

JOÃO PAULO MARQUES TAVARES

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA
RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA SUJEITAS A CONDIÇÕES
AMBIENTAIS ADVERSAS**

JOÃO PAULO MARQUES TAVARES

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA
RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA SUJEITAS A CONDIÇÕES
AMBIENTAIS ADVERSAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani

Orientador

Dr. Renzo Amilcar Vargas Peralta

Co-orientador

ILHA SOLTEIRA - SP

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T231d Tavares, João Paulo Marques.
Desenvolvimento de metodologia para restauração de redes de distribuição de energia elétrica sujeitas a condições ambientais adversas / João Paulo Marques Tavares. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
105 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2021

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani

Coorientador: Renzo Amilcar Vargas Peralta

Inclui bibliografia

1. Restauração de redes de distribuição de energia. 2. Recursos energéticos distribuídos. 3. Microrredes. 4. Programação matemática. 5. Meta-heurísticas. 6. Métodos de otimização híbridos.


Raiane da Silva Santos

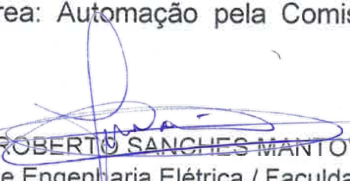
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Desenvolvimento de uma Metodologia para Restauração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Sujeitas a Condições Ambientais Adversas

AUTOR: JOAO PAULO MARQUES TAVARES

ORIENTADOR: JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO (Participação Virtual),
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. MARCELO ESCOBAR DE OLIVEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Áreas Acadêmicas / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia e Goiás - IFG

Ilha Solteira, 25 de março de 2021

Agradecimentos

À Deus, pela força e inspiração ao longo dessa etapa.

À minha mãe, Edna Márcia Tavares, cuja dedicação, força e amor, me motivam a lutar e perseverar. Ao meu pai, Nilton Marques, e à minha vizinha, Vera Lúcia, pelo apoio e carinho.

Ao Prof. José Roberto Sanches Mantovani, pela confiança, orientação e ensinamentos durante o desenvolvimento desse trabalho. Ao Dr. Renzo Amilcar Vargas Peralta e ao Dr. Juan Manuel Home Ortiz pelo auxílio, colaboração e sugestões, que muito contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos Prof. Rubén Augusto Romero Lázaro, Dr. Diogo Rupolo e Prof. Marcelo Escobar de Oliveira pelas sugestões e comentários, que contribuíram na melhoria desse trabalho.

Aos colegas do LaPSEE, que me acolheram e contribuíram para que concluísse essa etapa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – projetos nº 2015/21972-6 e nº 2019/03331-4 – e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 pelo suporte financeiro.

Resumo

Em condições ambientais adversas, os sistemas de distribuição de energia ficam mais suscetíveis à contingências severas. Nestes cenários, torna-se necessário uma intervenção rápida e precisa, para restaurar o fornecimento de energia aos consumidores afetados enquanto as equipes especializadas realizam a manutenção do sistema. Nesse contexto, o objetivo do trabalho é desenvolver uma metodologia capaz de elaborar um plano de ação para restauração de redes de distribuição, considerando a presença de geradores distribuídos, sistemas de armazenamento de energia, programas de resposta à demanda e a formação de microrredes flexíveis na operação do estado restaurativo. Para alcançar esse objetivo, a rede de distribuição e os equipamentos nela inseridos são modelados através de um fluxo de potência ótimo, que visa reduzir o custo de operação do sistema operando no estado restaurativo. Desse modo, é possível avaliar os impactos e a factibilidade das ações de controle a serem executadas no processo de restauração. Com o intuito de determinar o conjunto de operações capazes de otimizar a operação no estado restaurativo, a metodologia proposta divide o processo de elaboração do plano em dois estágios de solução. No primeiro estágio de solução, determina-se a topologia de operação no estado restaurativo utilizando uma meta-heurística de busca de vizinhança variável (VNS – do inglês, *variable neighbourhood search*). Na etapa de busca do algoritmo VNS, utiliza-se uma abordagem que combina os procedimentos de busca, inerentes aos algoritmos VNS, e técnicas de otimização clássica, possibilitando determinar, ainda no primeiro estágio, o conjunto de operações ótimas de controle dos equipamentos operando no estado restaurativo. No segundo estágio de solução, determina-se a sequência de operações que conduzem a rede da topologia pós-falta à topologia de operação no estado restaurativo, estabelecida no primeiro estágio de solução. O segundo estágio é solucionado por meio de uma heurística cujas adaptações, realizadas neste trabalho, possibilitam a formação gradual de microrredes. A metodologia implementada computacionalmente é avaliada em diferentes cenários para os sistemas testes de 33 e 136 barras, que são disponibilizados na literatura. Os resultados evidenciam a capacidade da metodologia proposta em fornecer um plano de ações factível e capaz de otimizar a operação da rede no estado restaurativo, considerando a presença de recursos energéticos distribuídos e a formação dinâmica de microrredes.

Palavras-chave: Restauração de redes de distribuição de energia. Recursos energéticos distribuídos. Microrredes. Programação matemática. Meta-heurísticas. Métodos de otimização híbridos.

Abstract

In adverse environmental conditions, the power distribution systems are susceptible to severe contingencies. In these conditions, an outage scenario must be treated quickly and accurately to restore the power supply while the crews repair the network. In this context, this work proposes a network restoration method that taking into account in the model the presence of distributed generators, energy storage systems, demand response programs, and the formation of dynamic microgrids. The distribution network and the equipment are modeled through an optimum power flow, which aims to reduce the operational cost of the distribution system in the restorative state. In this way, it is possible to assess the impacts and feasibility of the control actions to be carried out in the restoration process. To determine the set of control actions that optimize the network in restorative state, the proposed methodology divides the solution process into two stages. In the first solution stage, the topology of operation in the restorative state is determined using a variable neighborhood search meta-heuristic (VNS). In the search stage of the VNS algorithm is used a matheuristic approach, making it possible to determine the set of optimal control actions of the equipment operating in the restorative state. The switching sequence that lead the network from the post-fault topology to the restorative state topology, established in the first solution stage, is determined in the second solution stage, that solved by a heuristic that allows the gradual formation of the microgrids. The implemented methodology is evaluated in different scenarios for the 33-nodes and 136-nodes test feeders, available in the literature. The results show the capacity of the proposed methodology to provide a feasible restoration solution that can optimize the operation of the network, considering the presence of distributed energy resources and the dynamic formation of microgrids.

Keywords: Network restoration. Distributed energy resources. Microgrids. Mathematical programming. Metaheuristics. Hybrid optimization methods.

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BVNS	<i>Basic Variable Neighbourhood Search</i>
CAO	<i>Change Ancestor Operator</i>
DER	<i>Distributed Energy Resources</i>
FPO	Fluxo de potência ótimo
FLISR	<i>Fault Location, Isolation and Service Restoration</i>
GD	Geração distribuída
GVNS	<i>General Variable Neighbourhood Search</i>
ESS	<i>Energy Storage Systems</i>
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes
LKT	Lei de Kirchhoff das Tensões
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
PAO	<i>Preserve Ancestor Operator</i>
PCSOIM	Programação Cônica de Segunda Ordem Inteira Mista
PRD	Programa de Resposta da Demanda
PRSDEE	Problema de Restauração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
RNP	Representação Nó-Profundidade
RNPm	Representação Nó-Profundidade Modificada
RVNS	<i>Reduced Variable Neighbourhood Search</i>
VND	<i>Variable Neighbourhood Descent</i>
VNS	<i>Variable Neighbourhood Search</i>

Lista de símbolos

Conjuntos

$\mathcal{T}$	instantes de tempo do horizonte de planejamento.
$\mathcal{B}$	Barras do sistema.
$\mathcal{R}$	Ramos do sistema.
$\mathcal{R}^{sw}; \mathcal{R}^{nsw}$	Ramos com e sem chaves de manobras, respectivamente.
$\mathcal{D}; \mathcal{D}_i$	Dispositivos <i>shunt</i> e dispositivos conectados à barra i , respectivamente.
$\mathcal{D}^{src}; \mathcal{D}_i^{src}$	Subestações e subestações ligadas à barra i , respectivamente.
$\mathcal{D}^{ld}; \mathcal{D}_i^{ld}$	Cargas e cargas conectadas à barra i , respectivamente.
$\mathcal{D}^{ld,cmv}; \mathcal{D}^{ld,PRD}$	Cargas convencionais e do PRD, respectivamente.
$\mathcal{D}^{ess}$	Elementos armazenadores de energia.
$\mathcal{D}^{ddg}; \mathcal{D}^{ddg,bs}$	Geradores despacháveis e geradores despacháveis com capacidade de BS, respectivamente.
$\mathcal{D}^{ndg}$	Geradores não despacháveis.
X^b	Conjunto das barras modificáveis.
X^{sw}	Conjunto das chaves seccionadoras modificáveis.
$X^{ddg,bs}$	Conjuntos dos geradores despacháveis com capacidade BS modificáveis.

Variáveis Contínuas

$U_{i,t}$	Magnitude de tensão quadrática da barra i no instante t .
$L_{ik,t}$	Magnitude de corrente quadrática do ramo ik no instante t .
$P_{ik,t}; Q_{ik,t}$	Potências ativa e reativa, respectivamente, do ramo ik no instante t .
$P_{d,t}^{dev}; Q_{d,t}^{dev}$	Potências ativa e reativa injetadas, respectivamente, pelo dispositivo <i>shunt</i> d , no instante t .
$P_{d,t}^{src}; Q_{d,t}^{src}$	Potências ativa e reativa injetadas, respectivamente, pela subestação d no instante t .

$\underline{\Delta U}_{i,t}; \overline{\Delta U}_{i,t}$	Desvios inferior e superior, respectivamente, de tensão da barra i no instante t .
$\overline{\Delta L}_{ik,t}$	Desvio superior de corrente no ramo ik no instante t .
$E_{d,t}^{ess}$	Energia armazenada no ESS d no instante t .
$P_{d,t}^{ess}$	Potência ativa injetada pelo ESS d no instante t .
$P_{d,t}^{ddg}; Q_{d,t}^{ddg}$	Potências ativa e reativa injetadas, respectivamente, pelo gerador despachável d no instante t .
$P_{d,t}^{ndg}; Q_{d,t}^{ndg}$	Potências ativa e reativa injetadas, respectivamente, pelo gerador não despachável d no instante t .

Variáveis Binárias

y_{ik}^{sw}	Estado da chave de manobra instalada na linha ik (0 aberta, 1 fechada).
y_i^b	Estado da barra i (0 desenergizada, 1 energizada).
$y_{d,t}^{ld}$	Estado da carga d no instante t (0 desligada, 1 ligada).
y_d^{ess}	Estado do ESS d (0 desligado, 1 ligado).
y_d^{ddg}	Estado do gerador despachável d (0 desligado, 1 ligado).
$x_d^{ddg,conv}$	Modo de operação convencional do gerador despachável d com capacidade de BS (0 inativo, 1 ativo).
$x_d^{ddg,bs}$	Modo de operação de controle de tensão do gerador despachável d com capacidade de BS (0 inativo, 1 ativo).
y_d^{ndg}	Estado do gerador não despachável d (0 desligado, 1 ligado).
$n_{d,t}^{-,PRD}, n_{d,t}^{+,PRD}$	Variáveis auxiliares para detecção de comutação da chave de controle da carga d , pertencente ao PRD, no instante t .
$n_{ik}^{-,sw}, n_{ik}^{+,sw}$	Variáveis auxiliares para detecção de comutação da chave de manobra do ramo ik .

Parâmetros

Δt	Tempo de discretização do período de operação.
M	Número positivo de grande valor (<i>Big-M</i>).
$Z_{ik}; R_{ik}; X_{ik}$	Impedância, resistência e reatância indutiva da linha ik , respectivamente.

$\bar{I}_{ik}$	Magnitude de corrente máxima do ramo ik .
$y_{ik,0}^{sw}$	Estado inicial da chave de manobra do ramo ik .
$\underline{V}_i; \bar{V}_i$	Magnitude de tensão, mínima e máxima, respectivamente, especificadas para a barra i .
V_d^{src}	Tensão nominal da subestação d .
$P_{d,t}^{ld}, Q_{d,t}^{ld}$	Potências ativa e reativa demandadas pela carga d no instante t .
$\bar{n}_d^{ld,PRD}$	Número máximo de operações de chaveamento da carga d , participante do PRD.
β_d^{ess}	Taxa de auto descarga do ESS d .
η_d^{ess}	Eficiência de carga e descarga do ESS d .
$\underline{E}_d^{ess}, \bar{E}_d^{ess}$	Capacidade de armazenamento de mínima e máxima, respectivamente, de energia do ESS d .
$\underline{P}_d^{ess}, \bar{P}_d^{ess}$	Potência ativa mínima e máxima, respectivamente, injetada pelo ESS d .
$\underline{\alpha}_d^{ess}, \bar{\alpha}_d^{ess}$	Taxa de variação mínima e máxima, respectivamente, da potência injetada pelo ESS d .
$\underline{P}_d^{ddg}, \bar{P}_d^{ddg}$	Potência ativa mínima e máxima, respectivamente, injetada pelo gerador despachável d .
$\underline{Q}_d^{ddg}, \bar{Q}_d^{ddg}$	Potência reativa mínima e máxima, respectivamente, injetada pelo gerador despachável d .
$\bar{S}_d^{ddg}$	Potência aparente máxima injetada pelo gerador despachável d .
$\underline{\alpha}_d^{ddg}, \bar{\alpha}_d^{ddg}$	Taxa de variação mínima e máxima, respectivamente, da potência ativa injetada pelo gerador despachável d .
V_d^{ddg}	Tensão nominal do gerador despachável d .
$\bar{P}_{d,t}^{ndg}$	Potência ativa máxima injetada pelo gerador não despachável d no instante t .
$\underline{pf}_d^{ndg}, \bar{pf}_d^{ndg}$	Fator de potência mínimo e máximo, respectivamente, do gerador não despachável d .
$\bar{S}_d^{ndg}$	Potência aparente máxima injetada pelo gerador não despachável d .
C_d^{NFE}	Custo da energia não suprida à carga d .

A_d^{NFE}	Custos adicionais devido ao não fornecimento de energia à carga d .
C_{ik}^{sw}	Custo da operação da chave de manobra ik .
$C_d^{ld,PRD}$	Custo da operação de chaveamento da carga d , pertencente ao PRD.
C_d^{ddg}	Custo da energia gerada pelo gerador despachável d .
C_d^{ndg}	Custo da energia gerada pelo gerador não despachável d .
C^L	Custo das perdas técnicas durante o período de operação.
K_{pen}	Fator de penalização das restrições operacionais.

Componentes da função objetivo

CT_{NFE}	Custo de interrupção.
CT_{SWO}	Custo das operações de chaveamentos.
CT_{DG}	Custo da geração distribuída.
CT_L	Custo das perdas de energia.
CP_{VO}	Componente de penalização devido às violações das restrições operacionais.

Lista de algoritmos

Algoritmo 1 – <i>Variable Neighbourhood Descent</i> (VND).	47
Algoritmo 2 – <i>Reduced Variable Neighbourhood Search</i> (RVNS).	48
Algoritmo 3 – <i>Basic Variable Neighbourhood Search</i> (BVNS).	49
Algoritmo 4 – <i>General Variable Neighbourhood Search</i> (GVNS).	50
Algoritmo 5 – Busca local.	62
Algoritmo 6 – Ótimo local.	64
Algoritmo 7 – Construção do conjunto de grupos de operações.	70
Algoritmo 8 – Fragmentação de grupos de operações.	72
Algoritmo 9 – Super grupos de operações.	76
Algoritmo 10 – Heurística de construção da sequência de operações.	80

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de Sistema Radial com Recurso	22
Figura 2 – Curva da capacidade de fornecimento de energia do sistema em cenários de falta permanentes.	25
Figura 3 – Fluxo de potência (a) nas barras e (b) linhas.	39
Figura 4 – Curva de capacidade dos geradores (a) despacháveis e (b) não despacháveis.	42
Figura 5 – Exemplo de aplicação da RNP.	51
Figura 6 – Exemplo de (a) rede de distribuição fictícia, (b) suas seções, (c) representação intermediária equivalente e sua respectiva (d) RNP.	52
Figura 7 – (a) Representação intermediária da rede fictícia e a (b) RNPm correspondente.	53
Figura 8 – (a) Representação intermediária da rede fictícia e (b) representação proposta utilizada nas metas-heurísticas de VNS.	54
Figura 9 – (a) Representação intermediária da rede fictícia e a (b) estrutura de representação proposta em um cenário de falta na seção S3.	54
Figura 10 – Exemplo do conceito de vizinhança de n níveis.	55
Figura 11 – Exemplo de (a) topologia geradora e (b) topologia gerada.	60
Figura 12 – Exemplo - Estruturas de representação das topologias (a) geradora e (b) gerada.	61
Figura 13 – Exemplo de avaliação das condições de fragmentação de um grupo de operações – (a) topologia inicial e (b) topologia final.	73
Figura 14 – Exemplo da aplicação do conceito de fragmentação de grupos - Conjunto de seções transferidas na execução integral do grupo de operações.	74
Figura 15 – Sistema de 33 barras – (a) Condição 1, (b) Condição 2 e (c) Condição 3.	83
Figura 16 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – (a) Topologia pós-falta e a (b) melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.	86
Figura 17 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Potência ativa restaurada em função da operação executada.	88
Figura 18 – Curvas de demanda e geração solar estabelecidas para os cenários de demanda variável.	89
Figura 19 – Sistema de 33 barras na Condição 3 – (a) Topologia pós-falta e a (b) melhor topologia encontrada na ocorrência de falta na seção 1.	90
Figura 20 – Sistema de 33 barras na Condição 3 – Potência ativa restaurada em função da operação executada.	92
Figura 21 – Sistema de 136 barras – (a) Condição 1 e (b) Condição 2.	93
Figura 22 – Sistema de 136 barras na Condição 1 – (a) Topologia pós-falta e a (b) melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.	94
Figura 23 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Potência ativa restaurada em função da operação executada.	98

Lista de tabelas

Tabela 1 – Operações permitidas segundo as condições das seções adjacentes à chave NA.	56
Tabela 2 – Comparação do tempo de execução do cálculo de fluxo de potência por diferentes metodologias.	59
Tabela 3 – Exemplo da aplicação do conceito de fragmentação de grupos – Etapas do algoritmo de fragmentação.	73
Tabela 4 – Exemplo da aplicação do conceito de fragmentação de grupos – Comparação entre o grupo de operações inicial e o grupo fragmentado correspondente. .	74
Tabela 5 – Parâmetros dos algoritmos VNS.	81
Tabela 6 – Sistema de 33 barras na Condição 1 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.	82
Tabela 7 – Sistema de 33 barras na Condição 1 – Sequência de operações na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.	84
Tabela 8 – Sistema de 33 barras na Condição 1 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.	84
Tabela 9 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.	85
Tabela 10 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Sequência de operações na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.	85
Tabela 11 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.	85
Tabela 12 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de falta na seção 1.	86
Tabela 13 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Sequência de operações na ocorrência de falta na seção 1.	87
Tabela 14 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de falta na seção 1.	88
Tabela 15 – Sistema de 33 barras na Condição 3 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de falta na seção 1.	89
Tabela 16 – Sistema de 33 barras na Condição 3 – Sequência de operações na ocorrência de falta na seção 1.	91
Tabela 17 – Sistema de 33 barras na Condição 3 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de falta na seção 1.	91
Tabela 18 – Sistema de 136 barras na Condição 1 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.	92
Tabela 19 – Sistema de 136 barras na Condição 1 – Sequência de operações na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.	95

Tabela 20 – Sistema de 136 barras na Condição 1 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.	95
Tabela 21 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.	95
Tabela 22 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Sequência de operações na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.	96
Tabela 23 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.	96
Tabela 24 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de falta crítica.	97
Tabela 25 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Sequência de operações na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.	97
Tabela 26 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de falta crítica.	98

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Sistemas de distribuição de energia elétrica	21
1.1.1	Redes inteligentes	21
1.2	Aspectos da restauração de redes de distribuição	24
1.3	Revisão Bibliográfica	24
1.4	Justificativas	29
1.5	Objetivos	30
1.6	Estrutura do texto	30
2	MODELO DA REDE NO ESTADO RESTAURATIVO	32
2.1	Aspectos operacionais da rede	32
2.1.1	Número de fases	32
2.1.2	Cargas	32
2.1.3	Chaves de manobras	33
2.1.4	Topologia do sistema	33
2.1.5	Recursos energéticos distribuídos	33
2.1.6	Formação dinâmica de microrredes	34
2.2	Função objetivo	35
2.2.1	Custo de interrupção	35
2.2.2	Custo das operações de chaveamentos	35
2.2.3	Custo da geração distribuída	36
2.2.4	Custo das perdas de energia	36
2.2.5	Penalização das violações das restrições operacionais da rede	36
2.3	Restrições do modelo	37
2.3.1	Equações de fluxo de potência	38
2.3.2	Modelo da subestação	39
2.3.3	Modelo das cargas	40
2.3.4	Modelo dos ESS	41
2.3.5	Modelo dos geradores despacháveis	41
2.3.6	Modelo dos geradores não despacháveis	43
2.4	Formulação da operação no estado restaurativo	43
3	MÉTODO DE SOLUÇÃO	45
3.1	Estratégia de solução do primeiro estágio	45
3.1.1	Busca de vizinhança variável	45
3.1.1.1	Elementos de um algoritmo VNS	46

3.1.1.2	<i>Variable Neighbourhood Descent (VND)</i>	47
3.1.1.3	<i>Reduced Variable Neighbourhood Search (RVNS)</i>	48
3.1.1.4	<i>Basic Variable Neighbourhood Search (BVNS)</i>	48
3.1.1.5	<i>General Variable NEighbourhood Search (GVNS)</i>	49
3.1.2	Algoritmos VNS e Técnicas de otimização clássica aplicados ao problema de RSDEE	49
3.1.2.1	Representação das soluções	50
3.1.2.1.1	Representação proposta	51
3.1.2.2	Critérios de vizinhança	55
3.1.2.3	Mecanismo eficiente de avaliação	57
3.1.2.3.1	Mecanismo adaptativo de solução	58
3.1.2.3.2	Reaproveitamento das soluções anteriores	60
3.1.2.4	Busca local	61
3.1.2.4.1	Equações para operações do Tipo 1	63
3.1.2.4.2	Equações para operações do Tipo 2	63
3.1.2.4.3	Equações para operações do Tipo 3	65
3.2	Estratégia de solução do segundo estágio	66
3.2.1	Operações elementares	66
3.2.2	Grupos de operações	67
3.2.2.1	Algoritmo de definição dos grupos de operações	68
3.2.2.2	Fragmentação dos grupos de operações	69
3.2.2.3	Super grupos de operações	74
3.2.3	Avaliação de grupos de operações	75
3.2.3.1	Cálculo do índice de restauração	77
3.2.3.2	Cálculo do índice de reserva girante	77
3.2.3.2.1	Critério de avaliação dos grupos de operações	78
3.2.4	Heurística de sequenciamento de operações	78
4	RESULTADOS	81
4.1	Sistema teste de 33 barras	81
4.1.1	Faltas simultâneas nas seções 3 e 8	82
4.1.1.1	Condição 1	82
4.1.1.2	Condição 2	84
4.1.2	Falta permanente na seção 1	85
4.1.2.1	Condição 2	85
4.1.2.2	Condição 3	87
4.2	Sistema de 136 barras	90
4.2.1	Falta permanente e simultâneas nas seções 48 e 148	91
4.2.1.1	Condição 1	91
4.2.1.2	Condição 2	95

4.2.2	Falta crítica	96
4.2.2.1	Condição 2	96
5	CONCLUSÕES	99
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	100
	REFERÊNCIAS	102

1 Introdução

Eventualmente, os consumidores atendidos pelos sistemas de distribuição de energia sofrem com interrupções no fornecimento de eletricidade. Tais interrupções são originadas majoritariamente por eventos não programados de caráter emergencial (CHOWDHURY; KOVAL, 2011). Apesar das causas desses eventos serem diversas, em geral, eles tendem a gerar interrupções de longa duração quando comparadas às interrupções programadas.

A eletricidade é, nos dias atuais, um bem essencial. Logo, interrupções de longa duração causam diversos transtornos aos usuários. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece que as concessionárias de energia elétrica compensem os consumidores afetados por faltas frequentes ou de longa duração (ANEEL, 2018). Desse modo, esse mecanismo é mais um incentivo para que as concessionárias de distribuição invistam em medidas para reduzir os impactos ocasionados por interrupções de energia.

Diversas medidas podem ser adotadas para melhorar a confiabilidade de uma rede de distribuição. Algumas delas podem ser definidas a partir de estudos de planejamento, sendo executadas antes da ocorrência de um evento que acarrete em uma interrupção não programada (TENG; LU, 2002; AWAD *et al.*, 2014). Apesar de tornar os sistemas de distribuição menos vulneráveis, tais medidas não eliminam o risco de interrupções não programadas.

Uma vez que ocorre um evento que causa a interrupção no fornecimento de energia é possível, utilizando os recursos já disponíveis na rede de distribuição, minimizar a quantidade de consumidores afetados executando um conjunto específico de ações, procedimento que é denominado de restauração (CURČIĆ *et al.*, 1995). Apesar de ser um procedimento eficaz na melhoria da confiabilidade dos sistemas de distribuição, planejar a execução da restauração pode ser uma tarefa extremamente desafiadora. Isso se deve à necessidade de definir, em um curto espaço de tempo, quais ações deverão ser executadas e quando será o momento mais propício, de modo que o procedimento seja eficaz e o sistema no estado restaurativo opere adequadamente.

Em sistemas de distribuição que cobrem uma área geográfica extensa, o número de variáveis envolvidas exige que o processo seja auxiliado por ferramentas computacionais. Tais ferramentas são baseadas, normalmente, em modelos matemáticos que descrevem as características de operação do sistema de distribuição e as variáveis de decisão do processo. Definindo um ou mais parâmetros de avaliação, se estabelece então um problema de otimização denominado na literatura especializada como Problema de Restauração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (PRSDEE).

1.1 Sistemas de distribuição de energia elétrica

Um sistema elétrico de potência, tradicionalmente, é dividido em subsistemas que são classificados, conforme a função desempenhada, em três tipos: geração; transmissão; e distribuição. Os sistemas de distribuição de energia, fundamentalmente, tem a função de condicionar e fornecer energia elétrica aos consumidores finais inseridos em uma determinada área de concessão.

A infraestrutura típica de um sistema de distribuição é segmentada, basicamente, em: subestação de distribuição; alimentadores primários; transformadores de distribuição; e redes secundárias. A topologia formada por esses elementos pode variar conforme os requisitos de confiabilidade e custos do projeto. No entanto, no contexto brasileiro, é comum a presença de sistemas cuja topologia seja radial com recurso. Nesse arranjo, a operação é feita de modo que haja um único caminho entre as cargas e sua fonte alimentadora, porém, possibilitando a transferência de cargas para alimentadores adjacentes. A vantagem dessa topologia está na facilidade da operação, a coordenação dos elementos de proteção da rede e maior confiabilidade, quando comparado com uma rede radial simples.

Na Figura 1 é ilustrado um diagrama unifilar exemplificando um sistema de distribuição radial típico com recurso. O sistema exemplificado é suprido por uma subestação de distribuição, que reduz os níveis de tensão para valores que podem variar entre 13,8 kV até 34,5kV por meio de um transformador de potência. Os alimentadores primários, que derivam do barramento de média tensão da subestação, são responsáveis por transportar a energia elétrica até os consumidores de média tensão e transformadores secundários.

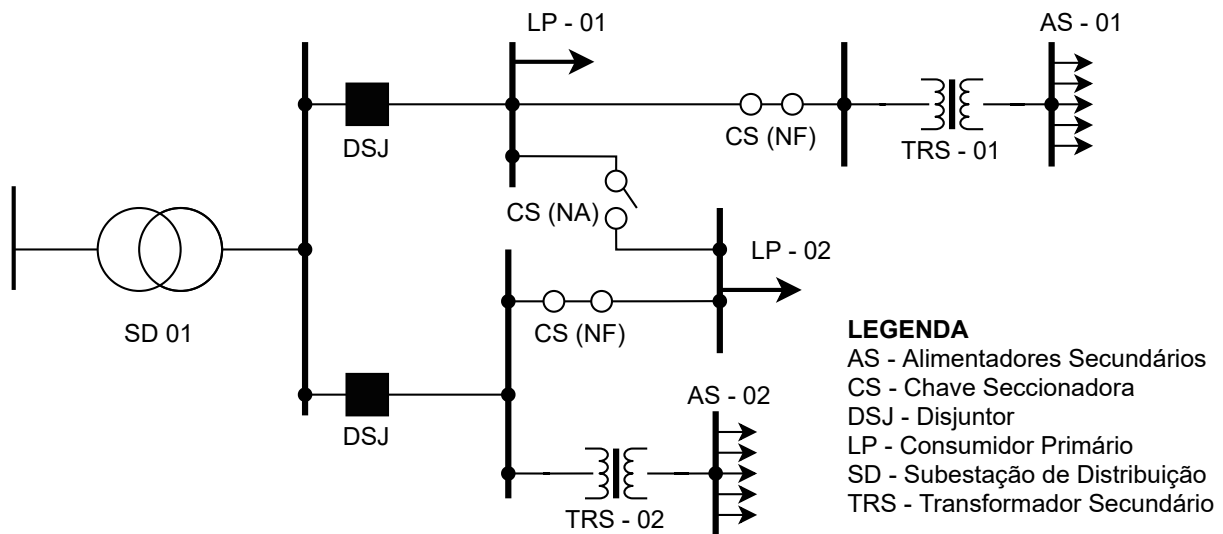
No exemplo da Figura 1, os alimentadores primários são dotados de chaves seccionadoras localizadas em pontos específicos. Essa característica permite manobras para isolar ou transferir seções da rede, neste último caso para alimentadores adjacentes, em casos de manutenções corretivas, por exemplo. A operação radial é garantida por meio da seleção adequada do conjunto de chaves que irão operar em estado Normalmente Fechado (NF) e Normalmente Aberto (NA).

Supridos pelos alimentadores primários, os transformadores secundários reduzem os níveis de média tensão para baixa tensão, a valores que podem variar entre 127/220V e 220/380V. Assim, se adequa os níveis de tensão para atendimento dos consumidores de baixa tensão por meio dos alimentadores secundários.

1.1.1 Redes inteligentes

Pelo fato da energia elétrica ser um item de consumo essencial na vida moderna, observa-se, ano após ano, o aumento da demanda energética. Consequentemente, a operação dos sistemas de distribuição deve, cada vez mais, ser eficiente, sob os pontos de vista técnico e econômico, e satisfazer níveis adequados de confiabilidade e qualidade. Nesse cenário, os sistemas de distribuição apresentaram poucas evoluções tecnológicas, tornando-se necessário, portanto,

Figura 1 – Exemplo de Sistema Radial com Recurso



Fonte: Elaborado pelo autor.

transformações nesses aspectos para alcançar as exigências impostas

Nesse contexto, surge o conceito das Redes Inteligentes, ou *Smart Grids*, cuja proposta básica é incorporar, maciçamente, sistemas bidirecionais de comunicação e informação à infraestrutura de distribuição de energia (YAN *et al.*, 2013). Tal característica, aumenta a capacidade de controle e gerenciamento das redes de distribuição, tornando as ações de operação e planejamento mais eficientes e confiáveis.

A motivação para investimentos em redes inteligentes é orientada por objetivos estratégicos regionais. Desse modo, emprega-se diferentes tecnologias para alcançar esses objetivos. Na Europa, por exemplo, alguns dos objetivos são a inserção de fontes renováveis, redução das emissões de carbono e integração dos mercados europeus. No Brasil, os objetivos para investimento em redes inteligentes se resumem no aumento da eficiência energética, redução dos custos operacionais e melhoria da confiabilidade e qualidade da energia fornecida (RIVERA *et al.*, 2013; SANTO *et al.*, 2015). Sob a perspectiva da melhoria da confiabilidade, alguns conceitos associados às redes inteligentes que se destacam são: automação da distribuição; programas de resposta da demanda; recursos energéticos distribuídos; e microrredes (MOSLEHI; KUMAR, 2010; WANG *et al.*, 2015).

A automação da distribuição consiste na capacidade de monitorar, coordenar e operar a infraestrutura de distribuição de energia remotamente. A infraestrutura de automação da distribuição é composta por redes de comunicação, sensores, atuadores e sistemas computacionais avançados de informação e controle, exercendo, portanto, um papel essencial na transição das redes tradicionais para as redes inteligentes. Com essas características, a automação da distribuição viabiliza a implantação de sistemas avançados de detecção e isolamento de faltas e a

restauração do serviço (FLISR – do inglês *Fault Location, Isolation and Service Restoration*). Sob a perspectiva da automação da distribuição, um sistema FLISR, diante de uma falta, deve ser capaz de localizar em qual parte da rede ocorre o defeito, isolar a seção defeituosa e, caso a falta seja permanente, restaurar os consumidores afetados automaticamente (AGÜERO, 2012; ZIDAN *et al.*, 2016). Devido a automação desse processo, o tempo e a frequência das interrupções no fornecimento de energia são reduzidos e, consequentemente, os índices de confiabilidade são melhorados (ELKADEEM *et al.*, 2018).

Os sistemas de comunicação, monitoramento e controle das redes inteligentes possibilitam a implantação de programas de resposta da demanda, que atuam como mecanismos de regulação da demanda por meio da aplicação de tarifas ou oferecimento de incentivos (SIANO, 2014). Esse mecanismo pode ser aplicado para suavizar a curva de demanda, seja pelo deslocamento ou redução do consumo, diminuindo, portanto, os picos de demanda da rede. Em situações de emergência, os programas de resposta da demanda podem atuar através da redução voluntária da demanda por parte dos consumidores ou pelo corte de cargas controladas pelo operador e, em ambos os casos, os consumidores são recompensados. Assim, os programas de resposta da demanda reduzem as ocorrências de sobrecarga e, em situações de emergência, são recursos adicionais para o operador manter as condições de operação da rede dentro dos limites adequados.

