kirchhoff das tensões e das correntes. Para a implementação, utiliza-se uma abordagem orientada por ramo usando um esquema eficiente de numeração de ramificação que é implementado para melhorar o desempenho numérico do método de solução. Desse modo, é usado a estrutura de árvore, onde os nós são enumerados partindo do nó da subestação (nó raiz) em direção aos nós extremos (nós folhas), seguindo as suas profundidades, ou seja, cada profundidade é enumerada conforme a Figura 5.

Figura 5: Representação de um Sistema de Distribuição enumerado corretamente para aplicação do VDI



Fonte: Marquez (2014)

Dada a tensão do nó da subestação e assumindo como *flat start* para todos os nós do sistema, a solução iterativa do método VDI soma de correntes consiste nos seguintes passos:

### 1. Cálculo das correntes nodais:

Na iteração  $k$ , a corrente nodal,  $I_i^{(k)}$ , no nó  $i$ , é calculado segundo a equação 3.1.

$$I_i^{(k)} = \left( \frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right)^* - Y_i V_i^{(k-1)} \quad (3.1)$$

Onde  $V_i^{(k-1)}$  é a tensão no nó  $i$  calculada durante a iteração  $k-1$  e  $S_i$  é a potência aparente injetada no nó  $i$ .  $Y_i$  é a soma de todos os elementos *shunt* conectados ao nó  $i$ .

## 2. Varredura Inversa - Etapa *Backward*:

Na iteração  $k$ , partindo dos nós da última profundidade e movendo em sentido à subestação a corrente do ramo  $L$ ,  $J_L$ , entre os nós  $i$  (mais próximo do nó raiz) e  $i + 1$ , é calculado conforme a equação 3.2.

$$J_L^{(k)} = -I_{i+1}^{(k)} + \sum_{m \in M} J_m^{(k)} \quad (3.2)$$

Onde  $I_{i+1}^{(k)}$  é a injeção de corrente no nó  $i+1$  e  $M$  é o conjunto de linhas ligadas à jusante da linha  $L$ . Consistido na aplicação da Lei de Kirchhoff das Correntes.

## 3. Varredura Direta - Etapa *Forward*:

As tensões nodais são atualizadas nessa etapa, segundo a equação 3.3, começando do nó mais próximo a SE em direção aos nós folhas. Para cada ramo,  $L$ , a tensão do nó  $i + 1$  é calculado usando a tensão atualizada do nó  $i$  e a corrente da linha  $L$  obtido na etapa anterior.

$$V_{i+1}^{(k)} = V_i^{(k)} - Z_L J_L^{(k)} \quad (3.3)$$

Onde  $Z_L$  é a impedância em série da linha  $L$ . A equação 3.3 representa a aplicação da Lei de Kirchhoff das Tensões.

## 4. Etapa de Convergência:

Normalmente, o critério adotado é o maior erro de potência ativa ou reativa nas barras da rede, tal que esse erro seja menor que uma tolerância previamente estabelecida. Em um estudo realizado pelo grupo LACOSEP, chegou-se a conclusão que para redes de distribuição reais de grande porte utilizadas nos estudos, fazendo uso da modelagem de carga corrente constante com a tensão, ao calcular o fluxo de potência VDI soma de correntes na primeira iteração já chegava-se a resultados satisfatórios. Dessa forma, optou-se por obter somente uma iteração na metodologia base. No entanto, ao adicionar-se Geração Distribuída esse conceito terá que ser estudado novamente.

### 3.4.1 Modelagem da Carga

No estudo de fluxo de potência, a modelagem da carga desempenha um papel fundamental nos resultados alcançados. Dessa forma, afeta diretamente na qualidade dos resultados, sendo capaz de conduzir a valores imprecisos, levando a prejuízos para o sistema

elétrico, à medida que a representação das cargas não condiz com a realidade do estado de regime permanente (MARQUEZ, 2014). Os modelos mais utilizados são classificados da seguinte forma:

1. Modelo de carga de Potência constante com a tensão;
2. Modelo de carga de Impedância constante com a tensão;
3. Modelo de carga de Corrente constante com a tensão.

Estudos recente no grupo LACOSEP vêm sendo realizados para a implementação do modelo de carga ZIP no fluxo de carga utilizado na metodologia base, para uma melhor representação das cargas. Esse modelo é largamente utilizado para caracterizar o comportamento estático de cargas em estudos de estabilidade de tensão. O significado físico deste modelo associa o comportamento da potência que flui para a carga como uma composição de 3 parcelas: uma parcela da carga representada por um modelo de impedância constante, outra pelo modelo de corrente constante e uma última pelo modelo de potência constante.

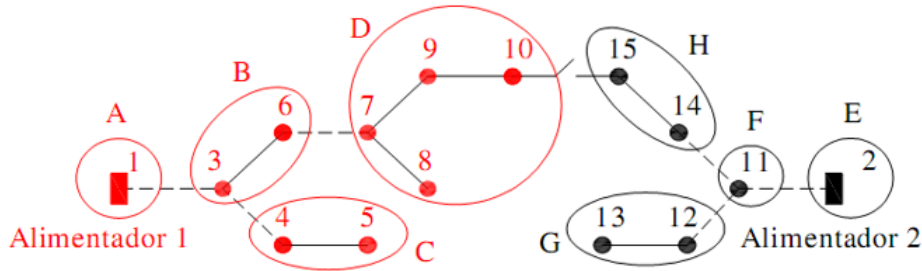
Conforme mencionado anteriormente, na metodologia base é utilizado o modelo de corrente constante, uma vez que o processo iterativo pode ser interrompido na primeira iteração, sem comprometimento dos resultados obtidos para o problema de restabelecimento (SANTOS, 2009). Na metodologia proposta será utilizada a modelagem de corrente constante para as cargas e de potência constante para os Gds. Destaca-se, ainda, que o número de iterações será limitado em cinco no caso da existência de Gds com modo de controle PV.

### 3.5 Representação Nó-Profundidade

A Figura 6 apresenta a representação de um SD típico, onde sua operação é radial, mas foi planejada de forma malhada. Na Figura 6, os retângulos representam barras em uma subestação, o círculos pequenos são barras do sistema (barras de carga, extremidades de chaves, ponto de conexão de duas ou mais linhas), as linhas cheias representam as linhas do sistema, as linhas tracejadas são chaves seccionadoras NFs e as linha interrompida representa chave seccionadora NA. Além disso, cada região representada por uma letra corresponde a um setor, como dito anteriormente, o setor consiste de um agrupamento de barras de carga, subestação ou de passagem, interconectados por chaves seccionadoras.

A estrutura de dados Representação Nó-Profundidade (RNP) foi proposta por Delbem et al. (2004) para retratar computacionalmente grafos de árvores. Essa representação consiste basicamente em uma lista contendo os nós e suas profundidades (DELBEM et al., 2004). As Equações 3.4 e 3.5 ilustram a representação dos setores do grafo apresentado

Figura 6: Exemplo de um SD típico



Fonte: Santos (2009)

na Figura 6 por meio da RNP. Observa-se que cada alimentador é representado por uma própria RNP T e o conjunto destas representa uma floresta.

Santos et al. (2010) aplicou pela primeira vez a RNP no problema de restabelecimento. No entanto, para permitir a execução do fluxo de potência de Shirmohammadi et al. (1988), foi necessário representar as barras e ramos que fazem parte de cada setor do SD.

$$T_1 = \begin{bmatrix} \text{Nó} \\ \text{Profundidade} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & C & D \\ 0 & 1 & 2 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \text{Nó - Setor} \\ \text{Profundidade} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & F & H & G \\ 0 & 1 & 2 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Portanto, criou-se as RNPs dos alimentadores e as RNPs dos setores, onde cada alimentador é representado por uma RNP na sua configuração pré-falta e cada setor tem suas possíveis RNPs armazenadas, com diferentes origens, nos dados da metodologia base. Observar-se que o setor D pode ser energizado tanto pelo setor B quanto pelo setor H, logo, para representar esse setor existirá duas RNPs. A Equação 3.6 representa a RNP do setor D alimentada pelo setor B, pode-se notar que o primeiro nó representa o nó da RNP do setor B que é ligado a este setor. A Equação 3.7 mostra a RNP do setor D energizado pelo setor H, onde o nó de profundidade 0 é o nó da RNP H que é ligado a esse setor.

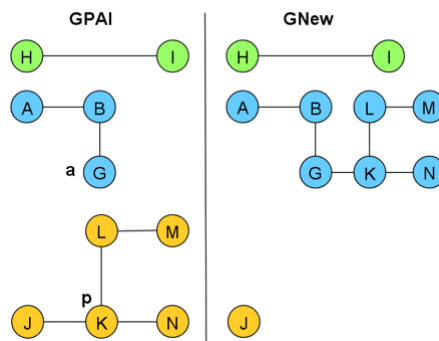
$$t_1 = \begin{bmatrix} \text{Nó - Barra} \\ \text{Profundidade} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 3 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$t_2 = \begin{bmatrix} \text{Nó} \\ \text{Profundidade} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15 & 10 & 9 & 7 & 8 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$



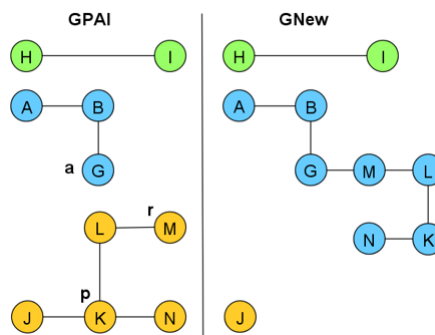
Os operadores criados por [Delbem et al. \(2004\)](#) garantem que as configurações geradas por eles sempre resultarão em uma configuração radial do SD. Esses operadores são denominados *Preserve Ancestor Operator* (PAO) e *Chance Ancestor Operator* (CAO) e exemplos desses operadores estão presentes nas Figuras 7 e 8. Nas Figuras 7 e 8, cada nó corresponde a um setor e as linhas entre eles representam chaves NFs e cada cor representa um alimentador diferente. Para a aplicação desses operadores é necessário a escolha de duas RNPs, na qual uma será a RNP origem e a outra a RNP destino. Nessas RNPs são escolhidos três nós: nó de poda ( $p$ ), onde será podado da RNP origem; nó raiz ( $r$ ) que será enxertado na RNP de destino, mas originalmente presente na RNP origem; e nó  $a$ , no qual o nó  $r$  será conectado, logo, o nó  $r$  e nó  $a$  precisam ser adjacentes, ou seja, é necessário existir uma chave NA entre eles. A diferença entre o operador PAO e CAO é que no operador PAO o nó  $p$  e nó  $r$  são iguais, como pode observar na [Figura 7](#), onde existe somente o nó  $p$ .

Figura 7: Exemplo do Operador PAO



Fonte: [Marques \(2018\)](#)

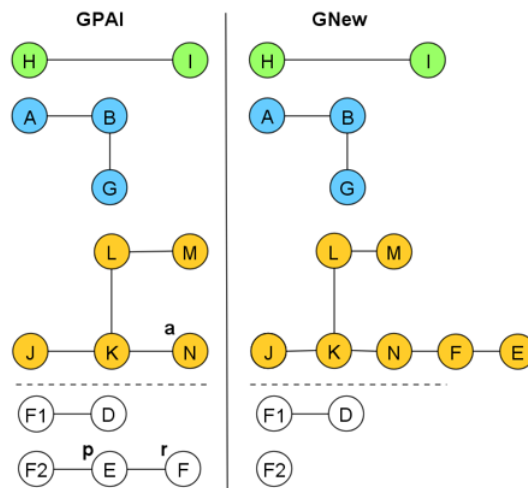
Figura 8: Exemplo do Operador CAO



Fonte: [Marques \(2018\)](#)

Em Marques (2018) criou-se um terceiro operador, conhecido como *Load Reconnector Operator* (LRO), devido a necessidade de deixar cargas desligadas, caso não encontrar uma solução factível capaz de restabelecer todos os setores restauráveis. Portanto, Marques (2018) criou, também, uma RNP Fictícia para armazenar os setores restauráveis. Para o operador LRO também existem os nós  $p$ ,  $r$ ,  $a$ , onde os nós  $p$  e  $r$  sempre serão escolhidos entre as RNP Fictícias. A Figura 9 apresenta um exemplo no operador LRO, no qual os setores brancos representam setores saudáveis desligados, observa-se que existem duas RNP Fictícias, a F1 e F2, sendo esses setores fictícios.

Figura 9: Exemplo do Operador LRO



Fonte: Marques (2018)

### 3.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os principais conceitos e embasamento teórico que abordam aspectos importantes para esse trabalho. A partir desses conceitos torna-se possível o entendimento da metodologia base que será apresentado no próximo capítulo.

## 4 METODOLOGIA BASE

### 4.1 Enunciado formal do problema

Nesta seção será apresentado, de maneira sucinta, o enunciado formal do problema de restabelecimento de energia a partir da representação da rede elétrica por grafos através da RNP. O desenvolvimento completo está presente no trabalho de [Marques \(2018\)](#). Considerando a necessidade de definição de uma sequência adequada de chaveamento e a representação de SDs através de grafos, formalmente pode-se definir o problema de restabelecimento de energia em SDs da seguinte forma:

Minimizar:

$$\varepsilon(G), \psi(G) \quad (4.1)$$

Sujeito a:

$$A(G^e)x(G^e) = c(G^e) \quad (4.2)$$

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

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

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

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

$$G \text{ deve ser uma floresta de grafos} \quad (4.7)$$

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

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

No qual  $G$  é uma configuração radial do SD, representada por uma floresta de grafos;  $G^e$  é a porção de  $G$  que encontra-se em serviço, a qual representa todos os alimentadores energizados em  $G$ ;  $G^{me}$  é a porção de  $G$  que encontra-se fora de serviço, ou seja, a parte desenergizada da rede em  $G$ ;  $\varepsilon(G)$  é a Energia Total Não Suprida (ENS) durante o intervalo de tempo  $\Delta_{t4}$  (intervalo de tempo necessário para a execução das ações de reparo nos setores em falta);  $\psi(G)$  é o número total de manobras para obtenção de  $G$  a partir da configuração em operação antes da atuação do sistema de proteção (definida usualmente como configuração pré-falta ( $G^{pf}$ ));  $A(G^e)$  é a matriz de incidência nó-aresta pseudo-orientada (obtida através de um grafo orientado das correntes) de  $G^e$ ;  $x(G^e)$  é o vetor de correntes complexas nas linhas em  $G^e$ ;  $c(G^e)$  é o vetor de correntes complexas demandadas em barras de carga e injetadas em barras de subestações em  $G^e$ ;  $Y_x(G^e)$  é

a matriz diagonal de admitâncias da rede em  $G^e$ ;  $v(G^e)$  é o vetor de tensões complexas nas barras em  $G^e$ ;  $X(G^e)$  é o máximo valor de carregamento de rede em  $G^e$ , dado por  $X(G^e) = MAX\{x_j/\bar{x}_j\}$ , no qual  $\bar{x}_j$  é o limite superior de corrente para cada magnitude de corrente  $x_j$  em uma linha  $j$ ;  $B(G^e)$  é o máximo valor para carregamento de subestação (transformador) em  $G^e$ , dado por  $B(G^e) = MAX\{b_s/\bar{b}_s\}$ , sendo  $\bar{b}_s$  é o limite superior para cada magnitude de injeção de corrente  $b_s$  provida por uma subestação  $s$ ;  $V(G^e)$  é a máxima queda de tensão em  $G^e$ , dada por  $V(G^e) = MAX\{|v_s - v_k|/v_s\}$ , sendo  $v_s$  a magnitude de tensão na barra de uma subestação  $s$  (mais especificamente, na barra secundária do transformador da subestação  $s$ ),  $v_k$  é a magnitude de tensão em uma barra  $k$  da rede e  $\delta$  é a máxima queda de tensão admissível ( $\delta = 0, 1$ , isto é, 10% (MARQUES, 2018));  $seq(G)$  representa a sequência de chaveamento a ser executada para obtenção de  $G$ , isto é, a sequência na qual devem ser executadas as manobras necessárias para obtenção de  $G$  a partir de  $G^{pf}$ .

A equação 4.1 representa os objetivos do problema. As restrições 4.2 e 4.3 correspondem, respectivamente, a primeira e a segunda Leis de Kirchoff, já as equações 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os limites de carregamento da rede e da subestação e queda de tensão. A restrição 4.7 representa a necessidade de manter a radialidade do sistema, enquanto a 4.8 indica que o SD estará dividido em duas porções, uma energizada e uma desenergizada. Por fim, a equação 4.9 refere-se à necessidade de que ao longo da realização de todas as manobras necessárias para obtenção de  $G$  a partir de  $G^{pf}$  todas as demais restrições (equações 4.2 a 4.8) sejam atendidas para que a configuração final seja considerada factível. Essas configurações são conhecidas como configurações intermediárias, as quais são associadas a  $G$ , pela sequência necessária para a obtenção de  $G$ . Nesse caso, são utilizadas as Restrições Relaxadas, isto é, o sistema permite uma ultrapassagem por uma margem dos limites estabelecidos. Portanto, a restrição 4.9 pode ser expressa por:

$seq(G)$  é factível, se :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$G \text{ deve ser uma floresta de grafo} \quad (4.22)$$

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

A obtenção de  $G$  partindo de  $G^{pf}$  é realizada por meio de uma sequência de manobras  $seq(G)$ ;  $g$  representa uma configuração intermediária de  $G$ ;  $g^e$  é a porção de  $g$  energizada;  $g^{ne}$  a porção de  $g$  desenergizada;  $\Omega_I(G)$  representa o conjunto formado por todas as configurações intermediárias energizadas de  $G$ , ou seja, todas as configurações que ficarão temporariamente em operação enquanto  $seq(G)$  estiver sendo executada para a obtenção de  $G$ ;  $\Delta B$  e  $\Delta V$  representam, respectivamente, carregamentos de transformador e quedas de tensão adicionais que são aceitos temporariamente enquanto  $g$  está em operação.

Dessa forma, as equações 4.10 e 4.11 representam a primeira e segunda Leis de Kirchoff, já as restrições 4.12, 4.13 e 4.14 representam, respectivamente, as restrições para carregamento de rede, carregamento de subestação e queda de tensão, onde 4.13 e 4.14 são conhecidas como Restrições Relaxadas. A equação 4.15 serve para expressar a necessidade de manutenção da radialidade em  $g^e$ . 4.16 expressa que  $g$  é dividido em duas porções, uma energizada ( $g^e$ ) e outra desenergizada ( $g^{ne}$ ); As demais equações de 4.17 a 4.23, correspondem às mesmas exigências dadas de 4.2 a 4.8, para a configuração final  $G$ .

