UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira - SP

GABRIEL FIGUEIREDO PUERTA

RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO ALGORITMOS DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL

Ilha Solteira - SP
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira - SP

GABRIEL FIGUEIREDO PUERTA

RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO ALGORITMOS DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de Concentração: Automação

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro
Orientador
Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
Coorientador

Ilha Solteira - SP
2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P977r

Puerta, Gabriel Figueiredo.
Restauração de redes de distribuição utilizando algoritmos de busca em vizinhança variável / Gabriel Figueiredo Puerta. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
125 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2022

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro
Co-orientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
Inclui bibliografia

1. Busca em vizinhança variável. 2. Metaheuristica. 3. Matheuristica. 4. Modelagem matemática. 5. Programação linear inteira-mista. 6. Restauração de sistemas de distribuição.

Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Restauração de redes de distribuição utilizando algoritmos de busca em vizinhança variável

AUTOR: GABRIEL FIGUEIREDO PUERTA
ORIENTADOR: RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
COORIENTADOR: LEONARDO HENRIQUE FARIA MACEDO POSSAGNOLO

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

Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO (Participaçao Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / UNESP/Câmpus de Ilha Solteira

Dr. JONATAS BOAS LEITE (Participaçao Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JOHN FREDY FRANCO BAQUERO (Participaçao Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Campus Experimental de Rosana - UNESP

Prof. Dr. JOÃO ANDRÉ PINTO SOARES (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Electrotécnica / Instituto Superior de Engenharia do Porto - Portugal

Prof. Dr. EDUARDO NOBUHIRO ASADA (Participaçao Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Ilha Solteira, 08 de setembro de 2022

À minha família, em especial à minha avó Lindaura, aos meus pais Rubéns e Valquíria, à minha irmã Daniely, e aos meus amigos, por todo amor, apoio, incentivo e companhia em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, por todo o amor e suporte incondicional que me foi oferecido. Agradeço aos meus pais, pelo suporte e por me apoiarem em todas as decisões. Agradeço a minha irmã, por sempre estar me incentivando a ir além. Agradeço também a minha família escolhida: Carol, Douglas, Juliana, Tainá e Thainara. Por estarem presentes em todos os momentos da minha vida e por me amarem exatamente como sou. Meu muito obrigado por acreditarem em mim principalmente nas horas em que eu não acreditava em mais nada. Em destaque, gostaria de agradecer à minha amiga irmã Tainá, por todos os momentos que compartilhamos juntos, pela companhia diária e por todos os puxões de orelha.

Agradecimentos especiais ao professor e orientador Rubén Romero Lazaro, por ter me encaminhado e me guiado por todo esse percurso acadêmico. Agradeço também ao Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo, primeiramente por ter aceitado o convite de coorientação e posteriormente por ter me guiado e auxiliado durante esse doutorado.

Agradeço a todos da equipe LAPSEE, pelo convívio diário no laboratório, por todo o apoio com material e auxílio com as disciplinas e por todas as trocas de cultura efetuadas. Em especial gostaria de agradecer aos amigos Bruna, Cindy, Cleberton, Christoffer, Dayara, Enielma, Hugo, Norberto, e Tayenne, pelos vários cafés coados no filtro da nossa amizade, por todas as companhias durante o horário de almoço e por todos os churrascos realizados.

Agradecimentos especiais à Dayara, Enielma, Norberto e Tainá, por terem sido minha principal rede de apoio nesses dois últimos anos de doutorado.

Agradeço também aos amigos que sempre me apoiaram mesmo de longe, muito obrigado Heitor, Horácio e Márian. O apoio e incentivo contínuo de vocês me fez seguir em frente mesmo nas horas mais difíceis.

Agradeço aos funcionários da UNESP, por todos os serviços prestados.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior- Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro- Código de Financiamento 001, e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte através do Projeto Temático n. 2015/21972-6.