Os recursos energéticos distribuídos (DER, do inglês *distributed energy resources*) fazem referência ao conjunto de tecnologias de geração distribuída (unidades de geração localizadas próximas ao ponto de consumo) e armazenamento de energia (AKOREDE *et al.*, 2010). Dentre os benefícios da geração distribuída é possível destacar a melhoria dos níveis de tensão, redução das perdas técnicas e a capacidade de postergar investimentos nos sistemas de transmissão e geração convencionais. No entanto, a inserção de unidades geradoras em sistemas de distribuição traz desafios, dentre os quais pode-se destacar os impactos da alta penetração e da natureza intermitente de unidades de geração eólica e solar nos níveis de tensão e carregamento do sistema (SEGUIN *et al.*, 2016). Nesse sentido, uma solução que vem sendo explorada é a utilização de sistemas de armazenamento de energia, que pode demandar ou injetar energia na rede, o que possibilita o controle dos níveis de tensão e a gestão da demanda em sistemas com alta penetração de geradores distribuídos (PROCOPIOU *et al.*, 2018).

As microrredes, ou *microgrids*, são sistemas, localizados nas redes de baixa ou média tensão, compostos por DER e cargas e que possuem a capacidade de operar em modo autônomo (ilhados) ou não autônomo (conectados à rede) (DRIESEN; KATIRAEI, 2008; KROPSKI *et al.*, 2008). Para viabilizar a operação, uma microrrede deve possuir um sistema de controle capaz de regular a tensão local e a frequência quando opera no modo autônomo (KROPSKI *et al.*, 2008). Devido a capacidade de operação ilhada, as microrredes podem alimentar um conjunto limitado de cargas em situações de faltas permanentes de longa duração, melhorando, consequentemente, os índices de continuidade da rede (CHE *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2015).

1.2 Aspectos da restauração de redes de distribuição

No estado normal de operação, a rede de distribuição opera dentro de limites adequados e viáveis ao atendimento de todas as cargas do sistema. Em um cenário de falta permanente, o sistema passa a operar em um estado de emergência devido a violação dos limites operacionais e físicos, o que implica no desligamento de parte do sistema devido a atuação dos dispositivos de proteção. A curva da Figura 2 ilustra os efeitos de uma falta permanente na capacidade de fornecimento de energia às cargas do sistema.

Para que o sistema volte a operar no estado normal, é necessário determinar a localização e isolar a região em que ocorreu a falta. Assim, é possível realizar as intervenções de manutenção, necessárias para remover os defeitos que originaram o desligamento na rede. Dependendo das características do defeito, a conclusão das tarefas de manutenção exige um tempo elevado. Consequentemente, mantendo as cargas afetadas desligadas neste período, degrada-se os indicadores de confiabilidade. Desse modo, com o intuito de minimizar os efeitos negativos do desligamento, inicia-se um conjunto de procedimentos que conduzem a rede para o estado restaurativo. O estado restaurativo consiste em uma condição de operação temporária, em que busca-se atender a maior quantidade de cargas sem a violação dos limites operacionais preestabelecidos (CURČIĆ *et al.*, 1995).

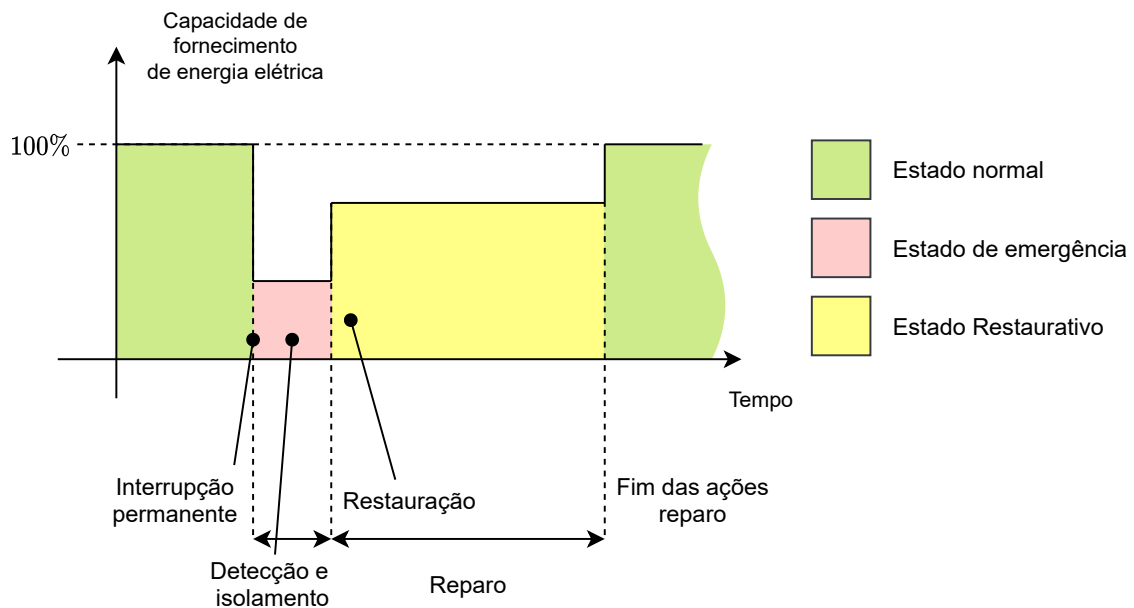
Para que seja possível conduzir a rede no estado de emergência para o estado restaurativo, é necessário definir um plano de ações que atenda as restrições operacionais da rede. Dentre os componentes desse plano, a topologia em que a rede irá operar no estado restaurativo é um dos elementos principais (ZIDAN *et al.*, 2016). Já que é possível, por meio da modificação do estado das chaves de manobras, restaurar as cargas afetadas (SHIRMOHAMMADI, 1992). Além disso, com os avanços proporcionados pelas redes inteligentes, tem-se apresentado soluções que utilizam recursos avançados na restauração de sistemas de distribuição, dentre os quais pode-se destacar a geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia, programas emergenciais de resposta à demanda e a utilização de microrredes (LI *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2017).

1.3 Revisão Bibliográfica

Na literatura são encontradas diferentes abordagens para tratar o PRSDEE. Essas abordagens podem ser categorizadas, segundo a arquitetura de controle das ações de restauração, em: centralizada, em que as ações referentes à restauração da rede são coordenadas a partir de um centro de controle; e descentralizada, em que diferentes agentes de controle tomam decisões e coordenam as suas ações por meio de uma infraestrutura de comunicação. Nessa revisão bibliográfica serão avaliadas as principais técnicas utilizadas para solução do PRSDEE baseado em arquiteturas de controle centralizado.

Os algoritmos heurísticos aplicados na restauração de redes são baseados em regras, que

Figura 2 – Curva da capacidade de fornecimento de energia do sistema em cenários de falta permanentes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

originam-se, sobretudo, da experiência do operador da rede e do conhecimento dos procedimentos de restauração de redes. São algoritmos caracterizados pela capacidade de fornecer respostas factíveis com baixo custo de processamento computacional, o que é desejado para o problema de restauração de redes devido a necessidade de obter-se uma solução com rapidez. No entanto, não há garantia que a solução fornecida seja um ótimo local.

Em Morelato e Monticelli (1989) é proposto um algoritmo heurístico de busca baseada em árvores de decisão binária, capaz de ser aplicado em problemas de reconfiguração e restauração. No algoritmo proposto, basicamente, a árvore de decisão é percorrida, utilizando a estratégia de busca em profundidade, até que uma solução é encontrada e, em seguida, verifica-se as condições de factibilidade e otimalidade dessa solução, que se satisfeitas implica na atualização da solução incumbente; o processo ocorre até que todas soluções listadas sejam verificadas. As regras heurísticas utilizadas no problema evitam a explosão combinatória. A metodologia é testada em um sistema com 20 barras e 33 chaves de manobras.

Em Shirmohammadi (1992) é apresentado um algoritmo heurístico que baseia-se em características de redes radiais e na análise de fluxo de potência para determinar as operações de restauração da rede. No processo de construção da solução, fecha-se todas as chaves da rede, exceto aquelas utilizadas para isolar a falta, formando uma rede malhada. Em seguida, iterativamente, realiza-se a avaliação da rede por meio de um fluxo ótimo de potência e, em seguida, abre-se a chave de manobra que está inserida em um laço da rede e em que flui a menor corrente. Esse processo iterativo é realizado até que seja obtida uma topologia radial. A metodologia é testada com um sistema composto por 4 alimentadores, em que cada alimentador

possui mais de 500 barras e 50 chaves de manobras.

Em Hsu *et al.* (1992) é proposto um algoritmo heurístico de restauração de cargas após a ocorrência de faltas permanentes. As regras do algoritmo heurístico foram elaboradas por meio de entrevistas com operadores experientes da Taiwan Power Company (TPC), objetivando atender os requisitos práticos da restauração da rede. A eficácia da metodologia foi avaliada por meio da utilização do algoritmo heurístico no processo de restauração de um sistema de distribuição subterrâneo pertencente à área de serviço da TPC na cidade de Taipei.

Em Huang (2003) é proposto um sistema *fuzzy* de causa e efeito (FCE – do inglês *fuzzy cause-effect*) baseado em regras heurísticas para solucionar um problema multiobjetivo de restauração de redes de distribuição. O diagrama FCE é desenvolvido utilizando regras heurísticas construídas a partir da experiência de especialistas. Os objetivos *fuzzy* são combinados por soma ponderada e expressam a quantidade de carga restaurada, o número de operações de chaveamentos realizadas e a condição de carregamento e variação de corrente nos equipamentos da rede. A metodologia é empregada em um sistema de distribuição da TPC.

Em Kleinberg *et al.* (2010) é proposto um algoritmo de busca heurística que soluciona um problema de restauração multiobjetivo que leva em consideração a possibilidade do corte de cargas. As regras heurísticas são baseadas em análises de fluxo de potência da rede pós-falta e possibilitam a seleção das chaves que serão manobradas no processo de restauração e as cargas que serão desligadas. A eficiência da metodologia é avaliada em um sistema de 416 barras e os resultados indicam que o corte de cargas possibilita a redução do número de operações de chaveamentos e o aumento da carga restaurada.

Na literatura há diversos trabalhos que empregam meta-heurísticas na solução do problema de restauração de redes. As meta-heurísticas são algoritmos projetados para conduzir o processo de busca de soluções para problemas de otimização de maneira eficiente e genérica. A maior parte das meta-heurísticas possuem estruturas de busca sofisticadas e flexíveis a adaptações, o que possibilita encontrar soluções de melhor qualidade, quando comparadas às heurísticas simples.

Em Toune *et al.* (2002) são empregadas as meta-heurísticas de busca tabu, busca tabu reativa, recozimento simulado paralelo e algoritmo genético na solução do problema de restauração. O desempenho das meta-heurísticas utilizadas são comparados por meio de simulações em sistemas testes de 18, 24, 30, 36, 48 e 60 barras. Nos resultados obtidos, a busca tabu reativa apresentou melhor desempenho em comparação aos demais métodos avaliados.

Em Kumar *et al.* (2007) utiliza-se o algoritmo genético multiobjetivo *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) na solução de uma formulação multiobjetivo do problema de restauração de redes. Na formulação do problema objetiva-se minimizar a área de serviço desenergizada, o número de operações de chaveamentos em chaves manuais e automáticas e as perdas técnicas. As soluções, isto é, as topologias candidatas para operação no estado

restaurativo são representadas por vetores binários. A condição de radialidade é garantida por meio da verificação das soluções candidatas por meio de um algoritmo de busca em largura. A metodologia é testada em sistemas testes de 10, 13, 32 e 173 barras.

Em Santos *et al.* (2010) é proposto um algoritmo evolucionário multiobjetivo, que utiliza a Representação Nó-Profundidade (RNP), para solução do problema de restauração multiobjetivo. A utilização da RNP possibilita restringir a busca às soluções radiais, o que reduz o esforço computacional do algoritmo. A eficiência computacional do método é verificado por meio de testes em sistemas de distribuição grande porte nos quais inclui-se um sistema modificado com mais de 30000 barras e 5000 chaves de manobras, que é solucionado em tempo médio adequado para o problema de restauração.

Em Mathias-Neto (2016) é proposto um método para a solução do problema de restauração utilizando busca tabu e a RNP como representação das soluções. Na formulação do problema, considera-se a presença de geração distribuída, operação ilhada e cargas remotamente controladas e termostáticas. É proposto um novo operador para geração de soluções radiais, que possibilita o corte de cargas e a formação de ilhas. A metodologia é avaliada por meio de testes em um sistema de 37 barras simulando diferentes cenários de operação.

Em Peralta (2019) é proposto um método para solução do problema de restauração de redes baseado em busca tabu de vizinhança variável reativa. Neste trabalho é proposta uma heurística que determina a sequência de operações de chaveamentos, que conduz a topologia pós-falta para a topologia de operação no estado restaurativo. No modelo é considerada a presença de capacitores chaveados, reguladores de tensão, geração distribuída com a possibilidade de formação de microrredes dinâmicas, modelo de cargas ZIP, e, além disso, é considerado a condição de *cold load pick-up*. A eficiência do método é avaliado por meio de testes em sistemas de 53 e 7052 barras.

Por meio de técnicas de otimização clássica é possível tratar modelos detalhados do PRSDEE e obter, assim, soluções ótimas. No entanto, dependendo da formulação adotada para descrever o PRSDEE, a solução do problema de otimização correspondente demanda um tempo de processamento que excede os limites adequados para operações em tempo real. Na literatura são encontradas diferentes técnicas para contornar essa dificuldade, dentre as quais pode-se destacar a utilização de métodos de linearização de restrições, que resultam em modelos que podem ser solucionados de maneira mais eficiente.

Em Wang e Wang (2015) são propostos modelos matemáticos para a otimização da operação do sistema em condições normais e em cenários de contingência, em que propõe-se um conjunto ações para o autorrestabelecimento rede. Os modelos são formulados como Problemas Não Lineares Inteiros Mistos (PNLIM), em que considera-se a presença de geradores distribuídos, sistemas de armazenamento de energia e a possibilidade de formação de microrredes. Em condições normais de operação, o modelo proposto fornece as ações de controle ótimas para redução dos custos operacionais da rede. Em cenários de contingência, a propriedade

é minimizar a quantidade de carga não suprida, considerando, nesse caso, a possibilidade de formação de microrredes. Neste trabalho são avaliados diferentes cenários de operação para um sistema de 123 barras.

Em Cavalcante *et al.* (2015), propõe-se um modelo de PNLIM para o problema de restauração de redes de distribuição. A solução do PNLIM é feita em dois estágios: no primeiro estágio o PNLIM é linearizado e solucionado, obtendo as variáveis de decisão binárias; no segundo estágio, fixa-se as variáveis binárias, determinadas no estágio anterior, obtendo um Problema Não Linear (PNL), que é utilizado para determinar as variáveis de decisão contínuas. O PNLIM é linearizado por meio de uma estratégia de linearização por partes. O método é avaliado em testes realizados em sistemas de 44 e 964 barras.

Em Romero *et al.* (2015) é proposto um modelo de PNLIM para o problema de restauração de redes de distribuição. O modelo PNLIM proposto é transformado em um PCSOIM, que pode ser solucionado de modo eficiente por *solvers* comerciais. O modelo é utilizado para solucionar um conjunto de cenários de faltas permanentes em um sistema de 53 barras.

Em Chen *et al.* (2017) é apresentado um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o problema de restauração. No modelo é considerado a presença de geradores distribuídos, sistemas de armazenamento de energia, a possibilidade de formação de microrredes e a sequência de operações para execução do plano de ações para restauração da rede. O modelo é avaliado por meio de testes em um sistema de 123 barras.

As técnicas híbridas de solução do problema de restauração é resultante da combinação de duas ou mais técnicas de otimização. Nesse tipo de abordagem de solução do PRSDEE, busca-se explorar as diferentes metodologias para obter-se melhores respostas com o tempo de processamento adequado ao PRSDEE.

Em Nagata *et al.* (1995) é proposto um método híbrido baseado em um sistema especialista e programação matemática para solução do problema de restauração. Neste trabalho o problema de restauração é formulado como Problema Inteiro Misto (PIM). O PIM é solucionado por meio de uma estratégia de decomposição, em que o problema principal é decomposto em subproblemas utilizando as regras do sistema especialista. Na formulação, objetiva-se minimizar o custo da operação no estado restaurativo pela redução do número de operações de chaveamentos e a redução da carga desenergizada. A efetividade do método é avaliada em um sistema de 82 barras.

Em Ciric e Popovic (2000), propõe-se um método baseado em heurísticas e programação matemática para solucionar o problema de restauração multiobjetivo. A estratégia utilizada consiste em buscar uma solução para o PRSDEE por meio de um algoritmo heurístico e, caso não seja encontrada uma solução factível, soluciona-se um problema do tipo PIM. O método foi avaliado por meio de testes em um sistema de 36 barras.

Em Hsiao e Chien (2000) é proposto um método que combina algoritmo genético e

conjuntos *fuzzy* para solucionar o problema de restauração de redes. Basicamente, o algoritmo genético é responsável pela busca no espaço de soluções do problema, enquanto que o conjunto *fuzzy* é utilizado na avaliação das soluções. Neste trabalho, a sequência de operações de chaveamentos é considerada no problema. O método foi testado com um sistema de 102 barras e 217 chaves de manobras.

Em Shin *et al.* (2004) utiliza-se um método híbrido resultante da combinação de algoritmo genético e busca tabu para solucionar os problemas de restauração e reconfiguração de redes de distribuição. No algoritmo tabu genético (GTA – do inglês *Genetic-Tabu Algorithm*), basicamente, utiliza-se uma lista tabu para verificar a diversidade dos genes das soluções visitadas; caso um conjunto de genes apresente baixa diversidade, intensifica-se a mutação nesse conjunto de genes por meio do ajuste da taxa de mutação. O método é testado em um sistema com 7 alimentadores e 38 barras. Nos resultados obtidos, o GTA apresentou melhor convergência quando comparado à um algoritmo genético convencional.

Em Carvalho *et al.* (2007), propõe-se uma metodologia de dois estágios para solução do problema de restauração. No primeiro estágio, utiliza-se um algoritmo genético para determinar a topologia pós-falta. No segundo estágio é utilizado um modelo de programação dinâmica para estabelecer a sequência de operações de chaveamentos. O método é avaliado em um sistema real com 633 barras.

1.4 Justificativas

As faltas permanentes podem ser ocasionadas, entre outras causas, por eventos climáticos adversos que são, por exemplo, tempestades, ventos, granizo ou temperatura extrema. Normalmente, esse tipo de falta é de longa duração já que devido as condições climáticas, as equipes de trabalho podem encontrar dificuldades em executar as ações necessárias para restaurar o sistema de distribuição e, além disso, podem ocorrer múltiplas faltas simultaneamente (CHOW *et al.*, 1996). Ademais, a intensidade e as características desses eventos climáticos podem ocasionar faltas severas localizadas em componentes importantes como, por exemplo, nas subestações de distribuição, afetando muitos consumidores por um longo período. Nesse contexto, o desenvolvimento de novos métodos computacionais com a capacidade de solucionar o PRSDEE, em tempo de operação, após a ocorrência de múltiplas faltas ou faltas severas é desejável. Assim, é possível determinar um conjunto de ações capazes de reduzir o número de consumidores afetados e, conseqüentemente, melhorar os índices de confiabilidade dos sistemas de distribuição.

As transformações associadas às redes inteligentes modificam significativamente os paradigmas da operação dos sistemas de distribuição. Conseqüentemente, soluções propostas no contexto das redes convencionais de distribuição devem ser revistas e reformuladas de modo a considerar as características das redes inteligentes. De modo específico, o PRSDEE considerando aspectos das redes inteligentes, torna-se desafiador devido a introdução de novas variáveis de

controle, porém possibilita explorar os benefícios decorrentes das novas tecnologias e propor soluções inovadoras.

1.5 Objetivos

Neste trabalho, o objetivo principal é desenvolver um método capaz de fornecer, em tempo adequado para operação, um plano de restauração para redes de distribuição inteligentes após a ocorrência de faltas permanentes, ocasionadas por condições climáticas adversas e, portanto, com a possibilidade de serem múltiplas ou estarem localizadas na subestação de distribuição. Desse modo, os objetivos específicos do trabalho são:

- Modelar o sistema de distribuição considerando a presença de recursos avançados como automação da distribuição, programas de resposta da demanda, recursos energéticos distribuídos e a possibilidade da formação dinâmica de microrredes.
- Desenvolver e implementar computacionalmente um método de solução híbrido, baseando em meta-heurísticas de busca de vizinhança variável e programação matemática. O método deve fornecer um plano de ação composto pela topologia em que a rede deve operar após a falta, a sequência de chaveamentos para se obter tal topologia e as decisões de controle dos recursos avançados presentes na rede.
- Simular cenários de faltas permanentes múltiplas e severas (em que ocorre a perda da subestação).

1.6 Estrutura do texto

O texto está organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 1** – Apresenta-se uma breve apresentação do contexto do trabalho, as características e avanços das rede de distribuição de energia, os aspectos relacionados ao problema de restauração, uma revisão bibliográfica, as justificativas e, por fim, os objetivos do trabalho.
- **Capítulo 2** – Consideram-se os aspectos da modelagem do sistema de distribuição e do PRSDEE; os modelos dos componentes básicos da rede e dos recursos avançados considerados neste trabalho; e, por fim, a formulação do PRSDEE.
- **Capítulo 3** – Os detalhes da estratégia de dois estágios de solução, que no primeiro estágio utiliza uma abordagem híbrida baseada em meta-heurísticas e otimização clássica e no segundo estágio uma heurística, são apresentados e discutidos.
- **Capítulo 4** – são apresentadas os parâmetros de simulação, assim, como os resultados obtidos com a simulação dos cenários desenvolvidos para os sistemas de 33 e 136 barras.

- **Capítulo 5** – Apresentam-se as considerações finais da metodologia proposta, os resultados obtidos e as sugestões de trabalhos futuros.

2 Modelo da rede no estado restaurativo

Neste capítulo, apresenta-se o modelo utilizado para representar o estado da rede de distribuição de energia elétrica operando no estado restaurativo. Na formulação considera-se os equipamentos e componentes básicos do sistema de distribuição, recursos energéticos distribuídos e um modelo de programa de resposta da demanda emergencial. A rede no estado restaurativo é modelada através de fluxo ótimo de potência na forma de um problema de PCSOIM.

2.1 Aspectos operacionais da rede

Neste trabalho, o plano de ações da restauração consiste em definir a topologia da rede no estado restaurativo, a sequência de operações de chaveamentos e as decisões de controle dos recursos avançados presentes na rede. No estado restaurativo, a rede deve atender um conjunto de restrições físicas e operacionais preestabelecidas. Assim, é necessário verificar as condições de operação do sistema no estado restaurativo e nas etapas de transição entre a topologia pós-falta e a topologia do estado restaurativo. Com este propósito, neste trabalho, o período em que o sistema operado no estado restaurativo é discretizado em intervalos iguais à Δt , formando um conjunto $\mathcal{T}$ de intervalos de tempo e denominado de período de operação. No período de operação são estabelecidas as equações que modelam o comportamento em regime permanente e as restrições do sistema de distribuição. Nas subseções seguintes são apresentados detalhes considerados na modelagem matemática do sistema de distribuição.

2.1.1 Número de fases

Os sistemas de distribuição são caracterizados pelo desbalanceamento de fases (KERS-
TING, 2017). No entanto, considera-se que esse desbalanceamento, na média tensão, é baixo o suficiente para que o sistema possa ser representado pelo equivalente monofásico. Apesar de afetar a precisão dos resultados, essa é uma consideração aceitável para representação da rede de média tensão em modelos de RSDEE (MATHIAS-NETO, 2016; PERALTA, 2019). Adicionalmente, o número de variáveis do problema é reduzido, melhorando, portanto, o desempenho computacional do método.

2.1.2 Cargas

As cargas são representadas pela potência ativa e reativa demandada de acordo com a curva de carga dos alimentadores. A variação da demanda (curva de carga) pode ser estabelecida por meio de técnicas de previsão de carga, sendo essa uma etapa prévia à solução do problema de RSDEE. Para o problema em análise, o horizonte de previsão de carga é de curto prazo.

O esquema de resposta da demanda para situações de emergência é considerado no modelo, possibilitando a interrupção total do fornecimento de energia de um consumidor ou conjunto de consumidores durante a operação no estado restaurativo. Neste caso é oferecido aos consumidores participantes do programa de resposta da demanda uma compensação financeira. Nesse contexto, no modelo há dois subconjuntos de cargas que são definidos pela disponibilidade de controle da demanda.

2.1.3 Chaves de manobras

Na modelagem atual, considera-se que todas as chaves de manobras instaladas no sistema são automáticas. Adicionalmente, parte-se da hipótese que o sistema de comunicação e controle continua operando normalmente no período de operação pós-falta.

A manobra de chaves automáticas é de rápida execução quando comparada à de chaves manuais, já que são realizadas via telecomando. Desse modo, as hipóteses adotadas sobre as chaves de manobras, permitem que o tempo de execução das operações de chaveamentos possa ser ignorado nas restrições do modelo do problema de RSDEE. Embora as hipóteses consideradas possibilite desconsiderar o tempo de manobra do sistema, ainda é desejável reduzir o número de operações de chaveamentos. Isso porque a cada operação, a vida-útil do equipamento de manobra é reduzida e, portanto, há um custo intrínseco nas operações de chaveamentos (ABU-ELANIEN *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2017).

2.1.4 Topologia do sistema

Os sistemas de distribuição são operados, normalmente, em topologia radial, e esta característica é considerada na modelagem do problema de RSDEE. Essa restrição do modelo limita a análise da operação em topologia radial, não considerando a possibilidade de operação malhada no período de análise.

Na estratégia de solução adotada, a restrição de radialidade é garantida por meio de uma abordagem híbrida (detalhada no próximo capítulo) que utiliza algoritmos construtivos e, baseado no tipo de operação de chaveamento, introduz um conjunto de equações específicas ao modelo do FPO, apresentado neste capítulo. Portanto, a restrição de radialidade não está explícita na formulação do problema. Originalmente, a topologia do sistema é representada no FPO por meio de variáveis binárias de estado dos componentes.

2.1.5 Recursos energéticos distribuídos

No modelo, leva-se em conta a presença de geradores distribuídos e sistemas de armazenamento de energia. Os geradores distribuídos são categorizados, segundo a capacidade de controle de injeção de potência, em unidades de geração despacháveis e não despacháveis. Para

os geradores despacháveis considera-se que a potência ativa e reativa injetada é totalmente controlável e restrita, apenas, pelos limites operacionais da unidade de geração.

Neste trabalho, considera-se que a fonte primária de uma unidade de geração não despachável é intermitente e, embora seja possível realizar a previsão da geração, há riscos associados a disponibilidade energética da fonte primária. Desse modo, a injeção de potência ativa é limitada pela disponibilidade de potência fornecida pela fonte primária, que varia com o tempo. No contexto da geração distribuída, a geração eólica e fotovoltaica são exemplos de unidades de geração não despacháveis, já que dependem, respectivamente, da disponibilidade de energia cinética dos ventos e da radiação solar. No modelo dos geradores não despacháveis considera-se que a unidade de geração é conectada à rede por meio de inversores com capacidade de suporte de reativo (SMITH *et al.*, 2011).

Considera-se que os sistemas de armazenamento de energia operam no modo de controle de potência ativa, assim, objetiva-se determinar a potência injetada ou absorvida da rede durante cada intervalo de tempo do período de operação. As restrições associadas aos limites de armazenamento e taxa de injeção ou absorção de potência ativa são consideradas. O intervalo de tempo entre o estado normal de operação e o início do estado restaurativo é considerado curto o suficiente para que a quantidade de energia armazenada pré-falta permaneça inalterada.

2.1.6 Formação dinâmica de microrredes

As microrredes podem ser categorizadas, segundo as características de suas fronteiras, em microrredes fixas e flexíveis (PERALTA, 2019). As microrredes fixas são limitadas à uma região contendo um conjunto de cargas e recursos energéticos distribuídos e possui um ponto de interconexão fixo com a rede de distribuição. As microrredes flexíveis podem ser formadas dinamicamente, expandindo ou reduzindo a sua área de abrangência por meio do controle de chaves seccionadoras (NASSAR; SALAMA, 2015). Essa característica possibilita que as microrredes flexíveis se adaptem às diversas condições de modo a garantir o balanceamento entre a potência gerada e demandada.

Neste trabalho, considera-se a possibilidade de formação dinâmica de microrredes flexíveis operando no modo ilhado. Para tal, é necessário a presença de um gerador despachável com capacidade de auto restabelecimento (ou *black start*) cuja tensão é utilizada como referência pelas demais unidades de geração (LOPES *et al.*, 2006; CHEN *et al.*, 2017). As unidades de geração despacháveis (sem a capacidade de *black start*), não despacháveis e ESS são controladas de modo a garantir o balanceamento das potências ativa e reativa da microrrede. Considera-se que o controle da operação da microrrede é centralizado.

2.2 Função objetivo

A função objetivo do modelo visa minimizar o custo da operação da rede no estado restaurativo. Os custos considerados são: o custo de interrupção do fornecimento de energia elétrica no período de operação; o custo das operações de chaveamentos; o custo da geração distribuída; o custo das perdas de energia; e a penalização das violações das restrições operacionais da rede.

2.2.1 Custo de interrupção

Considera-se que o custo de interrupção de fornecimento da energia elétrica, expresso na equação (1), é composto pelo custo da energia não suprida e custos adicionais associados à interrupção de energia das cargas.

$$CT_{NFE} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{d \in \mathcal{D}^{ld}} \left(C_d^{NFE} \cdot P_{d,t}^{ld} \cdot \Delta t + A_d^{NFE} \cdot \Delta t \right) (1 - y_{d,t}^{ld}) \quad (1)$$

Na equação (1) o custo da energia não suprida é proporcional à energia estimada para o período em que ocorreu a interrupção. Os custos adicionais devido ao não fornecimento de energia às cargas podem contemplar os seguintes aspectos: para cargas convencionais, indicam o nível de prioridade da carga; para as cargas participantes do PRD, expressam os custos das compensações financeiras. Os custos adicionais são proporcionais ao tempo em que carga fica desenergizada.

2.2.2 Custo das operações de chaveamentos

O custo dos chaveamentos está associado às operações realizadas nas chaves de manobras e cargas pertencentes ao PRD. A operação de chaveamento ocorre sempre que há a comutação do estado de um equipamento de manobra. Nessa perspectiva, estabelece-se a expressão (2) que fornece o custo das operações de chaveamentos.

$$CT_{SWO} = \sum_{ik \in \mathcal{R}^{sw}} C_{ik}^{sw} (n_{ik}^{-,sw} + n_{ik}^{+,sw}) + \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{d \in \mathcal{D}^{ld,PRD}} C_d^{ld,PRD} \cdot (n_{d,t}^{-,PRD} + n_{d,t}^{+,PRD}) \quad (2)$$

Na equação (2), calcula-se o custo das operações mínimas que devem ser efetuadas nas chaves de manobras para modificar a topologia no estado de operação normal para a topologia do estado restaurativo. No cálculo das operações de chaveamentos para controle das cargas do PRD, a comutação das chaves é determinada pelas variáveis auxiliares $n_{d,t}^{-,PRD}$ e $n_{d,t}^{+,PRD}$.