No trabalho de Marques (2018) foram adicionados na formulação do problema de restabelecimento alguns aspectos práticos. Adicionou-se a distinção entre as chaves controladas manualmente (CCM) das controladas remotamente (CCR), portanto, a minimização do número de manobras ( $\psi(G)$ ) torna-se um problema hierárquico, onde as CCR têm preferência sobre CCM devido ao menor tempo gasto para operação da manobra remota. Além disso, Marques (2018) adicionou níveis de prioridade de cargas, tendo então quatro níveis, sendo eles, prioridade alta (PA), prioridade intermediária (PI), prioridade baixa (PB) e sem prioridade (SP). Conseqüentemente, a equação 4.1 pode ser reformulada por 5.7:

$$\begin{aligned} & \text{Min. } \varepsilon_A(G), \text{ e com o valor } \varepsilon_{Amin}(G) \text{ obtido, resolver :} \\ & \text{Min. } \varepsilon_A(G) + \varepsilon_I(G), \text{ e com o valor } \varepsilon_{Imin}(G) \text{ obtido, resolver :} \\ & \text{Min. } \varepsilon_A(G) + \varepsilon_I(G) + \varepsilon_B(G), \text{ e com o valor } \varepsilon_{Bmin}(G) \text{ obtido, resolver :} \quad (4.24) \\ & \text{Min. } \varepsilon_A(G) + \varepsilon_I(G) + \varepsilon_B(G) + \varepsilon_S(G); \\ & \text{Min. } \psi_M(G), \text{ e com o valor } \psi_{Mmin}(G) \text{ obtido, resolver :} \\ & \text{Min. } \psi_M(G) + \psi_R(G) \end{aligned}$$

*Sujeito a :*

$$A(g^e)x(g^e) = c(g^e), \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.25)$$

$$A(g^e)Y_x(g^e)A(g^e)^t v(g^e) = c(g^e), \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.26)$$

$$X(g^e) \leq 1, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.27)$$

$$B(g^e) \leq 1 + \Delta B, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.28)$$

$$V(g^e) \leq \delta + \Delta V, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.29)$$

$$g^e \text{ for uma floresta de grafo}, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (4.30)$$

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

$$A(G^e)x(G^e) = c(G^e) \quad (4.32)$$

$$A(G^e)Y_x(G^e)A(G^e)^t v(G^e) = c(G^e) \quad (4.33)$$

$$X(G^e) \leq 1 \quad (4.34)$$

$$B(G^e) \leq 1 \quad (4.35)$$

$$V(G^e) \leq \delta \quad (4.36)$$

$$G \text{ deve ser uma floresta de grafo} \quad (4.37)$$

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

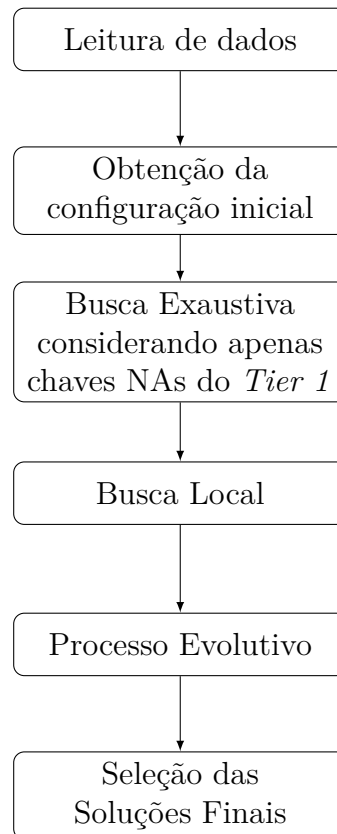
Sendo  $\varepsilon_A(G)$  a energia não suprida para consumidores de PA durante o intervalo de tempo necessário para a obtenção e a operação de  $G$ ;  $\varepsilon_I(G)$  a energia não suprida para consumidores de PI durante o intervalo de tempo necessário para a obtenção e a operação de  $G$ ;  $\varepsilon_B(G)$  a energia não suprida para consumidores de PB durante o intervalo de tempo necessário para a obtenção e a operação de  $G$ ;  $\varepsilon_S(G)$  a energia não suprida para consumidores SP durante o intervalo de tempo necessário para a obtenção e a operação de  $G$ ;  $\psi_M(G)$  o número de manobras em CCMs necessárias para a obtenção de  $G$  a partir de  $G^{pf}$ ; e  $\psi_R(G)$  o número de manobras em CCRs necessárias para a obtenção de  $G$  a partir de  $G^{pf}$ .

## 4.2 Metodologia Base

Para desenvolvimento da metodologia proposta será utilizado como base o trabalho desenvolvido recentemente pelo grupo de pesquisa do LACOSEP apresentado em [Fernandes \(2019\)](#). Importante destacar que essa metodologia é fruto de diversos trabalhos desenvolvidos pelo grupo, que ao longo dos anos deram origem a diversas publicações relevantes, cada uma incorporando algo de inovador no processo de restabelecimento de energia em SDs apresentados em [Santos et al. \(2010\)](#), [Sanches et al. \(2014\)](#), [Camillo et al. \(2016\)](#) e [Marques, Delbem e London \(2018\)](#). Assim como as demais metodologias elaboradas pelo grupo de pesquisa do LACOSEP, a metodologia base faz uso de um AEMT e da estrutura para representação computacional de árvores de grafo RNP. São várias as etapas que

compõem a metodologia base, partindo do setor em falta identificado até o fornecimento de PREs, que incluem a obtenção de uma sequência de chaveamento. Conforme ilustrado na Figura 10, a metodologia base pode ser dividida, de modo simplificado, em seis etapas.

Figura 10: Fluxograma Simplificado da Metodologia Base.



Fonte: Elaborado pela autora

#### 4.2.1 Leitura de dados

A execução da metodologia base inicia-se pela obtenção (a) das informações da rede primária de distribuição em sua configuração pré-falta (dados de topologia, impedância e capacidade de condução de cada trecho, localização e tipo de cada chave, localização e grau de prioridade dos consumidores, demanda de potência ativa e reativa das cargas, etc.), (b) da lista dos setores em falta e (c) da lista com os valores escolhidos para os parâmetros da metodologia (conforme detalhado em [Fernandes \(2019\)](#)). É nesta etapa que a metodologia armazena a topologia elétrica da rede primária em RNPs.

#### 4.2.2 Obtenção da configuração inicial

Visto que os dados foram devidamente organizados, pode-se iniciar as etapas do problema de restabelecimento. A primeira parte do problema de restabelecimento abrange identificar os setores em falta e isolá-los, ou seja, abrir as chaves que os separam do restante

do SD. Com os setores em falta identificados e devidamente isolados, os conjuntos de setores restauráveis<sup>1</sup> que ficaram desenergizados são então movidos para RNPs fictícias, estruturas utilizadas para permitir que seja realizado o processo de busca por soluções. As porções ainda energizadas continuam armazenadas nas RNPs que foram inicializadas na etapa anterior.

#### 4.2.3 Busca Exaustiva (BE) considerando apenas chaves NAs do *Tier 1*

A BE consiste numa estratégia determinística que considera todas as chaves NAs diretamente conectadas aos grupos de setores restauráveis e aos setores energizados, chamadas em Miu, Chiang e McNulty (2000) de chaves NAs do *Tier 1* – chaves da primeira vizinhança da região problema. Mais especificamente, essa BE possibilita a geração e avaliação de todas as configurações envolvendo apenas manobras em chaves NAs do *Tier 1*. Se pelo menos uma dessas configurações for factível (atende a todas as restrições do problema), o processo é finalizado e essa configuração é indicada como solução do problema. Caso contrário, todas as configurações geradas serão armazenadas em tabelas para formação da população inicial de indivíduos a serem analisados no processo evolutivo. Vale destacar que a BE procura apenas por soluções (PREs) capazes de restaurar todos os setores desligados restauráveis, que, de acordo com a literatura, são chamadas de soluções de restabelecimento completo.

#### 4.2.4 Busca Local (BL)

A BL é uma busca “pseudo-exaustiva” a ser realizada após a BE e antes do processo evolutivo da metodologia base. Nessa busca estão envolvidas todas as chaves NAs do *Tier 1* (consideradas na BE) e todas as chaves NFs do *Tier 1* que conectam setores desenergizados restauráveis entre si. Isso implica em um aumento considerável no número de configurações possível, exigindo a utilização de estratégias para minimizar o uso de memória e o tempo de execução por meio de filtros que analisam quais combinações devem de fato ser analisadas e de simplificações na geração de sequência de chaveamento.

Para todos os indivíduos gerados ao longo da BL, o ponto de partida é o indivíduo inicial, ou seja, o indivíduo obtido após os setores em falta serem isolados. Portanto, as chaves consideradas são aquelas que estão dentro da região desenergizada ou que conectam a região desenergizada à energizada do indivíduo inicial (chaves do *Tier 1*).

Durante a BL, será testada a maior quantidade possível de combinações entre as chaves do *Tier 1*. As configurações geradas (ou indivíduos na terminologia de algoritmos evolutivos) nessa etapa servirão para, em conjunto com as geradas nas etapas anteriores, preencher as tabelas de subpopulações usadas no processo evolutivo, podendo ainda servir,

---

<sup>1</sup> Setores saudáveis (sem falta) que ficaram sem energia, em função da isolação dos setores em falta, que possuem pelo menos uma chave NA possibilitando conexão com setores energizados da rede.



eventualmente, como soluções finais. O funcionamento e os artifícios usados pela BL, para torná-la viável em aplicações em tempo real, são apresentados detalhadamente em [Fernandes \(2019\)](#). Estes artifícios vão desde a elaboração de uma representação mais adequada do SD para execução desta etapa, até a elaboração de um filtro e modos de execução simplificados que permitam trabalhar em sistemas de grande porte. Vale destacar que a BL possibilita a obtenção de soluções de restauração parcial, ou seja, soluções que não contemplam o restabelecimento de todos os setores restauráveis.

#### 4.2.5 Processo Evolutivo

Esta etapa consiste da aplicação de um AEMT que busca por configurações factíveis com menores ENSs e número de manobras. Assim como qualquer algoritmo evolutivo, o AEMT é um algoritmo computacional pertencente a uma classe de métodos regidos por princípios evolutivos oriundos do mundo biológico que, baseados na teoria da evolução darwiniana, tentam simular o processo de evolução natural ([DEB, 2001](#)) a fim de obterem a solução para um determinado problema.

O princípio básico deste tipo de meta-heurística é o seguinte: dada uma população de indivíduos (isto é, um conjunto de possíveis soluções), pressões do ambiente desencadeiam um processo de seleção natural que privilegia as melhores soluções até então encontradas, causando assim um incremento na adequação das soluções. Em outras palavras, dada uma função a ser otimizada, inicialmente, gera-se aleatoriamente um conjunto de soluções, isto é, elementos pertencentes ao domínio da função, e aplica-se à função para medir a qualidade dessas soluções candidatas, atribuindo-lhes um valor que mede sua adequação, o chamado *fitness*.

Com base no *fitness*, algumas das melhores soluções são selecionadas para darem origem a novas soluções candidatas (descendentes) pela aplicação de operadores de cruzamento. Esses descendentes competem com os indivíduos da geração anterior, com base no *fitness*, para assumir um lugar na nova população. Esse processo é iterativo até que uma solução candidata seja suficientemente qualificada ou até que um número máximo de gerações seja alcançado.

Conforme mencionado no capítulo anterior, a característica fundamental de um AEMO é a estratégia usada para selecionar o subconjunto de soluções ranqueado por mais de uma função objetivo. Para isso é muito comum empregar-se o conceito de dominância de Pareto, a fim de comparar duas soluções factíveis de um problema ([DEB et al., 2002](#)). O AEMT trabalha com várias subpopulações em paralelo armazenadas em tabelas, onde os melhores indivíduos para cada característica do problema são armazenados em suas respectivas subpopulações. Uma importante característica do AEMT é o uso de subpopulação para armazenar indivíduos avaliados por uma função agregação, também conhecida como soma ponderada ([DEB, 2001](#)), bem como por indivíduos pertencentes à

Fronteira de Pareto. O indivíduo selecionado para reprodução pode ser proveniente de qualquer subpopulação ou tabela. Essa estratégia de seleção aumenta a diversidade entre os indivíduos que reproduzem de forma que as características de um indivíduo de uma subpopulação possam migrar para as demais subpopulações da tabela. Em consequência, aumenta-se a possibilidade de o algoritmo escapar de ótimos locais, aproximando-se de soluções com avaliações próximas de um ótimo global na fronteira Pareto-ótima (SANCHES et al., 2014).

Alguns parâmetros são importantes para o desempenho do AEMT:

- O tamanho de cada subpopulação  $S_{P_i}$ , que indica o número máximo de indivíduos que podem permanecer em cada subpopulação  $P_i$  de uma geração para outra;
- O número máximo de gerações ( $g_{max}$ ). Soluções geradas pelo AEMT podem ser armazenadas ou descartadas, dependendo do grau de adaptação do indivíduo a cada objetivo do problema (característica do problema em uma subpopulação  $P_i$ ). No processo de seleção de sobreviventes, um novo indivíduo é acrescentado a uma subpopulação  $P_i$  se sua adequação ao objetivo de  $P_i$  for melhor que pelo menos um indivíduo já armazenado na mesma. O mesmo indivíduo pode ser incluído em mais de uma tabela de acordo com esse critério de seleção. Importante destacar, como a população é estacionária, os novos indivíduos substituem os piores. A versão do AEMT utilizada pela metodologia base possui um total de 26 tabelas de subpopulação, conforme detalhado em Marques (2018) e Fernandes (2019).

#### 4.2.6 Seleção das Soluções Finais

Após o encerramento do processo evolutivo são selecionados os indivíduos para comporem uma aproximação do conjunto Pareto-ótimo resultante da execução da metodologia base. Esta seleção por não-dominância é realizada com base nos valores de energia total não suprida e de total número de manobras em chaves remotas e manuais. A partir dessa aproximação do conjunto Pareto-ótimo, três indivíduos são selecionados para tornarem-se soluções finais do problema, os quais serão informados aos operadores da rede juntamente com a sequência de chaveamento associada.

#### 4.2.7 Contribuições da Metodologia Base

Os principais diferenciais da metodologia base é a capacidade de lidar com redes reais de grande porte, com baixo tempo computacional e considerando importantes aspectos práticos do problema, como, por exemplo, priorização de CPs (considerando quatro níveis diferentes), priorização de manobras em CCRs e a definição de uma sequência de chaveamento para cada solução. Além disso, é capaz de lidar com casos de faltas no quais não é possível a restauração completa. Em Fernandes (2019), a metodologia foi

validada em um SD real de grande porte da região metropolitana de Londrina, com 15 subestações, 83 alimentadores, 3.893 chaves, 3.479 setores e 40.606 barras.

A [Tabela 2](#) apresenta as características da aproximação do conjunto Pareto-ótimo obtido nas simulações para falta simples no setor 2.532. Nota-se que por se tratar de um sistema complexo, existem cargas com diferentes prioridades e chaves remotas e manuais, como foi citado na [seção 4.1](#). A coluna Ocorrências indica a quantidade de ocorrências da mesma solução em 35 simulações. Na [Tabela 2](#),  $\varepsilon_A(G)$ ,  $\varepsilon_I(G)$ ,  $\varepsilon_B(G)$  e  $\varepsilon_S(G)$  representam a Energia Não Suprida dos níveis alto, intermediário, baixo e sem prioridade em kWh por fase, respectivamente.  $\psi_M(G)$  e  $\psi_R(G)$  denotam as manobras manuais e remotas, respectivamente.  $X(G)$  refere-se ao máximo carregamento da rede em porcentagem,  $V(G)$  a maior queda de tensão em porcentagem e  $B(G)$  o maior carregamento da subestação em porcentagem.

Tabela 2: Características dos indivíduos finais obtidos nas 35 simulações para faltas no setor 2.532 do SD de Londrina

Ocorrências	35 de 35	35 de 35	35 de 35
$\varepsilon_A(G)$	54,2	79,2	54,2
$\varepsilon_I(G)$	532,6	124,8	623,9
$\varepsilon_B(G)$	85,60	13,47	85,60
$\varepsilon_S(G)$	9580,1	5714,9	14200,8
$\psi_M(G)$	4	6	4
$\psi_R(G)$	3	2	1
$X(G)$	77,34	95,48	70,47
$V(G)$	5,84	6,81	2,66
$B(G)$	82,38	83,06	82,38

Fonte: [Fernandes \(2019\)](#)

Em sistemas reais é muito importante levar em conta o tempo de execução da metodologia de restabelecimento, principalmente por ser um problema que deve ser resolvido o mais rápido possível. A [Tabela 3](#) mostra os tempos médios de execução de alguns casos de faltas simples analisados no sistema real de Londrina no trabalho de [Fernandes \(2019\)](#).

Tabela 3: Tempos médios de execução da metodologia base aplicada ao SD de Londrina

<b>Setor em falta</b>	<b>Tempo Médio de Simulação da Metodologia Base (s)</b>
<b>1349</b>	41,28
<b>1587</b>	40,05
<b>2532</b>	60,29
<b>2571</b>	52,06

Fonte: [Fernandes \(2019\)](#)

### 4.3 Considerações Finais

Neste capítulo apresentou-se a metodologia base para o desenvolvimento deste trabalho. Trata-se de uma metodologia capaz de lidar com o problema sem exigir simplificações do SD e sem perda de eficiência computacional, podendo então ser utilizado para operação em tempo real. Além disso, considera diferentes níveis de prioridade de cargas, chave remotas e manuais, considerando preferência para as remotas, e verifica a sequencia de chaveamento. Entretanto, a metodologia base não lida com GD, e, tendo em vista essa limitação, este trabalho foi proposto.

## 5 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste Capítulo será apresentada a metodologia proposta para tratamento do problema de restabelecimento de energia considerando a presença GD. Diferentes modos de controle e a possibilidade de ilhamento intencional são atributos tratados pela metodologia proposta.

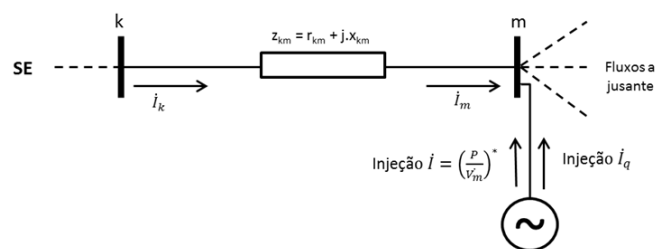
### 5.1 Modelagem dos Geradores Distribuídos no Fluxo de Potência

A determinação de um modelo adequado para representação de GD para cálculo de fluxo de potência requer o conhecimento da operação do GD e do tipo de conexão com a rede (direta ou indireta) (MOGHADDAS-TAFRESHI; MASHHOUR, 2009). Geralmente, os GDs podem ser modelados como barras:

1. PQ constantes;
2. PV constantes.

Estes dois tipos de modelos foram considerados neste trabalho. Os GDs modelados como PQ constantes são implementados no fluxo de potência de forma simples e similar às cargas elétricas, porém com sentido de injeção contrário. No entanto, lidar com barras PV no fluxo de potência requer um processo adicional, onde além da corrente injetada devido a potência ativa do GD é preciso calcular uma corrente reativa  $I_q$ , quando necessário, para controlar a tensão na barra em questão, representada na Figura 11, contendo os seguintes passos (MOGHADDAS-TAFRESHI; MASHHOUR, 2009; CHENG; SHIRMOHAINMADI, 1995):

Figura 11: Gerador Distribuído no Fluxo de Potência com modo de controle PV



Fonte: (MASSIGNAN; PEREIRA; LONDON, 2017)

1. Checar se o erro da magnitude da tensão está abaixo do tolerância estipulada de todos os nós especificados com PV, conforme equação 5.1.

$$|\Delta V| = |V_{especificada}| - |V_{calculada}| \quad (5.1)$$

Onde  $\Delta V$  é a diferença entre a magnitude da tensão controlada da barra PV ( $V_{especificado}$ ) e a magnitude da tensão da barra calculada no fluxo de potência ( $V_{calculada}$ ).

2. Caso o maior erro das tensões seja menor que a tolerância admitida, as magnitudes de tensão nos nós PV convergiram para o valor especificado. Caso contrário, uma compensação reativa será necessária para que esses nós se adéquem ao valor de magnitude de tensão especificado, isso ocorre por meio de uma corrente reativa injetada pelo gerador através da equação 5.2.

$$|Z_V| \cdot |I_q| = |\Delta V| \quad (5.2)$$

Onde,  $Z_V$  é a Matriz de Sensibilidade PV, baseada no equivalente de Thévenin para as barras PV do sistema, no qual, os elementos da diagonal são a soma das reatâncias de todos os ramos entre a barra PV e a barra da subestação (nó raiz) e os elementos fora da diagonal são a soma das reatâncias dos ramos compartilhados entre os dois nós PV (ou barra PV) e o nó raiz;  $I_q$  é a parcela de corrente reativa calculada para compensar a magnitude da tensão (CHENG; SHIRMOHAINMADI, 1995). A solução obtida pela equação 5.3 fornece uma aproximação linear da injeção de corrente reativa necessária para eliminar a incompatibilidade de magnitude de tensão nesta iteração. Se a potência reativa do gerador fosse ilimitada, seria injetado  $I_q$  a 90 graus do ângulo da tensão no nó PV, conforme a equação 5.3.

$$I_{iq} = |I_{iq}| e^{j(90^\circ + \theta_{Vi})} \quad (5.3)$$

Onde  $\theta_{Vi}$  é o ângulo de fase da tensão do nó i. No entanto, a capacidade de potência reativa do gerador é limitada, logo, os limites precisam ser verificados para que seja possível avaliar se a corrente necessária está disponível.