A simple plot

But I know one day

Good things are coming our way

Coldplay

RESUMO

Neste trabalho são apresentadas três métodos especializados na resolução do problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica (PRSDEE). O principal objetivo do problema é a elaboração de uma estratégia que consiga restaurar o maior montante possível de carga que foi afetada pela falta ao mesmo tempo que altere minimamente a topologia do sistema de distribuição. A primeira metodologia proposta no trabalho é um modelo de programação linear inteira-mista (PLIM). A segunda metodologia é um algoritmo baseado na meta-heurística de busca em vizinhança variável (VNS), que possui a vantagem de resolver o problema de restauração como se fosse um problema de reconfiguração. A terceira metodologia proposta é um algoritmo matheurístico híbrido com base no modelo de PLIM e que conta com uma busca em vizinhança variável similar à da meta-heurística VNS. Na literatura do problema de restauração não é possível encontrar abordagens com algoritmos matheurísticos. Os resultados são divididos em três casos de estudos. O primeiro é composto pela simulação de faltas únicas em um sistema de distribuição radial de 53 barras. No segundo caso de estudo são simuladas faltas únicas em um sistema de distribuição de 417 barras. O terceiro caso de estudo incorpora dois testes específicos: faltas múltiplas e contingências em sistemas com presença de geração distribuída. As três metodologias são comparadas com um modelo de programação cônica de segunda ordem inteira-mista (PCSOIM) já conhecido na literatura e os resultados obtidos qualificam a robustez e eficácia dos algoritmos propostos, principalmente o algoritmo matheurístico.

Palavras-chave: Busca em vizinhança variável. Metaheuristica. Matheurística. Modelagem matemática. Programação linear inteira-mista. Restauração de sistemas de distribuição.

ABSTRACT

This work proposes three specialized methodologies for the resolution of the power system distribution restoration problem. The main goal of the problem is to elaborate a strategy that can restore the maximum possible load amount that was affected by the fault and, at the same time, to minimally change the distribution system's topology. The first methodology proposed is a mixed-integer linear programming model. The second methodology is an algorithm based on the variable neighborhood search metaheuristic that has the advantage of solving the restoration problem as a reconfiguration problem. The third methodology is a hybrid matheuristic algorithm based on the mixed-integer linear programming model with a variable neighborhood search, similar to the VNS metaheuristic. The numerical results are divided into three different study cases. The first is composed of the simulation of single faults in a 53-bus distribution system. In the second study case, single faults are simulated in a 417-bus distribution system. The third study case incorporates two specific tests: multiple faults and faults in distribution systems with the presence of distributed generation. The three methodologies are compared with a known mixed-integer second-order cone programming model and the obtained results qualify the robustness and efficiency of the proposed algorithms, mainly the matheuristic algorithm.

Keywords: Mathematical modeling. Matheuristic. Mixed-integer linear programming. Metaheuristic. Power distribution systems. Service restoration. Variable neighborhood search.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estrutura básica de um sistema de distribuição 11
Figura 2 Linearização da tensão 33
Figura 3 Linearização do limite de corrente nas linhas 34
Figura 4 Representação de uma topologia para a formulação de radialidade . . . 38
Figura 5 Representação de uma topologia com laço para a formulação de radialidade 39
Figura 6 Estrutura básica do algoritmo VND 46
Figura 7 Estrutura básica do algoritmo RVNS 48
Figura 8 Estrutura básica do algoritmo BVNS 49
Figura 9 Estrutura básica do algoritmo GVNS 50
Figura 10 Sistema de distribuição de 7 barras 53
Figura 11 Representação da proposta de solução inicial para um sistema de 7 barras 53
Figura 12 Vizinhança de nível um para a solução inicial 54
Figura 13 Vizinhança de nível dois para a solução inicial 55
Figura 14 Transformação de um problema de restauração em um problema de reconfiguração 56
Figura 15 Fluxograma do algoritmo VND proposto 58
Figura 16 Fluxograma do algoritmo matheurístico especializado em PRSDEE . . 65
Figura 17 Topologia inicial do sistema de 53 barras 67
Figura 19 Plano de restauração para falta na barra 14 73
Figura 20 Plano de restauração para falta na barra 3 74
Figura 21 Plano de restauração para falta na barra 11 75
Figura 22 Topologia inicial do sistema de 417 barras 79
Figura 23 Topologia inicial do sistema do sistema de 417 barras com GD 91
Figura 18 Plano de restauração para falta na barra 3 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resumo do levantamento bibliográfico para o problema de restauração . 24
Tabela 2 Informações dos cenários de falta permanente simulados no sistema de 53 barras 68
Tabela 3 Resultados obtidos para falta na barra 1 70
Tabela 4 Resultados obtidos para falta na barra 3 71
Tabela 5 Resultados obtidos para falta na barra 11 72
Tabela 6 Resultados obtidos para falta na barra 14 72
Tabela 7 Resultados obtidos para falta na barra 21 76
Tabela 8 Resultados obtidos para falta na barra 30 77
Tabela 9 Informações dos cenários de falta permanente simulados no sistema de 417 barras 78
Tabela 10 Resultados obtidos para falta na barra 91 80
Tabela 11 Resultados obtidos para falta na barra 119 81
Tabela 12 Resultados obtidos para falta na barra 189 82
Tabela 13 Resultados obtidos para falta na barra 210 83
Tabela 14 Resultados obtidos para falta na barra 214 83
Tabela 15 Resultados obtidos para falta na barra 222 84
Tabela 16 Resultados obtidos para falta na barra 345 84
Tabela 17 Informações dos cenários de faltas múltiplas simulados no sistema de 53 barras 85
Tabela 18 Resultados obtidos para falta múltipla nas barras 1 e 3 85
Tabela 19 Resultados obtidos para falta múltipla nas barras 3 e 11 86
Tabela 20 Resultados obtidos para falta múltipla nas barras 11 e 14 87
Tabela 21 Resultados obtidos para falta múltipla nas barras 14 e 21 87
Tabela 22 Informações dos cenários de faltas múltiplas simulados no sistema de 417 barras 88
Tabela 23 Resultados obtidos para faltas múltiplas nas barras 119 e 210 88
Tabela 24 Resultados obtidos para faltas múltiplas nas barras 214 e 222 89
Tabela 25 Resultados obtidos para faltas múltiplas nas barras 214 e 345 89
Tabela 26 Informações dos GDs adicionados no sistema de distribuição de 417 barras 90