O termo de cálculo dos custos das operações das chaves de manobras, presente na equação (2) é linearizado por meio da introdução das variáveis auxiliares $n_d^{-,sw}$ e $n_d^{+,sw}$, sendo necessário, portanto, introduzir as restrições (3)-(4).

$$y_{ik}^{sw} - y_{ik,0}^{sw} = n_{ik}^{+,sw} - n_{ik}^{-,sw}, \quad \forall ik \in \mathcal{R}^{sw} \quad (3)$$

$$n_{ik}^{-,sw}, n_{ik}^{+,sw} \in \{0, 1\}, \quad \forall ik \in \mathcal{R}^{sw} \quad (4)$$

2.2.3 Custo da geração distribuída

O custo atribuído à geração distribuída, expresso pela equação (5), é composto pelo custo da energia fornecida pelos geradores despacháveis e não despacháveis ao longo do período de operação.

$$CT_{DG} = \sum_{d \in \mathcal{D}^{ddg}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_d^{ddg} \cdot P_{d,t}^{ddg} \cdot \Delta t + \sum_{d \in \mathcal{D}^{ndg}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_d^{ndg} \cdot P_{d,t}^{ndg} \cdot \Delta t \quad (5)$$

2.2.4 Custo das perdas de energia

O custo das perdas de energia elétrica é definido pela equação (6), em que calcula-se o custo da energia dissipada nas linhas de distribuição no período de operação. O custo associado às perdas de energia, no período de operação, tende a ser baixo, porque o tempo em que a rede opera no estado restaurativo é, normalmente, curto (CURČIĆ *et al.*, 1995; SHEN *et al.*, 2018). No entanto, considerar o custo das perdas técnicas na função objetivo possibilita que a restrição cônica associada à corrente, apresentada na seção seguinte, fique ativa, tornando as equações de fluxo de potência do modelo de PCSOIM equivalentes ao modelo não linear original (FRANCO *et al.*, 2014).

$$CT_L = C^L \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{ik \in \mathcal{R}^{sw}} L_{ik,t} \cdot R_{ik} \quad (6)$$

2.2.5 Penalização das violações das restrições operacionais da rede

As restrições operacionais da rede são as restrições de tensão nodal e corrente nas linhas. Essas restrições podem ser expressas, simplesmente, por meio das expressões:

$$\begin{aligned} \underline{V}_i^2 \cdot y_i^b &\leq U_{ik,t} \leq \bar{V}_i^2 \cdot y_i^b, & \forall i \in \mathcal{B}, \forall t \in \mathcal{T} \\ 0 &\leq L_{ik,t} \leq \bar{I}_{ik}^2 \cdot y_{ik}^{sw}, & \forall ik \in \mathcal{R}^{sw}, \forall t \in \mathcal{T} \\ 0 &\leq L_{ik,t} \leq \bar{I}_{ik}^2, & \forall ik \in \mathcal{R}^{nsw}, \forall t \in \mathcal{T} \end{aligned}$$

No entanto, como a solução é construída parcialmente por uma meta-heurística, há a possibilidade que uma solução candidata viole as restrições operacionais impedindo a solução do FPO. É possível resolver este problema construindo uma expressão que penalize essas violações na função objetivo. Desse modo, considerando a restrição de tensão, definem-se:

$$\begin{aligned} \underline{\Delta U}_{i,t} &= \max \left\{ 0, y_i^b \cdot \underline{V}_i^2 - U_{i,t} \right\}, & \forall i \in \mathcal{B}, \forall t \in \mathcal{T} \\ \overline{\Delta U}_{i,t} &= \max \left\{ 0, U_{i,t} - \bar{V}_i^2 \cdot y_i^b \right\}, & \forall i \in \mathcal{B}, \forall t \in \mathcal{T} \end{aligned}$$

Assim, as variáveis $\underline{\Delta U}$ e $\overline{\Delta U}$ determinam os valores das violações dos limites das magnitudes de tensão mínima e máxima, respectivamente. No entanto, como as expressões são não lineares

é necessário redefini-las por meio de manipulações algébricas, obtendo as restrições (7)-(10).

$$\underline{\Delta U}_{i,t} \geq y_i^b \cdot \underline{V}_i^2 - U_{i,t}, \quad \forall i \in \mathfrak{B}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (7)$$

$$\underline{\Delta U}_{i,t} \geq 0, \quad \forall i \in \mathfrak{B}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (8)$$

$$\overline{\Delta U}_{i,t} \geq U_{i,t} - \overline{V}_i^2 \cdot y_i^b, \quad \forall i \in \mathfrak{B}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (9)$$

$$\overline{\Delta U}_{i,t} \geq 0, \quad \forall i \in \mathfrak{B}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (10)$$

As restrições (7)-(10) ficam ativas, em um problema de minimização, desde que na função objetivo as variáveis $\underline{\Delta U}$ e $\overline{\Delta U}$ estejam associadas a uma constante estritamente positiva. Similarmente, definem-se as restrições devido à violação da restrição de corrente das linhas por (11)-(13).

$$\overline{\Delta L}_{ik,t} \geq L_{ik,t} - \overline{I}_{ik}^2 \cdot y_{ik}^{sw}, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}^{sw}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (11)$$

$$\overline{\Delta L}_{ik,t} \geq L_{ik,t} - \overline{I}_{ik}^2, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}^{nsw}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (12)$$

$$\overline{\Delta L}_{ik,t} \geq 0, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (13)$$

A partir da definição das variáveis de violação, estabelece-se a expressão de penalização das violações das restrições operacionais da rede (14).

$$CP_{VO} = K_{pen} \cdot \sum_{t \in \mathfrak{T}} \left[\sum_{i \in \mathfrak{B}} (\underline{\Delta U}_{i,t} + \overline{\Delta U}_{i,t}) + \sum_{ik \in \mathfrak{R}} \overline{\Delta L}_{ik,t} \right] \quad (14)$$

Na equação (14), a constante K_{pen} é o fator de penalização, sendo um parâmetro de valor positivo de ordem de grandeza muito maior que os termos da função objetivo. A calibração deste parâmetro é importante para solução do problema. Empiricamente, verifica-se que valores elevados de K_{pen} favorecem soluções cujos valores das tensões nodais e correntes nas linhas estejam dentro dos limites especificados, enquanto que atribuição de valores baixos para K_{pen} equivale a relaxar as restrições operacionais.

2.3 Restrições do modelo

As restrições do modelo descrevem o estado e os limites da rede e os equipamentos operando no estado restaurativo. O equacionamento apresentado é baseado no modelo proposto em Macedo *et al.* (2015), que formula um problema de PCSOIM para determinar a operação ótima de sistemas de distribuição com equipamentos de armazenamento de energia. Devido às hipóteses adotadas e particularidades do problema tratado nesse projeto, foram realizadas algumas adaptações no modelo.

2.3.1 Equações de fluxo de potência

Em decorrência da LKC, conforme ilustrado na Figura 3a, a soma das injeções de potências ativa e reativa nas barras do sistema deve satisfazer as restrições (15) e (16), respectivamente.

$$\sum_{ki \in \mathfrak{R}} P_{ki,t} + \sum_{d \in \mathfrak{D}_i} P_{d,t}^{dev} = \sum_{ik \in \mathfrak{R}} (P_{ik,t} + R_{ik} \cdot L_{ik,t}), \quad \forall i \in \mathfrak{B}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (15)$$

$$\sum_{ki \in \mathfrak{R}} Q_{ki,t} + \sum_{d \in \mathfrak{D}_i} Q_{d,t}^{dev} = \sum_{ik \in \mathfrak{R}} (Q_{ik,t} + X_{ik} \cdot L_{ik,t}), \quad \forall i \in \mathfrak{B}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (16)$$

As injeções de potência decorrentes dos equipamentos do tipo *shunt*, podem ser expressas, genericamente, por meio das variáveis $P_{d,t}^{dev}$ e $Q_{d,t}^{dev}$. As potências ativa e reativa dissipadas nas linhas são alocadas nas respectivas barras de origem.

Considerando o diagrama da Figura 3b, a aplicação da LKT possibilita, após manipulações algébricas, relacionar a queda da magnitude de tensão quadrática com os parâmetros da linha, fluxo de potências ativa e reativa e a magnitude de corrente por meio da equação (17). Os passos para se obter essa expressão são encontrados em Franco *et al.* (2013).

$$U_{i,t} - U_{k,t} - 2(R_{ik}P_{ik,t} + X_{ik}Q_{ik,t}) - Z_{ik}^2 L_{ik,t} = 0, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}^{nsw}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (17)$$

Verifica-se que a equação (17) é aplicada apenas aos ramos que não possuem chaves de manobras. No caso dos ramos com chaves de manobra há duas possibilidades: a chave está fechada, então a equação (17) é válida; a chave está aberta, logo o fluxo de potência e a corrente na linha são nulos, e a diferença de tensão entre as barras adjacentes é indefinida. Assim, para os ramos com chaves de manobra tem-se as equações (18) e (19). Considerando a existência de ramos com e sem chaves de manobras tem-se que $\mathfrak{R} = \mathfrak{R}^{sw} \cup \mathfrak{R}^{nsw}$.

$$-M(1 - y_{ik}^{sw}) \leq U_{i,t} - U_{k,t} - 2(R_{ik}P_{ik,t} + X_{ik}Q_{ik,t}) - Z_{ik}^2 L_{ik,t} \leq M(1 - y_{ik}^{sw}), \quad \forall ik \in \mathfrak{R}^{sw}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (18)$$

$$y_{ik}^{sw} \in \{0, 1\}, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}^{sw} \quad (19)$$

A magnitude da corrente quadrática se relaciona com os fluxos de potência ativa e reativa por meio da equação:

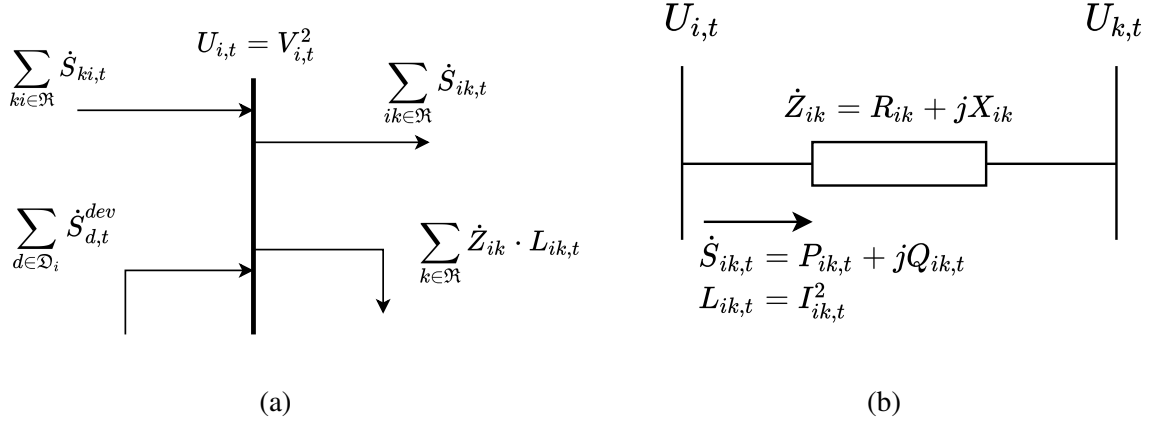
$$L_{ik,t} = \frac{P_{ik,t}^2 + Q_{ik,t}^2}{U_{k,t}}, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}, \forall t \in \mathfrak{T}$$

No entanto, esta equação é não linear. Desse modo, a convexidade e otimalidade é garantida relaxando a igualdade, transformando-a em uma desigualdade cônica de segunda ordem (JABR, 2006). Assim, obtém-se:

$$U_{k,t} \cdot L_{ik,t} \geq P_{ik,t}^2 + Q_{ik,t}^2, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (20)$$

$$L_{ik,t} \geq 0, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (21)$$

Figura 3 – Fluxo de potência (a) nas barras e (b) linhas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No problema de restauração, há a possibilidade de que algumas barras fiquem desenergizadas, sendo necessário expressar essa condição, que é atendida por meio da restrição (22), em que $y_i^b = 0$ indica que barra está desenergizada; e $y_i^b = 1$ indica que a barra está energizada. Similarmente, não há fluxo de potência em linhas desenergizadas pela operação de chaves de manobra, o que é modelado pelas restrições (24)-(26).

$$0 \leq U_{i,t} \leq M \cdot y_i^b, \quad \forall i \in \mathfrak{B}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (22)$$

$$y_i^b \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathfrak{B} \quad (23)$$

$$-M \cdot y_{ik}^{sw} \leq P_{ik,t} \leq M \cdot y_{ik}^{sw}, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}^{sw}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (24)$$

$$-M \cdot y_{ik}^{sw} \leq Q_{ik,t} \leq M \cdot y_{ik}^{sw}, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}^{sw}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (25)$$

$$0 \leq L_{ik,t} \leq M \cdot y_{ik}^{sw}, \quad \forall ik \in \mathfrak{R}^{sw}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (26)$$

2.3.2 Modelo da subestação

A subestação pode ser modelada como uma fonte de tensão. Nesse caso, as variáveis a serem determinadas são as injeções de potências ativa e reativa, representadas, respectivamente, por (28) e (29). Assim, as restrições que modelam as grandezas elétricas da barra da subestação podem ser expressas por (27)-(29).

$$U_{i,t} = y_i^b \cdot (V_d^{src})^2, \quad \forall i \in \{k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{src} \neq \emptyset\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{src} \subset \mathfrak{D}_i, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (27)$$

$$P_{d,t}^{dev} = P_{d,t}^{src}, \quad \forall i \in \{k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{src} \neq \emptyset\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{src} \subset \mathfrak{D}_i, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (28)$$

$$Q_{d,t}^{dev} = Q_{d,t}^{src}, \quad \forall i \in \{k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{src} \neq \emptyset\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{src} \subset \mathfrak{D}_i, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (29)$$

Na restrição (27), fixa-se o valor quadrático da magnitude da tensão da barra i que representa uma subestação, como sendo o quadrado do valor nominal da tensão da subestação.

Verifica-se que caso a subestação esteja desenergizada, então a tensão na barra i é zero. As restrições (28) e (29) definem as variáveis correspondentes à injeção de potências ativa e reativa da subestação.

2.3.3 Modelo das cargas

Para as cargas do sistema, independente do subconjunto ao qual elas pertencem, conhecem-se as demandas ativa e reativa em cada instante do período de operação. Desse modo, definem-se as restrições (30)-(32).

$$P_{d,t}^{dev} = -y_{d,t}^{ld} \cdot P_{d,t}^{ld}, \quad \forall i \in \left\{ k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{ld} \neq \emptyset \right\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{ld} \subset \mathfrak{D}_i, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (30)$$

$$Q_{d,t}^{dev} = -y_{d,t}^{ld} \cdot Q_{d,t}^{ld}, \quad \forall i \in \left\{ k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{ld} \neq \emptyset \right\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{ld} \subset \mathfrak{D}_i, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (31)$$

$$y_{d,t}^{ld} \in \{0, 1\}, \quad \forall d \in \mathfrak{D}^{ld} \subset \mathfrak{D}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (32)$$

As restrições (30) e (31) definem as variáveis de injeção da carga. Nessas equações, considera-se que a fluxo de potência devido à demanda flui da barra para a carga, no sentido oposto à convenção estabelecida na Figura 3a.

O estado da carga é dependente do estado de energização da barra na qual está conectada. Para as cargas convencionais e para aquelas participantes do PRD, essa dependência é representada pelas restrições (33) e (34):

$$y_{d,t}^{ld} = y_i^b, \quad \forall i \in \left\{ k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{ld} \neq \emptyset \right\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{ld,conv} \subset \mathfrak{D}_i^{ld}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (33)$$

$$y_{d,t}^{ld} \leq y_i^b, \quad \forall i \in \left\{ k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{ld} \neq \emptyset \right\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{ld,PRD} \subset \mathfrak{D}_i^{ld}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (34)$$

Na restrição (33), define-se que o estado das cargas convencionais é igual ao estado da barra. Na restrição (34), considera-se que o estado da carga incluída no PRD seja definido apenas quando a barra está energizada, caso contrário está desenergizada ($y_{d,t}^{ld} = 0$).

No controle das cargas do PRD, considera-se que o número de chaveamentos no período de operação é limitado por $\bar{n}_d^{ld,PRD}$. Essa característica é representada pela equação (35):

$$\sum_{t \in \mathfrak{T}} |y_{d,t}^{ld} - y_{d,t-1}^{ld}| \leq \bar{n}_d^{ld,PRD}, \quad \forall d \in \mathfrak{D}^{ld,PRD} \quad (35)$$

No entanto, a equação (35) é não linear, tornando-se necessário realizar a sua linearização. Utilizando uma adaptação de Macedo *et al.* (2015), introduz-se duas variáveis auxiliares $n_{d,t}^{-,PRD}$ e $n_{d,t}^{+,PRD}$ e define-se o conjunto de restrições (36)-(38). A restrição (37) possibilita que as variáveis auxiliares façam a detecção da transição de estados entre dois instantes subsequentes. A restrição (36) define o limite para a quantidade de transições de estado da carga d .

$$\sum_{t \in \mathfrak{T}} \left(n_{d,t}^{-,PRD} + n_{d,t}^{+,PRD} \right) \leq \bar{n}_d^{ld,PRD}, \quad \forall d \in \mathfrak{D}^{ld,PRD} \quad (36)$$

$$y_{d,t}^{ld} - y_{d,t-1}^{ld} = n_{d,t}^{+,PRD} - n_{d,t}^{-,PRD}, \quad \forall d \in \mathfrak{D}^{ld,PRD}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (37)$$

$$n_{d,t}^{-,PRD}, n_{d,t}^{+,PRD} \in \{0, 1\}, \quad \forall d \in \mathfrak{D}^{ld,PRD}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (38)$$

2.3.4 Modelo dos ESS

Para os sistemas de armazenamento de energia, o modelo gerencia a energia armazenada ajustando a potência de saída do dispositivo. A quantidade de energia armazenada no ESS d no intervalo t é determinada pela equação (39) e está limitada à valores mínimos e máximos, conforme a restrição (40).

$$E_{d,t}^{ess} = E_{d,t-1}^{ess} (1 - \beta_d^{ess} \Delta t) - \frac{\Delta t \cdot P_{d,t}^{ess}}{\eta_d^{ess}}, \quad \forall d \in \mathcal{D}^{ess}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (39)$$

$$\underline{E}_d^{ess} \leq E_{d,t}^{ess} \leq \bar{E}_d^{ess}, \quad \forall d \in \mathcal{D}^{ess}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (40)$$

Considerando o sentido de injeção de potência convencionado para os dispositivos *shunt*, conforme ilustrado na Figura 3a, no modo carga tem-se $P_{d,t}^{ess} < 0$ e, pela equação (39), uma parcela da energia extraída da rede será armazenada. No modo descarga tem-se $P_{d,t}^{ess} > 0$, uma parcela da energia armazenada é exportada para a rede. Quando $t = 0$, então $E_{d,t-1}^{ess}$ corresponde à energia armazenada no estado pré-falta, isto é, $E_{d,t-1}^{ess} = E_{d,PF}^{ess}$.

A potência injetada na rede é limitada pelos valores mínimo e máximo, conforme a restrição (41), e pela restrição de rampa de carga e descarga, indicada pela equação (42), que impede a variação arbitrária da potência. Na equação (42), para $t = 0$, considera-se $P_{d,t-1}^{ess} = 0$. As equações (43) e (44) estabelecem, respectivamente, a variável de injeção de potência na barra e o estado do ESS.

$$y_d^{ess} \cdot \underline{P}_d^{ess} \leq P_{d,t}^{ess} \leq y_d^{ess} \cdot \bar{P}_d^{ess}, \quad \forall d \in \mathcal{D}^{ess}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (41)$$

$$\underline{\alpha}_d^{ess} \leq \frac{P_{d,t}^{ess} - P_{d,t-1}^{ess}}{\Delta t} \leq \bar{\alpha}_d^{ess}, \quad \forall d \in \mathcal{D}^{ess}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (42)$$

$$P_{d,t}^{dev} = P_{d,t}^{ess}, \quad \forall i \in \{k \in \mathcal{B} : \mathcal{D}_k^{ess} \neq \emptyset\}, \forall d \in \mathcal{D}_i^{ess} \subset \mathcal{D}_i, \forall t \in \mathcal{T} \quad (43)$$

$$y_d^{ess} \leq y_i^b, \quad \forall i \in \{k \in \mathcal{B} : \mathcal{D}_k^{ess} \neq \emptyset\}, \forall d \in \mathcal{D}_i^{ess} \subset \mathcal{D}_i \quad (44)$$

$$y_d^{ess} \in \{0, 1\}, \quad \forall d \in \mathcal{D}^{ess} \subset \mathcal{D} \quad (45)$$

2.3.5 Modelo dos geradores despacháveis

Os geradores despacháveis são modelados por meio das equações (46)-(52), que descrevem os limites de injeção das potências ativa e reativa do gerador. A equação (49) estabelece as restrições de rampa do gerador para $t \neq 0$. As equações que estabelecem os limites de injeção de potência dos geradores despacháveis correspondem à curva de capacidade apresentada na

Figura 4a.

$$y_d^{ddg} \cdot \underline{P}_d^{ddg} \leq P_{d,t}^{ddg} \leq y_d^{ddg} \cdot \overline{P}_d^{ddg}, \quad \forall d \in \mathcal{D}^{ddg}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (46)$$

$$y_d^{ddg} \cdot \underline{Q}_d^{ddg} \leq Q_{d,t}^{ddg} \leq y_d^{ddg} \cdot \overline{Q}_d^{ddg}, \quad \forall d \in \mathcal{D}^{ddg}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (47)$$

$$\left(P_d^{ddg}\right)^2 + \left(Q_d^{ddg}\right)^2 \leq \left(\overline{S}_d^{ddg}\right)^2, \quad \forall d \in \mathcal{D}^{ddg}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (48)$$

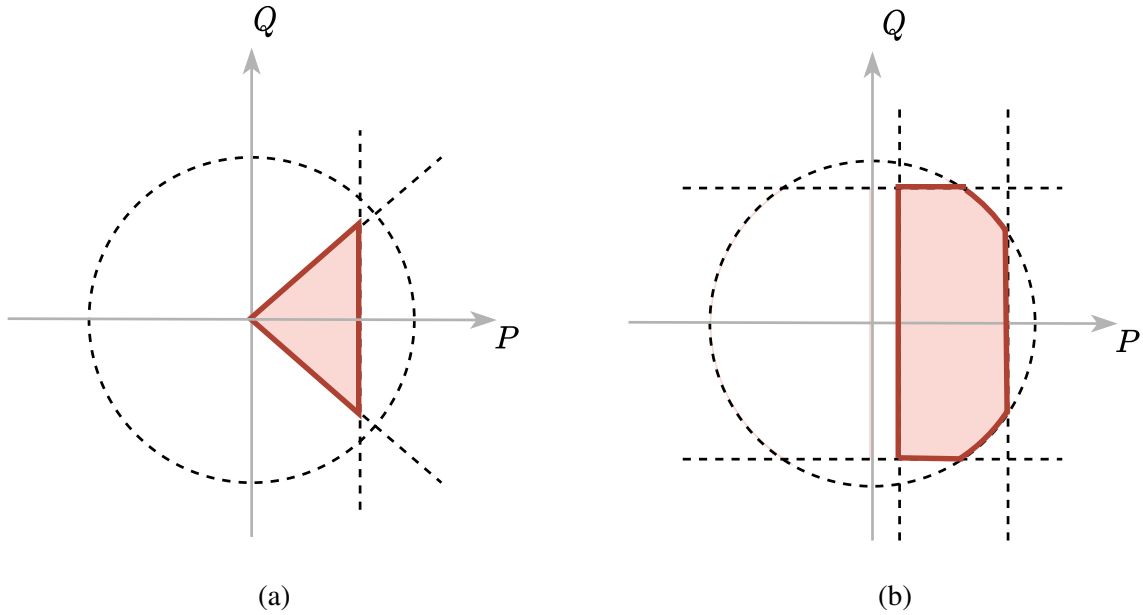
$$\underline{\alpha}_d^{ddg} \leq \frac{P_{d,t}^{ddg} - P_{d,t-1}^{ddg}}{\Delta t} \leq \overline{\alpha}_d^{ddg}, \quad \forall d \in \mathcal{D}^{ddg}, \forall t \in \{t \in \mathcal{T} : t \neq 0\}, \quad (49)$$

$$P_{d,t}^{dev} = P_{d,t}^{ddg}, \quad \forall i \in \left\{k \in \mathcal{B} : \mathcal{D}_k^{ddg} \neq \emptyset\right\}, \forall d \in \mathcal{D}_i^{ddg} \subset \mathcal{D}_i, \forall t \in \mathcal{T} \quad (50)$$

$$Q_{d,t}^{dev} = Q_{d,t}^{ddg}, \quad \forall i \in \left\{k \in \mathcal{B} : \mathcal{D}_k^{ddg} \neq \emptyset\right\}, \forall d \in \mathcal{D}_i^{ddg} \subset \mathcal{D}_i, \forall t \in \mathcal{T} \quad (51)$$

$$y_d^{ddg} \in \{0, 1\}, \quad \forall d \in \mathcal{D}^{ddg} \quad (52)$$

Figura 4 – Curva de capacidade dos geradores (a) despacháveis e (b) não despacháveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O estado dos geradores despacháveis que não possuem capacidade de *black start* é descrito por meio da equação (53). Para os geradores com capacidade de *black start* o estado é estabelecido por meio da equação (54).

$$y_d^{ddg} \leq y_i^b, \quad \forall i \in \left\{k \in \mathcal{B} : \mathcal{D}_k^{ddg} \neq \emptyset\right\}, \forall d \in \mathcal{D}_i^{ddg} - \mathcal{D}_i^{ddg,bs} \quad (53)$$

$$y_d^{ddg} = x_d^{ddg,conv} + x_d^{ddg,bs}, \quad \forall i \in \left\{k \in \mathcal{B} : \mathcal{D}_k^{ddg,bs} \neq \emptyset\right\}, \forall d \in \mathcal{D}_i^{ddg,bs} \subset \mathcal{D}_i^{ddg} \quad (54)$$

Na equação (54), as variáveis $x_d^{ddg,conv}$ e $x_d^{ddg,bs}$ indicam o modo de operação do gerador com capacidade BS. Quando $x_d^{ddg,conv} = 1$, então o gerador opera no modo despachável convencional, isto é, as tensões terminais do gerador permanecem livres; e quando $x_d^{ddg,conv} = 0$, indica apenas que o gerador não está operando neste modo. Quando $x_d^{ddg,bs} = 1$, então o gerador opera no modo de controle das tensões terminais, fixando-a no valor de tensão nominal do gerador; quando $x_d^{ddg,bs} = 0$, indica que o gerador não está neste modo de operação. Quando $x_d^{ddg,conv} = x_d^{ddg,bs} = 0$ indica que o gerador está desenergizado. Por convenção, estabeleceu-se que o modo de controle das tensões terminais está ativo apenas para o gerador com capacidade de BS que conduz a formação de uma microrrede flexível. Na equação (55) se estabelece as tensões terminais dos geradores despacháveis com capacidade BS em função do modo de operação.

$$\begin{aligned} -M \cdot x_d^{ddg,conv} + (V_d^{ddg})^2 \cdot x_d^{ddg,bs} \leq U_{i,t} \leq M \cdot x_d^{ddg,conv} + (V_d^{ddg})^2 \cdot x_d^{ddg,bs}, \\ \forall i \in \left\{ k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{ddg,bs} \neq \emptyset \right\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{ddg,bs} \subset \mathfrak{D}_i^{ddg}, \forall t \in \mathfrak{T} \end{aligned} \quad (55)$$

2.3.6 Modelo dos geradores não despacháveis

Os geradores não despacháveis são modelados por meio das equações (56)-(62), que restringem a injeção das potências ativa e reativa de acordo com a curva de capacidade da Figura 4b. No modelo, a potência injetada pelo gerador é limitada pela disponibilidade de potência fornecida pela fonte primária, que varia com o tempo, e pelas restrições operacionais do inversor. O suporte de reativos é limitado pela injeção de potência ativa e pelos limites estabelecidos para o fator de potência.

$$0 \leq P_{d,t}^{ndg} \leq y_d^{ndg} \cdot \bar{P}_{d,t}^{ndg}, \forall d \in \mathfrak{D}^{ndg}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (56)$$

$$P_{d,t}^{ndg} \cdot \tan \left[\arccos \left(\underline{pf}_d^{ndg} \right) \right] \leq Q_{d,t}^{ndg} \leq P_{d,t}^{ndg} \cdot \tan \left[\arccos \left(\overline{pf}_d^{ndg} \right) \right], \forall d \in \mathfrak{D}^{ndg}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (57)$$

$$\left(P_{d,t}^{ndg} \right)^2 + \left(Q_{d,t}^{ndg} \right)^2 \leq \left(\bar{S}_d^{ndg} \right)^2, \forall d \in \mathfrak{D}^{ndg}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (58)$$

$$P_{d,t}^{dev} = P_{d,t}^{ndg}, \forall i \in \left\{ k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{ndg} \neq \emptyset \right\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{ndg}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (59)$$

$$Q_{d,t}^{dev} = Q_{d,t}^{ndg}, \forall i \in \left\{ k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{ndg} \neq \emptyset \right\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{ndg}, \forall t \in \mathfrak{T} \quad (60)$$

$$y_d^{ndg} \leq y_i^b, \forall i \in \left\{ k \in \mathfrak{B} : \mathfrak{D}_k^{ndg} \neq \emptyset \right\}, \forall d \in \mathfrak{D}_i^{ndg} \quad (61)$$

$$y_d^{ndg} \in \{0, 1\}, \forall d \in \mathfrak{D}^{ndg} \quad (62)$$

2.4 Formulação da operação no estado restaurativo

A rede operando no estado restaurativo é formulada por meio do fluxo ótimo de potência indicado em (63), que consiste em problema de PCSOIM. Com a formulação, objetiva-se, portanto, reduzir os custos associados a operação da rede no estado restaurativo atendendo as

restrições operacionais da rede e dos equipamentos.

$$\min : (1) + (2) + (5) + (6) + (14)$$

s.a.:

(63)

$$(3) - (4)$$

$$(7) - (13)$$

$$(15) - (34)$$

$$(36) - (62)$$

3 Método de solução

Neste capítulo, apresenta-se o método proposto para solução do problema de RSDEE. O método divide o problema de RSDEE em dois estágios, em que no primeiro estágio objetiva-se determinar a topologia de operação da rede no estado restaurativo e no segundo estágio, determina-se a sequência de operações que conduzirá a topologia pós-falta à topologia fornecida como solução do primeiro estágio.

3.1 Estratégia de solução do primeiro estágio

No primeiro estágio, busca-se determinar uma topologia de operação para o estado restaurativo que seja factível e de boa qualidade. Desse modo, propõe-se para este estágio uma estratégia de solução baseada em meta-heurísticas de Busca de Vizinhança Variável (VNS).

3.1.1 Busca de vizinhança variável

Um problema de otimização pode ser definido, genericamente, por:

$$\min \{f(x) : x \in S\}$$

Em que $f(x)$ é a função objetivo do problema; e S o seu conjunto de soluções factíveis. Dada uma solução x , diz-se que o conjunto $N(x) \subseteq S$ é vizinhança de x se existir um conjunto aberto U tal que $x \in U \subseteq N(x)$. Define-se a solução x^* como ótimo (mínimo) local se existe vizinhança $N(x^*)$ tal que a seguinte condição seja satisfeita:

$$f(x^*) \leq f(x), \forall x \in S \cap N(x^*)$$

Uma solução $x^* \in S$ é ótimo (mínimo) global do problema se ela satisfaz a seguinte condição:

$$f(x^*) \leq f(x), \forall x \in S$$

Determinar a solução de problemas de otimização que modelam o comportamento de sistemas físicos reais pode ser uma tarefa que exige um tempo de processamento proibitivo, já que muito desses problemas pertencem à classe de problemas *NP-Hard* (HANSEN *et al.*, 2010). Nesse caso, é aceitável utilizar técnicas que forneçam soluções de boa qualidade (próximas ao ótimo global) em um tempo computacional razoável. Dentre as possíveis abordagens destacam-se as metas-heurísticas, que consistem em um conjunto de métodos de estrutura geral que gerencia o processo de busca de soluções.

Os algoritmos de busca de vizinhança variável (VNS - do inglês *Variable Neighbourhood Search*) são uma classe de metas-heurísticas que foram introduzidas por Mladenović e Hansen

(1997). A característica fundamental das metas-heurísticas VNS é a mudança sistemática das estruturas de vizinhança nas etapas de intensificação, em que se busca por ótimos locais, e diversificação, em que se exploram novas regiões do espaço de solução (HANSEN *et al.*, 2010). Segundo Hansen *et al.* (2017), a estratégia de mudança de vizinhança é baseada nas seguintes observações:

1. O ótimo local de uma estrutura de vizinhança não é necessariamente o ótimo local das demais estruturas de vizinhança;
2. O ótimo global é o ótimo local de todas as estruturas de vizinhança possíveis;
3. Para muitos problemas, os ótimos locais em relação a uma ou mais estruturas de vizinhança estão relativamente próximos um dos outros.

Nos algoritmos VNS as observações 1 e 2 são exploradas pelo uso de diferentes estruturas de vizinhança e a aplicação de busca local no processo de busca por soluções ótimas do problema de otimização. A observação 3, que é empírica, sugere que a vizinhança da solução incumbente seja intensamente explorada (HANSEN *et al.*, 2017).

Os diferentes algoritmos de VNS, normalmente, apresentam um esquema simples e exigem poucos parâmetros. Além disso, os algoritmos são flexíveis à integração de heurísticas eficientes no processo de busca local.

3.1.1.1 Elementos de um algoritmo VNS

Os algoritmos VNS possuem três elementos básicos: 1) melhoria, em que se busca uma solução de melhor qualidade a partir de uma solução dada; 2) agitação, cujo objetivo é evitar soluções ótimas locais; 3) e mudança de vizinhança, que é o mecanismo utilizado para conduzir o processo de busca das metas-heurísticas de VNS.

A fase de melhoria pode ser implementada por meio de heurísticas de busca local. Esse tipo de heurística explora a vizinhança de uma solução fornecida em busca de uma solução de melhor qualidade. As abordagens mais comuns empregadas na estratégia de busca local são: primeira melhoria, em que o processo de busca é interrompido ao encontrar a primeira melhor solução na vizinhança avaliada; e a maior melhoria, em que se busca a melhor solução dentre todas as soluções da vizinhança da solução onde foi iniciada a busca (HANSEN *et al.*, 2017).

A diversificação nos métodos VNS é assegurada na fase de agitação. A implementação da agitação é baseada, normalmente, em uma abordagem estocástica. Um procedimento simples para essa fase consiste em escolher, aleatoriamente, uma solução contida em uma vizinhança especificada (HANSEN *et al.*, 2017).

O mecanismo de mudança de vizinhança define os critérios que estabelecem a próxima vizinhança que será explorada e se uma dada solução deve ser aceita como a nova solução

incumbente (HANSEN *et al.*, 2017). Um algoritmo comumente adotado na fase de mudança de vizinhança é denominado de mudança sequencial de vizinhança, em que encontrada uma solução melhor que a solução incumbente, a busca continuará a partir da primeira estrutura de vizinhança da nova solução; caso contrário, a solução incumbente é mantida e a busca continuará na próxima estrutura de vizinhança.

3.1.1.2 Variable Neighbourhood Descent (VND)

O VND explora sequencialmente e de forma determinística as estruturas de vizinhanças consideradas, buscando melhorar a solução incumbente (HANSEN *et al.*, 2010). A solução final será a melhor solução encontrada entre todas as vizinhanças visitadas.

No Algoritmo 1 são apresentadas as etapas do algoritmo VND. O processo é iniciado definindo a solução inicial como solução incumbente. A cada iteração busca-se melhorar, sucessivamente, a solução incumbente por meio de heurísticas de busca local. A busca local, normalmente, é a de maior melhoria, ou seja, busca-se a melhor solução que está na vizinhança avaliada. No Algoritmo 1, a mudança de vizinhança é do tipo sequencial, descrita na seção anterior e ocorre nas linhas 7-14. A execução do algoritmo VND é interrompida quando não é possível melhorar a solução incumbente aplicando as heurísticas de busca local nas vizinhanças definidas.

Algoritmo 1: Variable Neighbourhood Descent (VND).

Entrada: Solução inicial x_0 ; conjunto de estruturas de vizinhanças $\mathcal{N} = \{N_1, \dots, N_n\}$.