3. A nova potência reativa é calculada segundo a equação 5.4.

$$Q_{ig} = Q'_i + Q_{id} \quad (5.4)$$

No qual  $Q'_i$  é a nova potência reativa do nó i, calculada segundo a equação 5.5, e  $Q_{id}$  é a potência reativa, calculada na iteração anterior.

$$Q'_i = \text{Im} |V_i \cdot I_i^*| \quad (5.5)$$

A nova injeção de corrente no nó PV  $I'_i$  é a combinação da corrente desejada com a corrente de carga do nó PV, conforme a equação 5.6.

$$I'_i = I'_{iq} + I_i \quad (5.6)$$

Então a potência reativa  $Q_{iq}$  é comparada com os limites do gerador. Caso esteja dentro dos limites permitidos, a potência reativa assume o valor encontrado pela equação 5.4. Caso contrário,  $Q_{iq}$  assume então o valor desse limite, ou seja, o gerador é considerado como PQ constante, e a coluna e linha correspondente a esse nó são removidos da Matriz de Sensibilidade  $Z_V$  e a mesma é atualizada. Os passos de 1 a 3 são repetidos, após a execução do fluxo de potência, até que todos os erros das tensões estejam dentro da tolerância permitida.

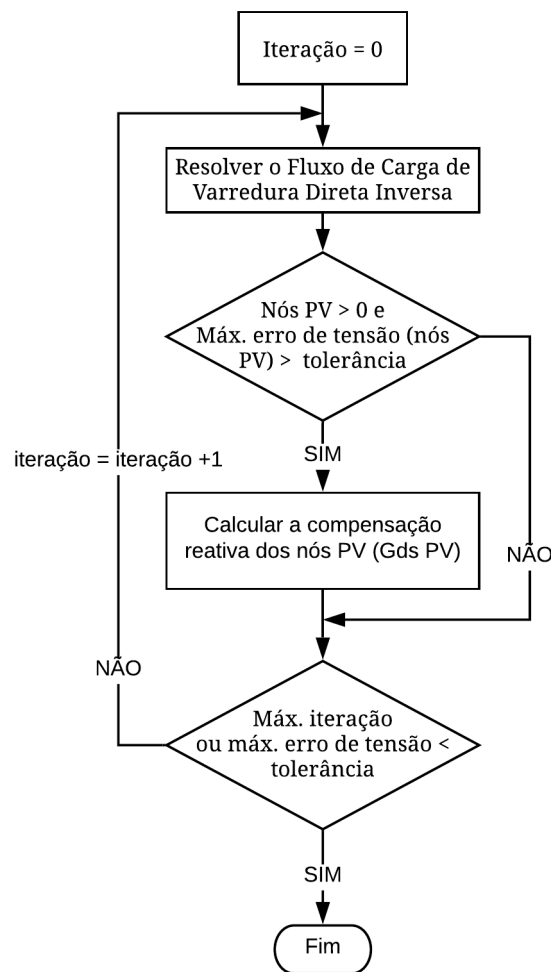
O fluxograma do fluxo de potência de Varredura Direta Inversa considerando os Gds, utilizado nesta dissertação, está presente na [Figura 12](#).

## 5.2 Inclusão de Geração Distribuída no problema de restabelecimento

Conforme apresentado na [seção 2.3](#) existem diversas maneiras de considerar a presença de GD no problema de restabelecimento, desde a abordagem mais simples a mais complexa. A presença de GD auxilia neste problema, uma vez que, por meio do ilhamento intencional consegue-se manter certas cargas energizadas, enquanto, no restante da rede pode aliviar alimentadores, sendo possível a restauração de mais setores sadios desenergizados. Dessa forma, os Gds podem aumentar a resiliência do SD em tempos de contingência. Face ao exposto, para tratar as diferentes situações neste trabalho considera-se que:

1. Os geradores presentes são geradores síncronos;
2. Os geradores possuem modo de controle PV ou PQ, conectados ao SD;
3. Geradores sem característica *black start* possuem proteção anti-ilhamento, quando afetado por alguma falta será desligado. Caso o setor seja restabelecido, o Gd é religado;
4. Todos Gds ligados não podem ter seus setores desenergizados por nenhuma operação de transferência entre alimentadores;
5. Considera-se somente um gerador, com característica *black start*, por microrrede, podendo a microrrede conter um ou mais setores;
6. A microrrede consiste em uma região delimitada e conhecida pelo operador;

Figura 12: Fluxo de Potência com barras PV



Fonte: Santos (2009)

7. A microrrede possui dispositivos de proteção local no gerador e, também, nos pontos de acoplamento comum (PACs);
8. A microrrede possui dispositivos de proteção no PAC que garantem sua desconexão em até dois segundos na ocorrência de faltas no SD (IEEE, 2018), dessa forma, ilhando intencionalmente a microrrede. Esse dispositivo também é responsável por enviar um sinal ao gerador para modificar o seu modo de controle para v-f, tendo assim, controle da tensão e frequência da microrrede (LIMA, 2018);
9. A proteção local do gerador é responsável por desligá-lo caso ocorra a instabilidade do mesmo no momento do ilhamento e para garantir que isso não ocorra o desbalanço de potência ativa da microrrede deve ser pequeno (LIMA, 2018; FARIA et al., 2019);



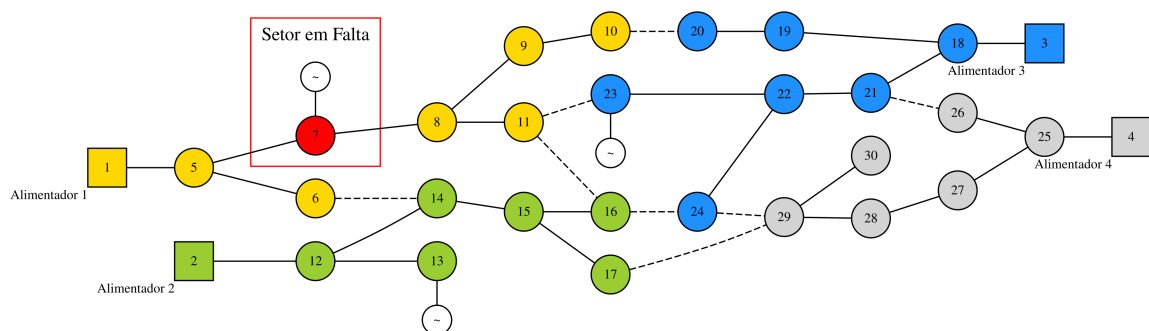
10. Para executar a metodologia proposta no caso de ilhamento, a barra com gerador será tratada como a barra de uma subestação para poder ser utilizada a estrutura RNP do sistema já consolidada. O fluxo de potência será realizado na microrrede considerando os limites do gerador;
11. Considera-se possível a transferência de setores para microrrede, caso a taxa de variação de potência ativa seja respeitada, assim como foi proposto em [Chen et al. \(2018a\)](#), [Chen et al. \(2018b\)](#), [Chen et al. \(2019\)](#) e [Prabawa e Choi \(2020\)](#);

Logo, este trabalho visa a análise da inclusão de GD na operação estática da rede e o impacto do ilhamento intencional ([IEEE, 2018](#)). Desse modo, no contexto do problema de RR, deve-se considerar situações diferentes para a GD, como por exemplo, a localização da falta, posição do Gd em relação ao setor em falta, o tipo do Gd e a capacidade do Gd ser utilizado com backup. Tendo em vista a localização do Gd em relação ao setor em falta, tratou-se as seguintes possibilidades:

### Situação 1

Refere-se à situação que o gerador encontra-se no setor em falta, neste caso os geradores serão desligados durante todo o período de manutenção do setor em falta. A [Figura 13](#) apresenta um exemplo da situação 1. Os círculos numerados representam os setores, as linhas cheias representam as chaves NFs, as chaves tracejadas correspondem as chaves NAs, os círculos brancos representam os Gds, o setor em vermelho é o setor em falta, cada cor representa um alimentador distinto. Esse sistema exemplo possui três geradores, nos setores 7, 13 e 23.

Figura 13: Situação 1

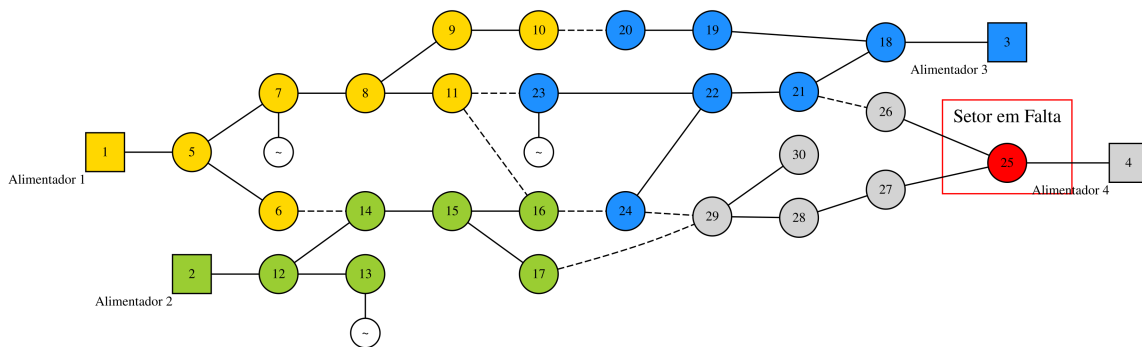


Fonte: Elaborada pela autora.

## Situação 2

Nesta situação os Gds estão localizados em setores que não foram afetados pela falta, portanto, os Gds permanecem ligados. A Situação 2 é representada na [Figura 14](#), onde o setor 25 está em falta e nenhum dos setores do alimentador quatro possuem geradores.

Figura 14: Situação 2

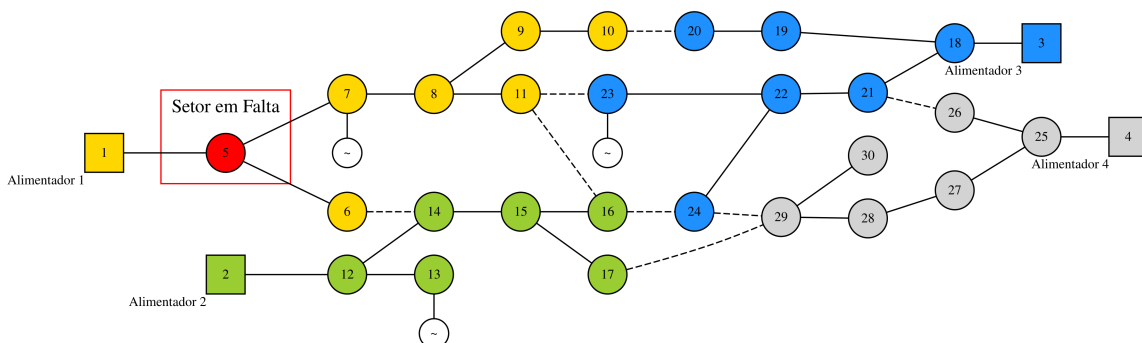


Fonte: Elaborada pela autora.

## Situação 3

Situação onde os setores com GD encontram-se entre os setores restauráveis, ou seja, setores que foram desconectados devido ao isolamento do setor em falta, como pode-se observar na [Figura 16](#), onde o setor 7, que possui um Gd, está à jusante da falta. A situação 3 pode ser tratada de diversas formas, como foi mostrado na [seção 2.3](#).

Figura 15: Situação 3



Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo as normas brasileiras, o gerador deve ser desconectado fisicamente da rede elétrica e permanecer desligado até o encerramento do serviço de manutenção do setor

em falta (ANEEL, 2018). Entretanto, a norma IEEE Std 1547 (IEEE, 2018) incentiva a operação de microrredes de modo ilhado, tornando possível a redução do número de setores restauráveis. Na literatura estão presentes diversos trabalhos com diferentes abordagens (PERALTA; LEITE; MANTOVANI, 2019; CHEN et al., 2018b; HUANG; YANG; TAYLOR, 2016) para os geradores localizados na região restaurável afetada pela falta. Com base nos estudos realizados optou-se neste trabalho pelos dois tipos de geradores:

- Gds com característica *black start*;
- Gds sem característica *black start*.

### Situação 3 com Gds sem capacidade *black start*

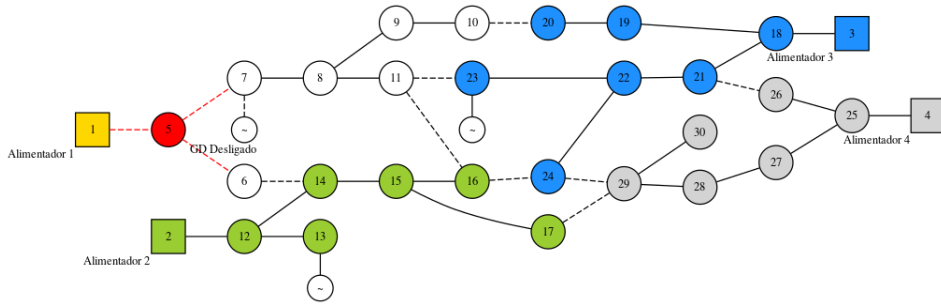
Os geradores sem capacidade *black start* podem funcionar somente conectados a sistemas energizados e neste caso os geradores possuem um dispositivo de proteção anti-ilhamento, qual a função é desligar o gerador em caso de falta no sistema, e o Gd pode ser religado somente quando seu setor for reenergizado, conforme dito anteriormente na seção 2.3. A Figura 16 apresenta um exemplo dessa situação, onde o Gd localizado no setor 7 não possui capacidade *black start*, portanto, quando a falta ocorre à montante deste setor, o Gd é desligado, como mostra a Figura 16a. Para restabelecer os setores restauráveis optou-se por fechar a chave NA que liga os setores 10 e 20 e ao religar todos os setores o Gd pode ser religado novamente, representado pela Figura 16b.

### Situação 3 com Gds com capacidade *black start*

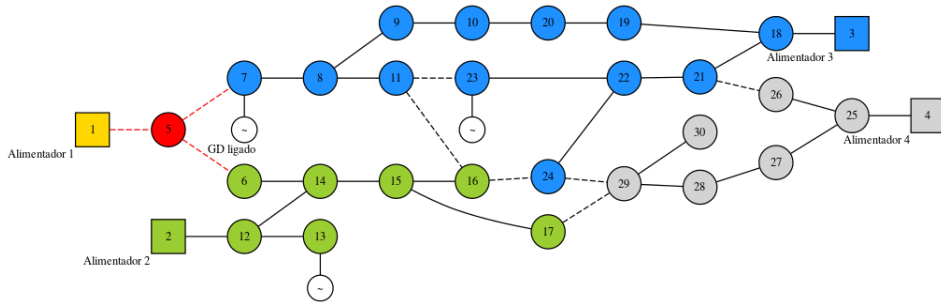
Para a situação 3 com Gds que possuem a capacidade *black start*, considera-se que as microrredes formadas por esses Gds possuem a capacidade de trabalharem em modo paralelo com a rede elétrica ou de modo isolado. Buscando representar a transição entre a microrrede conectada ao SD e o ilhamento intencional, preservando a estrutura da RNP já consolidada, no momento da ocorrência da falta os dispositivos de proteção reconhecem a falta, isolam a microrrede e sinalizam para que seja feita a mudança de controle para que o gerador possa controlar a tensão e frequência da ilha. Portanto, para simbolizar essa transição foi considerado que para cada microrrede ilhada intencionalmente será criada uma nova subestação fictícia, considerando o gerador como a barra desta subestação, transformando a microrrede em um novo alimentador.

Face ao exposto, apresenta-se a seguir um sistema exemplo para melhor entendimento de como a transição de modo conectado para isolado da microrrede foi representada no algoritmo. Considerando que o sistema possui uma microrrede formada somente pelo setor 7, lembrando que a microrrede pode possuir mais de um setor, mas neste exemplo optou-se por somente um setor. Desse modo, no caso de uma falta no setor 5, como mostra a Figura 17, as chaves entre o setor 7 e os setores 5 e 8 abrirão automaticamente, em

Figura 16: Situação 3 com Gd sem capacidade *black start*



(a) Setor em falta isolado, setores restauráveis à justante desenergizados e Gd desligado

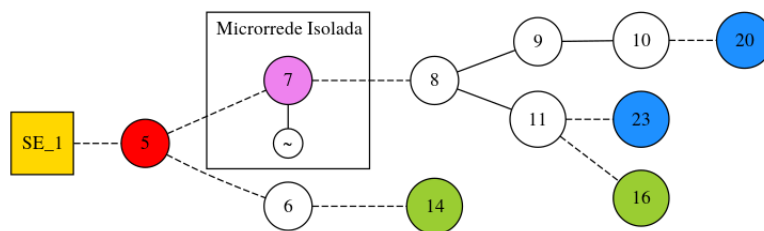


(b) Setores restaurados e Gd religado

Fonte: Elaborado pelo autor

até dois segundos (IEEE, 2018), isolando a microrrede no instante que a falta ocorreu. A Figura 17 mostra o setor faltoso isolado, neste caso, como a chave entre o setor em falta e a microrrede foi aberta automaticamente, desse modo, será necessário somente a abertura de duas chaves para isolar o setor 5.

Figura 17: Sistema exemplo após o setor faltoso e a microrrede serem isolados

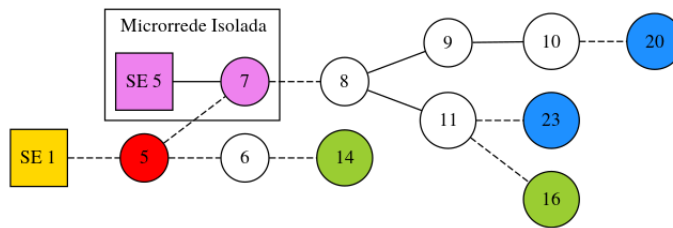


Fonte: Elaborada pela autora.

Além disso, no momento do isolamento da microrrede é necessário a mudança de controle, pois antes da falta o SD era encarregado pelo controle da tensão e frequência no sistema e o Gd torna-se responsável após a falta e a ocorrência do ilhamento (FARIA et al.,

2019; LIMA, 2018). Portanto, para representar essa mudança de controle, a metodologia proposta cria uma nova subestação fictícia energizada, onde os limites do transformador são os limites do Gd, e essa mudança é representada pelo fechamento de uma chave NA fictícia com impedância nula. Assim, as chaves que foram abertas para isolar a microrrede e a chave NA fictícia não fazem parte da contagem do número total de manobras. Essas características são inclusas para o tratamento do algoritmo, tornando possível a utilização dos operadores da RNP para isolar a microrrede.