Tabela 27 Informações dos cenários de falta simulados no sistema de 417 barras com GD 90
Tabela 28 Resultados obtidos para falta na barra 91 - Caso C 92
Tabela 29 Resultados obtidos para falta na barra 119 - Caso C 92
Tabela 30 Resultados obtidos para falta na barra 189 - Caso C 93
Tabela 31 Resultados obtidos para falta na barra 210 - Caso C 94
Tabela 32 Resultados obtidos para falta na barra 214 - Caso C 94
Tabela 33 Resultados obtidos para falta na barra 222 - Caso C 94
Tabela 34 Resultados obtidos para falta na barra 345 - Caso C 95
Tabela 35 Dados de capacidade de carregamento das subestações do sistema de 53 barras 105
Tabela 36 Dados de impedância das linhas do sistema de 53 barras 106
Tabela 37 Dados de demanda das barras do sistema de 53 barras 107
Tabela 38 Dados de demanda das barras do sistema de 417 barras 107
Tabela 39 Dados de ramos do sistema de 417 barras 113

LISTA DE ACRÔNIMOS

BPSO	*Binary Particle Swarm Optimization*
BVNS	Busca em Vizinhança Variável Básica
GD	Geração Distribuída
BVNS	Busca em Vizinhança Variável Generalizada
PCIM	Programação Cônica Inteira-Mista
PCSOIM	Programação Cônica de Segunda Ordem Inteira-Mista
PLIM	Programação Linear Inteira-Mista
PNLIM	Programação Não-Linear Inteira-Mista
PRSDEE	Problema de Restauração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
RINS	*Relaxation Induced Neighbourhood Search*
RVNS	Busca em Vizinhança Reduzida
SD	Sistema de Distribuição
VND	Vizinhança Variável de Descida
VNS	Busca em Vizinhança Variável

LISTA DE SÍMBOLOS

Conjuntos:

Ω_S	Conjunto de barras de subestação
Ω_{GD}	Conjunto de barras que possuem geração distribuída
Ω_N	Conjunto de nós
Ω_H	Conjunto de ramos artificias que conectam a subestação artificial com as barras do sistema
Ω_{BBF}	Conjunto de ramos ij e ji presentes no sistema
Ω_A	Conjunto de ramos normalmente abertos (NA)
Ω_F	Conjunto de ramos normalmente fechados (NF)
Ω_L	Conjunto de ramos reais presentes na rede de distribuição

Parâmetros:

C_i^{op}	Custo de operação do gerador distribuído presente na barra i
pf_i	Fator de potência da barra i
$\underline{\sigma_i}$	Fator de potência indutivo da barra i
$\bar{\sigma}_i$	Fator de potência capacitivo da barra i
$\bar{I}_i^S$	Limite capacitativo da subestação da barra i
$\bar{S}_i^G$	Limite capacitativo de geração da barra i
$\bar{I}_{ij}$	Magnitude máxima de corrente permitida no ramo ij
nl	Número de blocos de retas de aproximação
x_i^G	Parâmetro que informa se o gerador distribuído presente na barra i pode operar de forma ilhada
$\overline{V}^{im}$	Parte imaginária de tensão máxima
$\underline{V}^{im}$	Parte imaginária de tensão mínima
V_i^{im*}	Parte imaginária da tensão na barra i no ponto de operação estimado
$\overline{V}^{re}$	Parte real de tensão máxima
$\underline{V}^{re}$	Parte real de tensão mínima
V_i^{re*}	Parte real da tensão na barra i no ponto de operação estimado
α_i	Peso atribuído ao corte de carga do nó i
λ_{ij}	Peso atribuído ao custo de se abrir a chave presente no ramo ij
γ_{ij}	Peso atribuído ao custo de se fechar a chave presente no ramo ij
P_i^D	Potência ativa demandada no nó i
Q_i^D	Potência reativa demandada no nó i

X_{ij} Reatância do ramo ij

R_{ij} Resistência do ramo ij

$P^G_{0_i}$ Valor de geração de potência ativa inicial da barra i

$Q^G_{0_i}$ Valor de geração de potência reativa inicial da barra i

M Valor suficientemente grande (*big-M*)

Variáveis:

H_{ij} Fluxo artificial no ramo ij

H^G_i Geração artificial na barra i

$I^{D^{im}}_i$ Parte imaginária da corrente demandada na barra i

I^{im+}_{ij} Parte imaginária da corrente do ramo ij na direção direta

I^{im-}_{ij} Parte imaginária da corrente do ramo ij na direção inversa

$I^{S^{im}}_i$ Parte imaginária da corrente fornecida na barra de subestação i

$I^{G^{im}}_i$ Parte imaginária da corrente gerada na barra i

V^{im}_i Parte imaginária da tensão na barra i

$I^{D^{re}}_i$ Parte real da corrente demandada na barra i

I^{re+}_{ij} Parte real da corrente do ramo ij na direção direta

I^{re-}_{ij} Parte real da corrente do ramo ij na direção inversa

$I^{S^{re}}_i$ Parte real da corrente fornecida na barra de subestação i

$I^{G^{re}}_i$ Parte real da corrente gerada na barra i

V^{re}_i Parte real da tensão na barra i

P^G_i Potência ativa gerada na barra i

Q^G_i Potência reativa gerada na barra i

fe_{ij} Variável auxiliar que contabiliza o fluxo artificial do ramo ij

fg_i Variável auxiliar que representa o fluxo artificial gerado na barra i

bl^{im}_{ij} Variável auxiliar utilizada no cálculo da parte imaginária da queda de tensão para o ramo ij

bl^{re}_{ij} Variável auxiliar utilizada no cálculo da parte real da queda de tensão para o ramo ij

β_{ij} Variável binária auxiliar para a restrição de radialidade

y_i Variável binária de decisão relacionada à decisão de se energizar ou desenergizar a barra i

x^+_{ij} Variável binária de decisão relacionada ao estado de operação de uma chave presente no ramo ij

x^-_{ij} Variável binária de decisão relacionada ao estado de operação de uma chave presente no ramo ij

$P^G_{\Delta_i}$ Variação de geração de potência ativa da barra i

$Q^G_{\Delta_i}$ Variação de geração de potência reativa da barra i

SUMÁRIO

1 Introdução 10
1.1 Sistemas de distribuição de energia elétrica radiais 10
1.2 O problema de restauração de sistemas de distribuição 11
1.3 Revisão bibliográfica 12
1.3.1 Heurísticas e sistemas especialistas propostos na literatura 13
1.3.2 Meta-heurísticas propostas na literatura 16
1.3.3 Abordagens baseadas em modelagem matemáticas propostas na literatura 18
1.3.4 Propostas baseadas em grafos e inteligência computacional 21
1.3.5 Matheurísticas propostas na literatura 22
1.3.6 Resumo do levantamento bibliográfico 23
1.4 Justificativa 28
1.5 Objetivos da tese 28
1.6 Estrutura do trabalho 29