Resultado: Solução incumbente x .

```

1  $x \leftarrow x_0$ ;
2  $run \leftarrow \text{true}$  ;
3 fazer
4    $k \leftarrow 1$ ;
5   enquanto  $k \leq |\mathcal{N}|$  faça
6      $x' \leftarrow \arg \min_{y \in N_k(x)} f(y)$  ;
7     se  $f(x') < f(x)$  então
8        $k \leftarrow 1$ ;
9        $run \leftarrow \text{true}$  ;
10       $x \leftarrow x'$  ;
11     senão
12        $run \leftarrow \text{false}$  ;
13        $k \leftarrow k + 1$ ;
14     fim
15   fim
16 enquanto  $run$ ;

```

3.1.1.3 Reduced Variable Neighbourhood Search (RVNS)

O algoritmo RVNS é um método estocástico que descarta a etapa de melhoria. O procedimento consiste em, basicamente, gerar uma nova solução na vizinhança da solução incumbente a partir do método de agitação estabelecido. Se a solução gerada é melhor que a solução incumbente, então passa-se para a nova solução; caso contrário, muda-se a estrutura de vizinhança. Os passos do algoritmo RVNS são apresentados no Algoritmo 2.

O algoritmo RVNS é útil em problemas em que os procedimentos de busca local possuem um custo de processamento elevado. Geralmente, o algoritmo apresenta melhor desempenho com duas estruturas de vizinhança (HANSEN *et al.*, 2010). Podem ser estabelecidos diferentes critérios de parada para o algoritmo RVNS, sendo comum estabelecer, por exemplo, um número máximo de iterações executadas.

Algoritmo 2: *Reduced Variable Neighbourhood Search (RVNS).*

Entrada: Solução inicial x_0 ; conjunto de estruturas de vizinhanças $\mathcal{N} = \{N_1, \dots, N_n\}$.

Resultado: Solução incumbente x .

```

1  $x \leftarrow x_0$ ;
2  $i \leftarrow 0$ ;
  /*  $i$  indica quantidade de iterações - pode ser utilizado como
    critério de parada */
3 fazer
4    $k \leftarrow 1$ ;
5   enquanto  $k \leq |\mathcal{N}|$  faça
6      $x' \leftarrow \text{Agitação}(N_k(x))$ ;
7     se  $f(x') < f(x)$  então
8        $k \leftarrow 1$ ;
9        $x \leftarrow x'$ ;
10    senão
11       $k \leftarrow k + 1$ ;
12    fim
13  fim
14   $i \leftarrow i + 1$ ;
15 enquanto o critério de parada não é satisfeito;
```

3.1.1.4 Basic Variable Neighbourhood Search (BVNS)

O algoritmo BVNS explora as vizinhanças de forma determinística e estocástica. Na fase estocástica, gera-se uma solução na vizinhança da solução incumbente por meio do método de agitação definido. Na fase determinística, realiza-se a busca local na vizinhança da solução gerada na fase estocástica. Se a solução encontrada pela heurística de busca local é melhor que a solução incumbente, então atualiza-se a solução incumbente; caso contrário, realiza-se a mudança de vizinhança. O algoritmo BVNS é descrito no Algoritmo 3.

Algoritmo 3: *Basic Variable Neighbourhood Search (BVNS).***Entrada:** Solução inicial x_0 ; conjunto de estruturas de vizinhanças $\mathcal{N} = \{N_1, \dots, N_n\}$.**Resultado:** Solução incumbente x .

```

1   $x \leftarrow x_0$ ;
2   $i \leftarrow 0$ ;
3  fazer
4       $k \leftarrow 1$ ;
5      enquanto  $k \leq |\mathcal{N}|$  faça
6           $x' \leftarrow \text{Agitação}(N_k(x))$ ;
7           $x'' \leftarrow \text{Melhoria}(N_k(x'))$ ;
8          se  $f(x'') < f(x)$  então
9               $k \leftarrow 1$ ;
10              $x \leftarrow x''$ ;
11         senão
12              $k \leftarrow k + 1$ ;
13         fim
14     fim
15      $i \leftarrow i + 1$ ;
16 enquanto o critério de parada não é satisfeito;

```

3.1.1.5 *General Variable NEighbourhood Search (GVNS)*

O algoritmo GVNS possui uma estrutura similar ao algoritmo BVNS. A diferença entre os dois algoritmos é que enquanto o esquema BVNS utiliza uma heurística de busca local na etapa de melhoria, o GVNS utiliza o método VND. No GVNS, a estrutura de vizinhança utilizada na etapa de melhoria, normalmente, é diferente da estrutura de vizinhança utilizada na etapa de agitação. O algoritmo GVNS é apresentado no Algoritmo 4.

3.1.2 Algoritmos VNS e Técnicas de otimização clássica aplicados ao problema de RSDEE

Os quatro esquemas de VNS apresentados na seção anterior foram implementados em conformidade com os algoritmos descritos. Para todos os métodos implementados definiu-se como critério de parada um tempo máximo de execução. Adicionalmente, os algoritmos BVNS, RVNS e GVNS possuem mais dois critérios de parada: número máximo de execuções; e o número máximo de execuções sem que haja a melhoria da solução incumbente. Nos algoritmos implementados utilizou-se o algoritmo de agitação básico, que consiste em escolher uma solução aleatória da vizinhança avaliada. Na etapa de melhoria, exceto para o algoritmo VND, utilizou-se o método de primeira melhoria por exigir menor tempo de processamento computacional.

Com a utilização dos algoritmos VNS para solução do primário estágio do problema de RSDEE, torna-se necessário estabelecer uma representação computacional eficiente para as soluções candidatas e definir as estruturas de vizinhança. Nas subseções seguintes descrevem-se

Algoritmo 4: *General Variable Neighbourhood Search (GVNS).*

Entrada: Solução inicial x_0 ; conjunto de estruturas de vizinhanças $\mathcal{N} = \{N_1, \dots, N_n\}$ e $\mathcal{N}_{VND} = \{N_1^{VND}, \dots, N_m^{VND}\}$.

Resultado: Solução incumbente x .

```

1  $x \leftarrow x_0$ ;
2  $i \leftarrow 0$ ;
3 fazer
4    $k \leftarrow 1$ ;
5   enquanto  $k \leq |\mathcal{N}|$  faça
6      $x' \leftarrow \text{Agitação}(N_k(x))$ ;
7      $x'' \leftarrow \text{VND}(x', \mathcal{N}_{VND})$ ;
8     se  $f(x'') < f(x)$  então
9        $k \leftarrow 1$ ;
10       $x \leftarrow x''$ ;
11     senão
12        $k \leftarrow k + 1$ ;
13     fim
14   fim
15    $i \leftarrow i + 1$ ;
16 enquanto o critério de parada não é satisfeito;
```

os aspectos relacionados às representações das soluções e estruturas de vizinhança.

3.1.2.1 Representação das soluções

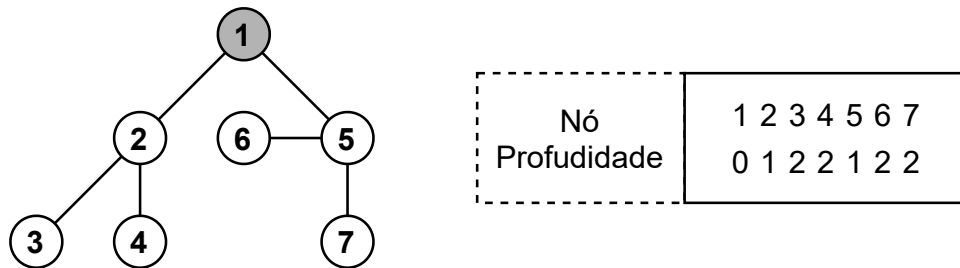
A solução fornecida pela meta-heurística VNS, no método proposto nesse projeto, é a topologia de operação da rede no estado restaurativo. Desse modo, a representação das soluções deve descrever a topologia da rede de distribuição. Computacionalmente, é possível representar a rede de distribuição por meio de um grafo, em que as barras são equivalentes aos nós e os circuitos elétricos entre os nós correspondem aos ramos do grafo. As redes radiais são representadas por árvores, que são um subtipo de grafo em que quaisquer dois nós do grafo são conectados por apenas um caminho.

Em Santos *et al.* (2010) é proposta uma representação para redes de distribuição denominada de representação nó profundidade (RNP). A RNP é uma proposta para representar um conjunto de árvores por meio de uma estrutura de dados e baseada no conceito de nó e profundidade do nó (distância entre a raiz da árvore e um nó específico).

Na Figura 5 é ilustrado um exemplo da aplicação da RNP na representação de uma árvore. Com a RNP, a árvore passa a ser representada por meio de um vetor de pares indicando o índice do nó e sua respectiva profundidade. O nó raiz da árvore ocupa sempre a primeira posição do vetor com profundidade zero. Tomando um nó qualquer como referência, a sua posição na estrutura da RNP deve ser estabelecida de modo que os nós pais (localizados à sua montante), precedam-o e possuam uma profundidade menor e os nós filhos (localizados à sua

jusante), sucedam-o e possuam uma profundidade maior. Como exemplo, na Figura 5, o nó 2 está localizado de modo que os nós filhos (3 e 4), o sucedem na sequência e o nó pai (1), o precede. A posição dos nós (e sua respectiva profundidade) na estrutura da RNP é estabelecida por meio do algoritmo de busca em profundidade (EVEN, 2011).

Figura 5 – Exemplo de aplicação da RNP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

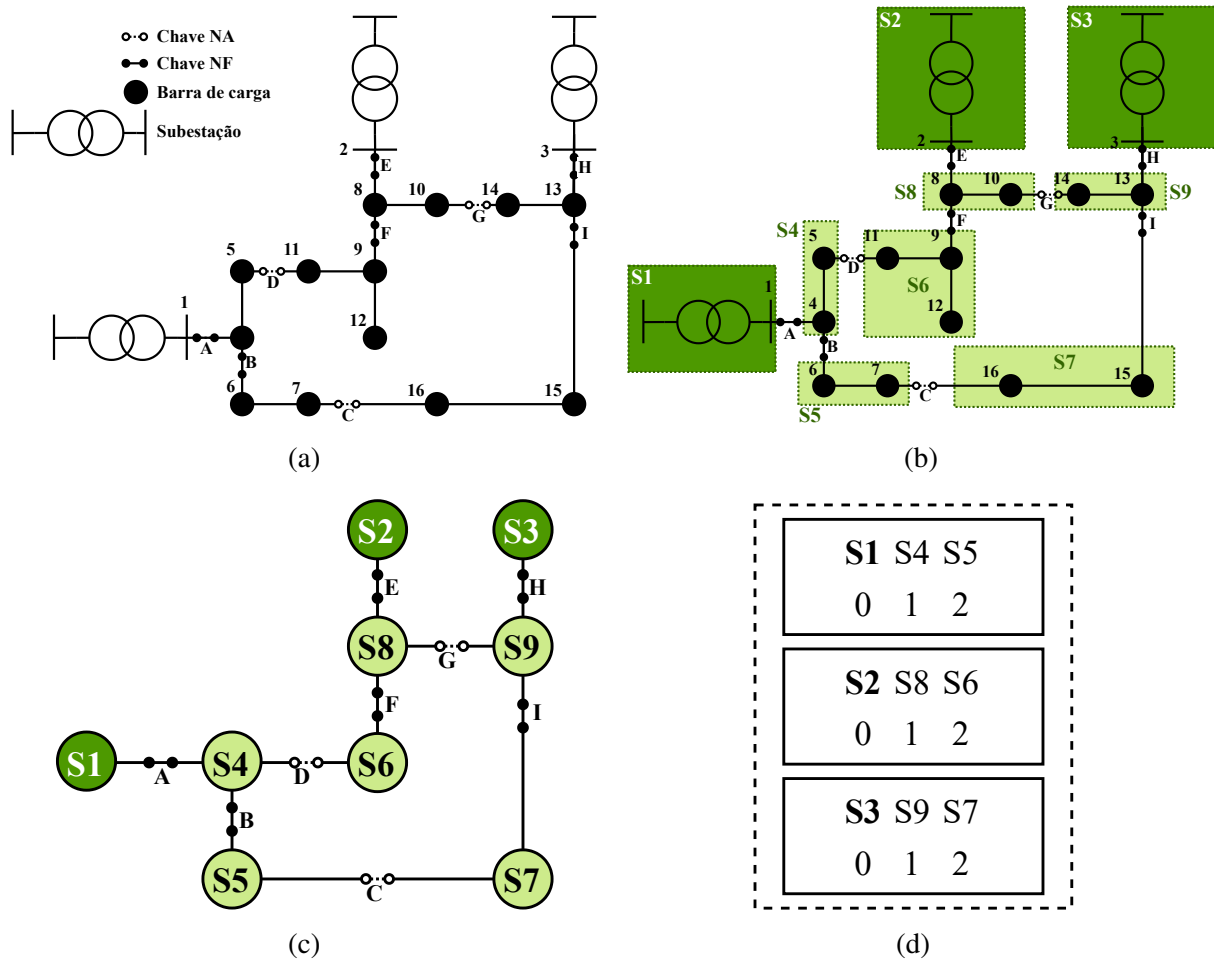
Em problemas de reconfiguração e restauração de redes de distribuição é conveniente utilizar uma representação intermediária da rede em conjunto com a RNP (SANTOS *et al.*, 2010; PERALTA, 2019). Nessa representação intermediária a rede de distribuição é particionada em seções, que são regiões delimitadas por chaves de manobras, o que permite obter um grafo equivalente da rede formado pelas seções (as regiões que contêm barras e ramos que não possuem chaves de manobras instaladas) e ramos manobráveis. Desse modo, a topologia da rede de distribuição é representada pela RNP correspondente a representação intermediária. Para problemas de reconfiguração e restauração, essa abordagem tem a vantagem de simplificar a representação da topologia do sistema.

Na Figura 6 é apresentado um exemplo da aplicação da representação intermediária e a RNP da topologia de uma rede de distribuição fictícia. Na Figura 6a tem-se a topologia da rede de distribuição e na Figura 6b são definidas as seções da rede. A partir das definições das seções, obtém-se a representação intermediária da topologia do sistema, apresentada na Figura 6c. Na Figura 6d são apresentadas as estruturas que compõem a RNP correspondente à rede. Nota-se que para cada alimentador há uma estrutura de RNP e os nós raízes de cada estrutura correspondem à seção que possuem a barra da subestação. Em sistemas com múltiplos alimentadores, como o sistema apresentado na Figura 6, a RNP correspondente à rede é composta por um conjunto de estruturas.

3.1.2.1.1 Representação proposta

A RNP é muito eficaz no processo de geração de novas soluções (SANTOS *et al.*, 2010). A eficácia se deve, principalmente, a duas características: a estrutura de dados da RNP é facilmente manipulável; e, através do uso de operadores específicos, é possível gerar apenas topologias factíveis (radiais), tornando a busca por novas soluções eficiente.

Figura 6 – Exemplo de (a) rede de distribuição fictícia, (b) suas seções, (c) representação intermediária equivalente e sua respectiva (d) RNP.



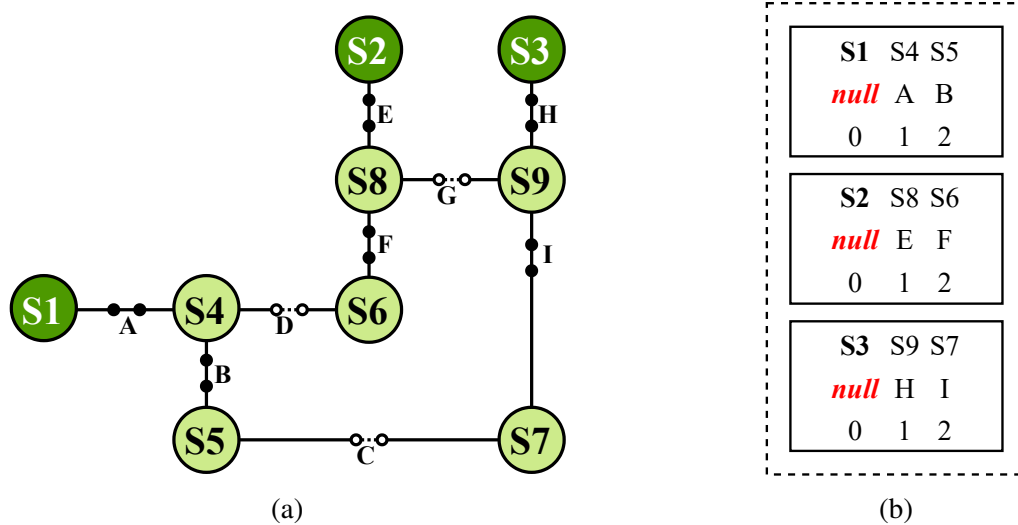
Fonte: Elaborado pelo autor.

As metas-heurísticas de tipo VNS exigem que a vizinhança da solução incumbente seja sistematicamente mapeada, o que não ocorre nos algoritmos genéticos, em que o processo de busca é orientado à construção de populações (conjuntos de soluções). Originalmente, a RNP foi projetada para ser manipulada por operadores específicos para algoritmos genéticos (DELBEM *et al.*, 2004). Desse modo, nesse projeto, necessitou-se adaptar a RNP para torná-la eficiente no processo de mapeamento das estruturas de vizinhanças.

A adaptação proposta consiste em substituir o vetor de pares da estrutura da RNP por um vetor de trios. Cada trio é composto pelo índice do nó, profundidade do nó (em conformidade com os pares da RNP) e o índice do ramo adjacente que está a montante do nó. Desse modo, conforme detalhado na subseção a seguir, torna-se possível usufruir da facilidade de manipulação da RNP e mapear a vizinhança de uma determinada topologia. O processo de construção da estrutura da RNP modificada (RNPm), utilizada nesse projeto, é o mesmo utilizado na construção da estrutura da RNP convencional.

Um exemplo da RNPm correspondente à rede de distribuição fictícia da Figura 6 é ilustrado na Figura 7. Como o nó raiz não possui um ramo a sua montante, utiliza-se o símbolo "*null*" para indicar o valor vazio. Com a estrutura proposta, é possível determinar todos os nós e ramos que estão a montante de um nó (seção) especificado. Por retratar a representação intermediária da rede de distribuição, os ramos indicados na RNPm correspondem às chaves de manobras que estão fechadas (chaves NF).

Figura 7 – (a) Representação intermediária da rede fictícia e a (b) RNPm correspondente.



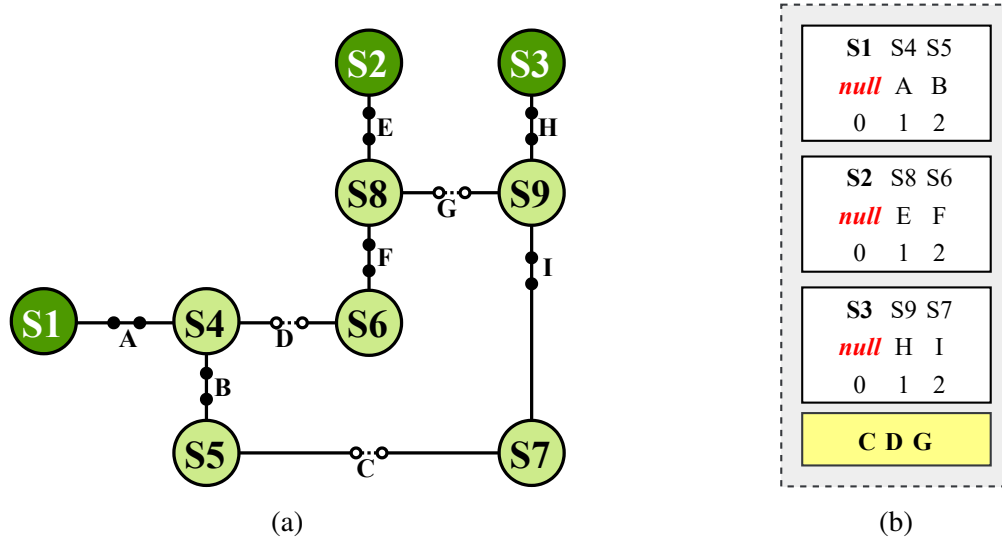
Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura modificada da RNP em conjunto com um vetor contendo o índice das chaves NA é utilizada para representar computacionalmente uma solução candidata nas metas-heurísticas VNS implementadas. Um exemplo é ilustrado na Figura 8, em que se aplica a estrutura de representação proposta à topologia de rede de distribuição fictícia apresentada anteriormente.

Para facilitar a apresentação dos conceitos que são apresentados nas subseções seguintes, designa-se como ilha um conjunto de seções interligadas por chaves de manobras fechadas (chaves NF). Nessa perspectiva, uma rede de distribuição é composta por um conjunto de ilhas. Na representação proposta para a topologias, cada estrutura de RNPm corresponde à uma ilha. Os nós raízes de uma estrutura RNPm, neste trabalho, são definidos de acordo com as características da ilha representada: para ilhas que representam alimentadores energizados e conectados à subestação, o nó raiz será a seção que contém a barra ligada à subestação; para ilhas que representam microrredes flexíveis, o nó raiz da estrutura de RNPm será a seção que contém o gerador que controla a tensão da microrrede; e em ilhas desenergizadas, o nó raiz poderá ser qualquer uma das seções dessa ilha.

As seções em falta e as chaves de manobras utilizadas para isolar tais seções são omitidas da representação. Desse modo, é possível manipular a estrutura de representação sem a necessidade de verificar se uma determinada operação envolve uma seção em falta ou chave de

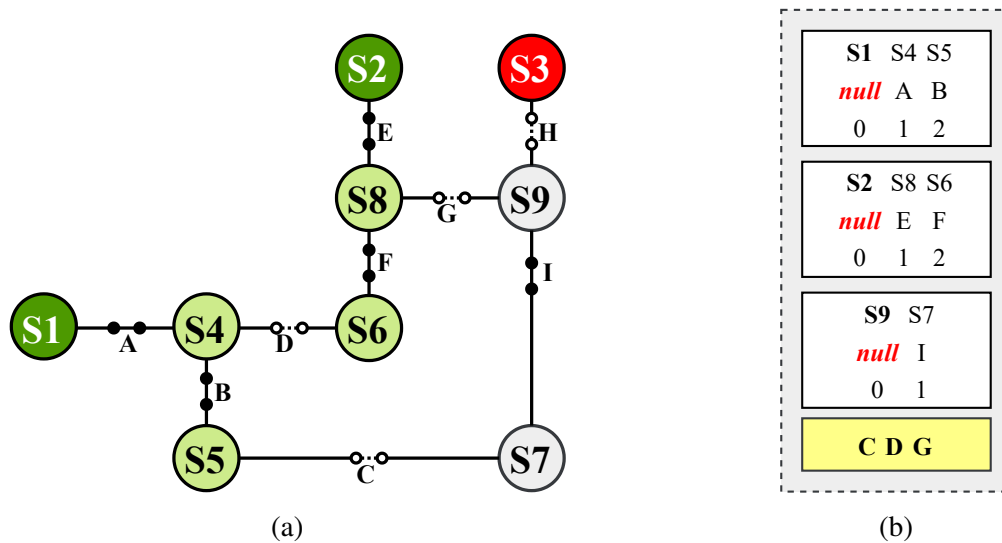
Figura 8 – (a) Representação intermediária da rede fictícia e (b) representação proposta utilizada nas metas-heurísticas de VNS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

isolamento, o que não é permitido na etapa de restauração das cargas. Na Figura 9 é ilustrado um exemplo em que a seção S3 contém uma falta, sendo isolada pela abertura da chave seccionadora H e, consequentemente, desenergizando as seções S7 e S9. Na Figura 9b, verifica-se que a seção de falta e as chaves de isolamento são omitidas da representação.

Figura 9 – (a) Representação intermediária da rede fictícia e a (b) estrutura de representação proposta em um cenário de falta na seção S3.



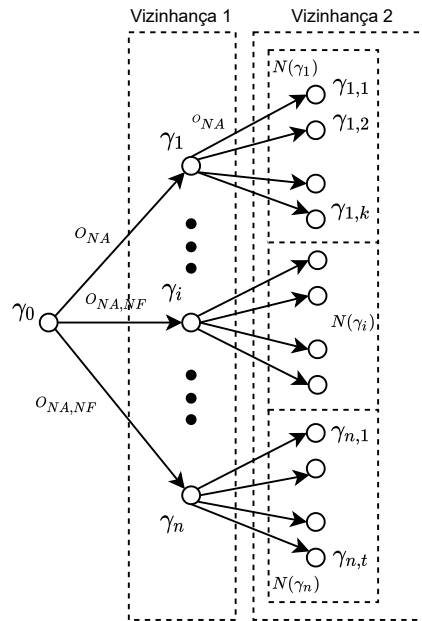
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2.2 Critérios de vizinhança

No contexto desse trabalho, dada uma topologia radial γ , diz-se que uma solução γ' está na primeira vizinhança de γ se γ' é radial e pode ser obtida a partir do fechamento de uma chave NA de γ . Desse modo, é possível obter uma solução candidata na primeira vizinhança de uma topologia radial a partir de operações básicas: fechamento de uma chave NA, que será denotada por O_{NA} ; fechamento de uma chave NA e abertura de uma chave NF elegível, operação que será denotada por $O_{NA,NF}$. A partir desse conceito, define-se que uma topologia γ' pertence a n -ésima vizinhança de γ se γ' é radial e pode ser obtida por meio de n operações básicas (O_{NA} ou $O_{NA,NF}$) sucessivas a partir da topologia γ .

A definição de estrutura de vizinhança de nível n é exemplificado na Figura 10, em que é ilustrada a vizinhança de nível 2 de uma solução γ_0 . Basicamente, a estrutura de vizinhança de nível 2 é formada pela união das estruturas de vizinhanças de nível 1 de cada topologia que pertence à $N(\gamma_0)$.

Figura 10 – Exemplo do conceito de vizinhança de n níveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para garantir a factibilidade da topologia é necessário estabelecer critérios que definam em quais condições as operações básicas O_{NA} e $O_{NA,NF}$ podem ser aplicadas. Esses critérios são definidos a partir de três características associadas às seções adjacentes à chave NA (S_{A1} e S_{A2}) que deverá ser fechada: o estado das seções, que é categorizado em energizado (E) ou desenergizado (D); ao tipo de ilha em que a seção está inserida, que é categorizado em microrrede (μG) e conectada à subestação (BG); e, por fim, na verificação se seções estão inseridas na mesma ilha, indicado pelos valores binários 0 (não pertencem à mesma ilha) e 1 (pertencem à mesma ilha).

Na Tabela 1, são apresentadas as operações permitidas segundo as condições das seções adjacentes à chave NA que deverá ser fechada. Para cada caso possível, segundo os critérios estabelecidos, define-se um conjunto de operações factíveis que resultará em uma nova topologia radial na vizinhança da topologia corrente. As operações permitidas para cada caso apresentado na Tabela 1 podem ser categorizadas, segundo as suas características, em três tipos:

- **Tipo 1** – As operações do Tipo 1 são executadas nos casos 3, 4 e 8. Este tipo de operação possibilita o remanejamento entre seções energizadas da rede, o que pode resultar na melhoria das condições de operação no estado restaurativo. Para este tipo, a operação O_{NA} não é permitida, pois gera laços na rede.
- **Tipo 2** – As operações do Tipo 2 são executadas nos casos 1 e 2. Este tipo de operação permite que seções desenergizadas sejam restauradas.
- **Tipo 3** – As operações do Tipo 3 são executadas nos casos 5, 6 e 7. Neste tipo de operação realiza-se o remanejamento entre seções energizadas. Ao menos uma microrrede está envolvida nesta operação e devido a possibilidade de execução da operação O_{NA} é necessário avaliar o modo de operação dos geradores de BS que controlam as microrredes envolvidas: nos casos 5 e 6, caso a operação O_{NA} seja executada o gerador responsável pelo controle de tensão e frequência é operado no modo convencional, conforme o modelo apresentado no Capítulo 2; no caso 7, mediante a execução da operação O_{NA} então o gerador de BS com maior capacidade de geração controla a nova microrrede.

Tabela 1 – Operações permitidas segundo as condições das seções adjacentes à chave NA.

Caso	Estado		Tipo		Pertencem à mesma ilha?	Operação permitida
	S_{A1}	S_{A2}	S_{A1}	S_{A2}		
0	D	D	**	**	**	Não há
1	E	D	**	**	**	$O_{NA}; O_{NA,NF}$
2	D	E	**	**	**	$O_{NA}; O_{NA,NF}$
3	E	E	BG	BG	0	$O_{NA,NF}$
4	E	E	BG	BG	1	$O_{NA,NF}$
5	E	E	BG	μG	**	$O_{NA}; O_{NA,NF}$
6	E	E	μG	BG	**	$O_{NA}; O_{NA,NF}$
7	E	E	μG	μG	0	$O_{NA}; O_{NA,NF}$
8	E	E	μG	μG	1	$O_{NA,NF}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 1 nota-se que em todos os casos, exceto para o caso 0, é possível aplicar a operação NA/NF. A operação NA/NF exige a definição de um conjunto de chaves NF elegíveis para que a nova topologia gerada seja radial. Em Santos *et al.* (2010) são apresentados dois operadores genéticos: *Preserve Ancestor Operator* (PAO); e *Change Ancestor Operator* (CAO). Ambos operadores geram uma nova topologia realizando duas operações de chaveamentos entre

alimentadores adjacentes: uma operação de fechamento de uma chave NA; e uma operação de abertura de uma chave NF específica. Desse modo, as operações executadas resultam na transferência de carga entre dois alimentadores adjacentes. O que diferencia os dois operadores é que o operador PAO se limita à abertura das chaves NF adjacentes e a montante de uma das seções da chave NA; enquanto o operador CAO possibilita a abertura de qualquer chave NF localizada a montante de uma das seções adjacentes à chave NA especificada. Baseando-se nas características dos operadores PAO e CAO apresentados em Santos *et al.* (2010), define-se os seguintes critérios que geram um conjunto de chaves NF elegíveis para uma operação NA/NF:

1. Se as duas seções adjacentes à chave NA especificada estão desenergizadas, então o conjunto de chaves elegíveis é vazio;
2. Se uma seção adjacente à chave NA especificada está energizada e a outra desenergizada, o conjunto de chaves elegíveis é formado por todas as chaves NF que estão na ilha desenergizada;
3. Se ambas seções adjacentes à chave NA especificada estão energizadas e os nós correspondentes à essas seções estão em ilhas distintas, o conjunto de chaves elegíveis é composto por todas as chaves NF que estão na montante das seções adjacentes;
4. Se ambas seções adjacentes à chave NA especificada estão energizadas e inseridas na mesma ilha, o conjunto das chaves elegíveis é formado por todas as chaves NF que ligam as seções adjacentes à primeira seção comum localizada na montante das duas seções adjacentes à chave NA.

O critério 1 evita que a operação de transferência de carga entre seções desenergizadas seja avaliada. O critério 2 possibilita que uma parcela das cargas desenergizadas sejam transferidas para um alimentador energizado. Os critérios 3 e 4 permitem o remanejamento de cargas, o que pode resultar na melhoria das condições de operação no estado restaurativo. Especificamente, o critério 4 possibilita a reconfiguração de microrredes, o que amplia a possibilidade de remanejamento de cargas.

3.1.2.3 Mecanismo eficiente de avaliação

O parâmetro de avaliação das topologias candidatas à solução do primeiro estágio é o somatório das funções de custo, apresentadas no Capítulo 2, que compõe a função objetivo do problema (63). Desse modo, para avaliar cada topologia candidata é necessário resolver o problema (63).

A avaliação das topologias candidatas é a etapa com o maior custo computacional na solução do primeiro estágio do problema. Com o intuito de reduzir o custo computacional da etapa de avaliação das soluções, utiliza-se uma estratégia de avaliação que realiza o reaproveitamento

de soluções anteriores em conjunto com um mecanismo adaptativo para solução do problema (63).

Em ambas estratégias de otimização da etapa de avaliação, explora-se a característica de que as variáveis de estado e decisão associadas a cada ilha são independentes das demais variáveis associadas às outras ilhas que compõem a rede. Uma consequência dessa característica, é que a solução do problema (63), correspondente a uma topologia de rede, pode ser obtida decompondo o problema completo (que considera todas as variáveis de estado e decisão associadas à rede) em problemas menores (que considera apenas uma parcela das variáveis de estado e decisão) associados à cada ilha que compõe a rede.

Como exemplo, considere uma rede qualquer cuja topologia seja γ . Fixando as variáveis associadas à topologia da rede no problema (63), considere que X_γ seja o conjunto solução do problema completo e que f_γ seja a função objetivo associada à γ . Supondo que o sistema operando com a topologia γ possua n ilhas e que X_i seja o conjunto solução do subproblema associado a ilha $i \in \{1, \dots, n\}$ e f_i a função objetivo correspondente. A função objetivo do problema completo pode ser representada por $f_\gamma = \sum_i f_i + K$, em que K é o termo associado ao custo da operação das chaves de manobras que estão abertas na topologia γ . Como as variáveis associadas à topologia da rede são fixadas, então o termo K é obtido pela soma algébrica dos custos de comutação associados às chaves NA de γ que foram comutadas em relação a topologia no estado normal de operação.

3.1.2.3.1 Mecanismo adaptativo de solução

O modelo de FPO da rede operando no estado restaurativo, representado pelo problema de otimização (63), é composto, basicamente, por: variáveis de estado associadas às tensões nodais e aos fluxos de potências; variáveis de decisão associadas a topologia da rede; e variáveis de decisão associadas ao controle dos equipamentos. Na ausência de geração distribuída, armazenamento de energia e cargas participantes do PRD então não haverá variáveis de decisão associadas ao controle de equipamentos. Se definida uma topologia de operação para a rede no estado restaurativo, então é possível fixar as variáveis de decisão associadas a topologia da rede. Nessas circunstâncias, determina-se apenas as variáveis de estado associadas às tensões nodais e aos fluxos de potências e, conseqüentemente, o problema (63) pode ser solucionado por meio de algoritmo de fluxo de potência convencional.

Devido a capacidade de avaliar um sistema decompondo o problema (63), conforme descrito anteriormente, e as características da formulação na ausência de equipamentos controláveis é possível empregar, simultaneamente, algoritmos especializados para o cálculo do fluxo de potência e *solvers* comerciais no processo de avaliação das topologias. Para tal, verifica-se, na topologia avaliada, quais são as ilhas que possuem equipamentos controláveis (equipamentos de geração distribuída, armazenamento de energia e cargas participantes do PRD); se há algum equipamento controlável, então utiliza-se um *solver* para resolver o problema (63) associado

à ilha avaliada; caso contrário, utiliza-se um algoritmo especializado para o cálculo do fluxo de potência. Ao fim do processo, conhece-se a função objetivo associada a cada ilha e, então, determina-se a função objetivo da topologia avaliada.