Figura 18: Ilhamento Intencional



Fonte: Elaborado pela autora

### 5.3 Enunciado formal do problema com Geração Distribuída

Considerando a formulação final de Marques (2018), presente na seção 4.1, adicionou a formulação matemática para tratamento de Gds por meio das Equações 5.20 e 5.21:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min. } \varepsilon_A(G), \text{ e com o valor } \varepsilon_{Amin}(G) \text{ obtido, resolver :} \\
 & \text{Min. } \varepsilon_A(G) + \varepsilon_I(G), \text{ e com o valor } \varepsilon_{Imin}(G) \text{ obtido, resolver :} \\
 & \text{Min. } \varepsilon_A(G) + \varepsilon_I(G) + \varepsilon_B(G), \text{ e com o valor } \varepsilon_{Bmin}(G) \text{ obtido, resolver :} \quad (5.7) \\
 & \text{Min. } \varepsilon_A(G) + \varepsilon_I(G) + \varepsilon_B(G) + \varepsilon_S(G); \\
 & \text{Min. } \psi_M(G), \text{ e com o valor } \psi_{Mmin}(G) \text{ obtido, resolver :} \\
 & \text{Min. } \psi_M(G) + \psi_R(G)
 \end{aligned}$$

Sujeito a :

$$A(g^e)x(g^e) = c(g^e), \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (5.8)$$

$$A(g^e)Y_x(g^e)A(g^e)^t v(g^e) = c(g^e), \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (5.9)$$

$$X(g^e) \leq 1, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (5.10)$$

$$B(g^e) \leq 1 + \Delta B, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (5.11)$$

$$V(g^e) \leq \delta + \Delta V, \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (5.12)$$

$$g^e \text{ for uma floresta de grafo, } \forall g^e \in \Omega_I(G) \quad (5.13)$$

$$g = g^e \cup g^{ne} \quad (5.14)$$

$$A(G^e)x(G^e) = c(G^e) \quad (5.15)$$

$$A(G^e)Y_x(G^e)A(G^e)^t v(G^e) = c(G^e) \quad (5.16)$$

$$X(G^e) \leq 1 \quad (5.17)$$

$$B(G^e) \leq 1 \quad (5.18)$$

$$V(G^e) \leq \delta \quad (5.19)$$

$$P_{Gd\min}^i \leq P_{Gd}^i \leq P_{Gd\max}^i \quad \forall i \in nGd \quad (5.20)$$

$$Q_{Gd\min}^i \leq Q_{Gd}^i \leq Q_{Gd\max}^i \quad \forall i \in nGd \quad (5.21)$$

$$fp_{Gd\min}^i \leq fp_{Gd}^i \leq fp_{Gd\max}^i \quad \forall i \in nGd \quad (5.22)$$

$$G \text{ deve ser uma floresta de grafo} \quad (5.23)$$

$$G = G^e \cup G^{ne} \quad (5.24)$$

As Equações 5.20 e 5.21 representam a necessidade de serem respeitados os limites de geração de potência ativa e reativa dos Gds presentes no SD (PEREIRA et al., 2014).  $P_{Gd\min}^i$ ,  $P_{Gd\max}^i$ ,  $Q_{Gd\min}^i$ ,  $Q_{Gd\max}^i$ ,  $fp_{Gd\min}^i$  e  $fp_{Gd\max}^i$  são, respectivamente, mínima potência ativa, máxima potência ativa, mínima potência reativa, máxima potência reativa, fator de potência mínimo, fator de potência máximo para o Gd instalado na barra  $i$ ;  $fp_{Gd}^i$ ,  $P_{Gd}^i$  e  $Q_{Gd}^i$  são o fator de potência e as potências ativa e reativa do Gd instalado na barra  $i$ ; e  $nGd$  é o conjunto de barras que possuem Gds no SD.

No caso dos Gds, sua potência ativa é modelada com potência constante e terá sentido oposto a potência ativa das cargas. No caso da potência reativa depende do controle do gerador. Para controle PQ, a potência reativa também é constante. Já para controle PV, a potência reativa depende da tensão da barra. Visto que a metodologia utiliza o Fluxo de Potência de Varredura Direta-Inversa, segundo Shirmohammadi et al. (1988), as correntes complexas das barras que possuem Gds serão injetadas ( $c_j > 0$ ), assim como, as correntes em barras de subestações, enquanto, as correntes em barras de cargas são consumidas ( $c_j \leq 0$ ) (MARQUES, 2018).

Frisando que o objetivo deste trabalho é analisar o ilhamento intencional no problema de restabelecimento, porém, serão considerados alguns limites dinâmicos para garantir que o ilhamento será viável e que a agregação de cargas na ilha não cause a desconexão do gerador.

A viabilidade do ilhamento intencional depende de variáveis como o desbalanço de potência, dispositivos de detecção de ilhamento e proteções do Gd (LIMA, 2018). De acordo com o trabalho desenvolvido por Lima (2018) é possível determinar o tempo de atuação dos relés de detecção do ilhamento e tempo de restrição para cada ponto de desbalanço de potência. Onde, o tempo de restrição caracteriza o tempo máximo depois

do ilhamento para ocorrer a mudança do modo de controle v-f sem que as oscilações de frequência e/ou tensão levem à desconexão do Gd (LIMA, 2018).

Portanto, observando os diversos testes realizados no trabalho de Lima (2018), conclui-se que o desbalanço de potência deve ser pequeno para que ocorra um ilhamento intencional viável e a proteção local do gerador não atue. Face ao exposto, considerou-se um desbalanço de até 20%. Logo, adicionou-se uma verificação para esse desbalanço de potência ativa e quando o mesmo for menor ou igual a 20% da potência do Gd no momento da falta, a microrrede é ilhada com sucesso. Caso contrário o gerador será desconectado. Assim, acrescentou-se o desbalanço de potência ativa no momento da falta, conforme a Equação Equação 5.25:

$$\|P_{Gd, G_0}^j - P_{cargas, G_0}^j\| \leq 20\% \text{ de } P_{Gd, G_0}^j \quad \forall j \in nM \quad (5.25)$$

Onde,  $P_{Gd, G_0}^j$  é a potência ativa do gerador da microrrede  $j$  no momento da falta,  $P_{cargas, G_0}^j$  potência ativa total das cargas presentes na microrrede  $j$  no momento da falta,  $G_0$  representa o indivíduo antes da falta e  $nM$  o número total de microrredes isoladas.

A taxa de variação de potência ativa (em inglês *ramp rate*) expressa a taxa que uma unidade geradora aumenta ou diminui sua geração (IEEE, 1993). Essa taxa de variação de potência ativa é considerada em diferentes trabalhos (CHEN et al., 2018a; CHEN et al., 2018b; CHEN et al., 2019; PRABAWA; CHOI, 2020). Analisando os diferentes valores considerados, conclui-se que 20% da potência máxima admitida pelo Gd é um valor razoável a se considerar como a taxa máxima de variação utilizada neste trabalho. Dessa forma, adicionou-se essa verificação para cada manobra envolvendo o alimentador da microrrede para que não ocorra uma instabilidade devida à drástica mudança de carga. Para considerar a variação de potência ativa dos geradores, adicionou-se a verificação segundo a Equação 5.26, onde  $P_{Gd, g+1}^i$  corresponde a potência ativa injetada do gerador do indivíduo atual ( $g+1$ ) na barra  $i$ ,  $P_{Gd, g}^i$  a potência ativa do anterior ( $g$ ), e  $\Delta P^i$  a variação máxima de potência ativa admitida pelo gerador.

$$P_{Gd, g}^i - \Delta P^i \leq P_{Gd, g+1}^i \leq P_{Gd, g}^i + \Delta P^i \quad \forall i \in nGd \quad (5.26)$$

A Figura 19 apresenta o fluxograma completo da metodologia proposta nesta dissertação de mestrado. Pode-se observar que no algoritmo o ilhamento intencional das microrredes são realizadas após a isolação do setor em falta, isso acontece para melhor aproveitar os operadores da RNP, mas essa inversão não afeta o cálculo da ENS, uma vez que, esses setores não são desligados em nenhum momento, logo não fazem para da PNS usada para calcular a ENS conforme a formulação utilizada por Marques (2018). Além

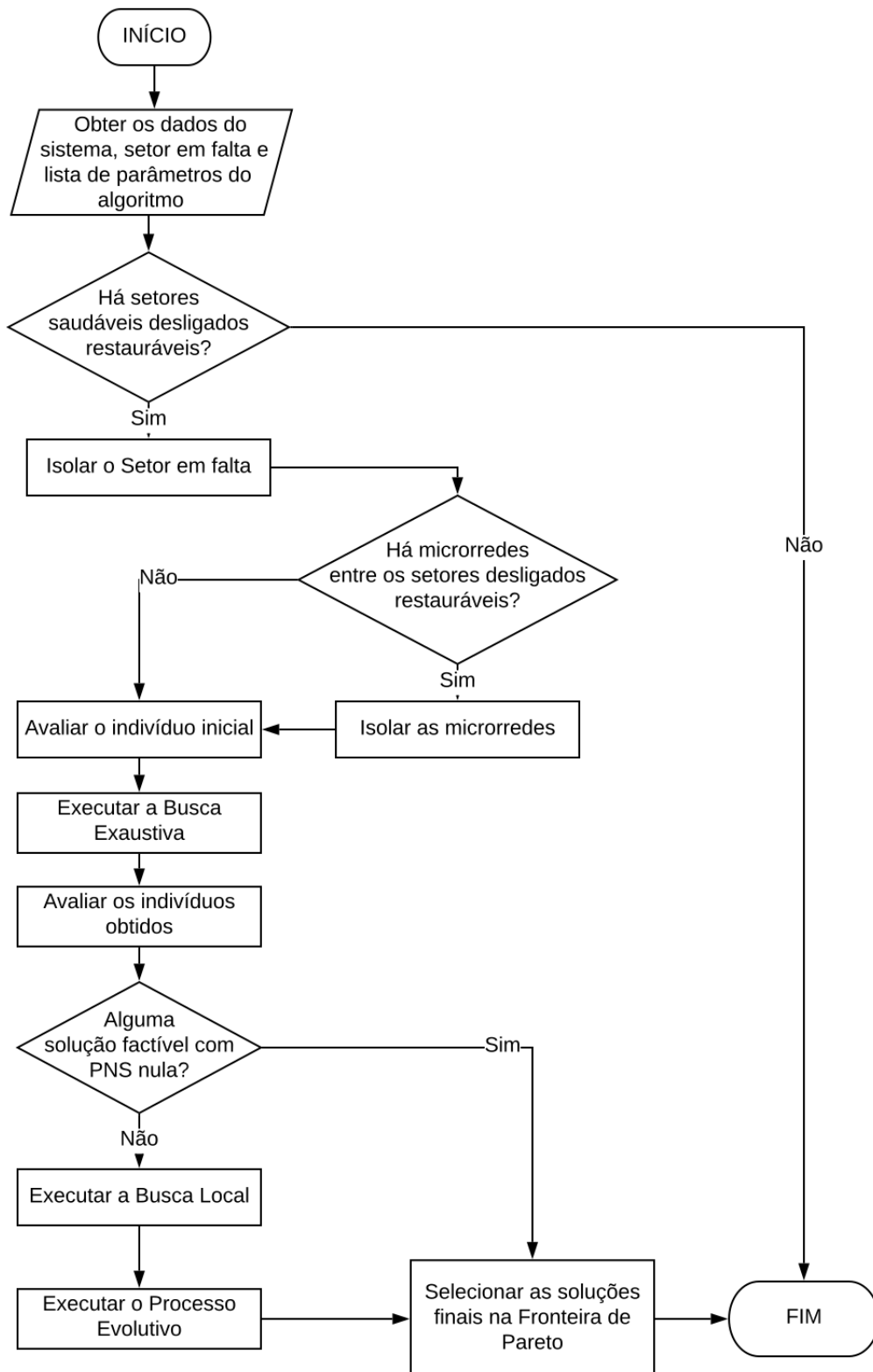
disso, nota-se que a avaliação do primeiro indivíduo ocorre somente após a isolação da microrrede. Os operadores são informados sobre essas manobras, mas as mesmas não são contabilizadas no número de total de manobras do PRE obtido.

#### **5.4 Considerações Finais**

Este capítulo apresentou a metodologia proposta para tratamento do problema de restabelecimento de energia via RR considerando a presença de GD. O enunciado formal do problema e o fluxograma da metodologia foram também apresentados. No próximo capítulo serão ilustrados e discutidos resultados da aplicação da metodologia em SDs da literatura e no SD real da cidade de Londrina/PR.



Figura 19: Fluxograma da Metodologia Proposta



Fonte: Elaborado pela autora



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de simulações computacionais executadas para validação da metodologia proposta. Três SDs foram considerados: sistema de 53 barras (ROMERO et al., 2016), 70 barras (DAS, 2006) e o SD real da cidade de Londrina/PR com mais de 40 mil barras. Foram consideradas apenas situações de faltas simples considerando a presença ou não de GD.

As simulações foram realizadas em um computador com processador Intel Core i7-3770 de 3,40GHz, 32 GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 18.04.4 LTS. O programa computacional foi codificado em linguagem C.

### 6.2 Sistemas de distribuição e parâmetros utilizados nas simulações

O primeiro sistema teste consiste no SD de pequeno porte ilustrado na Figura 20 que já foi utilizado em diversos trabalhos (ROMERO et al., 2016; MARQUES, 2018; FERNANDES, 2019; PERALTA; LEITE; MANTOVANI, 2019). Neste sistema cada setor possui somente uma barra (barra de carga ou barra de SE), com 53 barras, 61 chaves e 57 setores. O segundo SD considerado neste trabalho possui uma quantidade maior de barras e já foi também utilizado em outros trabalhos (DAS, 2006; HAFEZ; OMRAN; HEGAZY, 2018; MARTINS, 2019). Esse SD é constituído por duas subestação e quatro alimentadores, 70 barras e 68 ramos, contendo um total de 42 chaves de manobras, sendo somente quatro delas NAs. Além disso, as potências das barras do sistema de 70 barras foram triplicadas, pois os dados de entrada e saída da metodologia base e proposta são trifásicos. Por fim, o sistema real da região metropolitana de Londrina (LDR), que representa a rede em operação dessa região, que inclui as cidades mais próximas à Londrina, no dia 1 de novembro de 2016. Inclui-se consumidores de diferentes níveis de prioridade nesse sistema (MARQUES, 2018). Devido à grande quantidade de setores, 3.749, a representação gráfica desse sistema é inviável. As principais características dos três SDs utilizados estão presentes na Tabela 4.

Na Tabela 5 estão os valores assumidos pelos parâmetros de entrada do algoritmo. Onde  $\delta$  corresponde ao valor máximo de queda de tensão permitida,  $\Delta V$  o acréscimo a queda máxima de tensão para as Restrições Relaxadas e  $\Delta B$  o acréscimo ao máximo carregamento de transformador (ou SE) também para as Restrições Relaxadas, aceitas nos indivíduos intermediários.  $s$  é o parâmetro de entrada que assume 0 ou 1 e que informa a sequência escolhida para operação das manobras que ocorrem em par ("0- sequência fecha-abre; "1- sequência abre-fecha). Além do mais, considerou-se somente uma equipe

de manutenção para execução das manobras de forma sequencial, sendo executadas, primeiramente, as manobras de abertura.  $T$  representa o tempo total estimado necessário para a recuperação do elemento causador da falha, ou seja, tempo necessário para a execução das ações de reparo no setor em falta.  $t_{CCR}$  e  $t_{CCM}$  são os tempos de manobra para chaves remotas e manuais, respectivamente, de acordo com [Zidan e El-Saadany \(2012\)](#).

Tabela 4: Dados dos sistemas de distribuição utilizados nos testes experimentais

Sistemas de Distribuição		53 barras	70 barras	LDR
Subestações		3	2	15
Alimentadores		6	4	83
Setores		57	42	3.479
Barras		53	70	40.606
Chaves	CCMs	61	0	3.712
	CCRs	0	42	181
	Total	61	42	3.893
Consumidores	Prioridade Alta	0	13	107
	Prioridade Intermediária	0	13	154
	Prioridade Baixa	0	21	254
	Sem Prioridade	50	21	6.763
	Total	50	68	7.278
Máximo carregamento de rede na configuração pré-falta sem GD (%)		75,2	46,1	105,1
Máxima queda de tensão na configuração pré-falta sem GD (%)		2,8	6,9	7,2
Máximo carregamento de transformador na configuração pré-falta sem GD (%)		76,7	43,2	104,4

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 5: Restrições do problema e tempos utilizados para simulações

Parâmetro	$\delta$	$\Delta V$	$\Delta B$	$s$	$T$	$t_{CCR}$	$t_{CCM}$
Valor	0,1 (10%)	0,1 (10%)	0,5 (5%)	1	4h / falta	50 seg.	25 min.

Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com [Fernandes \(2019\)](#), em casos do sistema de grande porte acontece um

altíssimo consumo de memória observado nos testes realizados considerando a aplicação da BL completa. Portanto, existe um sistema de ajustes do filtro para casos em que o número de chaves nessa busca é muito alto. Dessa maneira, a [Tabela 6](#) mostra os ajustes necessários para a execução da BL, completa ou limitada. Caso no número de chaves for maior que 20, a BL limitada é executada, conforme [Fernandes \(2019\)](#), tendo número de indivíduos máximo igual a 25.000. Nos casos dos outros sistemas testados não houve necessidade de simplificação da BL.

Além disso, a BL somente ocorre se o número de chaves NA e NF forem maiores que 1 e o número total de chaves for menor que 100. Observa-se também que o número máximo de chaves para execução da BL completa é 20 chaves, onde o número de chaves NFs precisa ser maior que zero. O número máximo de gerações presentes na [Tabela 6](#) muda para cada sistema devido ao número de setores presentes. Quando a BL completa acontece, o número máximo de gerações pode ser modificado quando a quantidade de indivíduos da BL ultrapassa 75% deste valor, acrescentando 10.000 ao número total de gerações. Mais detalhes sobre os procedimentos da BL são apresentados em [Fernandes \(2019\)](#).

Tabela 6: Parâmetros utilizados nos testes

Parâmetro	Sistema de 53 barras	Sistema de 70 barras	Sistema de Londrina
Quantidade de simulações por falta	35	35	35
Número total de gerações	40.000	40.000	60.000*
Execução da Busca Local	Completa	Completa	Ajustada pelo número de chaves do <i>Tier 1</i>
Número mínimo de chaves** para execução da BL	1 chave NA e 1 chave NF	1 chave NA e 1 chave NF	1 chave NA e 1 chave NF
Limite de chaves** para execução completa da BL	Não se aplica	Não se aplica	Máx. 20 chaves (chaves NFs>0)
Limite de chaves** para execução da BL	Não se aplica	Não se aplica	Máx. 100 chaves (chave NAs ≤ 30)
Limite de indivíduos gerados pela BL limitada	Não se aplica	Não se aplica	25.000

\*Número mínimo;\*\*Chaves do *Tier 1*.

Fonte: Elaborado pela autora

### 6.2.1 Sistema Teste 1 - 53 barras

Escolheu-se o sistema de 53 barras por ser um sistema consolidado na literatura (ROMERO et al., 2016; MARQUES, 2018; FERNANDES, 2019; PERALTA; LEITE; MANTOVANI, 2019) e pela facilidade de visualização do problema. A Figura 20 apresenta a topologia do sistema de 53 barras. Na Figura 20 os números vermelhos entre parenteses representam o número da chave, enquanto, os números pretos representam os setores. Nota-se que os setores em negrito possuem mais que um número e deve-se ao fato de que cada alimentador necessita de um único setor como setor de origem, portanto, as subestações foram divididas proporcionalmente ao número de alimentadores presentes, essa modificação não prejudica a análise ou o fluxo de potência.

Para análise da metodologia proposta adicionou-se cinco Gds em diferentes setores, os parâmetros utilizados estão na Tabela 7, os modos de controle foram PQ para esses geradores. Somente geradores com a capacidade *black start* com controle PQ foram considerados nesse sistema para analisar a presença do ilhamento intencional. Optou-se por escolher a potência do Gds próxima a demanda da microrrede, para garantir que o ilhamento intencional fosse viável, conforme apresentado na seção 5.3. Diante disso, os desbalanços de potência ativa de todos geradores são menores que 20% da potência do gerador no momento da falta para garantir o ilhamento intencional viável.