Neste trabalho implementou-se o algoritmo proposto em Shirmohammadi *et al.* (1988), que calcula o fluxo de potência para redes radiais, para calcular o fluxo de potência em ilhas sem equipamentos controláveis. Com o intuito de comparar o desempenho do algoritmo implementado com o desempenho de um *solver* comercial no cálculo do fluxo de potência, foram utilizados dois sistemas testes (apresentados detalhadamente no capítulo a seguir) sem a presença de equipamentos controláveis. O *solver* utilizado no teste é o CPLEX 12.8 (CPLEX, 2017). Os testes foram realizados em um computador com processador i5-7200U de 2,5GHz e memória RAM de 8Gb. Na Tabela 2 são apresentados os tempos de execução dos algoritmos ao calcular o fluxo de potência para os sistemas testes.

Tabela 2 – Comparação do tempo de execução do cálculo de fluxo de potência por diferentes metodologias.

Sistema teste	Tempo de execução [ms]	
	(SHIRMOHAMMADI <i>et al.</i> , 1988)	CPLEX
33 barras	8	121
136 barras	28	238

Fonte: Elaborado pelo autor.

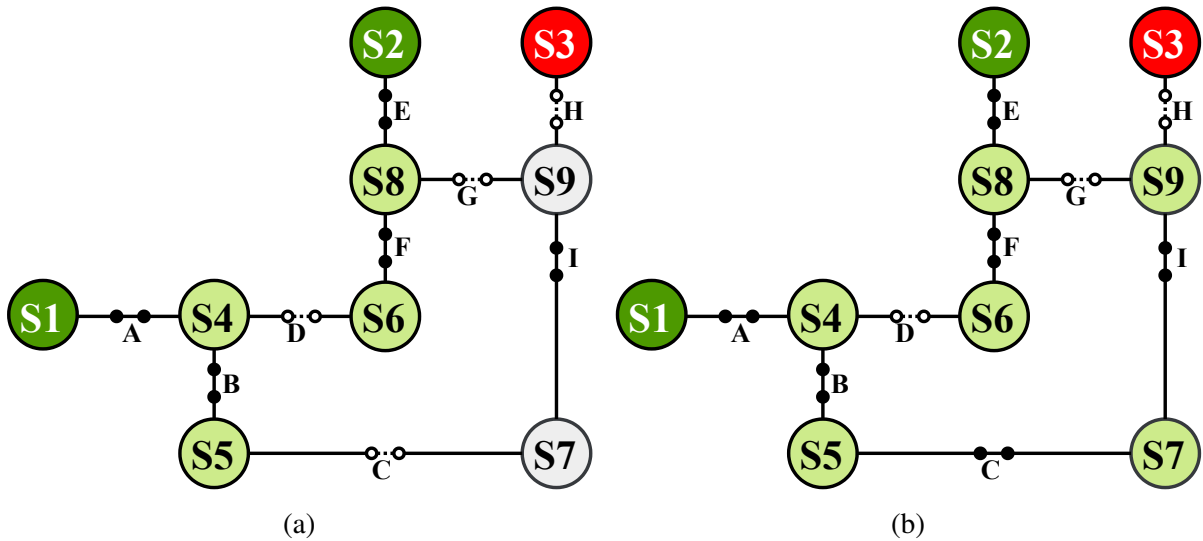
Na Tabela 2, verifica-se que o tempo de execução utilizando o algoritmo de fluxo de potência é substancialmente inferior em todos os testes. Isso ocorre porque o cálculo das variáveis de estado por meio de um algoritmo especializado de fluxo de potência demanda menor esforço computacional, quando comparado a utilização de um *solver* especializado em solucionar problemas de otimização. Desse modo, o mecanismo adaptativo de avaliação que é proposto, possibilita determinar as decisões ótimas de controle associadas à uma topologia, reduzindo o esforço computacional na etapa de avaliação.

Para evitar o esforço computacional associado à verificação de que uma ilha possua equipamentos controláveis, o que poderia aniquilar os benefícios do mecanismo adaptativo de solução, as estruturas de RNPM possuem uma *flag*, utilizada para indicar a presença de seções que contêm equipamentos controláveis. O estado dessa *flag* é definido no momento em que uma estrutura de RNPM é construída, já que nesta etapa todas as seções são visitadas. Desse modo, quando uma seção que contém um equipamento controlável é inserida na estrutura de RNPM, então a *flag* passa a indicar que ilha representada por essa RNPM possui um equipamento controlável. A verificação de que uma seção contém equipamentos controláveis é feita em um único momento, que é na etapa inicial de leitura dos dados.

3.1.2.3.2 Reaproveitamento das soluções anteriores

No processo de busca de solução do primeiro estágio, novas topologias são alcançadas a partir de modificações sucessivas de topologias já exploradas, o que é uma decorrência da definição das estruturas de vizinhança. Devido a essa particularidade, há a possibilidade de uma determinada topologia γ' possuir ilhas em comum com a sua topologia geradora γ . Como exemplo, considere as topologias apresentadas na Figura 11. A topologia da Figura 11b é gerada a partir da topologia da Figura 11a ao fechar a chave de manobra C e, por definição, essa é uma operação básica válida do tipo O_{NA} . Ao comparar as duas topologias, nota-se que a ilha conectada a seção S2 permanece inalterada após a operação.

Figura 11 – Exemplo de (a) topologia geradora e (b) topologia gerada.

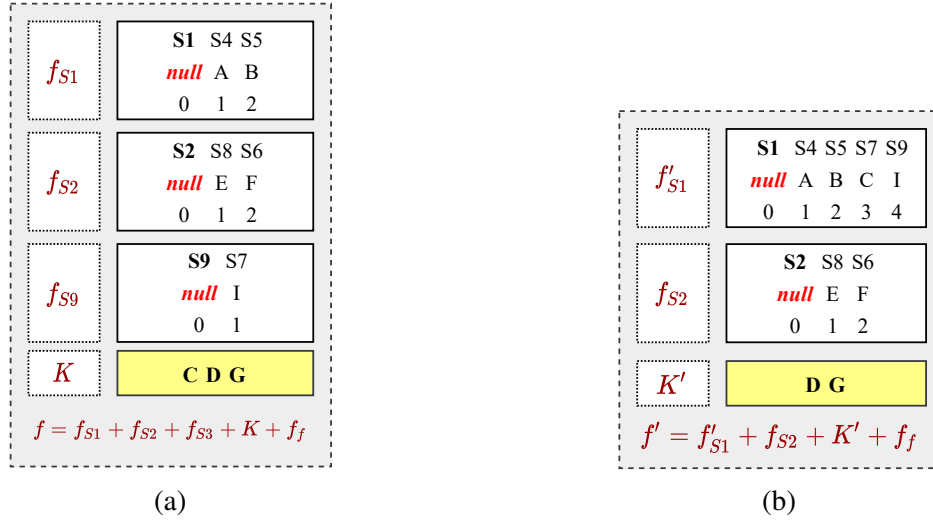


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com esta hipótese, uma vez que todas as ilhas de γ foram previamente solucionadas, ao realizar a avaliação da topologia γ' , é possível reutilizar a avaliação das ilhas em comum às duas topologias. Considerando o exemplo anterior, suponha que a topologia da Figura 11a tenha sido avaliada, conforme indicado na respectiva RNPM apresentada na Figura 12a. Ao avaliar a topologia da Figura 11b, é necessário avaliar a ilha cujo nó raiz corresponde a seção S1 e os custos associados as chaves NA, conforme indicado na RNPM apresentada na Figura 12b. Isso pelo fato que, nas seções em falta (S3) e na ilha cujo nó raiz é S2 não houve modificações e, logo, as variáveis de estado e decisão (e, consequentemente, a função objetivo) permanecem inalteradas.

Para viabilizar a reutilização das soluções, as ilhas de uma topologia possuem *flags*, que indicam se uma determinada ilha foi avaliada previamente, isto é, conhece-se a função objetivo associada à essa ilha. Essa *flag* permanece ativa sempre que, ao gerar uma nova topologia, a respectiva ilha permanece inalterada e a sua função objetiva é conhecida na topologia geradora.

Figura 12 – Exemplo - Estruturas de representação das topologias (a) geradora e (b) gerada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso uma *flag* esteja inativa, é necessário avaliar a ilha correspondente utilizando o mecanismo adaptativo. Em sistemas com múltiplos alimentadores, essa estratégia é benéfica, já que reduz o número de avaliações.

3.1.2.4 Busca local

Com o conceito de vizinhança adotado, a quantidade de soluções a serem avaliadas cresce exponencialmente à medida em que se aumenta o número de níveis de vizinhanças a serem visitadas. Neste caso, o esforço computacional para avaliar as soluções candidatas torna-se proibitivo, sendo necessário, portanto, adotar medidas para que o processamento seja feito em um tempo computacional aceitável.

Neste contexto, foi desenvolvida uma abordagem de busca local híbrida. Nessa abordagem, para vizinhanças $n > 1$, geram-se as operações básicas válidas para cada chave NA da topologia de partida γ e, para cada uma dessas operações, inicia-se uma busca na vizinhança $n - 1$ a partir das topologias resultantes das operações analisadas. No caso de $n = 1$, então determinam-se os ótimos locais associados às chaves NA. O ótimo local de uma chave NA é determinado solucionando uma modificação do problema (63). Os passos do algoritmo de busca local são apresentados em Algoritmo 5.

Na sub-rotina de ótimo local, introduz-se um conjunto de equações baseadas no tipo de operação permitida segundo o caso em que chave NA é tipificada. Desse modo, determina-se a operação de chaveamento ótima para a primeira vizinhança de uma determinada solução realizando em conjunto a avaliação do ótimo local e, portanto, reduz-se o número de avaliações realizadas. Para viabilizar a busca do ótimo local nessas condições, as variáveis associadas aos componentes de topologia (chaves seccionadoras, barras e geradores com capacidade de

Algoritmo 5: Busca local.

Entrada: nível da vizinhança $n \geq 1$; *flag* de maior melhoria *flagOpt* (*false* / *true*);
solução de partida γ .
Saída: Solução de saída γ^*

```

1   $\gamma^* \leftarrow \gamma$ ;
2  se  $n = 1$  então
3      para cada chave NA  $r_{NA} \in \gamma^*$  faça
4           $\gamma' \leftarrow \text{ÓtimoLocal}(\gamma^*, r_{NA})$ ;
5          se  $\gamma' < \gamma^*$  então
6               $\gamma^* \leftarrow \gamma'$ ;
7              Se flagOpt = false, finalize a busca e vá para o Passo (21);
8          fim
9      fim
10 senão
11     Liste todas as operações básicas ( $O_{NA}$  e  $O_{NA,NF}$ ) na primeira vizinhança de  $\gamma^*$  e
        armazene essas operações na lista  $L_{op}$  ;
12     para cada operação  $o \in L_{op}$  faça
13         Gere a representação correspondente à operação básica  $o$ , denotando a topologia
            gerada por essa operação em  $\gamma'_o$  ;
14          $\gamma' \leftarrow \text{BuscaLocal}(\gamma'_o, n - 1)$ ;
15         se  $\gamma' < \gamma^*$  então
16              $\gamma^* \leftarrow \gamma'$ ;
17             Se flagOpt = false, finalize a busca e vá para o Passo (21);
18         fim
19     fim
20 fim
21 Retorne  $\gamma^*$ ;

```

BS) tornam-se variáveis de decisão no modelo de FPO. As variáveis associadas aos demais componentes, isto é, a parcela da topologia que não é modificada tem os seus valores fixados segundo a topologia de partida. Desse modo, é conveniente definir os seguintes conjuntos de componentes a serem modificados:

- **Conjunto das barras** – Denotado por $\mathbb{X}^b$, $\mathbb{X}^b \subset \mathfrak{B}$, consiste no conjunto de todas as barras inseridas nas seções que pertencem as ilhas que podem ser modificadas. Exceto, para os casos 4 e 8, em cada operação duas ilhas serão modificadas. Para os casos 4 e 8, apenas uma ilha é modificada.
- **Conjunto das chaves seccionadoras** – Denotado por $\mathbb{X}^{sw}$, $\mathbb{X}^{sw} \subset \mathfrak{R}^{sw}$, consiste no conjunto das chaves NF elegíveis para abertura e a chave NA que será fechada.
- **Conjunto dos geradores com capacidade BS** – Denotado por $\mathbb{X}^{ddg,bs}$, $\mathbb{X}^{ddg,bs} \subset \mathfrak{D}^{ddg,bs}$, consiste no conjunto dos geradores que operam no modo de controle de tensão e que podem ter o modo de operação alterado devido a operação de chaveamento. Esse conjunto é não vazio apenas nos casos 5, 6 e 7. O conjunto $\mathbb{X}^{ddg,bs}$ é unitário e constituído pelo

gerador que controla a tensão na microrrede envolvida na operação de chaveamento (casos 5 e 6) e, no caso 7, pelo gerador que opera no modo de controle de tensão com a menor capacidade de geração.

O Algoritmo 6 apresenta o pseudocódigo da sub-rotina de busca pelo ótimo local. O processo tem como parâmetro de entrada uma topologia de partida e o índice da chave NA que deverá ser fechada. Inicialmente, verifica-se em qual caso a chave r_{NA} se enquadra conforme os casos da Tabela 1. Baseado na chave NA especificada, determine as ilhas de γ que serão modificadas com a execução de operação de chaveamento. Desse modo, para cada ilha que não será modificada na operação, execute os procedimentos de avaliação eficiente, isto é, o reaproveitamento das soluções anteriores e a definição adaptativa do método de solução dos subproblemas associados a cada ilha, conforme descrito anteriormente. Com a definição das seções adjacentes que serão modificadas (I_{A1} e I_{A2}), constrói-se um FPO reduzido com as variáveis associadas às ilhas I_{A1} e I_{A2} e insere um conjunto de equações baseadas no tipo de operação correspondente à chave NA r_{NA} , o que possibilitará determinar a operação ótima de chaveamento. Determinada a operação ótima de chaveamento, a avaliação da topologia resultante é feita com base nas informações de avaliação da topologia de partida γ (reaproveitamento das soluções anteriores) e dos resultados obtidos com a solução do FPO solucionado.

3.1.2.4.1 Equações para operações do Tipo 1

Nas operações do Tipo 1 são permitidas apenas operações básicas de abertura de uma chave NF e fechamento da chave NA especificada. Neste tipo de operação, as variáveis de estado de energização das barras pertencentes ao conjunto $\mathbb{X}^b$ e o modo de operação dos geradores com capacidade de BS não são alterados. Desse modo, exceto para as chaves inseridas no conjunto $\mathbb{X}^{sw}$ (chaves NF elegíveis e chave NA especificada), todas as variáveis topológicas são fixadas segundo a topologia de partida. Desse modo, as equações (64)-(65) são introduzidas no problema (63) para operações do Tipo 1. A equação (64) permite determinar a operação ótima de abertura de uma chave NF elegível, enquanto que a equação (65) estabelece que a chave NA seja fechada.

$$\sum_{i \in \mathbb{X}^{sw} - \{r_{NA}\}} (1 - y_i^{sw}) = 1 \quad (64)$$

$$y_{r_{NA}}^{sw} = 1 \quad (65)$$

3.1.2.4.2 Equações para operações do Tipo 2

As operações do Tipo 2 são realizadas nos casos 1 e 2, em que, pelo critério 2, as seções desenergizadas são transferidas para uma rede ligada à subestação ou microrrede. Desse modo, a operação de chaveamento modificará o estado das barras inicialmente desenergizadas. Consequentemente, as equações para este tipo de chaveamento envolve as variáveis dos conjuntos

Algoritmo 6: Ótimo local.**Entrada:** Solução de partida γ ; chave NA r_{NA} **Saída:** Ótimo local γ^*

- 1 Com base nos critérios da Tabela 1, determine em qual caso a chave r_{NA} se enquadra ;
- 2 Se o caso em que r_{NA} se enquadra é 0, então faça $\gamma^* \leftarrow \gamma$ e vá para o Passo (12); caso contrário vá para o Passo (3) ;
- 3 Determine as ilhas adjacentes à chave r_{NA} , denotando-as por I_{A1} e I_{A2} ;
- 4 **para cada ilha** $I \in \gamma \mid (I \neq I_{A1}) \wedge (I \neq I_{A2})$ **faça**
- 5 Se a ilha I não foi avaliada previamente, isto é, f_i não é conhecido, verifique se I possui algum equipamento de controlável; caso possua, determine f_i solucionando o subproblema associado à I por meio de um *solver*; caso não possua, determine f_i solucionando o subproblema associado à I por meio de um algoritmo de FP especializado;
- 6 **fim**
- 7 Determine o tipo que caracteriza a operação de chaveamento adequada ao caso da chave r_{NA} , construa o problema reduzido que contenha as variáveis associadas à I_{A1} , I_{A2} e r_{NA} , introduzindo o conjunto de equações de modificação correspondentes ao tipo de operação;
- 8 Execute o método de solução adequado ao FPO modificado associado à I_{A1} e I_{A2} ;
- 9 Se a solução do FPO é infactível, então faça $\gamma^* \leftarrow \gamma$ e vá para o Passo (12); caso contrário, vá ao Passo (6) ;
- 10 Verifique na resposta fornecida se alguma das chaves NF elegíveis está indicada como chave aberta ($\exists k \in \mathbb{X}^{sw} \mid y_k^{sw} = 0$), gere uma nova representação utilizando a operação NA/NF: $\gamma' \leftarrow O_{NA,NF}(r_{NA}, r_{NF}^k)$; senão gere uma nova representação por meio da operação NA: $\gamma' \leftarrow O_{NA}(r_{NA})$;
- 11 Para as ilhas não modificadas de γ' , atribua o valor da função objetivo associado a cada ilha (f_i) a partir dos resultados de γ ; para as ilhas modificadas, determine o valor da função objetivo associada ($f'_{I1,I2}$) utilizando o conjunto solução obtido na solução do FPO modificado; determine a função objetivo de γ' : $f_{\gamma'} = \sum_i f_i + f'_{I1,I2} + K'$; faça $\gamma^* \leftarrow \gamma'$ e vá ao Passo (12);
- 12 Retorne γ^* e finalize;

$\mathbb{X}^{sw}$ e $\mathbb{X}^b$. As equações para as operações do Tipo 2 são estabelecidas pela restrições (66)-(68).

$$\sum_{i \in \mathbb{X}^{sw} - \{r_{NA}\}} (1 - y_i^{sw}) \leq 1 \quad (66)$$

$$y_{r_{NA}}^{sw} = 1 \quad (67)$$

$$y_{r_{NA}}^{sw} - \sum_{k \in \mathbb{X}^{sw} - \{r_{NA}\}} g_{i,k} (1 - y_k^{sw}) = y_i^b, \forall i \in \mathbb{X}^b \quad (68)$$

As equações (66) e (67) estabelecem as operações ótimas de chaveamentos para as chaves seccionadoras do conjunto $\mathbb{X}^{sw}$. A equação (68) estabelece o estado das barras pertencentes ao conjunto $\mathbb{X}^b$ após a operação de chaveamento estabelecida. Na equação (68), o parâmetro $g_{i,k} \in \{0, 1\}$ indica a permanência da barra i na rede desenergizada após a abertura da chave NF k , isto é, se $g_{i,k} = 0$ então a barra i é transferida para a rede energizada após a abertura da chave

k e $g_{i,k} = 1$ indica que a barra i permanece na rede desenergizada após a abertura da chave k .

3.1.2.4.3 Equações para operações do Tipo 3

Nas operações do Tipo 3 é possível fechar apenas a chave NA especificada ou realizar uma operação de abertura e fechamento, respectivamente, de uma chave NF elegível e a chave NA especificada. Ao fechar a chave NA sem a abertura de uma chave NF elegível, a microrrede flexível que operava isolada será integrada em um alimentador ligado à subestação (casos 5 e 6) ou será formada uma nova microrrede em que o gerador de BS que opera no modo de controle de tensão e possui a menor capacidade de geração passará a operar no modo convencional. Se a operação realizada for de abertura de uma chave NF elegível e fechamento da chave NA especificada, ocorrerá, simplesmente, uma reconfiguração entre seções energizadas.

Diante dessas possibilidades, verifica-se que apenas as variáveis associadas aos elementos dos conjuntos $\mathbb{X}^{sw}$ e $\mathbb{X}^{ddg,bs}$ podem ser modificadas com as operações de chaveamento. As variáveis de topologia que não são modificadas por meio da operação são fixadas segundo a topologia de partida definida. Desse modo, as equações (69)-(76) são introduzidas às equações do problema (63) para as operações do Tipo 3.

$$\sum_{i \in \mathbb{X}^{sw} - \{r_{NA}\}} (1 - y_i^{sw}) \leq 1 \quad (69)$$

$$y_{r_{NA}}^{sw} = 1 \quad (70)$$

$$x_k^{ddg,bs} \geq y_i^b - y_{r_{NA}}^{sw} + \sum_{i \in \mathbb{X}^{sw} - \{r_{NA}\}} (1 - y_i^{sw}), \forall k \in \mathbb{X}^{ddg,bs}, i \in \mathfrak{B} | \mathfrak{D}_i \supset \{k\} \quad (71)$$

$$x_k^{ddg,bs} \leq y_i^b, \forall k \in \mathbb{X}^{ddg,bs}, i \in \mathfrak{B} | \mathfrak{D}_i \supset \{k\} \quad (72)$$

$$x_k^{ddg,bs} \leq 1 - y_{r_{NA}}^{sw} + \sum_{i \in \mathbb{X}^{sw} - \{r_{NA}\}} (1 - y_i^{sw}), \forall k \in \mathbb{X}^{ddg,bs}, i \in \mathfrak{B} | \mathfrak{D}_i \supset \{k\} \quad (73)$$

$$x_k^{ddg,conv} \geq y_i^b + y_{r_{NA}}^{sw} - \sum_{i \in \mathbb{X}^{sw} - \{r_{NA}\}} (1 - y_i^{sw}) - 1, \forall k \in \mathbb{X}^{ddg,bs}, i \in \mathfrak{B} | \mathfrak{D}_i \supset \{k\} \quad (74)$$

$$x_k^{ddg,conv} \leq y_i^b, \forall k \in \mathbb{X}^{ddg,bs}, i \in \mathfrak{B} | \mathfrak{D}_i \supset \{k\} \quad (75)$$

$$x_k^{ddg,conv} \leq y_{r_{NA}}^{sw} - \sum_{i \in \mathbb{X}^{sw} - \{r_{NA}\}} (1 - y_i^{sw}), \forall k \in \mathbb{X}^{ddg,bs}, i \in \mathfrak{B} | \mathfrak{D}_i \supset \{k\} \quad (76)$$

As equações (69)-(70) possibilitam a definição das operações de chaveamento. As equações (71)-(73) definem as condições necessárias para que o modo de operação de controle de tensão esteja ativo para o gerador contido no conjunto $\mathbb{X}^{ddg,bs}$, enquanto que as equações (74)-(76) estabelecem em quais condições do modo de operação convencional estará ativo.

3.2 Estratégia de solução do segundo estágio

No segundo estágio de solução, determina-se a sequência de operações que conduzem a rede à topologia de operação no estado restaurativo. Neste trabalho, utiliza-se uma adaptação da heurística proposta em Peralta (2019). O método de sequenciamento de operações, proposto em Peralta (2019), consiste em, basicamente, dividir as operações de chaveamentos em grupos e, posteriormente, ordenar tais grupos segundo o seu tipo e um critério de avaliação, estabelecido com intuito de otimizar a sequência de operações. Desse modo, com base na ordem dos grupos, determina-se a sequência de operações de chaveamentos.

Embora a metodologia de restauração proposta em Peralta (2019) considere a presença de microrredes flexíveis na topologia do estado restaurativo, na heurística de sequenciamento das operações, considera-se que as operações de chaveamentos que isolam e, conseqüentemente, formam uma microrrede flexível ocorrem antes do processo restaurativo e não fazem parte da sequência final de chaveamentos. Desse modo, neste trabalho, propõe-se estender a heurística de sequenciamento das operações de restauração para que sejam consideradas as sequências de operações de autorrestabelecimento e formação das microrredes.

3.2.1 Operações elementares

O processo de conduzir a rede de uma topologia inicial para uma topologia final pode ser realizado por meio da execução de um conjunto de operações elementares de transformação topológica. Neste trabalho, considera-se três tipos de operações elementares:

- **Abertura de chaves de manobra** – Em que comuta-se o estado de uma chave NF da topologia inicial.
- **Fechamento de chaves de manobra** – Comuta-se o estado de uma chave NA da topologia inicial.
- **Autorrestabelecimento de um gerador despachável** – Realiza-se o autorrestabelecimento de um gerador com capacidade de BS. Após a execução dessa operação o gerador opera no modo de controle de tensão, iniciando a formação de uma microrrede flexível ilhada.

As operações de abertura e fechamento de chaves de manobra modificam, diretamente, a configuração da rede de distribuição. Na operação de autorrestabelecimento de um gerador despachável, a modificação da topologia da rede ocorre pelo fato que, com esta operação, inicia-se a formação de uma microrrede.

As operações elementares possuem dois atributos principais: o tempo de execução da operação; e um elemento associado. Nas operações de chaveamentos, o elemento associado consiste na chave de manobra que será comutada e o tempo de execução é o intervalo necessário

para executar a operação de comutação. Na operação de autorrestabelecimento, o elemento associado é a seção que contém o gerador que irá controlar a tensão e a frequência da microrrede e o tempo de execução é o intervalo necessário para realizar a partida do gerador.

3.2.2 Grupos de operações

Os grupos de operações são definidos como um conjunto de operações elementares dispostas em uma sequência específica e que quando executadas geram uma nova topologia factível. Em Peralta (2019), são apresentados dois tipos de grupos de operações:

- **Grupos de reconfiguração** – consiste em um conjunto de operações elementares de chaveamentos, ordenadas em uma sequência que resulta na reconfiguração da topologia, isto é, ocorre o remanejamento entre seções energizadas.
- **Grupos de restauração** – consiste em um conjunto de operações elementares de chaveamentos, ordenadas em uma sequência que resulta na restauração de um conjunto de cargas.

Os grupos de reconfiguração e restauração possuem apenas uma operação de fechamento. Quanto as operações de abertura, nos grupos de restauração, variam entre nenhuma à múltiplas operações e, nos grupos de reconfiguração, há ao menos uma operação de abertura. Em ambos os grupos de operações, considera-se que as operações de abertura ocorrem antes das operações de fechamento. Desse modo, na execução de um grupo de reconfiguração, as seções remanejadas ficam desenergizadas por intervalo de tempo, porém considera-se que este intervalo de tempo é baixo o suficiente para não causar transtornos aos usuários.

Para que fosse possível gerar uma sequência de autorrestabelecimento e formação de microrredes, neste trabalho, considera-se mais um tipo de grupo de operações:

- **Grupos de formação de microrredes** – consiste em um conjunto de operações elementares, ordenadas em uma sequência que resulta na formação de uma nova microrrede.

Os grupos de formação de microrredes, possuem, obrigatoriamente, uma operação de autorrestabelecimento de um gerador despachável e um conjunto de operações de abertura, que são executadas com o intuito de isolar, inicialmente, a seção que contém o gerador responsável pelo controle de tensão da nova microrrede. O ato de isolar a seção que contém o gerador principal é feito com o objetivo de possibilitar a formação gradual da microrrede. Desse modo, é possível aumentar, gradativamente, o carregamento do gerador principal, garantindo a estabilidade de frequência e atendendo as restrições de rampa do gerador (LOPES *et al.*, 2005; CHEN *et al.*, 2017).

3.2.2.1 Algoritmo de definição dos grupos de operações

Na heurística utilizada, é necessário estabelecer os grupos de operações que devem ser executados para obter-se a topologia no estado restaurativo. Para tal, são definidas as seguintes premissas acerca de cada grupo de operações definido:

- Um grupo de reconfiguração é composto, basicamente, por uma operação de abertura de uma chave NF, seguida pelo fechamento de uma chave NA. A chave NF deve estar localizada em uma ilha energizada, enquanto que as duas seções adjacentes à chave NA devem estar em ilhas energizadas.
- Um grupo de restauração é composto, complementarmente, por um conjunto de operações de abertura de chaves NF, localizadas na ilha desenergizada alvo da restauração. Na sequência, obrigatoriamente, executa-se o fechamento da chave NA especificada para a operação. A chave NA deve possuir uma seção adjacente energizada, e a outra deve estar localizada em uma ilha desenergizada.
- Um grupo de operações de formação de microrrede, inicia-se pela abertura das chaves NF e adjacentes à seção associada à operação de autorrestabelecimento. Isolada a seção que será reestabelecida, executa-se a operação de autorrestabelecimento do gerador.

A etapa de definição dos grupos de operações inicia-se pela comparação entre uma topologia inicial (γ_o), que em um primeiro momento equivale à topologia pós-falta, e a topologia final (γ_f), que corresponde à topologia de operação no estado restaurativo. Ao comparar as duas topologias, obtém-se, inicialmente, um conjunto de operações, denotado por $\Omega(\gamma_o, \gamma_f)$, que são operações elementares que, se executadas diretamente, conduzem a rede, na configuração γ_o , à topologia γ_f . Aplicando as premissas estabelecidas às operações do conjunto $\Omega(\gamma_o, \gamma_f)$, é possível obter, portanto, um conjunto de grupos de operações, que será denotado por $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$.

Um grupo de reconfiguração G_{RCF}^i é definido a partir de uma operação de abertura $\sigma_o^i \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$. Segundo as premissas apresentadas anteriormente, a operação σ_o^i deve estar associada à uma chave de manobra fechada e inserida em uma ilha energizada. Para que a construção do grupo G_{RCF}^i seja consumada, é necessário encontrar uma operação de fechamento $\sigma_c^i \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$ cuja chave de manobra associada possua as duas seções adjacentes energizadas e apenas uma dessas seções esteja na jusante da chave associada à σ_o^i . É possível que haja mais de uma operação $\sigma_c \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$ que satisfaz as condições necessárias para formação do grupo de reconfiguração G_{RCF}^i e, neste caso, seleciona-se a operação σ_c que a possua a seção à jusante e mais próxima da chave associada à operação σ_o^i .

A construção de um grupo de restauração G_R^i inicia-se, sempre, que uma operação de fechamento $\sigma_c^i \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$, que possua uma chave de manobra associada com uma seção adjacente energizada e a outra desenergizada, é encontrada. Embora a construção do G_R^i inicia-se pela definição da operação de fechamento σ_c^i , segundo as premissas definidas, essa será a última

operação do grupo σ_c^i à ser executada. As demais operações associadas à G_R^i correspondem às operações de abertura $\sigma_o^i \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$ cujas chaves de manobras associadas estejam localizadas na ilha desenergizada. É possível que o grupo G_R^i não possua nenhuma operação de abertura, o que é equivalente à restaurar, por completo, a ilha desenergizada.

Um grupo de formação de microrrede G_{BS}^i deve ser iniciado para cada operação de autorrestabelecimento $\sigma_{bs}^i \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$, que será a última operação do grupo G_{BS}^i a ser executada. A operação σ_{bs}^i ocorre após a execução de operações de abertura, que visam isolar a seção associada à σ_{bs}^i . As possíveis operações de abertura não estão contidas no conjunto $\Omega(\gamma_o, \gamma_f)$ e devem ser determinadas avaliando o RNPM associada à ilha que contém o gerador que será reestabelecido.

Todas as etapas do processo de construção do conjunto $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$ são apresentadas no Algoritmo 7. O processo se resume a realizar as verificações descritas anteriormente para todas as operações do conjunto $\Omega(\gamma_o, \gamma_f)$.

3.2.2.2 Fragmentação dos grupos de operações

No processo de restauração, um aspecto crítico da formação de uma nova microrrede flexível é garantir, a cada etapa da sequência de chaveamento, que variação da potência restaurada seja ajustada de modo a não ocasionar desvios de frequência expressivos. A ANEEL, estabelece que, na ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,5 Hz à 60,5 Hz (ANEEL, 2018). Empiricamente, verifica-se que em grande parte dos sistemas, um incremento de potência de até 5% da potência de geração não resulta em desvios de frequência superiores à 0,5 Hz (ADIBI *et al.*, 1987). Na formação e restauração de microrredes, uma estratégia utilizada para evitar desvios proibitivos de frequência é priorizar a recomposição de unidades de geração despachável e restaurar as cargas do rede gradualmente (LOPES *et al.*, 2005; CHEN *et al.*, 2017). Nesse contexto, apresenta-se nesse trabalho uma estratégia de fragmentação dos grupos de operações.

A estratégia de fragmentação proposta consiste em dividir os grupos de operações de reconfiguração e restauração que compõem a sequência de formação de uma determinada microrrede e, se executados diretamente, ocasionam desvios expressivos de frequência. Com a fragmentação desses grupos de operações, objetiva-se, portanto, reduzir a quantidade de potência restaurada, entre as operações elementares sucessivas, para que a variação de frequência da microrrede fique dentro de limites aceitáveis.

No Algoritmo 8, apresenta-se as etapas da sub-rotina de fragmentação dos grupos de operações. O processo inicia-se pela definição de quais grupos de operações pertencentes à um conjunto $\mathbb{G}$ devem ser fragmentados. Desse modo, estabelece-se que um grupo de operações $G_i \in \mathbb{G}$ deve ser fragmentado se ele satisfaz, simultaneamente, às seguintes condições:

1. A execução da operação resulta em um incremento de carga em uma microrrede da

Algoritmo 7: Construção do conjunto de grupos de operações.