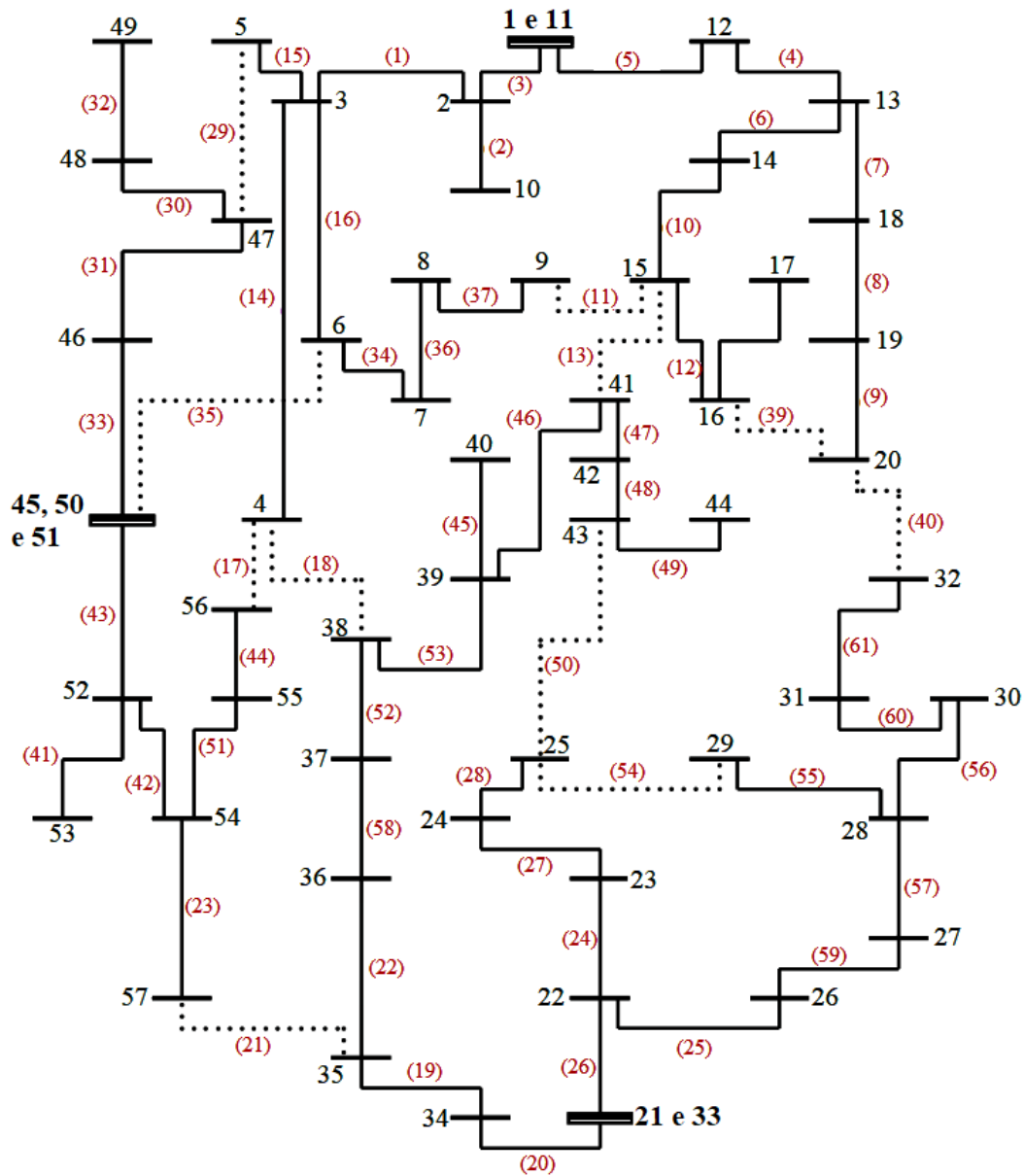
Tabela 7: Parâmetros dos Gds adicionados no SD de 53 barras

Parâmetros	Gd 1	Gd2	Gd 3	Gd 4	Gd 5
<b>Setor</b>	17	18	30	44	49
$P_{m\acute{a}x}$ (kW)	1.000	2.500	800	300	800
<b>Fator de potência limite</b>	0,9 cap. /0,9 ind.	0,9 cap. /0,9 ind.	0,9 cap. /0,9 ind.	0,9 cap. /0,9 ind.	0,9 cap. /0,9 ind.
$P_{pr\acute{e}-falta}$ (kW)	950	2.050	650	250	650
$Q_{pr\acute{e}-falta}$ (kVAr)	404	873	270	101	276
<b>Capacidade <i>black start</i></b>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 8 apresenta o número de casos solucionados pela BE e pelo processo evolutivo. Simulou-se 35 vezes uma falta em cada setor, dentre os 57 setores somente em 31 setores é necessário a execução do algoritmo para encontrar PRE. Para os demais setores não há possibilidade de resposta, uma vez que, a ocorrência de uma falta não coloca nenhum setor saudável fora de serviço (nós folha), ou são faltas nas barras de alimentadores, ou desliga setores restauráveis que não possuem outra opção de restauração, devido a ausência de chaves NAs para reconectá-los.

Figura 20: Configuração pré-falta do SD de 53 barras no formato setor e chave.



Fonte: Adaptado de [Romero et al. \(2016\)](#).

Nas simulações observou-se que a presença de GD aumenta o número de casos solucionados pela execução da BE, ou seja, aumenta a quantidade de casos onde todos os setores restauráveis foram restabelecidos somente pelo fechamento de chaves NAs no *Tier1*. Os casos solucionados pelo processo evolutivo representam os casos onde a BE não é capaz de encontrar um solução factível para reconectar todos os setores restauráveis manobrando apenas chaves NAs do *Tier1*. A solução é encontrada mais rapidamente na BE, cerca de 0,05 segundos, uma vez que não são necessários executar o número total de gerações, que

Tabela 8: Número de casos solucionados no sistema de 53 barras

Nº de casos solucionados	Sem a presença de GD	Com a presença de GD
<b>Busca Exaustiva</b>	17	21
<b>Processo Evolutivo</b>	14	10
<b>Total</b>	31	31

Fonte: Elaborado pela autora

eleva o tempo de processamento. Conclui-se que a presença de GD auxilia a encontrar uma solução mais simples do sistema, uma vez que, alivia os alimentadores ou reduz o número de setores a serem restaurados. Dentre as simulações realizadas foram escolhidos alguns exemplos com características distintas para analisar a metodologia proposta.

## Falta no setor 2

A falta localizada no setor 2 é responsável por retirar o fornecimento de todos os setores de um alimentador. Na [Tabela 9](#) são apresentados os resultados obtidos nas simulações sem e com a presença de GD no sistema. A primeira linha apresenta a origem dos indivíduos finais encontrados; a segunda a numeração do indivíduo final, a terceira linha refere-se à quantidade de vezes a solução foi obtida dentre as 35 simulações; a quarta, quinta e sexta linha informam, respectivamente, a ENS total trifásica (neste caso não há níveis de prioridade), número total de manobras (lembrando que o sistema possui somente chaves manuais) e PNS total trifásica (somatório de potência ativa das cargas que não foram restauradas) de cada indivíduo presente nos conjuntos de Pareto-Ótimo encontrados, nota-se que os valores finais são trifásicos, mas o fluxo de carga executado é monofásico.

Tabela 9: Resultados das simulações do Setor 2

	Sistema sem GD		Sistema com GD	
Indivíduos	1.a	1.b	2.a	2.b
<b>Ocorrência</b>	35 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35
<b>ENS*</b>	10.279,50	13.467,30	9.846,38	11.041,80
<b><math>\psi_M</math></b>	5	4	5	4
<b>PNS**</b>	0	1.663,20	0	623,70

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Essa falta não afeta nenhum setor com Gd e, assim, não causa ilhamento intencional. Observa-se que somente a presença de GD no SD afeta positivamente os resultados.



Comparando os indivíduos obtidos com o mesmo número de manobras, percebe-se que a ENS diminuiu, a diferença mais considerável acontece entre os casos com 4 manobras (1.b e 2.b).

### Falta no setor 12

A falta no setor 12 também é responsável por interromper a alimentação de cargas de um alimentador inteiro. A [Tabela 10](#) mostra os resultados obtidos nas simulações. A diferença em relação ao caso de falta no setor 2, quando o SD possui os 5 Gds, é o surgimento de dois ilhamentos intencionais no momento da falta. Uma ilha formada pelo setor 17 e outra pelo setor 18. O setor 17 trata-se de um nó folha, enquanto o setor 18 encontra-se no meio do alimentador e refere-se à um setor com potência elevada.

Tabela 10: Resultados das simulações do Setor 12

Indivíduo	Sistema sem GD		Sistema com GD		
	1.a	1.b	2.a	2.b	2.c
<b>Ocorrência</b>	35 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35
<b>ENS*</b>	25.970,18	27.396,60	14.021,70	15.147,83	16.458,75
$\psi_M$	7	4	7	6	3
<b>PNS**</b>	5.128,20	6.444,9	1.455,3	2.494,80	3.811,5

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Comparando o indivíduo 2.a com o indivíduo 1.a, observa-se que a ENS reduz significativamente e o número de manobra são iguais. Além disso, ao comparar o indivíduo final 2.c com o indivíduo 1.b, que possuem o menor número de manobras entre as soluções finais encontradas, nota-se que tanto a ENS quanto o número de manobras reduzem. Essa drástica mudança na ENS acontece, pois as ilhas formadas correspondem a 35,51% da potência ativa total da região afetada pela falta. Face ao exposto, conclui-se que o ilhamento intencional foi vantajoso neste caso, pois causou uma redução da ENS total.

A sequência de chaveamento do indivíduo 1.a está presente na [Tabela 11](#) e na [Tabela 12](#) a sequência do indivíduo 2.a. Nas Tabelas [11](#) e [12](#) estão presentes ENS e PNS total, número de manobras manuais ( $\psi_M$ ), máximo carregamento da rede (X), do transformador (B) e máxima queda de tensão (V) dos alimentadores envolvidos na sequência de chaveamento. As chaves 5 e 4 isolam o setor em falta. Para o caso 1.a, o fechamento da chave 40 restaura os setores 19 e 20 e a chave 11 restaura o setor 15. No caso do indivíduo 2.a, duas ilhas são formadas, as chaves 38 e 63 isolam a microrrede formada pelo setor 17 e as chaves 8, 7 e 62 isolam a microrrede formada pelo setor 18. As chaves 8, 7 e 38 são automáticas e acionadas pelos dispositivos de proteção que atuam

no momento da falta, já as chaves 62 e 63 são chaves fictícias, que representam a mudança de controle nas microrredes para controlar a tensão e frequência. Os setores 15, 16, 17, 19 e 20 são restaurados pelas manobras nas chaves 11, 40 e 39.

Tabela 11: Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 10 para o caso de falta no setor 12

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Abrir</b>	5	4	8	-	10	12	-
<b>Fechar</b>	-	-	-	40	-	-	11
<b>ENS*</b>		29.660,40	29.660,40	27.396,60	27.396,60	27.396,60	25.970,18
$\psi_M$		2	3	4	5	6	7
<b>PNS**</b>		7.415,10	7.415,10	6.444,90	6.444,90	6.444,90	5.128,20
<b>X(%)</b>		0,00	0,00	85,05	85,05	85,05	92,35
<b>V(%)</b>		0,00	0,00	2,85	2,85	2,85	2,85
<b>B(%)</b>		13,35	13,35	81,55	81,55	81,55	81,55

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 12: Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 10 para o caso de falta no setor 12

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Abrir</b>	5	4	38	8	7	10	12	-	-	-
<b>Fechar</b>	-	-	63		62	-	-	11	40	39
<b>ENS*</b>					19.126,80	19.126,80	19.126,80	16.603,13	15.147,83	14.021,70
$\psi_M$					2	3	4	5	6	7
<b>PNS**</b>					4.781,70	4.781,70	4.781,70	3.465,00	2.494,80	1.455,30
<b>X(%)</b>					0,84	0,84	0,84	92,35	92,35	92,62
<b>V(%)</b>					0,00	0,00	0,00	2,80	2,80	3,48
<b>B(%)</b>					83,07	83,07	83,07	83,07	83,07	83,61

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

### Falta no setor 23

No caso de uma falta no setor 23, percebe-se que somente dois setores (24 e 25) são afetados pela falta existindo apenas duas chaves NAs conectando o setor 25 com regiões ainda energizadas, como mostra a Figura 20. A solução mais simples seria o fechamento

de uma dessas chaves, no entanto, o sistema original encontra-se muito carregado, dessa forma, essa solução não é factível, como pode-se observar na [Tabela 13](#). Para o indivíduo 1.a, como mostra a [Tabela 14](#), são necessárias cinco manobras para a restauração completa, onde duas manobras (chaves 24 e 27) são necessárias para isolamento do setor em falta, duas manobras (chaves 61 e 40) para alívio de carga e uma manobra (chave 54) para restauração dos setores restauráveis interrompidos. Ao adicionar os Gds no sistema, a falta no setor 23 é resolvido pela BE, ou seja, restauração total por meio de uma manobra em uma chave NA. O indivíduo 2.a possui somente três manobras (duas para isolamento do setor faltoso e uma para restauração completa) e a ENS reduz expressivamente comparada as soluções encontradas sem a presença de GD, como mostra a [Tabela 15](#).

Tabela 13: Resultados das simulações do Setor 23

Indivíduo	Sistema sem GD		Sistema com GD
	1.a	1.b	2.a
Ocorrência	35 de 35	35 de 35	35 de 35
ENS*	5.457,38	6.883,80	2.858,63
$\psi_M$	5	4	3
PNS**	0	1.316,70	0

\*em ( $kWh_{3\phi}$ ); \*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 14: Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da [Tabela 13](#) para o caso de falta no setor 23

Ordem	1	2	3	4
Abrir	24	27	61	-
Fechar	-	-	40	54
ENS*		9.147,60	9.840,60	5.457,38
$\psi_M$		2	4	5
PNS**		2.286,90	2.286,90	0,00
X(%)		67,01	71,95	99,22
V(%)		1,73	2,78	3,02
B(%)		60,20	63,17	68,95

\*em ( $kWh_{3\phi}$ ); \*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 15: Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 13 para o caso de falta no setor 23

<b>Ordem</b>	1	2	3
<b>Abrir</b>	24	27	-
<b>Fechar</b>	-	-	54
<b>ENS*</b>		9.147,60	2.858,63
$\psi_M$		2	3
<b>PNS**</b>		2.286,90	0,00
<b>X(%)</b>		55,25	97,77
<b>V(%)</b>		1,45	3,00
<b>B(%)</b>		57,01	68,56

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

### Falta no setor 26

A falta no setor 26 também afeta um alimentador inteiro e no caso com GD um ilhamento intencional acontece, formado pelo setor 30. A presença de Gds e o ilhamento afetam positivamente os resultados, observa-se que o número de manobras e ENS são reduzidas, comparando os indivíduos 2.a com 1.a, 2.b com 1.b e 2.c com 1.c, isso deve-se ao fato de o setor 30 permanecer ligado. No entanto, essa diferença não é tão drástica comparada ao exemplo do setor 12, pois o setor 30 representa somente 15% da potência ativa afetada pela falta.

Tabela 16: Resultados das simulações do Setor 26

<b>Indivíduo</b>	<b>Sistema sem GD</b>			<b>Sistema com GD</b>		
	1.a	1.b	1.c	2.a	2.b	2.c
<b>Ocorrência</b>	35 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35
<b>ENS*</b>	8.835,75	10.031,18	11.018,70	7.074,38	8.801,10	9.719,33
$\psi_M$	6	5	4	5	4	3
<b>PNS**</b>	693,00	1.316,70	2.148,30	693,00	1.593,90	2.148,30

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

### Tempo de execução

Os tempos médios de simulações para os 4 casos detalhados são apresentados na Tabela 17. Observa-se que para a falta no setor 23, o tempo é drasticamente reduzido,

uma vez que, com a presença dos Gds o PRE é encontrado na BE. Em relação aos outros setores a diferença no tempo médio não é significativa. Além disso, o sistema de 53 barras é rapidamente resolvido pelo algoritmo.

Tabela 17: Tempos médios de simulações em segundos para o sistema de 53 barras

Setor em falta	Sistema sem GD	Sistema com GD
<b>2</b>	12,67	13,32
<b>12</b>	12,50	11,78
<b>23</b>	12,70	0,04
<b>26</b>	11,67	11,86

Fonte: Elaborado pela autora

### Falta no Setor 46 com Gd 5 localizado no Setor 48

Dependendo da localização dos Gds, em alguns casos de falta eles não contribuem com o processo de restabelecimento de energia. Para melhor visualização da importância da posição do Gd no SD, realizou-se um teste onde o Gd 5, que antes estava no setor 49, foi realocado no setor 48. Esse Gd possui 1,1 MW de potência ativa máxima, fator de potência limite de 0,9 indutivo/capacitivo, capacidade *black start* e modo de controle PQ. Considera-se, ainda, que no momento da falta ele possui potência ativa de 1.078kW e reativa de 873kVAr. A Tabela 18 mostra o resultado encontrado para simulação da falta no setor 46 considerando o Sistema de 53 barras original sem GD (Indivíduo 1) e com GD (neste caso considerando o Gd 5 no setor 48 (Indivíduo 2) e depois no setor 49 (Indivíduo 3)).

Tabela 18: Resultados das simulações do Setor 46

	Sistema sem GD	Sistema com GD (Gd 5 - Setor 48)	Sistema com GD (Gd 5 - Setor 49)
<b>Indivíduo</b>	1	2	3
<b>Ocorrência</b>	35 de 35	35 de 35	35 de 35
<b>ENS*</b>	2.945,25	3.257,10	2.858,63
<b><math>\psi_M</math></b>	3	3	3
<b>PNS**</b>	0	554,40	0

\*em ( $kWh_{3\phi}$ ); \*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Analisando os indivíduos encontrados é possível concluir que a localização do Gd é extremamente importante para o problema de restabelecimento, visto que a ENS passa de

2.858,63  $kWh_{3\phi}$ , para o SD sem GD, para 3.257,10  $kWh_{3\phi}$ , para o SD com GD quando o Gd 5 se encontra no setor 48. Esse aumento ocorreu em razão de a única opção de restauração do setor 49 ser pela microrrede que, no entanto, não é capaz de suprir a carga desse setor. No caso do Gd 5 localizado no setor 49, observa-se que a ENS diminuiu em relação à obtida para o sistema sem GD.

### 6.2.2 Sistema Teste 2 - 70 barras

A topologia do sistema de 70 barras é representado na [Figura 21](#) (os quadrados em vermelho são as chaves NFs, em verde as chaves NAs, em tracejado são os setores e os círculos em preto representam as barras). O sistema original ([DAS, 2006](#)) tem os limites operacionais violados, com a máxima queda de tensão da configuração pré-falta igual a 10,5%. Portanto, optou-se por alterar o carregamento da rede para 75% em relação aos dados originais, assim como [Martins \(2019\)](#), reduzindo a queda de tensão máxima dentro dos limites estabelecidos.

Para avaliar a metodologia proposta incluiu-se cinco Gds com diferentes características, conforme apresentado na [Tabela 19](#). Nesse sistema os fatores de potência das cargas estão abaixo de 0,9, logo, optou-se por utilizar os fatores de potências limites da [Tabela 19](#). A potência dos geradores na configuração pré-falta é próxima das demanda dos setores que fazem parte das microrredes, ou seja, os desbalanços de potência ativa são menores que 20%. Portanto, o ilhamento será viável se a microrrede for afetada pela falta. Somente o gerador 4 não possui capacidade *black start* e caso seja afetado por uma falta será desligado. O modo de controle PV é considerado para todos os Gds.

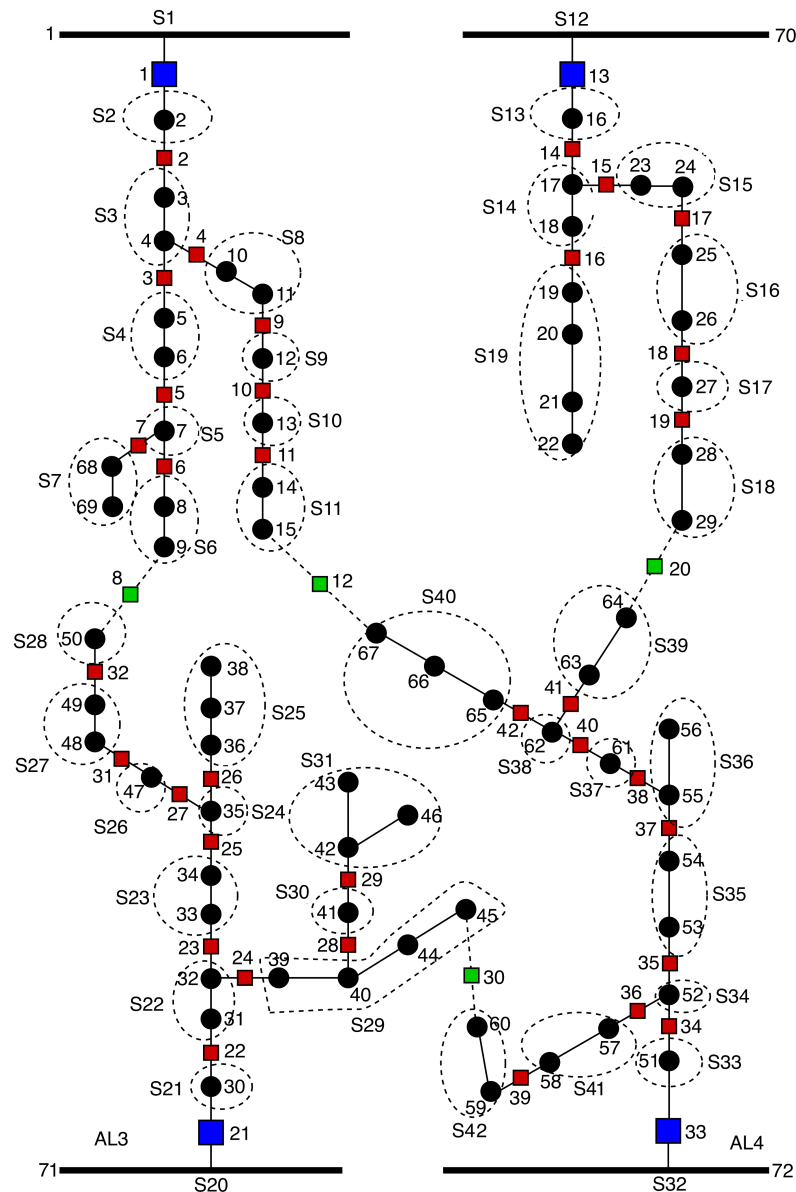
Tabela 19: Parâmetros dos Gds adicionados no SD de 70 barras

Parâmetros	Gd 1	Gd2	Gd 3	Gd 4	Gd 5
<b>Setor</b>	3	19	25	36	41
$P_{m\acute{a}x}$ (kW)	800	800	800	600	1.500
<b>Fator de potência limite</b>	0,75 cap. /0,75 ind.	0,8 cap. /0,8 ind.	0,8 cap. /0,8 ind.	0,8 cap. /0,8 ind.	0,8 cap. /0,8 ind.
$P_{pr\acute{e}-falta}$ (kW)	550	400	400	250	1000
$Q_{pr\acute{e}-falta}$ (kVAr)	487,5	412,5	300	187,5	750
<b>Capacidade <i>black start</i></b>	Sim	Sim	Sim	Não	Sim

Fonte: Elaborado pela autora

Faltas simples foram simuladas em todos os setores, 35 vezes, para o sistema sem e com a presença de GD. Entre os 42 setores, 25 setores foram solucionados pelo algoritmo e o restante não há possibilidade de resposta, pois afetam regiões não restauráveis,

Figura 21: Configuração pré-falta do SD de 70 barras.



Fonte: Adaptado de [Martins \(2019\)](#)

subestações ou setores no final do alimentador (nó folha). Novamente, ao considerar GD aumentou o número de casos resolvidos pela BE, de 10 para 16 casos, ou seja, todos os setores restauráveis são restabelecidos somente com fechamento de chaves NAs do *Tier 1*, tornando a solução mais simples e rápida, pois a BE é responsável por terminar o programa quando encontra uma solução factível. Três casos foram escolhidos para uma análise mais detalhada e os setores selecionados foram os responsáveis por desligar todas as cargas de um alimentador, sendo assim as faltas mais complexas para restauração.

Tabela 20: Número de casos solucionados no sistema de 70 barras

Nº de casos solucionados	Sem a presença de GD	Com a presença de GD
Busca Exaustiva	10	16
Processo Evolutivo	15	9
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>25</b>

Fonte: Elaborado pela autora

## Falta no setor 2

Os resultados obtidos nas simulações do setor 2 estão presentes na [Tabela 21](#). A primeira linha apresenta a origem dos indivíduos finais encontrados; a segunda a numeração do indivíduo final, a terceira linha refere-se a quantidade de vezes a solução foi obtida dentre as 35 simulações; a quarta, quinta, sexta e sétima linha informam, respectivamente,  $ENS_A$ ,  $ENS_I$ ,  $ENS_B$  e  $ENS_S$  representam a ENS dos níveis alto, intermediário, baixo e sem prioridade em ( $kWh_{3\phi}$ ).  $\psi_R$  define o número de manobras remotas, uma vez que, o sistema possui somente chaves remotas.  $PNS_A$ ,  $PNS_I$ ,  $PNS_B$  e  $PNS_S(G)$  representam a PNS final dos níveis alto, intermediário, baixo e sem prioridade, respectivamente, em ( $kW_{3\phi}$ ), novamente os valores finais são trifásicos, mas o fluxo de carga executado é monofásico.

Tabela 21: Resultados das simulações do Setor 2 do sistema de 70 barras

Indivíduos	Sistema sem GD			Sistema com GD
	1.a	1.b	1.c	2.a
Ocorrência	30 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35
$ENS_A^*$	267,38	242,63	507,00	22,50
$ENS_I^*$	671,25	1.211,63	2.322,00	23,25
$ENS_B^*$	178,80	181,80	604,80	8,40
$ENS_S^*$	1.671,33	1.640,98	1.640,98	15,73
$\psi_R$	8	6	4	3
$PNS_A^{**}$	54,00	54,00	121,50	0,00
$PNS_I^{**}$	162,00	297,00	580,50	0,00
$PNS_B^{**}$	43,20	43,20	151,20	0,00
$PNS_S^{**}$	405,00	405,00	405,00	0,00

\*em ( $kWh_{3\phi}$ ); \*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

As tabelas [22](#) e [23](#) apresentam a sequência de chaveamento do caso 1.a e 2.a.



Observa-se que no sistema sem GD, nenhuma solução apresentadas na [Tabela 21](#) possui restauração completa e um deles é necessário transferência de carga, como mostra a [Tabela 22](#). No sistema com GD, A falta no setor 2 causa o ilhamento intencional do setor 3, abrindo automaticamente as chaves 2, 3 e 4 para ilhar a microrrede e, logo, para isolar o setor em falta é necessário somente a abertura da chave 1, como pode-se observar na [Tabela 23](#).

Tabela 22: Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da [Tabela 21](#) para o caso de falta no setor 2

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6
<b>Abrir</b>	1	2	9	-	41	3
<b>Fechar</b>	-	-	-	12	20	8
<b>ENS Total*</b>		8.055,00	8.055,00	5.712,00	5.727,01	2.788,76
$\psi_R$		2	3	4	6	8
<b>PNS Total**</b>		2.013,75	2.013,75	1.419,75	1.419,75	664,20
<b>X(%)</b>		0	0	51,33	48,63	58,61
<b>V(%)</b>		0	0	10,42	9,76	9,76
<b>B(%)</b>		16,2	16,2	49,65	48,31	53,06

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 23: Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da [Tabela 21](#) para o caso de falta no setor 2

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Abrir</b>	1	2	4	3	-	-	-
<b>Fechar</b>	-	-	-	-	43	8	12
<b>ENS Total*</b>					5.807,09	2.805,88	69,88
$\psi_R$					1	2	3
<b>PNS Total**</b>					1.446,75	691,2	0
<b>X(%)</b>					5,53	53,08	53,08
<b>V(%)</b>					0,14	8,32	9,52
<b>B(%)</b>					63,25	63,25	63,25

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Para o sistema com GD a solução é encontrada na BE, com restauração total dos setores e ENS reduzida drasticamente em cada nível de prioridade, como mostra a

**Tabela 21.** Além disso, na **Tabela 23** observa-se o fechamento da chave 43, essa chave é fictícia e representa a mudança de controle da microrrede para v-f, além de ser responsável por tornar possível o fluxo de potência na microrrede, utilizando os mesmo operadores da metodologia base. Os chaveamentos da microrrede são colocadas na sequência de chaveamento somente para conhecimento do operador, mas o mesmo é informado que essas chaves são automáticas e, portanto, pode-se observar que não entram na contagem de manobras totais.

### Falta no setor 13

A **Tabela 24** apresenta os resultados encontrados nas 35 simulações sem e com a presença de GD para falta no setor 13. Na presença de GD, essa falta ocasiona o ilhamento intencional da microrrede formada pelo setor 19. Três diferentes soluções foram encontradas para o sistema original e duas soluções para o sistema com Gds, observa-se que ao incluir a GD ocorre uma redução na ENS, principalmente para ENS sem prioridade.

Tabela 24: Resultados das simulações do Setor 13 do sistema de 70 barras

	Sistema sem GD			Sistema com GD	
	1.a	1.b	1.c	2.a	2.b
<b>Indivíduos</b>					
<b>Ocorrência</b>	20 de 35	35 de 35	33 de 35	35 de 35	35 de 35
<b><math>ENS_A^*</math></b>	728,44	678,75	1.743,75	709,50	694,13
<b><math>ENS_I^*</math></b>	130,5	2.001,19	1.944,00	111,19	74,81
<b><math>ENS_B^*</math></b>	1.113,00	1.089,00	1.098,00	1.116,00	1.107,00
<b><math>ENS_S^*</math></b>	2.570,40	2.570,40	2.570,40	8,25	594,00
<b><math>\psi_R</math></b>	8	6	4	8	6
<b><math>PNS_A^{**}</math></b>	162,00	162,00	432,00	162,00	162,00
<b><math>PNS_I^{**}</math></b>	0,00	486,00	486,00	0,00	0,00
<b><math>PNS_B^{**}</math></b>	270,00	270,00	270,00	270,00	270,00
<b><math>PNS_S^{**}</math></b>	642,60	642,60	642,60	0,00	148,50

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

As Tabelas 25 e 26 referem-se a sequência de chaveamento encontrada para solução 1.a e 2.a. As chaves 13 e 14 isolam o setor em falta nas duas soluções. A solução 1.a necessita de duas transferências de carga, pois o alimentador 4 não é capaz de suprir os setores restaurados pela chave 20 sem extrapolar o limite operacional final, como pode-se observar que máxima queda de tensão está acima do limite final de 10%. Logo, reduziu-se a máxima queda de tensão pelos pares de manobras dos chaveamentos 5 e 6 presentes na **Tabela 25**.

Tabela 25: Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da [Tabela 24](#) para o caso de falta no setor 13

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6
<b>Abrir</b>	13	14	17	-	36	42
<b>Fechar</b>	-	-	-	20	30	12
<b>ENS Total*</b>		9.752,40	9.752,40	4.374,15	4.462,28	4.542,34
$\psi_R$		2		3	4	6
<b>PNS Total**</b>		2.438,10	2.438,10	1.074,60	1.074,60	1.074,60
<b>X(%)</b>		0		0	60,64	64,89
<b>V(%)</b>		0		0	13,39	12,46
<b>B(%)</b>		14,8		14,8	54,26	54,26

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Para o sistema com GD, a chave 16 é aberta automaticamente para ilhar o setor 19 e o fechamento da chave 43 simboliza a troca de controle do Gd, como mostra a [Tabela 26](#). O setor 14 é restaurado pela microrrede, pela manobras nas chaves 15 e 16, respeitando a máxima agregação de carga para microrrede de 20% da potência ativa máxima. O par de manobra das chaves 42 e 12 realiza uma transferência de carga e o par de manobras 17 e 20 restabelece os setores 16, 17 e 18, somente o setor 15 não é restaurado. Nas soluções 1.a e 2.a tem o mesmo número de manobras, mas na 2.a a ENS é consideravelmente menor.

Tabela 26: Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da [Tabela 24](#) para o caso de falta no setor 13

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Abrir</b>	13	14	16	-	15	-	42	17
<b>Fechar</b>	-	-	-	43	-	16	12	20
<b>ENS Total*</b>				7.776,00	7.776,00	7.190,25	7.247,44	1.944,94
$\psi_R$					2	3	4	6
<b>PNS Total**</b>				1.944,00	1.944,00	1.795,50	1.795,50	432,00
<b>X(%)</b>				1,68	1,68	3,32	35,36	35,36
<b>V(%)</b>				0,07	0,07	0,31	7,88	9,1
<b>B(%)</b>				54,48	54,48	71,04	71,04	71,04

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

### Falta no setor 33

Para falta no setor 33 foram encontrados três diferentes soluções para cada sistema. Quando considerado a presença da GD, a falta no setor 33 causa o desligamento do Gd localizado no setor 36 e o ilhamento intencional do setor 41. A [Tabela 27](#) apresenta os indivíduos finais encontrados nas simulações. Para o caso com restauração completa (1.a e 2.a), o sistema sem GD apresenta a solução com menor número de manobras e o sistema com GD a solução com menor ENS total. Para as soluções 1.b e 2.b, o sistema com GD apresenta a solução com menor ENS total e menor número de manobras. No entanto, ao comparar os casos com menor número de manobras (1.c e 2.c) observa-se que neste caso a ENS total é maior no sistema com GD, porém possui menor número de manobras.

Tabela 27: Resultados das simulações do Setor 33 do sistema de 70 barras

	Sistema sem GD			Sistema com GD		
Indivíduos	1.a	1.b	1.c	2.a	2.b	2.c
Ocorrência	33 de 35	35 de 35	33 de 35	32 de 35	35 de 35	35 de 35
$ENS_A^*$	47,63	363,75	363,75	15,00	274,50	326,81
$ENS_I^*$	87,38	87,38	3.312,75	53,06	1.407,19	3.308,06
$ENS_B^*$	37,35	37,35	1.624,2	37,01	25,35	1.825,20
$ENS_S^*$	54,00	2.161,50	2.268,00	36,75	31,50	2.268,00
$\psi_R$	7	6	4	8	5	3
$PNS_A^{**}$	0,00	81,00	81,00	0,00	67,50	81,00
$PNS_I^{**}$	0,00	0,00	823,50	0,00	337,50	823,50
$PNS_B^{**}$	0,00	0,00	402,30	0,00	0,00	456,30
$PNS_S^{**}$	0,00	540,00	567,00	0,00	0,00	567,00

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

As Tabelas [28](#) e [29](#) apresentam a sequência de chaveamento para o caso com restauração completa. Para isolar a falta é necessário a abertura das chaves 33 e 34. A solução 1.a divide os setores restauráveis em 3 grupos. O primeiro grupo, formado pelos setores 34, 35, 36, 37, 41 e 42, é restaurado pelo fechamento da chave 30, restabelecendo quase 50% da PNS total. O segundo grupo (setor 40) pela chave 12 e o último grupo (setores 38 e 39) pela chave 20. Como dito anteriormente, a maioria dos setores foram restaurados pelo fechamento da chave 30, mas no caso com GD, o setor 41 é ilhado, impedindo que a restauração do primeiro grupo seja semelhante ao caso 1.a.

A solução 2.a apresentada na [Tabela 29](#) causa a abertura automática das chaves 36 e 39 devido ao ilhamento do setor 41 e o fechamento da chave fictícia 43 representa

Tabela 28: Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da para o caso de falta no setor 33

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Abrir</b>	33	34	40	-	42	-	-
<b>Fechar</b>	-	-	-	30	-	12	20
<b>ENS Total*</b>		12.787,20	12.787,20	5.875,35	5.875,35	2.649,98	226,36
$\psi_R$		2	3	4	5	6	7
<b>PNS Total**</b>		3.196,80	3.196,80	1.444,50	1.444,50	621,00	0,00
<b>X(%)</b>		0	0	71,04	71,04	71,04	71,04
<b>V(%)</b>		0	0	9,36	9,36	9,36	9,36
<b>B(%)</b>		24,26	24,26	35,16	35,16	36,53	40,59

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

a mudança de controle para v-f. Primeiramente, todos setores, exceto o setor 42, foram restabelecidos pelo fechamento da chave 12. O setor 42 então é restabelecido pela microrrede por meio do fechamento da chave 39. No entanto, a máxima queda de tensão está acima do limite operacional, logo, ocorreu duas transferências de carga dos setores restabelecidos no chaveamento 6. Os setores 34 e 35 foram transferidos para microrrede e o setor 39 para o alimentador 2. A agregação de carga para microrrede respeitou os limites estabelecidos de 20% da máxima potência ativa em cada transferência.

Tabela 29: Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da para o caso de falta no setor 33

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Abrir</b>	33	34	39	36	-	-	-	37	41
<b>Fechar</b>	-	-	-	-	43	12	39	36	20
<b>ENS Total*</b>					9.331,20	1.700,33	102,83	120,83	141,82
$\psi_R$					2	3	4	6	8
<b>PNS Total**</b>					2.332,80	405,00	0,00	0,00	0,00
<b>X(%)</b>					3,52	46,24	46,24	42,93	40,23
<b>V(%)</b>					0,02	12,99	12,99	11,28	10
<b>B(%)</b>					50,01	50,01	75,38	91,07	91,07

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

## Tempo de execução

Os tempos médios de simulações para os casos detalhados são exibidos na [Tabela 30](#). Para a falta no setor 2, na qual a resposta era obtida no processo evolutivo e com a inclusão dos Gds passa a ser resolvida pela BE, o tempo é reduzido significativamente. Em relação aos outros setores os tempos são próximos.

Tabela 30: Tempos médios de simulações em segundos para o sistema de 70 barras

Setor em falta	Sistema sem GD	Sistema com GD
<b>2</b>	16,046	0,042
<b>13</b>	17,539	16,358
<b>33</b>	15,475	15,634

Fonte: Elaborado pela autora

### 6.2.3 Sistemas real de grande porte

A metodologia proposta também foi aplicada em um sistema real de grande porte, com mais de 3.000 setores. Seus dados são apresentados na [Tabela 4](#). Para análise da metodologia adicionou-se 7 geradores em diferentes setores, estrategicamente, uma vez que, o sistema de Londrina é muito extenso, uma vez que, o sistema de Londrina original não possui GD na média tensão. Os parâmetros utilizados e a localização dos Gds estão presente na [Tabela 31](#). O fator de potência limite para todos Gds considerado foi 0,92 capacitivo e 0,92 indutivo. O modo de controle dos Gds sem capacidade *black start* são PQ contantes e o restante PV.

Tabela 31: Parâmetros dos Gds adicionados no SD de Londrina

	Setor	$P_{m\acute{a}x}$ (MW)	$P_{pr\acute{e}-falta}$ (MW)	$Q_{pr\acute{e}-falta}$ (MVar)	Capacidade <i>black start</i>	Fator de potência
<b>Gd 1</b>	111	0,4	0,388	0,1700	Não	0,92 cap./0,92 ind.
<b>Gd 2</b>	769	1,0	0,910	0,3850	Sim	0,92 cap./0,92 ind.
<b>Gd 3</b>	861	0,3	0,240	0,1000	Sim	0,92 cap./0,92 ind.
<b>Gd 4</b>	939	0,2	0,150	0,0630	Sim	0,92 cap./0,92 ind.
<b>Gd 5</b>	1274	2,0	1,800	0,7880	Não	0,92 cap./0,92 ind.
<b>Gd 6</b>	2559	1,0	0,600	0,2468	Sim	0,92 cap./0,92 ind.
<b>Gd 7</b>	2095	1,0	0,600	0,2400	Não	0,92 cap./0,92 ind.

Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se que dois geradores não possuem capacidade *black start*, esses Gds foram inclusos no sistema para reduzir o carregamento da rede e de transformador, uma vez que, ao examinar os dados da configuração pré-falta extrapolam os limites das restrições operacionais, como pode-se observar na [Tabela 32](#). No entanto, a metodologia avalia somente os limites operacionais do alimentadores envolvidos na falta e soluções encontradas, portanto, os limites extrapolados não irão influenciar no chaveamento. Dessa forma, os Gds foram adicionados estrategicamente para que os carregamentos da rede e do transformador estivessem dentro dos limites estabelecidos, como é possível notar na [Tabela 32](#) para a configuração pré-falta com a presença de GD.

Tabela 32: Dados do sistema Londrina na configuração pré-falta

	LDR original	LDR com GD
Máximo carregamento de rede na configuração pré-falta (%)	105,1	93,9
Máxima queda de tensão na configuração pré-falta (%)	7,2	7,2
Máximo carregamento de transformador na configuração pré-falta (%)	104,4	99,7

Fonte: Elaborado pela autora

Novamente, ao analisar a quantidade de faltas resolvidas na [Tabela 33](#) observa-se que a presença de GD tem um impacto positivo no número de casos solucionados pela BE, quase metade dos casos que antes eram necessários passar pelo processo evolutivo agora são solucionados diretamente pela BE. Além do mais, o tempo para resolução desses novos casos são drasticamente reduzidos e os planos de restabelecimento são simples, visto que será necessário somente o isolamento do setor e o fechamento de chaves para o restabelecimento completo dos setores restauráveis.

Tabela 33: Número de casos solucionados no sistema de Londrina

Nº de casos solucionados	Sem a presença de GD	Com a presença de GD
Busca Exaustiva	467	530
Processo Evolutivo	127	64
<b>Total</b>	594	594

Fonte: Elaborado pela autora

A metodologia proposta foi aplicada em 5 casos de falta do sistema de Londrina, que sem a presença de GD implicam na aplicação do processo evolutivo. Logo, simulou-se

35 vezes a ocorrência de falta simples nos setores 749, 839, 919, 1587 e 2532.

### Falta no setor 749

A [Tabela 34](#) apresenta os resultados obtidos nas 35 simulações realizadas para uma falta simples no setor 749 sem e com a presença de GD. A falta no setor 749, com a presença de GD, provoca um ilhamento intencional na microrrede formada pelos setores 767, 768, 769 e 700. A  $ENS_S$  reduziu quase 50% e somente a  $ENS_I$  aumentou comparada ao resultado para o sistema sem GD, no entanto, na totalidade houve uma redução considerável na ENS. Além disso, o número de manobras também diminuiu, de 9 manobras para 8 e 6 nas soluções encontradas com GD. Nota-se também que mesmo tendo a PNS total igual a zero, a ENS do indivíduo final (1.a) é maior, comprovando que a ENS não é proporcional a PNS, uma vez que, depende da ordem dos chaveamentos também.

Tabela 34: Resultados das simulações do Setor 749

	Sistema sem GD		Sistema com GD	
Ocorrência	35 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35
Indivíduo	1.a	2.a	2.b	
$ENS_A^*$	227,50	0	0	
$ENS_I^*$	64,41	183,32	201,63	
$ENS_B^*$	368,95	0	152,66	
$ENS_S^*$	10.236,46	5.157,07	5.021,65	
$\psi_M$	5	6	5	
$\psi_R$	4	2	1	
$PNS_A^{**}$	0	0	0	
$PNS_I^{**}$	0	37,97	50,41	
$PNS_B^{**}$	0	0	0	
$PNS_S^{**}$	0	966,76	1.255,41	

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

### Falta no setor 839

Para o caso de falta no setor 839, a [Tabela 35](#) ilustra os indivíduos finais obtidos nas simulações com e sem a presença dos Gds com maior repetição entre as 35 simulações. Verifica-se que tanto o ilhamento intencional quanto a presença de GD nos alimentadores adjacentes afetam positivamente os resultados encontrados, reduzindo a ENS de todos os níveis e o número de manobras.



Tabela 35: Resultados das simulações do Setor 839

	Sistema sem GD		Sistema com GD	
	1.a	1.b	2.a	2.b
<b>Indivíduos</b>				
<b>Ocorrência</b>	26 de 35	21 de 35	35 de 35	35 de 35
$ENS_A^*$	0	141,07	0	0
$ENS_I^*$	124,02	5,96	0	0
$ENS_B^*$	126,02	179,56	95,40	95,40
$ENS_S^*$	17.081,67	17.076,97	8.397,10	9.124,91
$\psi_M$	8	6	5	4
$\psi_R$	1	1	1	1
$PNS_A^{**}$	0	0	0	0
$PNS_I^{**}$	0	0	0	0
$PNS_B^{**}$	0	0	0	0
$PNS_S^{**}$	0	799,03	193,91	576,41

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

A sequência de chaveamento da solução que restaura completamente todos os setores no sistema original (1.a) é representada na [Tabela 36](#). Na [Tabela 36](#) as chaves 2299, 2241, 2304 e 1042 são responsáveis por isolar o setor 839 e as chaves 3431, 3730 e 867 são responsáveis pela reconexão dos setores restauráveis. Observa-se que o máximo carregamento do transformador ( $B$ ) é maior que o limite operacional e como este valor de carregamento não é aceitável para uma operação por um tempo maior é necessário uma transferência de carga entre alimentadores. Dessa forma, realizou-se um par de manobras para extinguir esta pequena sobrecarga (chaveamento 8).

A [Tabela 37](#) mostra a solução com menor ENS encontrada no sistema com GD. Neste caso observa-se novamente que as chaves 2299, 2241, 2304 e 1042 isolam o setor em falta. A chave 2333 é aberta automaticamente no momento da falta para isolar a microrrede e a chave 3894, é fictícia, que simboliza a troca de controle de PV para controlar a tensão e frequência da microrrede. Como dito anteriormente, essas chaves não são contabilizadas, pois uma é automática e a outra fictícia, mas são mostradas na sequência para conhecimento do operador e o mesmo é informado que não precisa manobrá-las. As chaves 3894, 1790 e 867 são fechadas para reconexão dos setores restauráveis. Nota-se que neste caso não é necessário transferência de carga para alívio de carregamento. Além disso, a  $ENS_I$  inicial é menor que a  $ENS_I$  do indivíduo 1.a presente na [Tabela 36](#). Conclui-se que mesmo restaurando todos os setores restauráveis na solução 1.a a ENS total é elevada comparada com a solução 2.a, além do maior número de manobras.

Tabela 36: Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 35 para o caso de falta no setor 839

Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Abrir</b>	2299	2241	2304	1042	-	-	-	947
<b>Fechar</b>	-	-	-	-	3431	3730	867	1787
$ENS_A^*$				0	0	0	0	0
$ENS_I^*$				0	0	0	0	124.02
$ENS_B^*$				227.06	118,26	118,26	118,26	126,02
$ENS_S^*$				19.427.12	11.649,77	11.024,97	10.610,60	17.081,67
$\psi_M$				4	5	6	7	8
$\psi_R$				0	0	0	0	1
$PNS_A^{**}$				0	0	0	0	0
$PNS_I^{**}$				0	0	0	0	0
$PNS_B^{**}$				56.76	0	0	0	0
$PNS_S^{**}$				4.856.78	799.03	382.50	0	0
$X(\%)$				0	64.42	64.42	64.42	87.7
$V(\%)$				0	2.1	3.15	3.98	3.98
$B(\%)$				48.24	65.61	105.52	105.52	99.64

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

### Falta no setor 919

Os indivíduos finais obtidos nas simulações encontram-se na Tabela 38 e para uma falta no setor 919 não há consumidores com prioridade desligados, como pode-se observar na Tabela 38. Observa-se que a diferença entre as ENS dos resultados são próximas, onde as soluções encontradas no sistema com GD possuem ENS menor, comparando os resultados com mesmo número de manobras. A microrrede formada pelos setores 938 e 939 é isolada no momento da falta.

A sequência de chaveamento dos resultados obtidos para os casos com 6 manobras no total estão presentes nas Tabelas 39 e 40. Nos dois casos as chaves necessárias para isolar o setor em falta são 2628, 1352, 277 e 1351 e as chaves para restabelecer os setores são 864 e 1790. Para o caso 2.a, a chave 2317 foi aberta automaticamente para isolar a microrrede e a chave 3894 é a chave fictícia para simbolizar a mudança de controle para v-f. Observa-se que nesta falta a microrrede causa uma mudança sutil na ENS e afeta o máximo carregamento da rede no caso 2.a.

Tabela 37: Informações da sequência de chaveamento da solução 2.b da [Tabela 35](#) para o caso de falta no setor 839

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Abrir</b>	2299	2241	2304	1042	2333	-	-	-
<b>Fechar</b>	-	-	-	-	-	3894	1790	867
<b><math>ENS_A^*</math></b>						0	0	0
<b><math>ENS_I^*</math></b>						0	0	0
<b><math>ENS_B^*</math></b>						227.06	95,40	95,40
<b><math>ENS_S^*</math></b>						18.536.64	9.124,91	8.397,10
<b><math>\psi_M</math></b>						4	4	5
<b><math>\psi_R</math></b>						0	1	1
<b><math>PNS_A^{**}</math></b>						0	0	0
<b><math>PNS_I^{**}</math></b>						0	0	0
<b><math>PNS_B^{**}</math></b>						56.76	0	0
<b><math>PNS_S^{**}</math></b>						4.634.16	576.41	193.91
<b><math>X(\%)</math></b>						4.16	91.12	91.12
<b><math>V(\%)</math></b>						0.01	7.3	7.3
<b><math>B(\%)</math></b>						74.21	99.72	99.72

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

### Falta no setor 1587

A falta no setor 1587 não afeta nenhuma região com GD. No entanto, verifica-se que a presença de Gds no sistema melhora os resultados encontrados, tendo agora a possibilidade de restauração completa, como mostra a [Tabela 41](#). Além disso, comparando as soluções que restabelecem a mesma quantidade de PNS final, 1.b e 2.c, nota-se que quando existem Gds no sistema a ENS e número de manobras são menores. Além disso, os resultados para o sistema com GD as ENSs total são menores. Nos indivíduos finais do sistema original é necessário transferência de carga, uma vez que, os carregamentos estão acima dos limites operacionais permitidos, como pode-se observar na [Tabela 42](#) no chaveamento 5, abertura da chave 2225 e fechamento da chave 3848. A sequência de chaveamento estão presentes nas tabelas [42](#) e [42](#), onde a abertura das chaves 1743, 1740, 1745 e 1744 isolam o setor em falta. As chaves 3586 e 2613 reconectam os setores restauráveis no caso 1.a e as chaves 3586, 3584 e 2172 no caso 2.a.

Tabela 38: Resultados das simulações do Setor 919

	Sistema sem GD		Sistema com GD	
Indivíduos	1.a	1.b	2.a	2.b
Ocorrência	35 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35
$ENS_S^*$	3.753,14	6.103,43	3.584,04	5.579,76
$\psi_M$	3	3	3	3
$\psi_R$	3	2	3	2
$PNS_S^{**}$	209,19	1.076,99	209,19	946,07

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 39: Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 38 para o caso de falta no setor 919

Ordem	1	2	3	4	5	6
Abrir	2628	1352	2770	1351	-	-
Fechar	-	-	-	-	864	1790
$ENS_S^*$				9.928.57	6.103,43	3.753,14
$\psi_M$				3	3	3
$\psi_R$				1	2	3
$PNS_S^{**}$				2.482.14	1.076.99	209.19
$X(\%)$				20.52	55.72	61.95
$V(\%)$				0.86	4.23	4.23
$B(\%)$				47.4	96.45	96.45

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

### Falta no setor 2532

A Tabela 44 apresenta as características dos indivíduos finais encontrados nas simulações realizadas. A falta no setor 2532 é um dos casos que passou a ser resolvido pela BE ao adicionar Gds no sistema. Além disso, a falta nesse setor acarreta no ilhamento intencional da microrrede formada pelos setores: 2567 e 2568. A Tabela 45 apresenta a sequência de chaveamento obtida no caso do indivíduo final 1.a, para esse indivíduo são necessárias quatro manobras para isolamento (chaves 501, 618, 617 e 488), uma manobra de abertura (chave 619) e três manobras de fechamento (chaves 3706, 3811 e 75), não é possível restauração completa. A sequência dos chaveamento da solução 2.a é apresentada na Tabela 46, onde quatro manobras são necessárias para isolar o sistema e três manobras

Tabela 40: Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da [Tabela 38](#) para o caso de falta no setor 919

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Abrir</b>	2628	1352	2770	1351	2317	-	-	-
<b>Fechar</b>	-	-	-	-	-	3894	864	1790
<b><math>ENS_S^*</math></b>						9.404.9	5.579,76	3.584,04
<b><math>\psi_M</math></b>						3	3	3
<b><math>\psi_R</math></b>						1	2	3
<b><math>PNS_S^{**}</math></b>						2.351.23	946.07	209.19
<b><math>X(\%)</math></b>						20.52	55.72	58.12
<b><math>V(\%)</math></b>						0.86	4.23	4.23
<b><math>B(\%)</math></b>						65.46	96.45	96.45

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

para restaurar todos os setores interrompidos, como mostra o indivíduo 2.a na [Tabela 46](#). Novamente, a chave (624) para isolar a microrrede não é contabilizada, pois acontece automaticamente devido ao dispositivo de proteção no PACs que ilha a microrrede na ocorrência da falta. Além da chave fictícia (3894) para simbolizar a mudança de controle na microrrede. Logo, conclui-se que a presença de GD afetou positivamente a solução encontrada.

### Tempo de execução

Para complementar a análise da metodologia proposta em um sistema real de grande porte, a [Tabela 47](#) sumariza os tempos médios da execução computacional obtidos nas simulações dos casos analisados. Os valores apresentados nesta tabela podem ser considerados adequados as necessidades do problema. Observa-se também que a adição de Gds não prejudicou o tempo de execução das simulações.

### 6.3 Considerações Finais

Os testes em diferentes SDs apresentados neste capítulo validam a metodologia proposta e mostram que o ilhamento intencional é vantajoso na grande maioria das situações. As vantagens do ilhamento intencional dependem do planejamento correto do SD, pois é necessário configurar adequadamente os dispositivos de proteção e, caso os Gds não estiverem alocados em setores adequados, os eventos de ilhamento podem ser impossíveis de ocorrer ou o restabelecimento dos setores restauráveis pode ser afetado. Além da importância da localização do Gd, como, por exemplo, caso o ilhamento intencional

Tabela 41: Resultados das simulações do Setor 1587

	Sistema sem GD			Sistema com GD		
<b>Indivíduos</b>	1.a	1.b	1.c	2.a	2.b	2.c
<b>Ocorrência</b>	35 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35	34 de 35	35 de 35
<b><math>ENS_A^*</math></b>	96,03	96,03	152,79	64,19	64,19	64,19
<b><math>ENS_I^*</math></b>	175,73	239,86	239,86	125,76	125,76	239,86
<b><math>ENS_B^*</math></b>	587,25	587,25	587,25	369,07	587,25	587,25
<b><math>ENS_S^*</math></b>	9.432,53	12.021,45	12.506,17	6.262,92	6.639,96	11.246,23
<b><math>\psi_M</math></b>	7	6	6	6	5	4
<b><math>\psi_R</math></b>	1	1	0	1	1	1
<b><math>PNS_A^{**}</math></b>	0	0	38,20	0	0	0
<b><math>PNS_I^{**}</math></b>	0	59,97	59,97	0	0	59,97
<b><math>PNS_B^{**}</math></b>	146,81	146,81	146,81	0	146,81	146,81
<b><math>PNS_S^{**}</math></b>	253,71	2.674,52	2.674,52	0	253,71	2.674,52

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

isolar setores sem possibilidade de restabelecimento por outros meios e não ser possível restaurá-los pela microrrede. Os resultados dos testes também indicaram vantagens, mesmo quando os Gds não estão localizadas em setores restauráveis, pois aliviam os alimentadores onde estão localizadas.

Tabela 42: Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da [Tabela 41](#) para o caso de falta no setor 1587

<b>Ordem</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Abrir</b>	1743	1740	1745	1744	2225	-	-
<b>Fechar</b>	-	-	-	-	3848	3586	2613
<b><math>ENS_A^*</math></b>				152.79	152.79	96,03	96,03
<b><math>ENS_I^*</math></b>				239.86	239.86	239.86	175,73
<b><math>ENS_B^*</math></b>				587.25	587.25	587.25	587.25
<b><math>ENS_S^*</math></b>				12.002.76	12.506.17	12.021,45	9.432,53
$\psi_M$				4	6	6	7
$\psi_R$				0	0	1	1
<b><math>PNS_A^{**}</math></b>				38.2	38.2	0	0
<b><math>PNS_I^{**}</math></b>				59.97	59.97	59.97	0
<b><math>PNS_B^{**}</math></b>				146.81	146.81	146.81	146.81
<b><math>PNS_S^{**}</math></b>				3.000.69	3.000.69	2.674.52	253.71
<b><math>X(\%)</math></b>				0	98.06	98.06	98.06
<b><math>V(\%)</math></b>				0	5.15	5.15	5.15
<b><math>B(\%)</math></b>				84.67	84.67	86.57	99.51

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 43: Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 41 para o caso de falta no setor 1587

Ordem	1	2	3	4	5	6	7
<b>Abrir</b>	1743	1740	1745	1744	-	-	-
<b>Fechar</b>	-	-	-	-	3586	3874	2172
$ENS_A^*$				152.79	64,19	64,19	64,19
$ENS_I^*$				239.86	239.86	125,76	125,76
$ENS_B^*$				587.25	587.25	587.25	369,07
$ENS_S^*$				12.002.76	11.246,23	6.639,96	6.262,92
$\psi_M$				4	4	5	6
$\psi_R$				0	1	1	1
$PNS_A^{**}$				38.2	0	0	0
$PNS_I^{**}$				59.97	59.97	0	0
$PNS_B^{**}$				146.81	146.81	146.81	0
$PNS_S^{**}$				3.000.69	2674.52	253.71	0
$X(\%)$				0	93.92	93.92	93.92
$V(\%)$				0	5.01	5.01	5.12
$B(\%)$				82.63	84.53	97.48	99.57

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora



Tabela 44: Resultados das simulações do Setor 2532

Indivíduo	Sistema sem GD			Sistema com GD
	1.a	1.b	1.c	2.a
Ocorrência	35 de 35	35 de 35	35 de 35	35 de 35
$ENS_A^*$	167,37	142,39	142,39	113,73
$ENS_I^*$	412,96	820,74	912,05	314,57
$ENS_B^*$	53,00	125,12	125,12	39,97
$ENS_S^*$	12.522,23	16.387,42	21.008,10	6.508,78
$\psi_M$	6	4	4	5
$\psi_R$	2	3	1	2
$PNS_A^{**}$	0	10,83	10,83	0
$PNS_I^{**}$	0	188,17	228,01	0
$PNS_B^{**}$	0	31,28	31,28	0
$PNS_S^{**}$	1.354,03	3.138,65	5.154,95	0

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 45: Informações da sequência de chaveamento da solução 1.a da Tabela 44 para o caso de falta no setor 2532

Ordem de chaveamento	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Abrir</b>	501	618	617	488	619	-	-	-
<b>Fechar</b>	-	-	-	-	-	3706	3811	75
$ENS_A^*$				279,13	279,13	254,16	254,16	167,37
$ENS_I^*$				912,05	912,05	533,56	412,96	412,96
$ENS_B^*$				125,12	125,12	53,00	53,00	53,00
$ENS_S^*$				21.544,01	21.544,01	13.232,41	12.862,39	12.522,23
$\psi_M$				3	4	4	5	6
$\psi_R$				1	1	2	2	2
$PNS_A^{**}$				69,78	69,78	58,95	58,95	0
$PNS_I^{**}$				228,01	228,01	63,85	0	0
$PNS_B^{**}$				31,28	31,28	0	0	0
$PNS_S^{**}$				5.386,00	5.386,00	1.780,97	1.585,08	1.354,03
$X(\%)$				5,29	5,29	95,48	95,48	95,48
$V(\%)$				0,08	0,08	6,81	6,81	6,81
$B(\%)$				81,62	81,62	81,62	82,30	83,06

\*em ( $kWh_{3\phi}$ );\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 46: Informações da sequência de chaveamento da solução 2.a da Tabela 44 para o caso de falta no setor 2532

Ordem de chaveamento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Abrir</b>	501	618	617	488	624	-	-	-	-
<b>Fechar</b>	-	-	-	-	-	3894	3706	75	3811
$ENS_A^*$						279.13	249,65	113,73	113,73
$ENS_I^*$						818.17	435,17	435,17	314,57
$ENS_B^*$						125.12	39,97	39,97	39,97
$ENS_S^*$						19.562.92	7.411,50	6.878,81	6.508,78
$\psi_M$						3	3	4	5
$\psi_R$						1	2	2	2
$PNS_A^{**}$						69.78	58.95	0	0
$PNS_I^{**}$						204.54	63.85	63.85	0
$PNS_B^{**}$						31.28	0	0	0
$PNS_S^{**}$						4.890.73	426.94	195.9	0
$X(\%)$						12.45	97.97	97.97	97.97
$V(\%)$						0.12	6.96	6.96	6.96
$B(\%)$						81.62	81.62	82.38	83.06

\*em ( $kWh_{3\phi}$ ),\*\*em ( $kW_{3\phi}$ ).  
 Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 47: Tempos médios de simulações em segundos para o sistema de Londrina

Setor em falta	Sistema sem GD	Sistema com GD
<b>749</b>	63,45	56,98
<b>839</b>	91,37	96,86
<b>919</b>	34,54	25,12
<b>1587</b>	34,83	37,89
<b>2532</b>	110,4	0,49

Fonte: Elaborado pela autora



## 7 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais e trabalhos futuros para continuidade desta pesquisa. Destacar-se-ão também os artigos publicados e submetidos decorrentes da pesquisa desenvolvida.