Entrada: topologia inicial γ_o ; topologia final γ_f .
Saída: Conjunto de grupos de operações $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$

- 1 $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \emptyset$;
- 2 Determine o conjunto de operações elementares $\Omega(\gamma_o, \gamma_f)$;
- 3 **para cada** $\sigma_{bs}^i \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$ **faça**
- 4 Construa um grupo G_{BS}^i ;
- 5 Adicione ao grupo G_{BS}^i as operações elementares de abertura das chaves adjacentes à seção associada à σ_{bs}^i ;
- 6 Insira a operação elementar σ_{bs} ao final da sequência de G_{BS}^i e faça
 $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \{G_{BS}^i\} \cup \mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$;
- 7 **fim**
- 8 **para cada** $\sigma_o^i \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$ **faça**
- 9 Verifique se a chave associada à σ_o^i está em uma ilha energizada de γ_o ; se verdadeiro, vá ao Passo (10);
- 10 Verifique a existência de uma operação $\sigma_c^i \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$, tal que a chave associada à σ_c^i , em γ_o , possua as duas seções adjacentes energizadas e apenas uma dessas seções (denotada por S_{ds}^i) esteja na jusante da chave associada à operação σ_o^i ; se existir mais de uma operação σ_c^i que atenda esses critérios, selecione aquela cuja seção adjacente S_{ds}^i esteja mais próxima à chave associada à σ_o^i , forme um grupo de operações G_{RCF}^i , inserindo, nessa ordem, as operações σ_o^i e σ_c^i e faça
 $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \{G_{RCF}^i\} \cup \mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$;
- 11 **fim**
- 12 **para cada** $\sigma_c^i \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$ **faça**
- 13 Verifique se a chave associada à σ_c^i , na topologia γ_o , é adjacente à uma ilha energizada e a outra desenergizada; se verdadeiro, vá ao Passo (14);
- 14 Forme um grupo G_R^i , caso exista operações elementares $\sigma_o^i \in \Omega(\gamma_o, \gamma_f)$ cujas chaves associadas estejam na ilha desenergizada e adjacente à chave associada à σ_c^i , insira-as na sequência e, em seguida, insira a operação σ_c^i ; faça
 $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \{G_R^i\} \cup \mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$;
- 15 **fim**
- 16 Retorne $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$ e finalize;

topologia;

2. O índice percentual da razão entre o incremento de potência ativa demandada (ΔD_{Gi}), acrescido de um erro máximo na previsão de carga ($\overline{e_D}$), e a soma das potências ativas máximas ($P_{\mu G}^{ddg}$) dos geradores despacháveis, conectados à microrrede que receberá a carga restaurada ou remanejada, deve ser superior à um valor de referência ($\overline{\Delta D_{\%}}$), denominado de percentual de máxima carga restaurada. Matematicamente, essa condição é expressa pela equação (77).

$$\frac{\Delta D_{Gi} \cdot (1 + \overline{e_D})}{P_{\mu G}^{ddg}} \cdot 100\% \geq \overline{\Delta D_{\%}} \quad (77)$$

Define-se o valor padrão para o erro máximo na previsão de carga em 0,2 (ou 20%). Para

o percentual de máxima carga restaurada, utiliza-se, como valor padrão, de 5% (ADIBI *et al.*, 1987). Em alguns dos estudos realizados neste trabalho, esses valores foram ajustados conforme a condição de carregamento da rede.

Como exemplo, considere o sistema hipotético, apresentado em exemplos anteriores, com a presença de geradores distribuídos despacháveis. Suponha que na topologia de operação no estado restaurativo, apresentada na Figura 13b, haja uma microrrede composta pelas seções S4, S5, S6 e S7, sendo coordenada pelo gerador despachável (com capacidade de BS) da seção S7. Considere a topologia da Figura 13a como a topologia inicial (γ_0) e que para obter a topologia final (γ_f), apresentada na Figura 13b, seja necessário executar o grupo de operações de reconfiguração que é composto, apenas, pela operação de fechamento da chave C. Neste caso, a execução da operação resulta no incremento de carga de uma microrrede, atendendo a condição 1. Para o cálculo do índice da condição 2, soma-se da potência ativa demandada das cargas restauradas (valores, em por unidade, indicados em vermelho na Figura 13b) nas seções S4, S5 e S6 e considera-se apenas potência ativa máxima que poderá ser fornecida pela microrrede (valor, em por unidade, indicado em verde na Figura 13a). Utilizando os valores padrões, $\overline{e_D} = 0,2$ e $\overline{\Delta D_{\%}} = 20\%$ logo, obtém-se:

$$1,2 \cdot \frac{0,2 + 0,125 + 0,1}{5} \cdot 100\% = 10,2\% \geq 5\%$$

Desse modo, a condição 2 é satisfeita e, portanto, o grupo de operações avaliado deve ser fragmentado. Nota-se na avaliação realizada, que os geradores despacháveis agregados à microrrede após a execução de um grupo de operações não são considerados no cálculo do índice de avaliação do desvio de frequência.

No Algoritmo 8, a seleção das seções que irão compor o subconjunto é feita por meio de uma rotina iterativa. Nesta etapa, faz-se um cálculo simplificado do fluxo de potência das seções que seriam transferidas caso o grupo avaliado G_i fosse completamente executado. Nesta parte, calcula-se apenas injeção líquida de potência ativa (determinada pela potência ativa máxima dos geradores despacháveis da seção subtraída pela demanda total das cargas da seção) e os fluxos de potência dos ramos com chaves de manobras, considerando que a potência flui no sentido da seção adjacente à chave de manobra associada a operação de fechamento do grupo de operações G_i . O objetivo com esses cálculos simplificados, é estimar a distribuição de potência entre as seções que podem ser restauradas com a execução do grupo G_i e priorizar as seções com cargas menores (carga possui injeção de potência ativa negativa) ou que contenham geradores despacháveis (geradores despacháveis possui injeção de potência ativa positiva). Desse modo, inicia-se um processo iterativo, começando pela seção adjacente à chave de manobra associada a operação de fechamento do grupo de operações G_i , que estabelece as seções a serem restauradas, priorizando as seções com maior injeção líquida de potência ativa e sem a violação do índice de desvio de frequência.

Utilizando o exemplo anterior, em que verificou-se a necessidade de fragmentar o grupo de operações responsável pela formação da microrrede da Figura 13b, é possível verificar os

Algoritmo 8: Fragmentação de grupos de operações.

Entrada: Conjunto de grupos de operações $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$; topologia inicial γ_o ; topologia final γ_f ; dados de carregamento e geração do sistema.

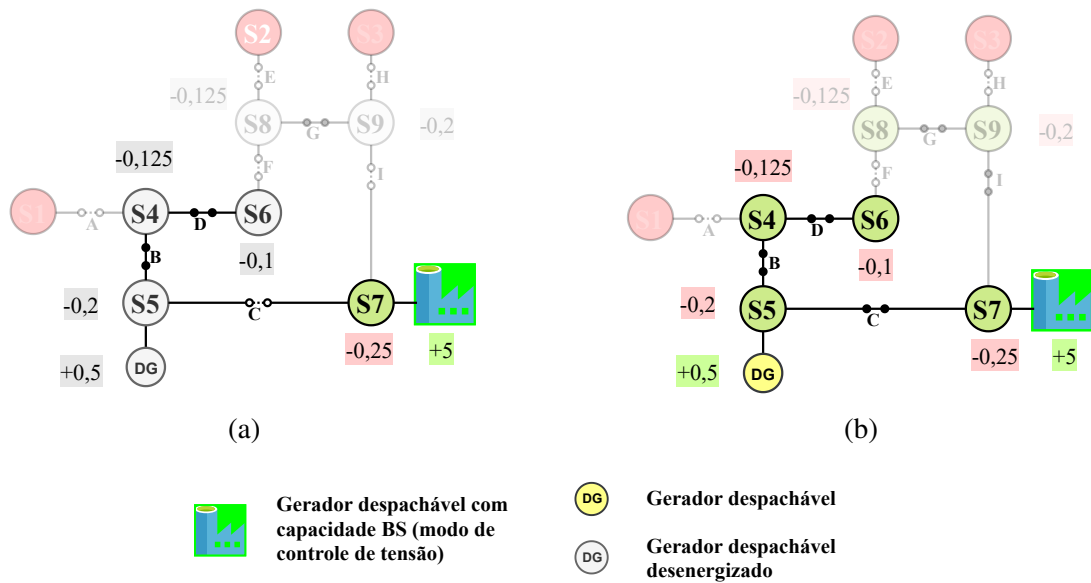
Saída: $\mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f)$

```

1   $\mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \emptyset$ ;
2  para cada  $G_i \in \mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$  faça
3      se  $G_i$  satisfaz as condições de fragmentação então
4          Na análise a seguir, considere apenas parcela da rede transferida caso o grupo  $G_i$ 
            fosse executado por completo;
5          Calcule a potência ativa líquida de cada seção;
6          Calcule o fluxo de potência simplificado dos ramos que contenham chaves de
            manobras, considerando que potência flui no sentido da seção adjacente à chave
            associada a operação de fechamento de  $G_i$ ;
7          Faça  $P_{transf} \leftarrow 0$ ;
8          Inicie a lista  $S_{next}$ , inserindo o índice da seção adjacente à chave associada a
            operação de fechamento de  $G_i$ ;
9          Inicie um novo grupo de operações auxiliar  $G_i^*$ ;
10         enquanto  $S_{next}$  não é vazio faça
11             Ordene a lista  $S_{next}$  em ordem crescente, tomando como parâmetro de
                referência o valor do fluxo de potência do ramo à montante de cada seção;
12             Retire a seção com maior valor de fluxo de potência do ramo à montante
                (última posição), denotando-a por  $s_{max,i}$ ;
13             Calcule o índice de avaliação da transferência, considerando a potência
                demandada das seções já transferidas ( $P_{transf}$ ) somada à potência
                demandada da seção  $s_{max,i}$ , denotando o índice por  $\Delta D_{\%,i}$ ;
14             se  $\Delta D_{\%,i} \leq \overline{\Delta D}_{\%}$  então
15                 Verifique se a chave à montante de  $s_{max,i}$  não possui uma operação de
                    abertura em  $G_i$ ; se não vá ao Passo (16), se sim vá ao Passo (19);
16                 Marque a seção  $s_{max,i}$  como uma seção ser transferida e faça
                     $P_{transf} \leftarrow P_{transf} + P_{s_{max,i}}$ ;
17                 Adicione as seções adjacentes e à jusante na lista  $S_{next}$ ;
18             senão
19                 Insira a operação de abertura da chave à montante de  $s_{max,i}$  no grupo de
                    operações  $G_i^*$ ;
20             fim
21         fim
22          $\mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \cup \{G_i^*\}$ ;
23     senão
24          $\mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \cup \{G_i\}$ ;
25     fim
26 fim
27 Retorne  $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$  e finalize;

```

Figura 13 – Exemplo de avaliação das condições de fragmentação de um grupo de operações – (a) topologia inicial e (b) topologia final.



Fonte: Elaborado pelo autor.

detalhes do processo de fragmentação de um grupo de operações. Na Figura 14 é apresentado, em destaque, o conjunto de seções (em azul) que seriam transferidas para a microrrede da seção S7 caso o grupo de operações de restaurações fosse executado integralmente. A seção S5 (em azul escuro), adjacente à chave de manobra associada a operação de fechamento do grupo, é utilizada como de referência para o cálculo de fluxo de potência simplificado. Os valores determinados na etapa de cálculo do fluxo simplificado são destacados na Figura 14.

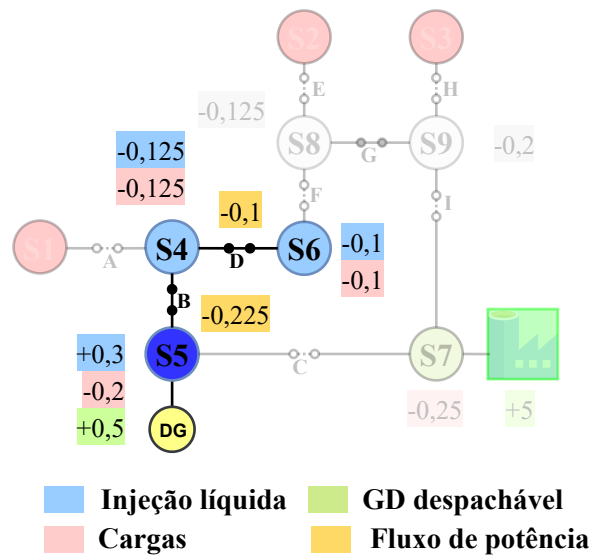
Na Tabela 3 são apresentados as iterações do processo de fragmentação. Considerando os valores padrões, apresentados anteriormente, o processo é interrompido ao fim da iteração 2, quando a lista S_{next} está vazia. Ao final, conforme indicado na lista S_{transf} da Tabela 3, restaura-se apenas a seção S5. Na Tabela 4 é apresentado o grupo de operações inicial e o grupo fragmentado obtido por meio do Algoritmo 8.

Tabela 3 – Exemplo da aplicação do conceito de fragmentação de grupos – Etapas do algoritmo de fragmentação.

Iteração	P_{rest} [pu]	$s_{max,i}$	$P_{s_{max,i}}$ [pu]	$\Delta D_{\%,i}$	S_{next}	S_{rest}
0	0.0	-	-	0.0	{S5}	$\emptyset$
1	0.0	S5	0,2	$5,0\% \leq 5\%$	{S4}	{S5}
2	0,2	S4	0,125	$7,8\% \geq 5\%$	$\emptyset$	{S5}

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – Exemplo da aplicação do conceito de fragmentação de grupos - Conjunto de seções transferidas na execução integral do grupo de operações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Exemplo da aplicação do conceito de fragmentação de grupos – Comparação entre o grupo de operações inicial e o grupo fragmentado correspondente.

Grupo inicial			Grupo fragmentado		
Ordem	Elemento associado	Tipo de operação	Ordem	Elemento associado	Tipo de operação
#1	Chave - C	Fechamento	#1	Chave - B	Abertura
			#2	Chave - C	Fechamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2.3 Super grupos de operações

Em Peralta (2019) é apresentado o conceito de super grupos, que pode ser interpretado como um caso especial dos grupos de operações. Um super grupo de operações é obtido por meio da combinação entre um grupo de reconfiguração e outro grupo de restauração, assim, executa-se primeiro as operações de reconfiguração e, em seguida, executa-se as operações do grupo de restauração.

Para que seja possível combinar os grupos de reconfiguração e restauração é necessário que a ilha receptora do grupo de restauração seja igual à ilha concessora do grupo de reconfiguração. Em um grupo de operações, a ilha concessora é aquela que concede uma parcela ou todas as seções que à compunha após a execução de todas as operações do grupo. O conceito de super grupo é utilizado para evitar infactibilidades associadas ao estado de operação da rede, já que é possível, por exemplo, reduzir o carregamento de uma ilha por meio da reconfiguração e, em seguida, restaurar um conjunto de cargas. Desse modo, essa estratégia torna o processo de definição da sequência de operações mais eficaz.

No Algoritmo 9 é apresentado o algoritmo proposto para construção de super grupos. O algoritmo consiste em verificar quais são as ilhas concessionárias e receptoras de cada grupo de operações de reconfiguração e restauração, respectivamente, de um conjunto de grupos de operações. Cada uma dessas ilhas identificadas possuem uma lista para os grupos de reconfiguração (L_{RCF}) e restauração (L_R) que estão associados à elas. Ao fim dessa fase de construção, verifica-se as listas de reconfiguração e restauração associadas à uma mesma ilha. Se uma das listas (L_{RCF} ou L_R), que estão associadas à mesma ilha, possui grupos de operações e a outra está vazia, logo, não é possível realizar a combinação de grupos de operações. No entanto, se ambas possuem grupos de operações, então realiza-se as combinações possíveis entre os grupos de reconfiguração e restauração.

3.2.3 Avaliação de grupos de operações

Em Peralta (2019), define-se a sequência de execução dos grupos de operações (e, conseqüentemente, a sequência das operações de chaveamentos), avaliando um parâmetro denominado de índice de restauração. O índice de restauração reflete a quantidade de carga restaurada por unidade de tempo, sendo determinado pela razão entre a potência da carga restaurada e o tempo total de execução do grupo de operações. Utilizando o índice de restauração, a heurística proposta em Peralta (2019), basicamente, otimiza a sequência factível de operações de chaveamento, priorizando os grupos de operações factíveis e com o maior índice de restauração.

Devido os aspectos associados à formação de microrredes, considera-se neste trabalho um segundo índice na avaliação dos grupos de operações. O índice utilizado reflete a modificação da reserva girante na ilha receptora associada a um grupo de operações, após a execução deste grupo. Em um grupo de reconfiguração e restauração, a ilha receptora é aquela que recebe as seções remanejadas ou restauradas após a execução do grupo de operações. Em um grupo de formação de microrrede, a ilha receptora é criada com a execução da operação de autorrestabelecimento do gerador despachável com capacidade de BS. Desse modo, o índice que reflete a reserva girante é determinado pela razão entre a potência ativa total das cargas pela potência ativa máxima dos geradores despacháveis da ilha receptora após a execução do grupo de operações.

Diferente do índice de restauração, em que prioriza-se os grupos com os maiores valores, no índice de reserva girante, prioriza-se os grupos com os valores mais baixos, entre zero e um. Isso porque valores do índice menores que 1, indicam que a potência máxima dos geradores excede a demanda das cargas, o que é desejável. Além disso, enquanto o índice de restauração é utilizado para otimização da redução da energia não suprida, o índice de reserva de energia, por outro lado, pode ser aplicado na otimização da formação da microrrede, já aumenta a margem de segurança na operação da microrrede e possibilita restaurar mais cargas.

Um terceiro parâmetro utilizado no processo de avaliação é o tempo de execução do grupo de operações. Esse parâmetro é utilizado como um critério de desempate entre dois grupos de operações que, por acaso, possuam os mesmos valores para os índices de restauração e reserva

Algoritmo 9: Super grupos de operações.

Entrada: Conjunto de grupos de operações $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$; topologia inicial γ_o ; topologia final γ_f .

Saída: Conjunto de grupos de operações $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$.

```

1   $L_{ilhas} \leftarrow \emptyset$  ;
2   $\mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \emptyset$  para cada grupo de restauração  $G_{R,i} \in \mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$  faça
3      Determine a ilha receptora associada ao grupo de restauração  $G_{R,i}$ , denotando-a por
         $I_{R,i}$ ;
4      Verifique se a ilha  $I_{R,i}$  está contida em  $L_{ilhas}$ ; se não, insira-a em  $L_{ilhas}$ , crie uma lista
        de grupos de restauração associados à ilha  $I_{R,i}$ , denotada por  $L_{R,I_{R,i}}$ ;
5      Insira o grupo de operações  $G_{R,i}$  na lista  $L_{R,I_{R,i}}$ ;
6  fim
7  para cada grupo de reconfiguração  $G_{RCF,i} \in \mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f)$  faça
8      Determine a ilha concessora associada ao grupo de reconfiguração  $G_{RCF,i}$ ,
        denotando-a por  $I_{RCF,i}$ ;
9      Verifique se a ilha  $I_{RCF,i}$  está contida em  $L_{ilhas}$ ; se não, insira-a em  $L_{ilhas}$ ;
10     Verifique se lista de grupos de reconfiguração associados à ilha  $I_{RCF,i}$  já foi criada; se
        não, crie-a, denotando por  $L_{RCF,I_{RCF,i}}$ ;
11     Insira o grupo de operações  $G_{RCF,i}$  na lista  $L_{RCF,I_{RCF,i}}$ ;
12 fim
13 para cada ilha  $I \in L_{ilhas}$  faça
14     Verifique as listas de reconfiguração e restauração associadas à ilha  $I$ , denotando-as,
        respectivamente, por  $L_{RCF,I}$  e  $L_{R,I}$ ;
15     se  $(L_{RCF,I} \neq \emptyset \wedge L_{R,I} = \emptyset) \vee (L_{R,I} = \emptyset \wedge L_{RCF,I} \neq \emptyset)$  então
16         para cada grupo de operações  $G \in (L_{R,I} \cup L_{RCF,I})$  faça
17              $\mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \cup \{G\}$ 
18         fim
19     senão
20         para cada grupo de operações  $G_{R,i} \in L_{R,I}$  faça
21              $\mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \cup \{G_{R,i}\}$ ;
22         para cada grupo de operações  $G_{RCF,j} \in L_{RCF,I}$  faça
23             Combine os grupos de operações  $G_{R,i}$  e  $G_{RCF,j}$  em um super grupo,
                denotado por  $G_{SGOP,i,j}$ ;
24              $\mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \mathbb{G}^*(\gamma_o, \gamma_f) \cup \{G_{SGOP,i,j}\}$ 
25         fim
26     fim
27 fim
28 fim

```

girante. Desse modo, no processo de avaliação o tempo de execução de um grupo de operações possui o menor peso.

3.2.3.1 Cálculo do índice de restauração

Como descrito anteriormente, o índice de restauração é determinado pela razão entre a potência da carga restaurada e o tempo de execução. Desse modo, considerando um grupo de operações G_i cuja execução restaura um conjunto de cargas com potência total de $P_{rest,i}$ em um intervalo de tempo $\Delta t_{exec,i}$, logo, o índice de restauração associado ao grupo G_i é determinado pela equação (78).

$$IR_i = \frac{P_{rest,i}}{\Delta t_{exec,i}} \quad (78)$$

A potência restaurada de um grupo de operações é obtida pela diferença entre as potências totais das cargas energizadas após e antes a execução de todas as operações que compõem o grupo de operações. Desse modo, em um grupo de restauração, em todos os casos, a potência restaurada é positiva. Um grupo de reconfiguração, no entanto, possui potência restaurada nula (embora haja um breve corte de cargas, logo em seguida as mesmas cargas são restauradas) ou negativa, que pode ocorrer em casos de fragmentação de grupos de reconfiguração.

3.2.3.2 Cálculo do índice de reserva girante

O índice de reserva girante deve ser determinado pela potência ativa total de todas as cargas da ilha receptora dividida pela potência ativa máxima dos geradores nesta mesma ilha após a execução das operações de um grupo. Desse modo, considere um grupo de operações G_i cuja ilha receptora, antes da execução das operações do grupo G_i , possua um conjunto de cargas com potência ativa total de $P_{i,ir}^{ld}$ e a soma total da potência ativa máxima fornecida pelos geradores dessa ilha seja $P_{i,ir}^{ddg}$. Ao executar o grupo de operações G_i , supondo que a potência ativa total das cargas transferidas para a ilha receptora seja $P_{i,transf}^{ld}$ e que a soma total da potência ativa máxima dos geradores despacháveis seja $P_{i,transf}^{ddg}$. Levando em conta o erro na previsão de demanda das cargas, definido anteriormente, o índice de reserva girante será determinado pela equação (79).

$$IRG_i = (1 + \bar{e}_D) \cdot \frac{P_{i,ir}^{ld} + P_{i,transf}^{ld}}{P_{i,ir}^{ddg} + P_{i,transf}^{ddg}} \quad (79)$$

Para os casos em que a ilha receptora está conectada à subestação considera-se $P_{i,ir}^{ddg} \leftarrow \infty$ e, portanto, o índice de reserva girante tende à zero. Essa consideração equivale à dizer que a subestação é alimentada por meio de um barramento infinito ou, ainda, que as cargas transferidas na execução dos grupos de operações, não afetam os níveis de tensão e a frequência da fonte alimentadora da subestação.

3.2.3.2.1 Critério de avaliação dos grupos de operações

No critério de avaliação adotado, pretende-se garantir, sobretudo, que no processo de formação das microrredes, a reserva girante seja suficiente para garantir a estabilidade de frequência e o balanço de potência da microrrede em formação. Adicionalmente, objetiva-se otimizar a sequência de operações, de modo que a energia não suprida seja reduzida. Com base nessas duas aspirações, é possível estabelecer uma relação de ordem entre dois grupos de operações, possibilitando a ordenação de um conjunto de operações.

Desse modo, considere um grupo de operações G_i cujos índices de restauração e reserva girante sejam IR_i e IRG_i , e o tempo total de execução desse grupo de operações seja $\Delta t_{exec,i}$. Similarmente, considere um segundo grupo de operações G_j . Assim, diz-se que G_i é menor que G_j ($G_i \prec G_j$), se:

1. Caso $IRG_i \neq IRG_j$, então $IRG_i > IRG_j$;
2. Caso $IRG_i = IRG_j$, então $IR_i < IR_j$;
3. Caso $IRG_i = IRG_j$ e $IR_i = IR_j$, então $\Delta t_{exec,i} > \Delta t_{exec,j}$.

Com base na relação de ordem estabelecida, prioriza-se, sobretudo, as operações com maiores margens de geração em relação às demandas das cargas. Uma implicação dessa aspiração é que em cenários com a presença de microrredes e ilhas conectadas à subestação, as operações de reconfiguração e restauração das ilhas ligadas à subestação são executadas primeiro, já que neste caso tem-se $IRG = 0$. Além disso, no caso de cenários sem a formação de microrrede, as regras de avaliação comportam-se de maneira similar ao critério utilizado em Peralta (2019).

3.2.4 Heurística de sequenciamento de operações

A heurística de sequenciamento de operações é descrita, resumidamente, em três fases principais:

1. **Comparação** – a topologia incumbente e a topologia alvo são comparadas, sendo possível determinar as operações que devem ser executadas na topologia incumbente para obter-se a topologia alvo;
2. **Tomada de decisão** – baseados em critérios que garantem a factibilidade e otimização da sequência de operações, determina-se o melhor conjunto de operações a ser executado;
3. **Validação e atualização** – nesta fase, válida-se a execução do conjunto de operações estabelecidos na fase anterior e atualiza-se a topologia incumbente e a demais variáveis, possibilitando o início de uma nova iteração.

O processo iterativo da heurística é interrompido quando a topologia incumbente é igual a topologia alvo ou não há operações factíveis disponíveis na tomada de decisão.

No Algoritmo 10 são apresentados os passos que compõem a heurística de construção da sequência de operações. Os parâmetros de entrada do algoritmo são as topologias pós-falta e de operação no estado restaurativo, e os dados da rede, que possibilitam avaliar a factibilidade das topologias construídas ao longo do processo iterativo. Além disso, há um parâmetro de tolerância da infactibilidade, que é utilizado para verificar quando uma operação conduz à uma topologia infactível.

O processo iterativo inicia-se com a avaliação das topologias pós-falta e de operação do estado restaurativo. Desse modo, determina-se qual delas possui o maior valor para função de penalização, que é utilizado como valor de referência no processo de verificação da factibilidade das topologias intermediárias. A topologia incumbente (γ_o), no início do algoritmo é a topologia pós-falta.

A fase de comparação é formada pelos Passos 4, 6 e 7. No Passo 4, constrói-se o conjunto de grupos de operações referente as topologias incumbente e alvo (γ_f) utilizando o Algoritmo 7. No Passo 5, verifica-se a possibilidade do conjunto de grupos de operações ser vazio, condição que interrompe o processo iterativo. Nos Passos 6 e 7, realiza-se, respectivamente, as fragmentações e formação dos super grupos. Para verificação e realização da fragmentação utiliza-se o Algoritmo 8. Na formação dos super grupos, utiliza-se o Algoritmo 9.

Nos Passos 8 à 17, executa-se a fase de tomada de decisão. Nesta fase, os grupos que pertencem ao conjunto de grupos $\mathbb{G}''(\gamma_o, \gamma_f)$ são ordenados, em ordem crescente, e armazenados na lista L_{GOP} . Em ordem crescente e segundo os critérios de avaliação dos grupos, o último grupo da lista L_{GOP} deve ser escolhido e avaliado, verificando se as operações conduzem à um estado factível. Nesse processo de avaliação das topologias intermediárias, resultantes da execução das operações, obtém-se o maior valor da função de penalização associado ao grupo escolhido, denotado por $\overline{CP}'_{VO}$. Se a diferença absoluta entre $\overline{CP}'_{VO}$ e o valor máximo de referência para a função de penalização, representado por $\overline{CP}_{VO}$, então o grupo avaliado é infactível. Caso o grupo seja infactível, avalia-se um novo grupo até esgotar as possibilidades.

Ao constatar que o grupo é factível, então atualiza-se a solução incumbente, executando todas as operações do grupo. A sequência de operações do grupo de operações é anexada à sequência total de operações, indicada pela variável $\mathbb{X}_{SOP}$.

Algoritmo 10: Heurística de construção da sequência de operações.

Entrada: topologia pós-falta γ_o ; topologia de operação no estado restaurativo γ_f ; tolerância de infactibilidade ε ; dados da rede (parâmetros, carregamento e geração).

Saída: Sequência de chaveamentos $\mathbb{X}_{SOP}$

```

1  Avalie as topologias  $\gamma_o$  e  $\gamma_f$ , e armazene na variável  $\overline{CP}_{VO}$  o maior valor encontrado para
   a função de penalização ;
2  flagRUN  $\leftarrow$  true;
3  enquanto flagRUN faça
4      Construa o conjunto de grupos de operações das topologias  $\gamma_o$  e  $\gamma_f$ :
        $\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \text{ConstroiCGOp}(\gamma_o, \gamma_f)$ ;
5      se  $(\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f) \neq \emptyset)$  então
6          Verifique e execute a fragmentação dos grupos:
            $\mathbb{G}'(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \text{Fragmentar}(\mathbb{G}(\gamma_o, \gamma_f))$ ;
7          Verifique e execute a formação de super grupos:
            $\mathbb{G}''(\gamma_o, \gamma_f) \leftarrow \text{SuperGrupos}(\mathbb{G}'(\gamma_o, \gamma_f))$ ;
8          Calcule os índices de avaliação e armazene (em ordem crescente e aplicando o
           critério de avaliação de grupos de operações) todos os grupos de  $\mathbb{G}''(\gamma_o, \gamma_f)$  em
            $L_{GOP}$ ;
9          enquanto  $L_{GOP}$  não é vazio faça
10             Armazene na variável  $G'$ , o grupo localizado na última posição de  $L_{GOP}$ ;
              remova o último grupo da lista  $L_{GOP}$ ;
11              $\gamma' \leftarrow \gamma_o$  ;
12              $\overline{CP}'_{VO} \leftarrow 0$  ;
13             para cada operação  $\sigma_i \in G'$  faça
14                 Atualize a topologia  $\gamma'$  aplicando a operação  $\sigma_i$ ;
15                 Avalie a topologia  $\gamma'$ ; se a avaliação convergir, então armazene o valor da
                  função de penalização em  $CP'_{VO}$ ; caso contrário faça  $CP'_{VO} \leftarrow \infty$ ;
16                 Se  $CP'_{VO} > \overline{CP}'_{VO}$ , então faça  $\overline{CP}'_{VO} \leftarrow CP'_{VO}$ ;
17             fim
18             se  $|\overline{CP}'_{VO} - \overline{CP}_{VO}| \leq \varepsilon$  então
19                 flagRUN  $\leftarrow$  true ;
20                 Atualize a topologia :  $\gamma_o \leftarrow \gamma'$ ;
21                 Anexe as operações do grupo  $G'$  no final da sequência  $\mathbb{X}_{SOP}$ ;
22             senão
23                 flagRUN  $\leftarrow$  false;
24             fim
25         fim
26     senão
27         flagRUN  $\leftarrow$  false;
28     fim
29 fim

```

4 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio de simulações com a metodologia proposta, que foi implementada em linguagem C++. Para resolver o FPO utilizou-se o *solver* CPLEX (CPLEX, 2017). As simulações foram executadas em um PC dotado de um processador i5-7200U de 2,5GHz e memória RAM de 8Gb.

As simulações foram realizadas com dados de sistemas testes disponíveis na literatura. São utilizados dois sistemas testes: sistema de 33 barras, publicado em Goswami e Basu (1992); e o sistema de 136 barras, apresentado em Mantovani *et al.* (2000). Os dados originais foram adaptados para se adequarem à entrada de dados da metodologia proposta e para composição de diferentes cenários de simulação, sendo disponibilizados em um repositório do GitHub¹.

Para avaliar o desempenho do método proposto, os sistemas testes foram avaliados em cenários de faltas permanentes. Cada cenário sob análise foi avaliado por meio de diferentes estratégias de solução utilizando os algoritmos VNS apresentados. Os parâmetros utilizados nos algoritmos VNS são apresentados na Tabela 5. Nas estratégias de solução de natureza estocásticas (que utilizam os métodos BVNS, RVNS e GVNS) foram realizadas 5 execuções em cada cenário proposto. Em cada cenário, avalia-se duas topologias: a topologia pós-falta, que consiste na configuração da rede após a execução das operações de isolamento; e a melhor topologia encontrada para o cenário proposto.

Tabela 5 – Parâmetros dos algoritmos VNS.

Algoritmo VNS	Núm. de vizinhanças	Núm. máximo de execuções	Núm. máximo de execuções sem melhoria	Tempo máximo de execução [s]
BVNS	2	6	2	300
RVNS	3	10	3	300
VND	1	**	**	300
GVNS	2	6	2	300

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Sistema teste de 33 barras

O sistema de 33 barras possui apenas um alimentador, 32 cargas e 37 ramos. Considera-se que todos os ramos possuem chaves de manobras automáticas, com tempos de operação de 1 minuto, e que cinco dessas chaves estão abertas na topologia inicial. Desse modo, cada seção

¹ <<https://github.com/JPMarquesEE/Data-ServiceRestoration>>

possui apenas uma barra. A soma da potência ativa das cargas é de 3,72 MVA e da potência reativa é 2,3 MVA. A potência base do sistema é de 1 MVA e a tensão base de 12,66 kV.

O sistema de 33 barras é avaliado em três diferentes condições de operação: sem a presença de geração distribuída, ESSs e cargas do PRD (Condição 1); com a presença de geradores despacháveis e cargas do PRD (Condição 2); e com a presença de cargas com geração distribuída (despachável e não despachável), ESSs e cargas do PRD (Condição 3). Na Condição 1, simulou-se um cenário de faltas permanentes e simultâneas nas seções 3 e 8. Na Condição 2, simulou-se dois cenários de faltas permanentes: faltas simultâneas nas seções 3 e 8; e falta na seção 1. Para a Condição 3, avaliou-se apenas um cenário de falta na seção 1. Na Figura 15 são apresentadas as topologias das condições de operação consideradas para o sistema de 33 barras, apresentando a localização dos equipamentos controláveis.