### 7.1 Conclusões

Nesta dissertação foi desenvolvida uma metodologia para tratamento do problema de restabelecimento de energia em SDs considerando a presença de Geração Distribuída. A metodologia base utilizada considera diversas características práticas do problema em pauta, apta a lidar com redes reais de grande porte exigindo baixo tempo computacional, no entanto, não considera a presença de Geração Distribuída.

Para obtenção da metodologia proposta a partir da metodologia base, foi implementado um fluxo de potência de varredura direta/inversa, considerando a modelagem de geradores distribuídos capaz de lidar com os modos de controle PV constante e PQ constante. Desenvolveu-se, também, procedimentos para obtenção de uma metodologia permitindo a análise do problema independentemente da localização dos Gds, podendo ocorrer ou não o chamado ilhamento intencional de microrredes. Lembrando que a possibilidade de ilhamento intencional ocorrerá por meio de chaveamento automático de dispositivos de proteção responsáveis por ilhar as microrredes em até dois segundos após a ocorrência de faltas permanentes (IEEE, 2018). A metodologia desenvolvida permite ainda que as microrredes isoladas restabeleçam cargas de outros setores restauráveis vizinhos que ficaram sem fornecimento de energia, desde que os limites de variação de potência ativa sejam respeitados. Entretanto, a metodologia não permite a transferência de microrredes conectadas (setores que possuem geração distribuída que não foram afetados pela falta) entre alimentadores, para alívio de carga, uma vez que, essa transferência causaria o desligamento do gerador distribuído presente neste setor.

Os resultados das diversas simulações computacionais realizadas em sistemas teste da literatura, bem como em um sistema real de grande porte, alguns dos quais apresentados neste documento, comprovaram a eficácia da metodologia proposta. Vale destacar ainda que esses testes mostraram que na grande maioria das situações de faltas permanentes avaliadas o ilhamento intencional corrobora com a obtenção de planos de restabelecimentos de energia mais adequados (considerando soluções de compromisso entre energia não suprida e número de manobras). Entretanto, importa lembrar que o ilhamento intencional depende de um planejamento correto do sistema de distribuição, porque é necessário configurar adequadamente os dispositivos de proteção e avaliar a localização do Gd para o ilhamento intencional não isolar setores sem possibilidade de restauração por outros meios

e ser ineficaz reenergizá-los pela microrrede.

Vale ressaltar ainda que os resultados obtidos também indicaram vantagens, mesmo quando os setores com geradores não foram desligados em função do isolamento dos setores em falta, visto que nessas situações esses geradores aliviam os alimentadores onde estão localizados, aumentando a possibilidade de restauração de setores saudáveis que foram desligados, reduzindo assim a energia não suprida. Em especial, os testes realizados no sistema real de grande porte comprovam essa observação, tendo em vista que a metade desses testes foi solucionada através do processo evolutivo na metodologia base e passaram a ser resolvidos pela busca exaustiva na metodologia proposta. Essa mudança ocorre em razão de as condições operacionais no pré-falta do sistema de Londrina ultrapassarem os limites estabelecidos. Logo, em alguns casos não é factível reconectar todos os setores restauráveis sem ocorrer uma transferência de cargas entre alimentadores. Desse modo, a presença de geradores distribuídos no sistema aumenta o número de soluções simples (soluções exigindo apenas manobras em chaves NA do Tier 1), sem a necessidade de transferência de cargas entre alimentadores para respeitar as restrições operacionais. Além do mais, a busca exaustiva encontra soluções com tempo computacional bem reduzido, uma vez que os planos de restabelecimento da busca exaustiva consistem em manobras em chaves NAs incidentes aos setores restauráveis reduzindo o número de indivíduos possíveis.

Face ao exposto, os testes realizados validaram a metodologia desenvolvida neste trabalho e demonstraram que a GD e a possibilidade de ilhamento intencional corroboram para obtenção de planos de restabelecimentos de energia adequados, isto em razão (i) da redução da energia não suprida, pois o setor com Gd ilhado não fica sem energia em momento algum após a identificação e isolamento dos setores em falta, e (ii) do alívio do carregamento de alimentadores onde os Gds estão localizados, mesmo quando não são afetados pela falta, aumentando as possibilidades de restabelecimento por esses alimentadores.

## 7.2 Trabalhos Futuros

Algumas perspectivas de trabalhos futuros são as seguintes:

- Analisar a possibilidade da ocorrência ou não da formação do ilhamento intencional das microrredes na região afetada pela falta;
- Executar o processo evolutivo independentemente de a Busca Exaustiva encontrar alguma solução factível. Isto em razão da possibilidade de o processo evolutivo encontrar uma solução melhor que a encontrada pela Busca Exaustiva. Um exemplo desse tipo de situação é quando a Busca Exaustiva encontra uma solução exigindo a operação de uma única chave manual, mas o processo evolutivo encontra uma solução exigindo a manobra em duas chaves remotas;

- Validar a metodologia para casos de faltas múltiplas;
- Estudos para verificar o impacto da dinâmica das redes elétricas no processo de restabelecimento de energia em SDs com Gds;
- Adicionar a modelagem trifásica do sistema, para considerar casos onde possam incluir o sistema de transmissão;
- Considerar a formulação proposta por [Camillo \(2020\)](#), que faz uso do chamado DEC' e do número de consumidores fora de serviço, para evitar a necessidade de utilização de um valor pré-determinado para o tempo de manutenção do setor em falta;
- Inclusão do tempo de deslocamento das equipes de manutenção na modelagem do problema.

### 7.3 Publicações

Destacam-se, a seguir, as publicações realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho relacionadas ao tema de pesquisa em pauta:

1. FERNANDES, J. P. R.; **CARVALHO, E. O. P.**; MARQUES, L. T.; LONDON Jr., J. B. A. Restabelecimento de Energia com Busca Local na Região de Falta e Possibilidade de Corte de Cargas. In: **14<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**, 2019.
2. **CARVALHO, E. O. P.**; FERNANDES, J. P. R.; MARQUES, L. T.; LONDON Jr., J. B. A. Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Service Restoration in the Presence of Distributed Generation. In: **VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, 2020.





## REFERÊNCIAS

ANEEL. Módulo 8-Qualidade da Energia Elétrica Revisão Motivo da Revisão Instrumento de aprovação pela ANEEL Data de vigência. 2018.

ARIF, A. et al. Power Distribution System Outage Management with Co-Optimization of Repairs, Reconfiguration, and DG Dispatch. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 5, p. 4109–4118, 2018. ISSN 19493053.

BENAYOUN, R.; MONTGOLFIER, J. de; TERGNY, J. Linear programming with multiple objective functions: Step method (stem). **Mathematical Programming**, v. 1, n. 1, p. 366–375, 1971.

CAMILLO, M. H. et al. Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 134, p. 1–8, May 2016. ISSN 0378-7796.

CAMILLO, M. H. M. **Otimização multiobjetivo para tratamento de diversas etapas do processo de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição reais**. Fev 2020. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Fev 2020.

CARRANO, E. G. et al. Subpermutation-Based Evolutionary Multiobjective Algorithm for Load Restoration in Power Distribution Networks. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 20, n. 4, p. 546–562, Aug 2016. ISSN 1089778X.

CHEN, B. et al. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 9, n. 6, p. 6793–6805, Nov 2018. ISSN 19493053.

\_\_\_\_\_. Sequential service restoration for unbalanced distribution systems and microgrids. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 33, n. 2, p. 1507–1520, March 2018. ISSN 1558-0679.

\_\_\_\_\_. Toward a milp modeling framework for distribution system restoration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 34, n. 3, p. 1749–1760, 2019.

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

CHEN, K. et al. Robust restoration decision-making model for distribution networks based on information gap decision theory. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 2, p. 587–597, March 2015. ISSN 1949-3053.

CHENG, C. S.; SHIRMOHAINMADI, D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 2, p. 671–679, May 1995. ISSN 0885-8950.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**. 2. ed. [S.l.]: Springer US, 2007.

DAS, D. Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 28, n. 5, p. 331 – 338, 2006. ISSN 0142-0615.

DEB, K. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**. New York, NY, USA: John Wiley and Sons, Inc., 2001. ISBN 047187339X.

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

DELBEM, A. C. B. et al. Node-Depth Encoding for Evolutionary Algorithms Applied to Network Design. In: . [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2004. p. 678–687.

DIMITRIJEVIC, S.; RAJAKOVIC, N. Service restoration of distribution networks considering switching operation costs and actual status of the switching equipment. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 3, p. 1227–1232, May 2015. ISSN 1949-3053.

FARIA, W. R. et al. Intentional island and dynamic analysis of a microgrid. In: **2019 IEEE Milan PowerTech**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

FARROKHABADI, M. et al. Microgrid stability definitions, analysis, and examples. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 35, n. 1, p. 13–29, 2020.

FERNANDES, J. P. R. **Restabelecimento de Energia com Corte Seletivo de Carga e Busca Local**. Julho 2019. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Julho 2019.

FERNANDES, J. P. R. et al. Considerando a Existência De Geradores Distribuídos Para Solução Do Problema De Restabelecimento De Energia. In: **XXII Congresso Brasileiro de Automática**. [S.l.: s.n.], 2018.

FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. **Evolutionary Computation**, v. 3, n. 1, p. 1–16, March 1995. ISSN 1063-6560.

FREITAS, W. et al. Influence of excitation system control modes on the allowable penetration level of distributed synchronous generators. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 20, n. 2, p. 474–480, June 2005. ISSN 0885-8969.

GANDOMI, A. et al. **Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures**. [S.l.]: Elsevier Science, 2013. ISBN 9780123983794.

HAFEZ, A. A.; OMRAN, W. A.; HEGAZY, Y. G. A Decentralized Technique for Autonomous Service Restoration in Active Radial Distribution Networks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2018. ISSN 19493053.

HOOSHYAR, A.; IRAVANI, R. Microgrid protection. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 7, p. 1332–1353, July 2017. ISSN 0018-9219.

HUANG, X.; YANG, Y.; TAYLOR, G. A. Service restoration of distribution systems under distributed generation scenarios. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, v. 2, n. 3, p. 43–50, Sep. 2016. ISSN 2096-0042.

IEEE. **IEEE Standard Definitions in Power Operations Terminology**. [S.l.], 1993.

\_\_\_\_\_. **IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces**. [S.l.], 2018. 1-138 p.

KUMAR, Y.; DAS, B.; SHARMA, J. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 1, p. 261–270, Jan 2008. ISSN 0885-8977.

LASSETER, R. H. Smart distribution: Coupled microgrids. **Proceedings of the IEEE**, v. 99, n. 6, p. 1074–1082, June 2011. ISSN 0018-9219.

LEITE, J. B.; MANTOVANI, J. R. S. Development of a self-healing strategy with multiagent systems for distribution networks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 5, p. 2198–2206, Sep. 2017. ISSN 1949-3053.

LI, W. et al. A full decentralized multi-agent service restoration for distribution network with dgs. **IEEE Transactions on Smart Grid**, p. 1–1, 2019. ISSN 1949-3053.

LIMA, R. L. **Metodologias para Determinar a Viabilidade Técnica do Ilhamento Intencional de Geradores Distribuídos Em Sistemas de Distribuição De Energia Elétrica**. 2018. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018.

LIN, C. H. et al. A multiagent-based distribution automation system for service restoration of fault contingencies. **European Transactions on Electrical Power**, 2011. ISSN 1430144X.

LINARES, P.; REY, L. The costs of electricity interruptions in spain. are we sending the right signals? **Energy Policy**, v. 61, p. 751 – 760, 2013. ISSN 0301-4215.

LO, Y. L.; WANG, C. H.; LU, C. N. A multi-agent based service restoration in distribution network with distributed generations. In: **2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5.

LOPEZ, J. C. et al. Optimal restoration/maintenance switching sequence of unbalanced three-phase distribution systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 6, p. 6058–6068, 2018. ISSN 19493053.

MARQUES, L. T. **Restabelecimento de energia por reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de grande porte com priorização de chaves, consumidores e definição de sequência de chaveamento**. Aug 2013. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Aug 2013.

MARQUES, L. T. **Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando aspectos práticos**. Aug 2018. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Aug 2018.

MARQUES, L. T. et al. A new multi-objective evolutionary algorithm for service restoration: Non-dominated sorting genetic algorithm-ii in subpopulation tables. In: **2017 IEEE Manchester PowerTech**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

MARQUES, L. T.; DELBEM, A. C. B.; LONDON, J. B. A. Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 3, p. 2359–2370, May 2018. ISSN 1949-3053.

MARQUES, L. T. et al. Análise da Influência da Geração Distribuída no Problema de Restabelecimento de Energia. In: **XX Congresso Brasileiro de Automática**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 3870–3876.

MARQUEZ, R. A. C. **Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de energia elétrica com priorização de chaves automáticas**. 2014. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014.

MARTINS, G. F. A. **Processo automático de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição modelado através de sistemas multiagentes**. 2019. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2019.

MASSIGNAN, J. A. D.; PEREIRA, B. R.; LONDON, J. B. A. Load flow calculation with voltage regulators bidirectional mode and distributed generation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 32, n. 2, p. 1576–1577, March 2017. ISSN 0885-8950.

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

MOGHADDAS-TAFRESHI, S.; MASHHOUR, E. Distributed generation modeling for power flow studies and a three-phase unbalanced power flow solution for radial distribution systems considering distributed generation. **Electric Power Systems Research**, v. 79, n. 4, p. 680 – 686, 2009. ISSN 0378-7796.

MORI, H. Recent trends of meta-heuristics applications in power systems. In: **IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.99CH37028)**. [S.l.: s.n.], 1999. v. 6, p. 492–496 vol.6. ISSN 1062-922X.

PARHIZI, S. et al. State of the art in research on microgrids: A review. **IEEE Access**, v. 3, p. 890–925, 2015. ISSN 2169-3536.

PERALTA, R. A. V.; LEITE, J. B.; MANTOVANI, J. R. S. Automatic restoration of large-scale distribution networks with distributed generators, voltage control devices and heating loads. **Electric Power Systems Research**, v. 176, p. 105925, 2019. ISSN 0378-7796.

PEREIRA, B. R. et al. Service Restoration in Distribution Systems with Distributed Generators Using Tabu Search. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1332–1343.

PRABAWA, P.; CHOI, D. Multi-agent framework for service restoration in distribution systems with distributed generators and static/mobile energy storage systems. **IEEE Access**, v. 8, p. 51736–51752, 2020.

ROMERO, R. et al. A New Mathematical Model for the Restoration Problem in Balanced Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 31, n. 2, p. 1259–1268, 2016. ISSN 08858950.

SANCHES, D. S. et al. Multiobjective evolutionary algorithm with a discrete differential mutation operator developed for service restoration in distribution systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 62, p. 700 – 711, 2014. ISSN 0142-0615.

SANTOS, A. C. et al. Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 3, p. 1254–1265, 2010. ISSN 08858950.

\_\_\_\_\_. A Power Flow Method Computationally Efficient for Large-Scale Distribution Systems. In: **2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America**. [S.l.]: IEEE, 2008. p. 1–6. ISBN 9781424422180.

SANTOS, A. C. dos. **Algoritmo evolutivo computacionalmente eficiente para reconfiguração de sistemas de distribuição**. apr 2009. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, apr 2009.

SCHNEIDER, K. P. et al. Evaluating the Feasibility to Use Microgrids as a Resiliency Resource. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 8, n. 2, p. 687–696, 2017. ISSN 19493053.

SHARMA, A.; SRINIVASAN, D.; TRIVEDI, A. A Decentralized Multiagent System Approach for Service Restoration Using DG Islanding. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 6, n. 6, p. 2784–2793, 2015. ISSN 19493053.

SHEN, F. et al. Review of service restoration methods in distribution networks. In: **2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.

\_\_\_\_\_. Hierarchical service restoration scheme for active distribution networks based on adm. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 118, p. 105809, 2020. ISSN 0142-0615.

SHIRAZI, E.; JADID, S. A multiagent design for self-healing in electric power distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 171, p. 230 – 239, 2019. ISSN 0378-7796.

SHIRMOHAMMADI, D. et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988. ISSN 15580679.

SUN, K. et al. Black-start capability assessment and optimization. In: \_\_\_\_\_. **Power System Control Under Cascading Failures: Understanding, Mitigation, and System Restoration**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 399–432.

TON, D. T.; WANG, W. T. P. A more resilient grid: The U.S. Department of Energy joins with stakeholders in an R&D plan. **IEEE Power and Energy Magazine**, IEEE, v. 13, n. 3, p. 26–34, May 2015. ISSN 15407977.

VARGAS, R. et al. Automatic restoration of active distribution networks based on tabu search specialized algorithm. In: **2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 411–416.

VELDHUIZEN, D. A. V.; LAMONT, G. B. **Multiobjective Evolutionary Algorithm Research: A History and Analysis**. 1998.

WANG, F. et al. A multi-stage restoration method for medium-voltage distribution system with DGs. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 6, p. 2627–2636, Nov 2017. ISSN 19493053.

WANG, Y. et al. Coordinating Multiple Sources for Service Restoration to Enhance Resilience of Distribution Systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 3053, n. c, p. 1–13, 2019.

XAVIER, J. Protection control strategy for effectively interconnecting and islanding distributed energy resources during grid disturbances. In: **2019 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–10.

XIAOYU, H.; MINGCHAO, X.; YINGHUI, H. A service restoration method for active distribution network. **Energy Procedia**, v. 61, p. 339 – 344, 2014. ISSN 1876-6102. International Conference on Applied Energy, ICAE2014.

XU, Y. et al. Microgrids for service restoration to critical load in a resilient distribution system. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 1, p. 426–437, 2018. ISSN 19493053.

ZIDAN, A.; EL-SAADANY, E. F. A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 3, p. 1525–1539, Sep. 2012. ISSN 1949-3053.

ZIDAN, A. et al. Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: State-of-the-art and future trends. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 5, p. 2170–2185, Sep. 2017. ISSN 1949-3053.