4.1.1 Faltas simultâneas nas seções 3 e 8

Na ocorrência de faltas permanentes e simultâneas nas seções 3 e 8, 84,37% das cargas do sistema ficam desenergizadas. Neste cenário, considera-se que as seções com falta são isoladas pela abertura das chaves de manobras dos ramos 2, 3, 7, 8 e 22, sendo que a configuração resultante consiste na topologia pós-falta. A chave NA 33, fica inutilizada para restauração por ser adjacente à seção 8, onde ocorreu uma falta.

4.1.1.1 Condição 1

Na Condição 1 de operação, o valor da função objetivo associada à topologia pós-falta é 923,75. O percentual elevado de cargas desenergizadas contribui substancialmente no custo total da operação da rede na topologia pós-falta. Na melhor topologia encontrada para operação no estado restaurativo, o valor da função objetivo é 805,33. Na Tabela 6 são apresentados os valores dos custos que compõem a função objetivo associadas às duas topologias avaliadas.

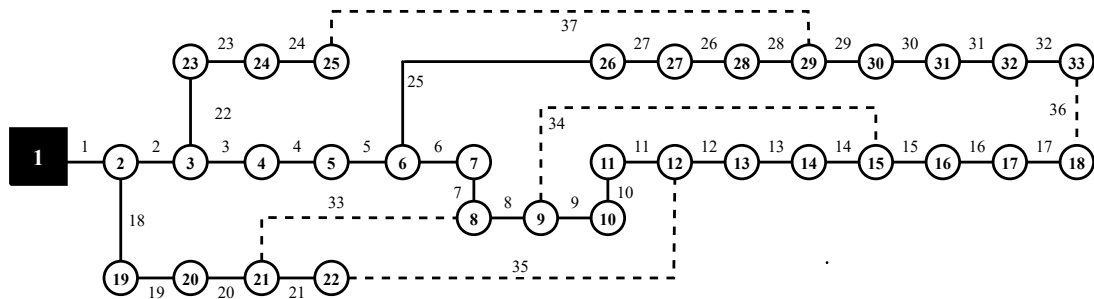
Tabela 6 – Sistema de 33 barras na Condição 1 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.

Topologia	CT_{NFE} [\$]	CT_{SWO} [\$]	CT_{DG} [\$]	CT_L [\$]	CP_{VO}	f [\$]
Pós-Falta	748,70	175,00	0,00	0,04	0,00	923,75
Melhor	584,25	220,00	0,00	1,08	0,00	805,33

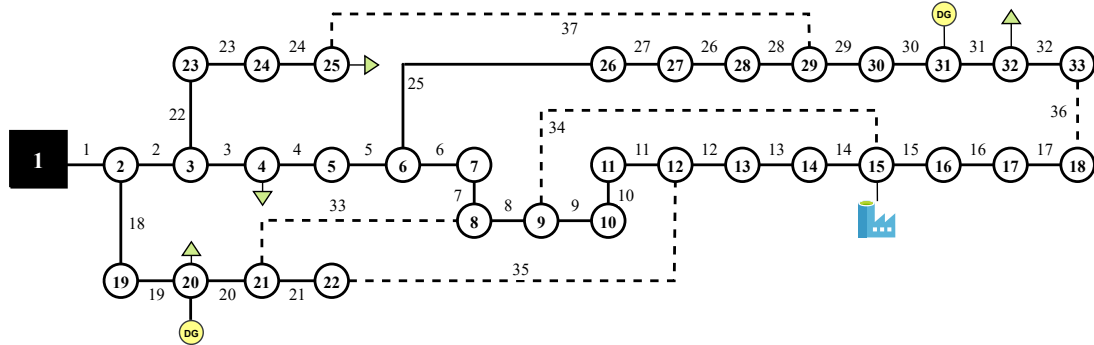
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 7 é apresentada a sequência de operações que conduz a rede da topologia pós-falta à melhor topologia encontrada para o estado restaurativo. Nota-se que a melhor topologia encontrada é obtida ao fechar a chave de manobra 35. Após a execução dessa operação, o percentual de cargas energizadas salta de 15,63% para 43,75%.

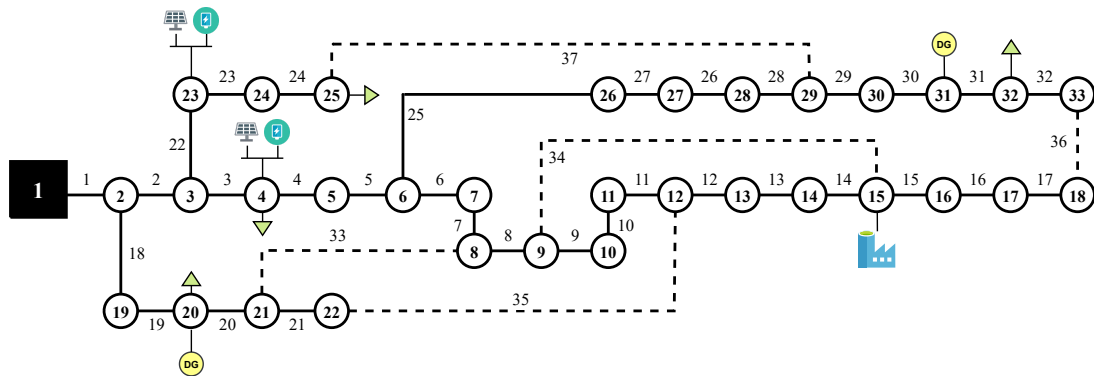
Figura 15 – Sistema de 33 barras – (a) Condição 1, (b) Condição 2 e (c) Condição 3.



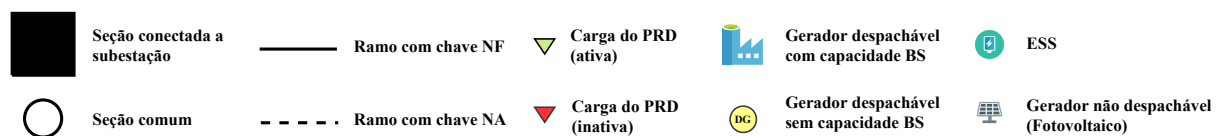
(a)



(b)



(c)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Sistema de 33 barras na Condição 1 – Sequência de operações na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.

Ordem	Elemento associado	Tipo de operação
#1	Chave - 35	Fechamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 8 são apresentadas as métricas de desempenho das estratégias de solução. Os tempos apresentados incluem o tempo de processamento da heurística que define a sequência de operações. Durante todos os testes, notou-se que o tempo de processamento do segundo estágio foi muito inferior ao tempo de processamento do primeiro estágio, motivo pelo qual o tempo de processamento de cada estágio não foi apresentado separadamente.

A partir dos dados da Tabela 8, nota-se que a qualidade das soluções fornecidas pelas estratégias foram iguais e todas apresentaram a melhor solução encontrada. Quanto ao tempo de processamento, neste cenário, destaca-se as estratégias utilizando o algoritmo VND e RVNS.

Tabela 8 – Sistema de 33 barras na Condição 1 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.

Algoritmo	t_{min} [s]	t_{max} [s]	t_{avg} [s]	f_{min} [\$]	f_{max} [\$]	f_{avg} [\$]
VNS						
BVNS	9,0	14,0	12,0	805,33	805,33	805,33
RVNS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	805,33	805,33	805,33
VND	**	< 0,1	**	**	805,33	**
GVNS	4,0	6,0	4,6	805,33	805,33	805,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.2 Condição 2

Na Condição 2 de operação, a topologia pós-falta possui função objetivo de 938,75, o que é um pouco superior quando comparada à Condição 1 e isso é devido à presença de cargas do PRD. Com a melhor topologia encontrada, o valor da função objetivo é 580,44. Ao comparar os valores da função objetivo das melhores topologias fornecidas para as Condições 1 e 2, verifica-se que na Condição 2 é possível restaurar mais cargas. Na Tabela 9, é possível comparar os valores da função objetivo para cada topologia avaliada.

Na Condição 2 de operação, a melhor topologia encontrada no estado restaurativo é obtida por meio do fechamento das chaves 35 e 36 da topologia pós-falta. Com a execução após a execução das operações, o percentual de cargas energizadas vai de 15,63% para 84,38%. Na Figura 16 são apresentadas as topologias pós-falta e a melhor topologia encontrada na Condição 2 de operação no cenário de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.

Tabela 9 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.

Topologia	CT_{NFE} [\$]	CT_{SWO} [\$]	CT_{DG} [\$]	CT_L [\$]	CP_{VO}	f [\$]
Pós-Falta	763,70	175,00	6,00	0,04	0,00	938,75
Melhor	272,45	265,00	29,98	13,01	0,00	580,44

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Sequência de operações na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.

Ordem	Elemento associado	Tipo de operação
#1	Chave - 35	Fechamento
#2	Chave - 36	Fechamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 11 são apresentadas as métricas de desempenho das estratégias de solução. Todas as estratégias foram capazes de fornecer a melhor topologia e nota-se que, neste cenário, as estratégias utilizando BVNS e GVNS apresentaram o mesmo desempenho quanto a qualidade das soluções fornecidas. Em relação ao tempo de processamento, a estratégia utilizando VND apresentou melhor desempenho em relação ao tempo médio das demais estratégias e a abordagem utilizando GVNS possui, neste cenário, o maior tempo médio de processamento.

Tabela 11 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.

Algoritmo VNS	t_{min} [s]	t_{max} [s]	t_{avg} [s]	f_{min} [\$]	f_{max} [\$]	f_{avg} [\$]
BVNS	10,0	28,0	17,4	580,44	645,49	619,47
RVNS	3,0	9,0	5,8	580,44	842,11	689,06
VND	**	4,0	**	**	580,44	**
GVNS	23,0	32,0	26,8	580,44	645,49	619,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

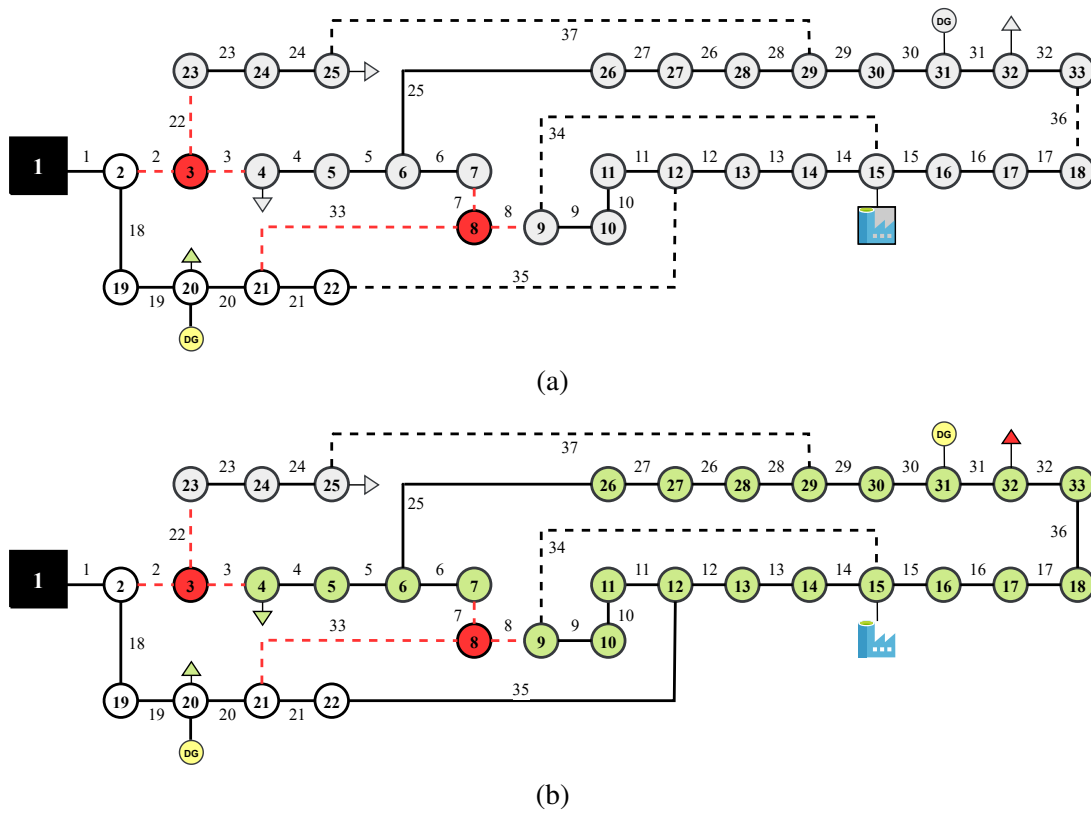
4.1.2 Falta permanente na seção 1

O cenário de falta permanente na seção 1 é crítica, já que resulta em todas as cargas do sistemas desenergizadas. A seção com falta é isolada pela abertura da chave de manobra localizada no ramo 1.

4.1.2.1 Condição 2

A função objetivo associada à rede após a ocorrência da falta crítica é 930,45. Na topologia de operação do estado restaurativo, fornecida pelo método proposto, a função objetivo

Figura 16 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – (a) Topologia pós-falta e a (b) melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 3 e 8.



Fonte: Elaborado pelo autor.

é reduzida à 459,34. Na topologia fornecida como solução, forma-se uma microrrede coordenada pelo gerador localizado na seção 15. Na Tabela 12 são apresentados os valores das duas topologias avaliadas para o cenário de falta na seção 1 para a Condição 2 de operação.

Tabela 12 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de falta na seção 1.

Topologia	CT_{NFE} [\$]	CT_{SWO} [\$]	CT_{DG} [\$]	CT_L [\$]	CP_{VO}	f [\$]
Pós-Falta	895,45	35,00	0,00	0,00	0,00	930,45
Melhor	173,30	77,50	206,07	2,47	0,00	459,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 13 são apresentadas as sequências de operações para obter-se a topologia fornecida como solução no estado restaurativo. A sequência de operações é construída de modo que a carga é restaurada parcialmente até que a topologia do estado restaurativo seja alcançada. A potência ativa restaurada em função da operação executada é apresentada no gráfico da Figura 17. Nota-se, neste gráfico, que a taxa de variação da potência restaurada é, aproximadamente, constante.

É importante destacar que, para a construção da sequência de operações desse cenário, estabeleceu-se o percentual de máxima carga restaurada ($\overline{\Delta D\%}$) em 7% e o erro percentual máximo na previsão de carga ($\overline{e_{D,\%}}$) em 5%, já que com os valores padrões (5% e 20%, respectivamente) não foi possível obter uma sequência de operações factíveis. Essa abordagem equivale a relaxar as restrições de estabilidade, definidas no segundo estágio de solução do método.

Tabela 13 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Sequência de operações na ocorrência de falta na seção 1.

Ordem	Elemento associado	Tipo de operação	Ordem	Elemento associado	Tipo de operação
#1	Chave - 15	Abertura	#18	Chave - 5	Fechamento
#2	Chave - 14	Abertura	#19	Chave - 29	Abertura
#3	Seção - 15	Autorrestabelecimento	#20	Chave - 26	Fechamento
#4	Chave - 12		#21	Chave - 18	Abertura
#5	Chave - 14		#22	Chave - 22	Abertura
#6	Chave - 9		#23	Chave - 3	Fechamento
#7	Chave - 12		#24	Chave - 20	Abertura
#8	Chave - 8		#25	Chave - 18	Fechamento
#9	Chave - 9		#26	Chave - 23	Abertura
#10	Chave - 7		#27	Chave - 22	Fechamento
#11	Chave - 8		#28	Chave - 20	Fechamento
#12	Chave - 6		#29	Chave - 30	Abertura
#13	Chave - 7		#30	Chave - 29	Fechamento
#14	Chave - 26		#31	Chave - 31	Abertura
#15	Chave - 5		#32	Chave - 30	Fechamento
#16	Chave - 6		#33	Chave - 15	Fechamento
#17	Chave - 3		#34	Chave - 31	Fechamento

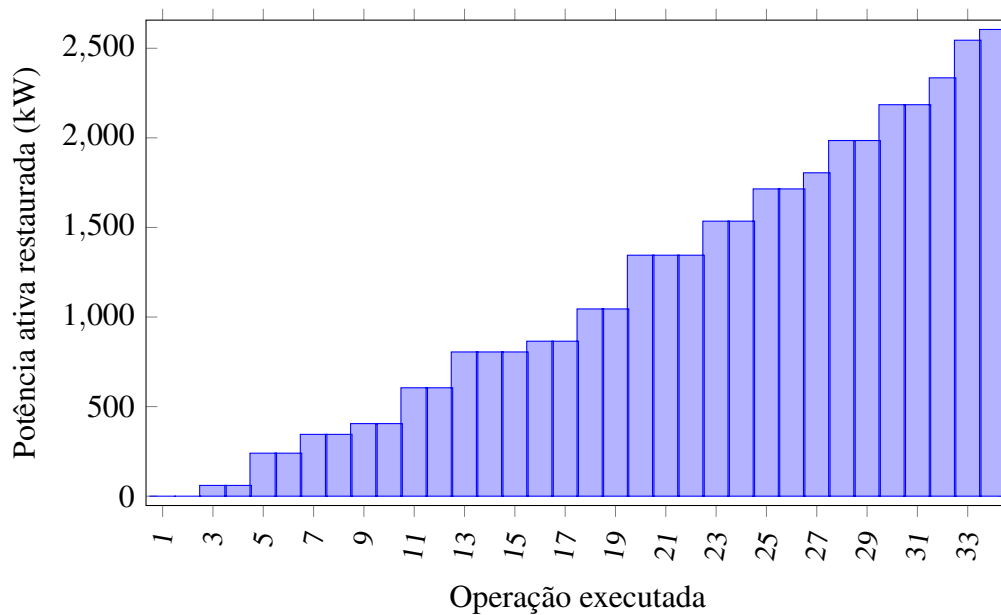
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 14 são apresentadas as métricas que possibilita a comparação das estratégias de solução do cenário da falta na seção 1 para Condição 2 de operação. Em relação a qualidade da solução fornecida, as estratégias utilizando o algoritmo VND fornece a melhor solução encontrada e a abordagem com GVNS possui o melhor valor médio. Quanto ao tempo de processamento, o algoritmo RVNS possui o menor tempo médio com 12,8 segundos, enquanto que a abordagem com VND fornece uma solução em 14 segundos.

4.1.2.2 Condição 3

Para Condição 3 de operação, considerou-se a variação de demanda no cenário de falta. Para tal, considera-se que falta na seção 1 ocorre às 16:45, com previsão de conclusão das ações de reparo para às 21:15. O intervalo de operação é discretizado com período de 15 minutos, o que resulta em 19 pontos de amostragem. Três tipos de curvas de demandas foram definidas sendo categorizadas, conforme o perfil de consumo, em residencial, comercial e industrial. Na

Figura 17 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Potência ativa restaurada em função da operação executada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Sistema de 33 barras na Condição 2 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de falta na seção 1.

Algoritmo	t_{min} [s]	t_{max} [s]	t_{avg} [s]	f_{min} [\$]	f_{max} [\$]	f_{avg} [\$]
VNS						
BVNS	21,0	45,0	31,8	459,34	493,30	483,32
RVNS	7,0	18,0	12,8	480,28	655,56	531,64
VND	**	14,0	**	**	459,34	**
GVNS	96,0	209,0	146,4	480,28	480,28	480,28

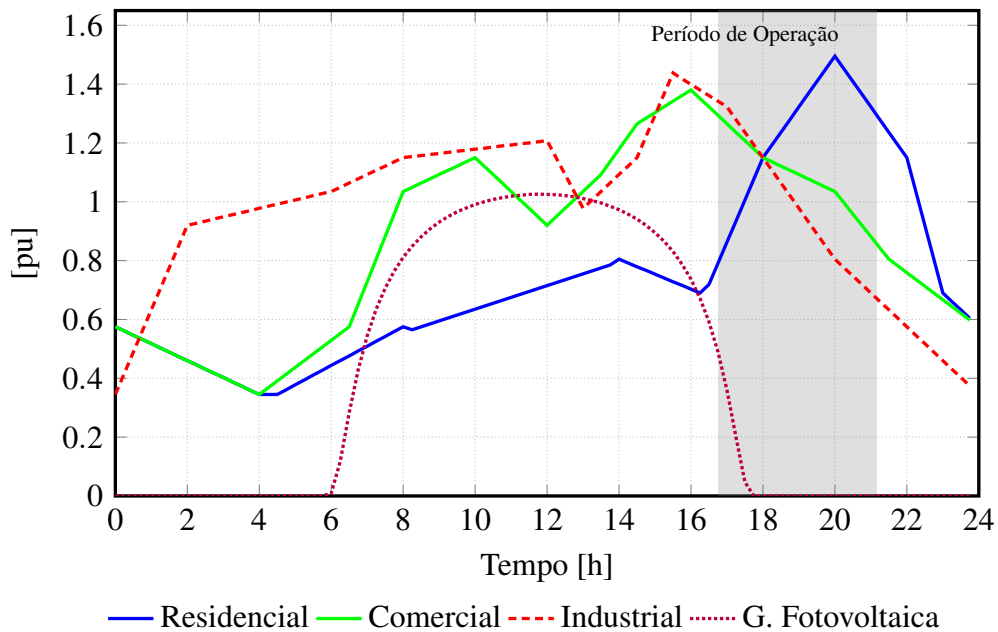
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 são apresentadas as curvas de demandas definidas e, em destaque, a abrangência do período de operação.

Na topologia pós-falta, a função objetivo apresenta um valor de 4655,57, devido a contribuição significativa dos custos de energia não suprida. Com a melhor topologia encontrada, o custo total da operação é reduzido para 1941,17. Por meio da solução fornecida, é possível restaurar todas as cargas, mas devido a condições de carregamento da rede, em alguns momentos, as cargas do PRD são desligadas. O custo da geração distribuída é bastante expressivo em relação ao custo total associado à melhor topologia fornecida, o que é uma decorrência da formação de uma microrrede dinâmica. Na Figura 19 são apresentadas a topologia pós-falta e a melhor topologia fornecida pela metodologia proposta para a Condição 3 de operação no cenário de falta permanente na seção 1.

Na heurística de construção da sequência de operações, estabeleceu-se o percentual

Figura 18 – Curvas de demanda e geração solar estabelecidas para os cenários de demanda variável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Sistema de 33 barras na Condição 3 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de falta na seção 1.

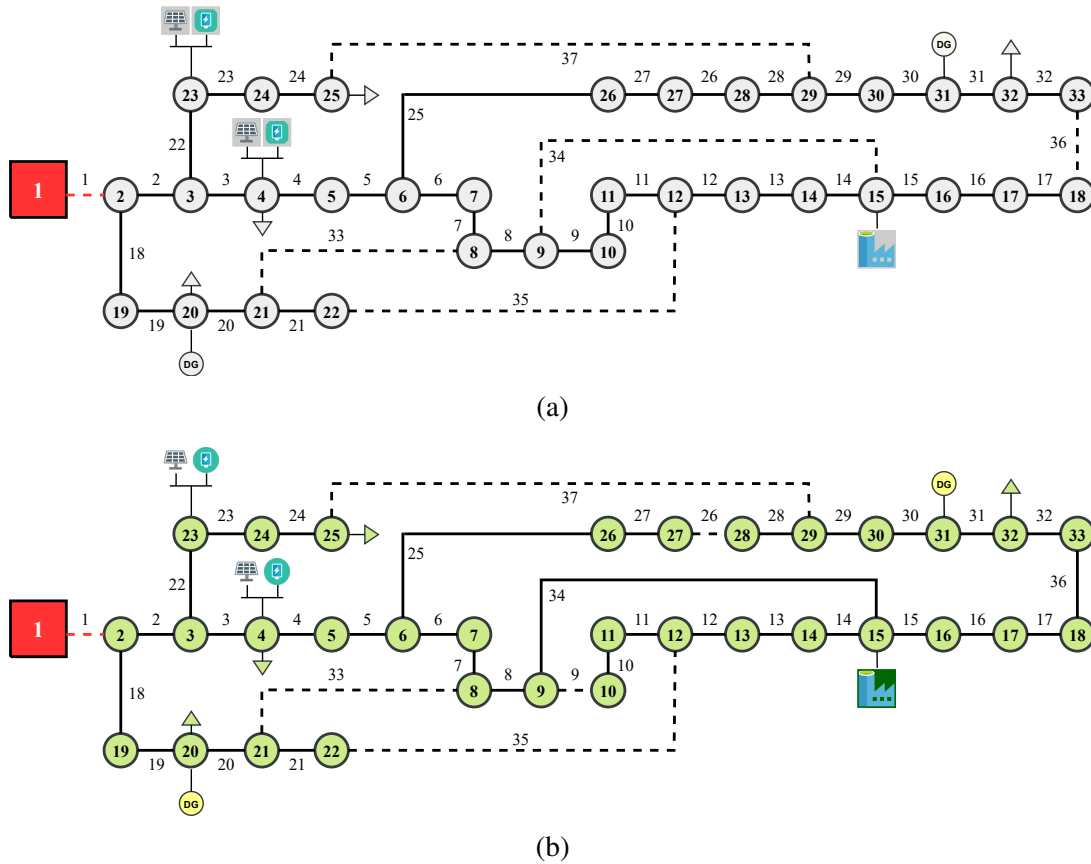
Topologia	CT_{NFE} [\$]	CT_{SWO} [\$]	CT_{DG} [\$]	CT_L [\$]	CP_{VO}	f [\$]
Pós-Falta	4620,57	35,00	0,00	0,00	0,00	4655,57
Melhor	230,17	202,50	1491,86	16,66	0,00	1941,18

Fonte: Elaborado pelo autor.

máximo de carga restaurada em 9,5% e o erro percentual máximo na previsão de carga em 2,5%. As operações da sequência construída são apresentadas na Tabela 16. Assim como observado na Condição 2, avaliada anteriormente, a microrrede é formada gradualmente, impedindo a variação brusca da carga restaurada. No gráfico da Figura 20 é apresentada o montante de potência ativa restaurada em função da operação executada.

Na Condição 3 de operação, não foi possível obter uma solução com as abordagens de BVNS, VND e GVNS em tempo de processamento inferior a 15 minutos. Nestas condições, abortou-se as avaliações com estas estratégias para este cenário. Apenas a estratégia utilizando o algoritmo RVNS foi capaz de fornecer uma solução no tempo estabelecido. Esse fato ocorre devido a complexidade do cenário e a quantidade de soluções processadas nas etapas de intensificação. Assim, embora tenha sido especificado um tempo máximo processamento de 5 minutos, é possível que esse limite seja excedido. Na Tabela 17 são apresentadas as métricas de desempenho da estratégia de solução utilizando o algoritmo RVNS.

Figura 19 – Sistema de 33 barras na Condição 3 – (a) Topologia pós-falta e a (b) melhor topologia encontrada na ocorrência de falta na seção 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Sistema de 136 barras

O sistema de 136 barras possui 8 barras alimentadoras, 107 cargas e 156 ramos. Considera-se que todos ramos possuem chaves de manobra automáticas com tempo de operação de 1 minuto. Essa consideração, torna o processo de solução complexo devido ao número elevado de topologias factíveis. Nesta condição, cada seção é composta por uma barra. Na topologia inicial, 21 ramos estão normalmente abertos. A potência base utilizada é de 1 MVA e a tensão base de 13,8 kV.

No sistema de 136 barras, avaliou-se duas condições de operação: a operação sem a presença de geradores distribuídos e cargas do PRD (Condição 1); e com a presença de geradores distribuídos despacháveis e cargas do PRD (Condição 2). As topologias iniciais do sistema de 136 barras nas Condições 1 e 2 são apresentadas na Figura 21. Nas Condições 1 e 2 foi avaliada a ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148. Adicionalmente, simulou-se a ocorrência de uma falta crítica, em que todo o sistema fica desenergizado, possibilitando a formação de uma microrrede.

Tabela 16 – Sistema de 33 barras na Condição 3 – Sequência de operações na ocorrência de falta na seção 1.

Ordem	Elemento associado	Tipo de operação	Ordem	Elemento associado	Tipo de operação
#1	Chave - 15	Abertura	#19	Chave - 22	Abertura
#2	Chave - 14	Abertura	#20	Chave - 4	Fechamento
#3	Seção - 15	Autorrestabelecimento	#21	Chave - 20	Abertura
#4	Chave - 15	Fechamento	#22	Chave - 2	Fechamento
#5	Chave - 32	Abertura	#23	Chave - 23	Abertura
#6	Chave - 36	Fechamento	#24	Chave - 22	Fechamento
#7	Chave - 9	Abertura	#25	Chave - 20	Fechamento
#8	Chave - 7	Abertura	#26	Chave - 31	Abertura
#9	Chave - 34	Fechamento	#27	Chave - 32	Fechamento
#10	Chave - 10	Abertura	#28	Chave - 30	Abertura
#11	Chave - 14	Fechamento	#29	Chave - 31	Fechamento
#12	Chave - 10	Fechamento	#30	Chave - 24	Abertura
#13	Chave - 6	Abertura	#31	Chave - 23	Fechamento
#14	Chave - 7	Fechamento	#32	Chave - 24	Fechamento
#15	Chave - 26	Abertura	#33	Chave - 28	Abertura
#16	Chave - 4	Abertura	#34	Chave - 30	Fechamento
#17	Chave - 6	Fechamento	#35	Chave - 28	Fechamento
#18	Chave - 2	Abertura			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Sistema de 33 barras na Condição 3 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de falta na seção 1.

Algoritmo	t_{min} [s]	t_{max} [s]	t_{avg} [s]	f_{min} [\$]	f_{max} [\$]	f_{avg} [\$]
VNS						
BVNS			** Execuções abortadas **			
RVNS	121,0	171,0	152,4	1941,18	2333,06	2098,07
VND			** Execuções abortadas **			
GVNS			** Execuções abortadas **			

Fonte: Elaborado pelo autor.

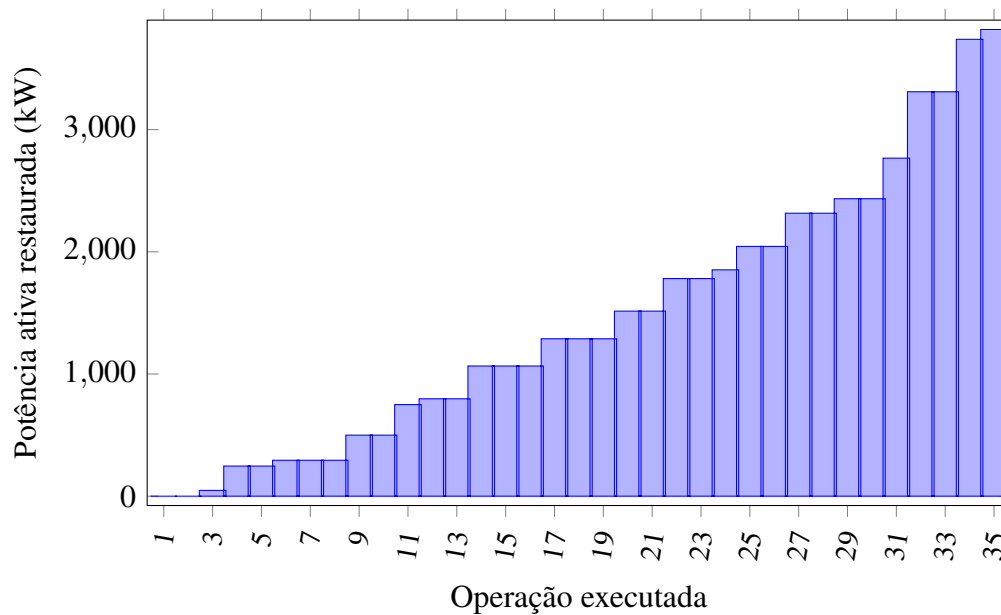
4.2.1 Falta permanente e simultâneas nas seções 48 e 148

Na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148, 32,7% das cargas ficam desenergizadas. As seções com faltas são isoladas pela abertura das chaves 39, 40, 99 e 100.

4.2.1.1 Condição 1

Na Condição 1 de operação, o valor da função objetivo associado à topologia pós-falta é 1256,48. Nos testes realizados, a melhor topologia fornecida pela metodologia proposta possui um custo total de operação de 398,97. O custo associado à energia não fornecida foi reduzido de 1119,32 a 37,52. Na Tabela 18 são apresentados a composição de custos da função objetivo para

Figura 20 – Sistema de 33 barras na Condição 3 – Potência ativa restaurada em função da operação executada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

as topologias avaliadas na Condição 1 de operação diante de faltas simultâneas nas seções 48 e 148. Na Figura 22, apresenta-se topologia pós-falta e a topologia do estado restaurativo.

Tabela 18 – Sistema de 136 barras na Condição 1 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.

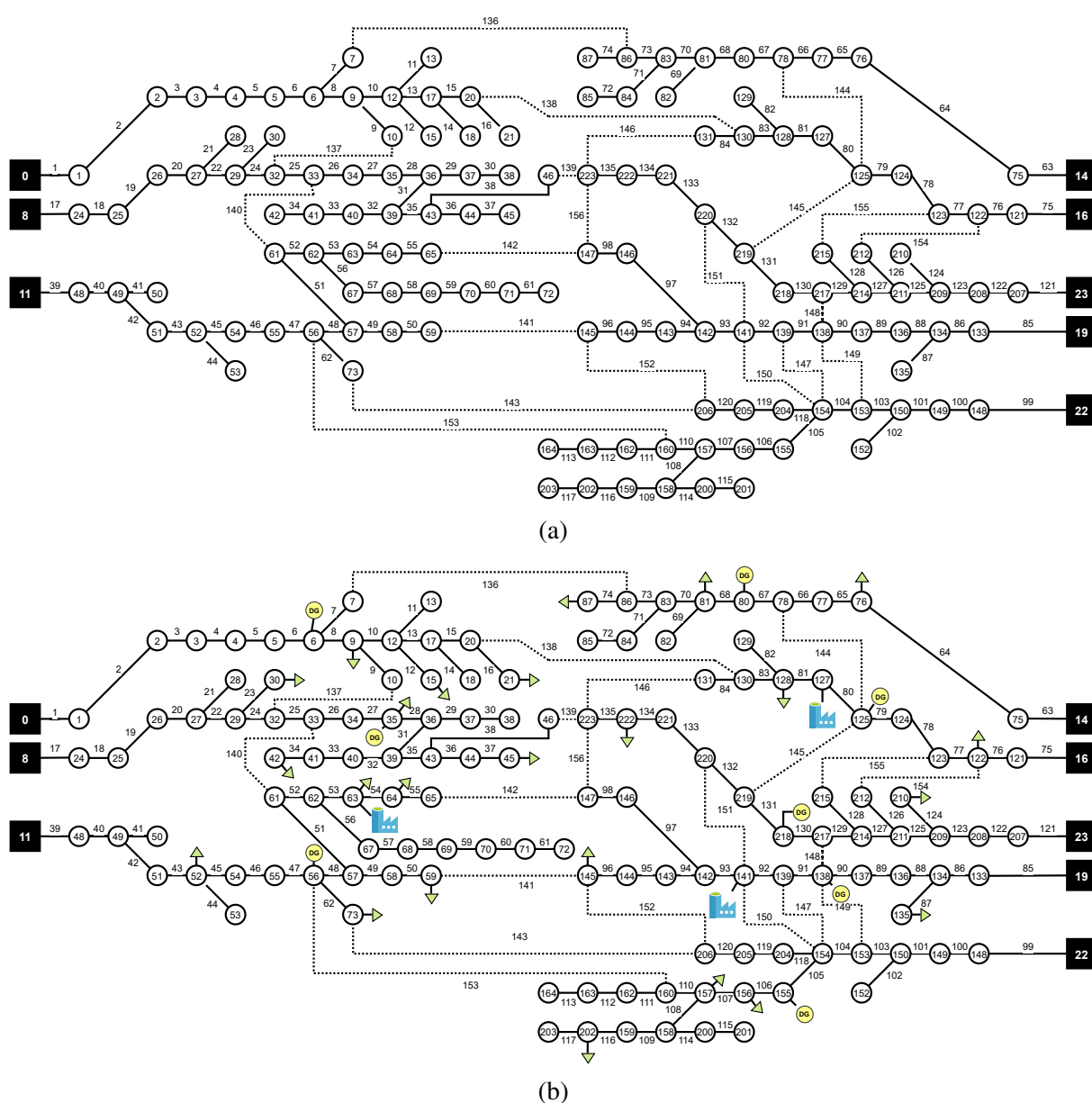
Topologia	CT_{NFE} [\$]	CT_{SWO} [\$]	CT_{DG} [\$]	CT_L [\$]	CP_{VO}	f [\$]
Pós-Falta	1119,32	140,00	0,00	6,15	0,00	1265,48
Melhor	37,52	345,00	0,00	16,45	0,00	398,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

A melhor topologia encontrada para esse cenário pode ser obtida por meio de cinco operações de chaveamentos a partir da topologia pós-falta. Na Tabela 19 são apresentadas as operações que compõem a sequência de chaveamentos, determinada pela heurística do segundo estágio de solução. Após a execução dessas operações, o percentual de cargas desenergizadas é reduzido de 32,7% a 0,93%. Dentre as seções que estão desenergizadas, apresentadas na topologia da Figura 22b, apenas a seção 202 possui cargas.

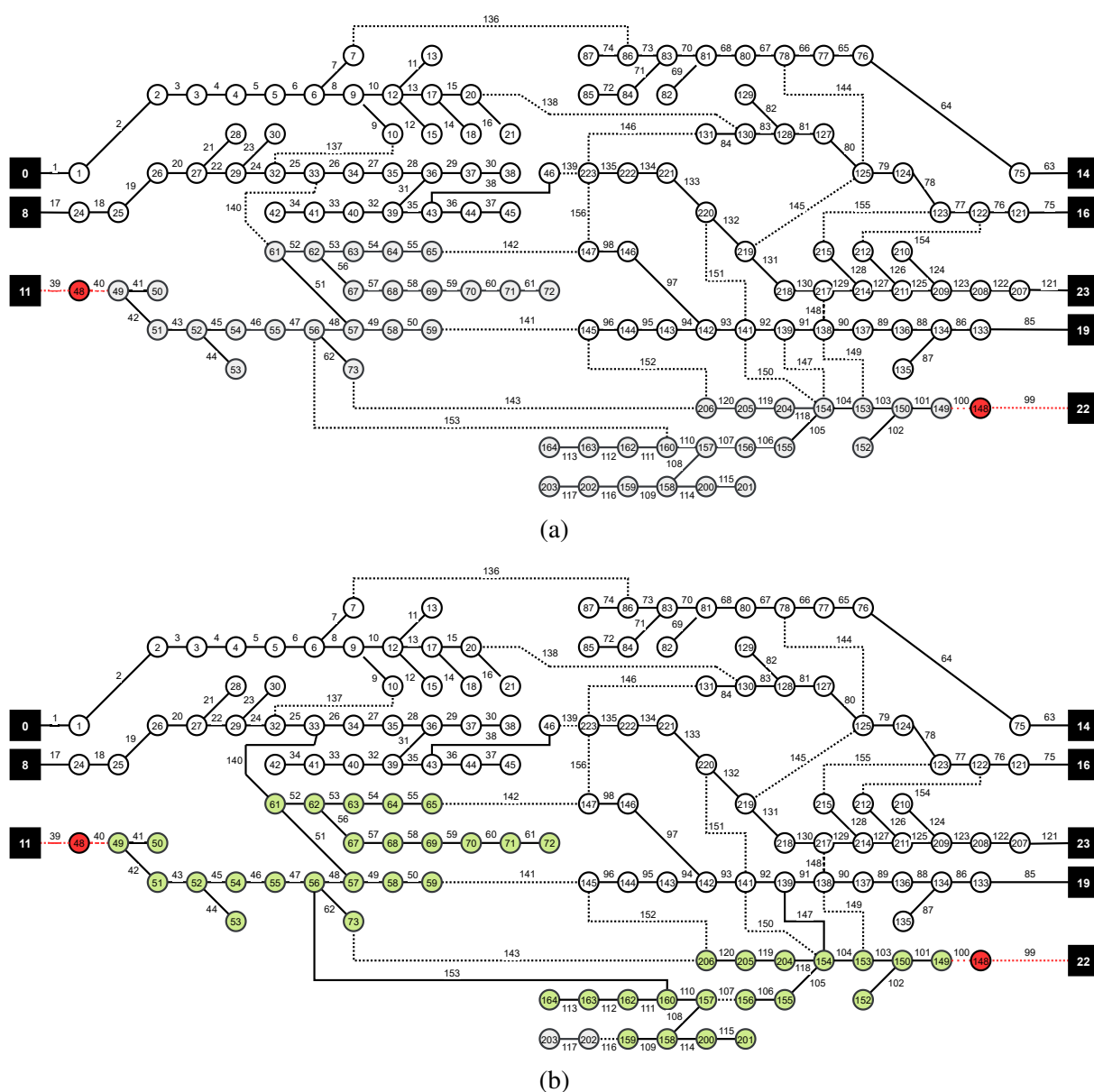
Na Tabela 20 são apresentadas as métricas de desempenho das estratégias baseadas nos algoritmos VNS implementados. Dentre as metodologias utilizadas, a abordagem utilizando o algoritmo RVNS possui o menor tempo de processamento, porém o maior valor médio da função objetivo. O algoritmo VND, por sua vez, fornece a melhor solução encontrada com o tempo de processamento de 46 segundos.

Figura 21 – Sistema de 136 barras – (a) Condição 1 e (b) Condição 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Sistema de 136 barras na Condição 1 – (a) Topologia pós-falta e a (b) melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 – Sistema de 136 barras na Condição 1 – Sequência de operações na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.

Ordem	Elemento associado	Tipo de operação	Ordem	Elemento associado	Tipo de operação
#1	Chave - 140	Fechamento	#4	Chave - 116	Abertura
#2	Chave - 107	Abertura	#5	Chave - 153	Fechamento
#3	Chave - 147	Fechamento			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Sistema de 136 barras na Condição 1 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.

Algoritmo	t_{min} [s]	t_{max} [s]	t_{avg} [s]	f_{min} [\$]	f_{max} [\$]	f_{avg} [\$]
VNS						
BVNS	14,0	78,0	43,8	439,34	969,97	724,05
RVNS	<0,01	1,0	0,4	811,66	1265,48	1013,92
VND	**	46,0	**	**	398,98	**
GVNS	306,0	493,0	348,0	398,98	439,54	408,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.2 Condição 2

Na Tabela 21 são apresentados os valores que compõem o valor da função objetivo das topologias avaliadas no cenário de faltas simultâneas nas seções 48 e 148 para a Condição 2 de operação. Na topologia proposta para operação no estado restaurativo, reduz-se o custo total da operação de 1265,48 para 261,71. Com a topologia fornecida como solução, restaura-se todas as cargas que foram afetadas pela ocorrência de falta. Ao comparar com a Condição 1 de operação, nota-se que foi possível restaurar mais cargas na Condição 2.

Tabela 21 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.

Topologia	CT_{NFE} [\$]	CT_{SWO} [\$]	CT_{DG} [\$]	CT_L [\$]	CP_{VO}	f [\$]
Pós-Falta	1099,32	140,00	14,00	5,75	0,00	1265,48
Melhor	0,00	230,00	16,5	15,21	0,00	261,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 22 são apresentadas as operações que compõem a sequência de chaveamento para obter a melhor topologia encontrada. A sequência é composta por duas operações, em que transfere as cargas desenergizadas para alimentadores adjacentes energizados. A presença de geradores distribuídos despacháveis possibilita a melhoria das condições de carregamento nos alimentadores, viabilizando a restauração de mais cargas, conforme observado nesse cenário.

Em relação a qualidade das soluções fornecidas, verifica-se que as estratégias utilizando os algoritmos GVNS e VND possuem um melhor desempenho, apresentando a melhor solução

Tabela 22 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Sequência de operações na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.

Ordem	Elemento associado	Tipo de operação
#1	Chave - 147	Fechamento
#2	Chave - 140	Fechamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

em todos os testes. A abordagem utilizando o algoritmo BVNS apresenta um comportamento intermediário em relação a qualidade das soluções fornecidas e o tempo de processamento. Assim como em cenários anteriores, verifica-se que a estratégia baseada no algoritmo RVNS fornece soluções factíveis com o menor tempo de processamento médio, porém possui o maior médio para a função objetivo.

Tabela 23 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.

Algoritmo VNS	t_{min} [s]	t_{max} [s]	t_{avg} [s]	f_{min} [\$]	f_{max} [\$]	f_{avg} [\$]
BVNS	64,0	140,0	99,8	299,42	504,43	401,60
RVNS	36,0	53,0	46,0	432,48	872,18	595,80
VND	**	72,0	**	**	261,71	**
GVNS	322,0	368,0	341,0	261,71	261,71	261,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Falta crítica

No cenário de falta crítica, considera-se que todo o sistema fica desenergizado. Isto equivale, por exemplo, a ocorrência de faltas simultâneas nas seções conectadas à subestação, ou ainda devido à perturbações na jusante da subestação de distribuição. Neste cenário, considera-se que as chaves de manobra 1, 17, 39, 63, 75, 85, 99 e 121 foram abertas na etapa de isolamento.

4.2.2.1 Condição 2

Na topologia pós-falta, o valor da função objetivo é 4017,07. Na melhor topologia encontrada, o valor da função objetivo é reduzido à 1964,78. Na solução fornecida, todas as cargas são energizadas. Na Tabela 24, apresenta-se a composição de valores da função objetivo das duas topologias avaliadas.

Na Tabela 25 são apresentadas todas as operações que compõem a sequência de operações de formação das microrrede dinâmicas. A melhor topologia é composta por três microrredes, operando de maneira independente. Na heurística do segundo estágio, definiu-se o percentual de máxima carga restaurada em 22% e o erro percentual máximo na previsão de carga em 5%,

Tabela 24 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Topologia pós-falta e a melhor topologia encontrada na ocorrência de falta crítica.

Topologia	CT_{NFE} [\$]	CT_{SWO} [\$]	CT_{DG} [\$]	CT_L [\$]	CP_{VO}	f [\$]
Pós-Falta	3737,07	280,00	0,00	0,00	0,00	4017,07
Melhor	0,00	505,00	1456,95	2,82	0,00	1964,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

relaxando, portanto, os valores padrões estabelecidos. Desse modo, nota-se, no gráfico da Figura 23, que a variação da carga restaurada, em algumas execuções, é alta.

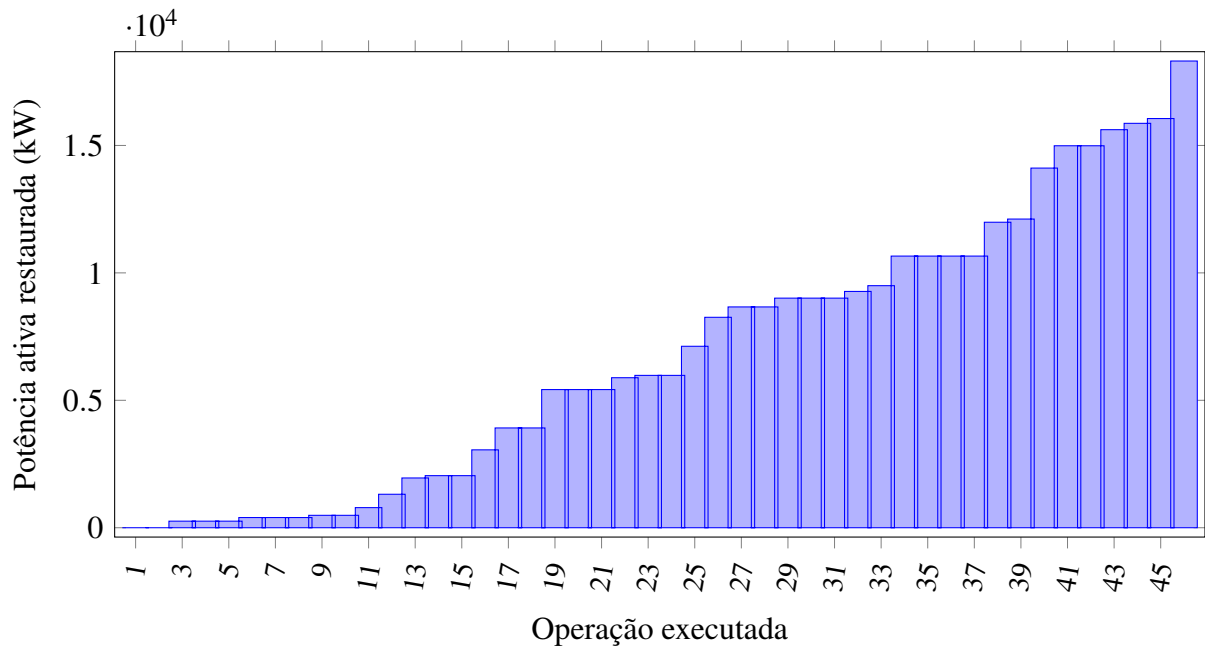
Tabela 25 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Sequência de operações na ocorrência de faltas simultâneas nas seções 48 e 148.

Ordem	Elemento associado	Tipo de operação	Ordem	Elemento associado	Tipo de operação
#1	Chave - 53	Abertura	#24	Chave - 74	Abertura
#2	Chave - 54	Abertura	#25	Chave - 144	Fechamento
#3	Seção - 63	Autorrestabelecimento	#26	Chave - 87	Fechamento
#4	Chave - 81	Abertura	#27	Chave - 74	Fechamento
#5	Chave - 80	Abertura	#28	Chave - 48	Abertura
#6	Seção - 127	Autorrestabelecimento	#29	Chave - 51	Fechamento
#7	Chave - 93	Abertura	#30	Chave - 62	Abertura
#8	Chave - 92	Abertura	#31	Chave - 47	Abertura
#9	Seção - 141	Autorrestabelecimento	#32	Chave - 48	Fechamento
#10	Chave - 105	Abertura	#33	Chave - 62	Fechamento
#11	Chave - 150	Fechamento	#34	Chave - 106	Fechamento
#12	Chave - 93	Fechamento	#35	Chave - 8	Abertura
#13	Chave - 80	Fechamento	#36	Chave - 9	Abertura
#14	Chave - 54	Fechamento	#37	Chave - 12	Abertura
#15	Chave - 87	Abertura	#38	Chave - 138	Fechamento
#16	Chave - 92	Fechamento	#39	Chave - 9	Fechamento
#17	Chave - 81	Fechamento	#40	Chave - 151	Fechamento
#18	Chave - 106	Abertura	#41	Chave - 8	Fechamento
#19	Chave - 105	Fechamento	#42	Chave - 45	Abertura
#20	Chave - 60	Abertura	#43	Chave - 47	Fechamento
#21	Chave - 51	Abertura	#44	Chave - 12	Fechamento
#22	Chave - 53	Fechamento	#45	Chave - 45	Fechamento
#23	Chave - 60	Fechamento	#46	Chave - 139	Fechamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre as estratégias de solução, a única que foi capaz de fornecer a melhor solução foi a abordagem utilizando o algoritmo VND. As abordagens utilizando os algoritmos BVNS e GVNS possuem um desempenho parecido em relação a qualidade de solução. Em relação ao tempo de processamento, assim como observado em outros cenários, o algoritmo RVNS apresentou o melhor tempo médio de processamento. Na Tabela 26 são apresentadas as métricas

Figura 23 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Potência ativa restaurada em função da operação executada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

de desempenho das estratégias de solução implementadas.

Tabela 26 – Sistema de 136 barras na Condição 2 – Desempenho das estratégias de solução no cenário de falta crítica.

Algoritmo	t_{min} [s]	t_{max} [s]	t_{avg} [s]	f_{min} [\$]	f_{max} [\$]	f_{avg} [\$]
VNS						
BVNS	185,0	241,0	216,6	2009,62	2134,77	2051,25
RVNS	53,0	115,0	90,6	2129,93	2515,46	2250,43
VND	**	297,0	**	**	1964,78	**
GVNS	365,0	449,0	403,8	2007,44	2052,21	2026,18

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 Conclusões

O modelo matemático que descreve o sistema de distribuição é capaz de representar adequadamente, em regime permanente, os componentes básicos da rede, os geradores distribuídos, as condições do programa emergencial de resposta da demanda e os elementos de armazenamento de energia. Nos cenários simulados, foi possível constatar que a presença de recursos energéticos distribuídos e a possibilidade de formação dinâmica de microrredes aumenta a capacidade de recuperação de cargas em situações de múltiplas faltas e perda da subestação.

A estratégia de solução do primeiro estágio, que é baseada em meta-heurísticas do tipo VNS e otimização clássica, foi capaz de fornecer topologias de boa qualidade para os cenários avaliados. A utilização da otimização clássica, garante a otimalidade das ações de controle dos equipamentos, fornecidas na solução. Naturalmente, a avaliação das topologias exige alta capacidade de processamento. No entanto, a utilização dos mecanismos reaproveitamento das soluções anteriores e adaptação do método de solução do fluxo de potência, reduziu, consideravelmente, o esforço computacional nas avaliações. O algoritmo de busca local, contribui na redução do número de avaliações realizadas, já que, ao modificar o modelo de FPO, é possível determinar um ótimo local junto com o processo de avaliação.

Nos cenários avaliados, a estratégia de segundo estágio foi capaz de fornecer sequências de operações factíveis em todos os casos. Nos cenários em que ocorre a formação de microrredes, a quantidade de operações de chaveamentos é considerável, quando comparada com os cenários em que não há microrredes. A maior quantidade de operações é devida a atuação do mecanismo de fragmentação dos grupos de operações, que limita a quantidade de cargas restauradas com o objetivo de garantir a estabilidade da microrrede. Em todos os cenários, a heurística adaptada fornece soluções em intervalos de tempo muito inferiores à estratégia do primeiro estágio.

Dentre os diferentes tipos de algoritmos de meta-heurística VNS que foram avaliados, verifica-se que o algoritmo RVNS é capaz de fornecer soluções em todos os cenários avaliados e em tempo adequado de operação. Essa característica é devido a ausência de etapas de intensificação, que demanda alto esforço computacional na estratégia do primeiro estágio. Porém, a ausência de intensificação reduz a qualidade das soluções fornecidas pelo algoritmo RVNS, o que pode ser verificado por meio do valor médio da função objetivo de cada cenário. Assim, o algoritmo RVNS pode ser utilizado como uma solução inicial para outras metodologias, já que possibilita obter uma solução de qualidade razoável em um curto espaço de tempo.

O algoritmo VND, utilizando apenas uma vizinhança, foi capaz de fornecer soluções de boa qualidade em um intervalo de tempo adequado para as ações de operação da rede. Em cenários com muitas variáveis, a utilização de duas ou mais vizinhanças não forneceu uma solução em tempo adequado para operação.

Os algoritmos BVNS e GVNS são capazes de fornecer soluções de boa qualidade, porém, em alguns, cenários possuem tempos de processamento elevados quando comparados com o algoritmo RVNS. Em grande parte dos cenários avaliados, o algoritmo GVNS apresenta o menor valor médio para a função objetivo, quando comparado com os demais algoritmos estocásticos, indicando que possui maior capacidade de fornecer soluções de boa qualidade. Essa característica é devido a utilização do algoritmo VND na fase de intensificação, que, em contrapartida, demanda maior esforço computacional na execução do algoritmo GVNS. Em relação ao tempo de processamento e qualidade das soluções, o algoritmo BVNS apresentou um comportamento intermediário.

Com base nos resultados obtidos, afirma-se que os objetivos estabelecidos para este trabalho foram alcançados. A metodologia desenvolvida é capaz de fornecer um plano de restauração factível, em tempo de operação, para redes inteligentes de pequeno e médio porte sob condições de faltas severas e múltiplas. O plano de ações de restauração é composto pela topologia de operação no estado restaurativo, pelas decisões de controle dos equipamentos da rede e pela sequência de operações que conduz a rede da topologia pós-falta à topologia de operação no estado restaurativo.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- **Formação de microrredes e modelagem da frequência** – Na heurística que gera a sequência das operações de formação da microrrede, utiliza-se parâmetros empíricos para controlar a quantidade de carga restaurada com o objetivo de garantir a estabilidade de frequência da microrrede em formação. O desenvolvimento de modelos dinâmicos e linearizados do comportamento da frequência da microrrede, possibilitaria avaliar com maior precisão a segurança das operações que compõem a sequência de formação das microrredes.
- **Tempo de processamento e qualidade das soluções** – A metodologia de solução pode ser aprimorada com o intuito de fornecer soluções de melhor qualidade e demandar menor esforço computacional. Com esse intuito é possível investigar e desenvolver novas estruturas de vizinhança, que sejam mais eficientes e adequadas para o problema de restauração.
- **Estratégia de solução integrada** – A estratégia de solução de dois estágios apresentada neste trabalho, pode ser aprimorada para uma estratégia de solução integrada, em que a topologia do estado restaurativo e a sequência de operações é solucionada no mesmo estágio. A vantagem da solução integrada é a possibilidade de tratar, com maior precisão, os efeitos do tempo de execução das operações, o que é relevante em cenários que considera-

se a presença de chaves de manobras de operação manual ou a falha do sistema de comunicação e controle das chaves automáticas.

Referências

- ABU-ELANIEN, A. E.; SALAMA, M.; SHABAN, K. B. Modern network reconfiguration techniques for service restoration in distribution systems: A step to a smarter grid. *Alexandria Engineering Journal*, Alexandria, v. 57, n. 4, p. 3959–3967, dez. 2018.
- ADIBI, M.; CLELLAND, P.; FINK, L.; HAPP, H.; KAFKA, R.; RAINE, J.; SCHEURER, D.; TREFFNY, F. Power system restoration-a task force report. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 2, n. 2, p. 271–277, 1987.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica - PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica*. 2018. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_12/342ff02a-8eab-2480-a135-e31ed2d7db47. Acesso em: 10 fev. 2021.
- AGÜERO, J. R. Applying self-healing schemes to modern power distribution systems. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2012, San Diego. *Proceedings...* San Diego: IEEE, 2012. p. 1–4.
- AKOREDE, M. F.; HIZAM, H.; POURESMAEIL, E. Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 2, p. 724–734, 2010.
- AWAD, A. S. A.; EL-FOULY, T. H. M.; SALAMA, M. M. A. Optimal ess allocation and load shedding for improving distribution system reliability. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 5, n. 5, p. 2339–2349, 2014.
- CARVALHO, P.; FERREIRA, L.; BARRUNCHO, L. Optimization approach to dynamic restoration of distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 29, n. 3, p. 222–229, 2007.
- CAVALCANTE, P. L.; LÓPEZ, J. C.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; GARCIA, A. V.; MALVEIRA, M. R.; MARTINS, L. L.; DIREITO, L. C. M. Centralized self-healing scheme for electrical distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 7, n. 1, p. 145–155, 2015.
- CHE, L.; KHODAYAR, M.; SHAHIDEHPOUR, M. Only connect: Microgrids for distribution system restoration. *IEEE Power and Energy Magazine*, Piscataway, v. 12, n. 1, p. 70–81, 2013.
- CHEN, B.; CHEN, C.; WANG, J.; BUTLER-PURRY, K. L. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 9, n. 6, p. 6793–6805, 2017.
- CHOW, M.-Y.; TAYLOR, L. S.; CHOW, M.-S. Time of outage restoration analysis in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 11, n. 3, p. 1652–1658, 1996.
- CHOWDHURY, A.; KOVAL, D. *Power distribution system reliability: practical methods and applications*. New York: John Wiley & Sons, 2011. v. 48.
- CIRIC, R. M.; POPOVIC, D. S. Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Piscataway, v. 22, n. 7, p. 497–505, 2000.

- CPLEX, I. I. C. O. S. *CPLEX user's manual, Version 12 Release 8*. IBM Corp. 2017.
- CURČIĆ, S.; ÖZVEREN, C.; CROWE, L.; LO, P. Electric power distribution network restoration: a survey of papers and a review of the restoration problem. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 35, n. 2, p. 73–86, nov. 1995.
- DELBEM, A. C.; CARVALHO, A. de; POLICASTRO, C. A.; PINTO, A. K.; HONDA, K.; GARCIA, A. C. Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design. In: GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE, 2004, Berlin. *Proceedings...* Berlin: Springer, 2004. p. 678–687.
- DRIESEN, J.; KATIRAEI, F. Design for distributed energy resources. *IEEE Power and Energy Magazine*, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 30–40, 2008.
- ELKADEEM, M.; ALAAM, M.; AZMY, A. M. Improving performance of underground mv distribution networks using distribution automation system: a case study. *Ain Shams Engineering Journal*, Cairo, v. 9, n. 4, p. 469–481, 2018.
- EVEN, S. *Graph algorithms*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; LAVORATO, M.; ROMERO, R. Optimal conductor size selection and reconductoring in radial distribution systems using a mixed-integer lp approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 28, n. 1, p. 10–20, Feb 2013.
- FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. A mixed-integer quadratically-constrained programming model for the distribution system expansion planning. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, Piscataway, v. 62, p. 265 – 272, 2014.
- GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 7, n. 3, p. 1484–1491, Jul 1992.
- HANSEN, P.; MLADENOVIĆ, N.; PÉREZ, J. A. M. Variable neighbourhood search: methods and applications. *Annals of Operations Research*, New York, v. 175, n. 1, p. 367–407, 2010.
- HANSEN, P.; MLADENOVIĆ, N.; TODOSIJEVIĆ, R.; HANAFI, S. Variable neighborhood search: basics and variants. *EURO Journal on Computational Optimization*, Amsterdam, v. 5, n. 3, p. 423–454, 2017.
- HSIAO, Y.-T.; CHIEN, C.-Y. Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-ga method. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 15, n. 4, p. 1394–1400, 2000.
- HSU, Y.-Y.; HUANG, H.-M.; KUO, H.-C.; PENG, S.; CHANG, C.; CHANG, K.; YU, H.; CHOW, C.; KUO, R. Distribution system service restoration using a heuristic search approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 7, n. 2, p. 734–740, 1992.
- HUANG, C.-M. Multiobjective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 18, n. 2, p. 867–874, 2003.
- JABR, R. A. Radial distribution load flow using conic programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 21, n. 3, p. 1458–1459, 2006.

- KERSTING, W. H. *Distribution system modeling and analysis*. New York: CRC press, 2017.
- KLEINBERG, M. R.; MIU, K.; CHIANG, H.-D. Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 26, n. 3, p. 1110–1117, 2010.
- KROPOSKI, B.; LASSETER, R.; ISE, T.; MOROZUMI, S.; PAPATHANASSIOU, S.; HATZIARGYRIOU, N. Making microgrids work. *IEEE Power and Energy Magazine*, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 40–53, 2008.
- KUMAR, Y.; DAS, B.; SHARMA, J. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers. *IEEE Transactions on Power delivery*, Piscataway, v. 23, n. 1, p. 261–270, 2007.
- LI, J.; MA, X.-Y.; LIU, C.-C.; SCHNEIDER, K. P. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 29, n. 6, p. 3021–3029, 2014.
- LI, Z.; JAZEBI, S.; LEON, F. de. Determination of the Optimal Switching Frequency for Distribution System Reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 32, n. 4, p. 2060–2069, ago. 2017.
- LOPES, J. P.; MOREIRA, C.; MADUREIRA, A. Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 21, n. 2, p. 916–924, 2006.
- LOPES, J. P.; MOREIRA, C.; MADUREIRA, A.; RESENDE, F.; WU, X.; JAYAWARNA, N.; ZHANG, Y.; JENKINS, N.; KANELLOS, F.; HATZIARGYRIOU, N. Control strategies for microgrids emergency operation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE POWER SYSTEMS, 2005, Amsterdam. *Proceedings...* Amsterdam: IEEE, 2005. p. 6.
- MACEDO, L. H.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Optimal Operation of Distribution Networks Considering Energy Storage Devices. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 6, n. 6, p. 2825–2836, nov. 2015.
- MANTOVANI, J. R.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *Revista Controle e Automação*, Campinas, v. 11, n. 3, p. 150–159, 2000.
- MATHIAS-NETO, W. P. *Proposta de um algoritmo eficiente baseado em busca tabu e representação nó-profundidade para a restauração de redes de distribuição de energia elétrica*. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/144326>>. Acesso em: 17 maio 2021.
- MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, Oxford, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997.
- MORELATO, A.; MONTICELLI, A. Heuristic search approach to distribution system restoration. *IEEE Power Engineering Review*, Piscataway, v. 9, n. 10, p. 65–66, 1989.
- MOSLEHI, K.; KUMAR, R. A reliability perspective of the smart grid. *IEEE transactions on smart grid*, IEEE, v. 1, n. 1, p. 57–64, 2010.

- NAGATA, T.; SASAKI, H.; YOKOYAMA, R. Power system restoration by joint usage of expert system and mathematical programming approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 10, n. 3, p. 1473–1479, 1995.
- NASSAR, M. E.; SALAMA, M. M. Adaptive self-adequate microgrids using dynamic boundaries. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 7, n. 1, p. 105–113, 2015.
- PERALTA, R. V. A. *Restauração automática de sistemas de distribuição de energia elétrica*. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/182255>>. Acesso em: 17 maio 2021.
- PROCOPIOU, A. T.; PETROU, K.; OCHOA, L. F.; LANGSTAFF, T.; THEUNISSEN, J. Adaptive decentralized control of residential storage in pv-rich mv–lv networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 34, n. 3, p. 2378–2389, 2018.
- RIVERA, R.; ESPOSITO, A. S.; TEIXEIRA, I. *Redes elétricas inteligentes (smart grid): Oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local*. Brasília: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2013. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2927>>. Acesso em: 17 maio 2021.
- ROMERO, R.; FRANCO, J. F.; LEÃO, F. B.; RIDER, M. J.; SOUZA, E. S. D. A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 31, n. 2, p. 1259–1268, 2015.
- SANTO, K. G. D.; KANASHIRO, E.; SANTO, S. G. D.; SAIDEL, M. A. A review on smart grids and experiences in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 52, p. 1072–1082, 2015.
- SANTOS, A. C.; DELBEM, A. C. B.; LONDON, J. B. A.; BRETAS, N. G. Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 25, n. 3, p. 1254–1265, 2010.
- SEGUIN, R.; WOYAK, J.; COSTYK, D.; HAMBRICK, J.; MATHER, B. *High-penetration PV integration handbook for distribution engineers*. Golden: National Renewable Energy Laboratory – NREL, 2016. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/63114.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2021.
- SHEN, F.; WU, Q.; HUANG, S.; LÓPEZ, J. C.; LI, C.; ZHOU, B. Review of service restoration methods in distribution networks. In: IEEE PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES CONFERENCE EUROPE – ISGT EUROPE, 2018, Sarajevo. *Proceedings...* Sarajevo: IEEE, 2018. p. 1–6.
- SHIN, D.-J.; KIM, J.-O.; KIM, T.-K.; CHOO, J.-B.; SINGH, C. Optimal service restoration and reconfiguration of network using genetic-tabu algorithm. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 71, n. 2, p. 145–152, 2004.
- SHIRMOHAMMADI, D. Service restoration in distribution networks via network reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 7, n. 2, p. 952–958, 1992.
- SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988.

- SIANO, P. Demand response and smart grids — a survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 30, p. 461–478, 2014.
- SMITH, J.; SUNDERMAN, W.; DUGAN, R.; SEAL, B. Smart inverter volt/var control functions for high penetration of pv on distribution systems. In: IEEE/PES POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2011, Phoenix. *Proceedings...* Phoenix: IEEE, 2011. p. 1–6.
- TENG, J.-H.; LU, C.-N. Feeder-switch relocation for customer interruption cost minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 17, n. 1, p. 254–259, 2002.
- TOUNE, S.; FUDO, H.; GENJI, T.; FUKUYAMA, Y.; NAKANISHI, Y. Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 17, n. 1, p. 173–181, 2002.
- WANG, Y.; CHEN, C.; WANG, J.; BALDICK, R. Research on resilience of power systems under natural disasters—a review. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 31, n. 2, p. 1604–1613, 2015.
- WANG, Z.; WANG, J. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 30, n. 6, p. 3139–3149, 2015.
- YAN, Y.; QIAN, Y.; SHARIF, H.; TIPPER, D. A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 5–20, 2013.
- ZIDAN, A.; KHAIRALLA, M.; ABDRABOU, A. M.; KHALIFA, T.; SHABAN, K.; ABDRABOU, A.; SHATSHAT, R. E.; GAUDA, A. M. Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: State-of-the-art and future trends. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 8, n. 5, p. 2170–2185, 2016.