2 Modelo matemático do Problema de Restauração de Redes de Distribuição Radiais 30
2.1 Modelagem matemática do PRSDEE 30
2.1.1 Restrições do estado de operação do sistema de distribuição 30
2.1.2 Linearização das restrições não-lineares 32
2.1.2.1 Linearização da demanda de corrente das cargas 32
2.1.2.2 Linearização da restrição de limite de tensão 33
2.1.2.3 Linearização da restrição de limite de corrente 34
2.1.2.4 Linearização das restrições referentes a capacidade de geração da subestação e da GD 35
2.1.3 Restrições topológicas do SDEE 35
2.1.3.1 Restrições de radialidade do SDEE 36
2.1.4 Função objetivo do modelo matemático 39
2.2 Proposta de modelo linear inteiro misto para o PRSDEE 40

3 Meta-heurística de busca em vizinhança especializada na resolução do problema de restauração de redes de distribuição 45
3.1 Introdução sobre VNS 45
3.1.1 Algoritmo VNS de descida 46

3.1.2 VNS reduzida (RVNS) **47**
3.1.3 VNS básico (BVNS) **48**
3.1.4 VNS generalizado (GVNS) **49**
3.2 Implementação da meta-heurística VND no PRSDEE 51
3.2.1 Função objetivo e restrições operacionais **52**
3.2.2 Representação de uma proposta de solução **52**
3.2.3 Solução inicial **53**
3.2.4 Estrutura de vizinhança **54**
3.2.5 Controle da radialidade da rede **55**
3.2.6 Fluxograma do algoritmo VND proposto **57**

4 Matheurística especializada em problemas de restauração de sistemas de distribuição **59**
4.1 Introdução 59
4.2 Técnicas de programação matemática 60
4.2.1 *Local branching* **60**
4.2.2 *Relaxation induced neighbourhood search* **61**
4.2.3 *Técnicas baseadas em decomposição* **62**
4.3 Algoritmo matheurístico especializado em PRSDEE 62
4.3.1 Fluxograma do algoritmo matheurístico proposto **64**

5 Resultados e discussões **66**
5.1 Caso de estudo A 66
5.1.1 Falta na barra 1 (Saída da subestação 101) **70**
5.1.2 Falta na barra 3 (Saída da subestação 101) **70**
5.1.3 Falta na barra 11 (Saída da subestação 102) **71**
5.1.4 Falta na barra 14 (Saída da subestação 102) **71**
5.1.5 Falta na barra 21 (Saída da subestação 104) **76**
5.1.6 Falta na barra 30 (Saída da subestação 104) **76**
5.2 Caso de estudo B 76
5.2.1 Falta na barra 91 **80**
5.2.2 Falta na barra 119 **80**
5.2.3 Falta na barra 189 **81**
5.2.4 Falta na barra 210 **82**
5.2.5 Falta na barra 214 **83**

5.2.6 Falta na barra 222 **83**

5.2.7 Falta na barra 345 **84**

5.3 Caso de estudo C 84

5.3.1 Simulação de faltas múltiplas nos sistemas de 53 e 417 barras **85**

5.3.2 Simulação de falta no sistema de 417 barras com presença de geração distribuída **89**

5.4 Discussões 95

6 CONCLUSÕES **97**

6.1 Publicações 98

REFERÊNCIAS **99**

ANEXO A - Dados dos Sistemas Testados **105**

A.1 Sistema de 53 barras 105

A.2 Sistema de 417 barras 107

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica desenvolve um papel essencial no cotidiano das pessoas proporcionando conforto, segurança e praticidade no dia a dia. Além disso, sua utilização é essencial para diversos setores educacionais, corporativos, industriais e, principalmente, setores hospitalares. O consumo contínuo de energia elétrica pela sociedade implica que a expectativa por um serviço de fornecimento ininterrupto e de qualidade cresça progressivamente. Com o passar dos anos, para suprir a demanda crescente de energia elétrica, os sistemas de distribuição começaram a se desenvolver cada vez mais, se tornando maiores e apresentando uma maior complexidade. Os sistemas geralmente operam em topologia radial, essa característica do sistema tem por finalidade reduzir o gasto com equipamentos de proteção, tornando os procedimentos de coordenação de proteção mais simples e rápidos (VARGAS et al., 2021).

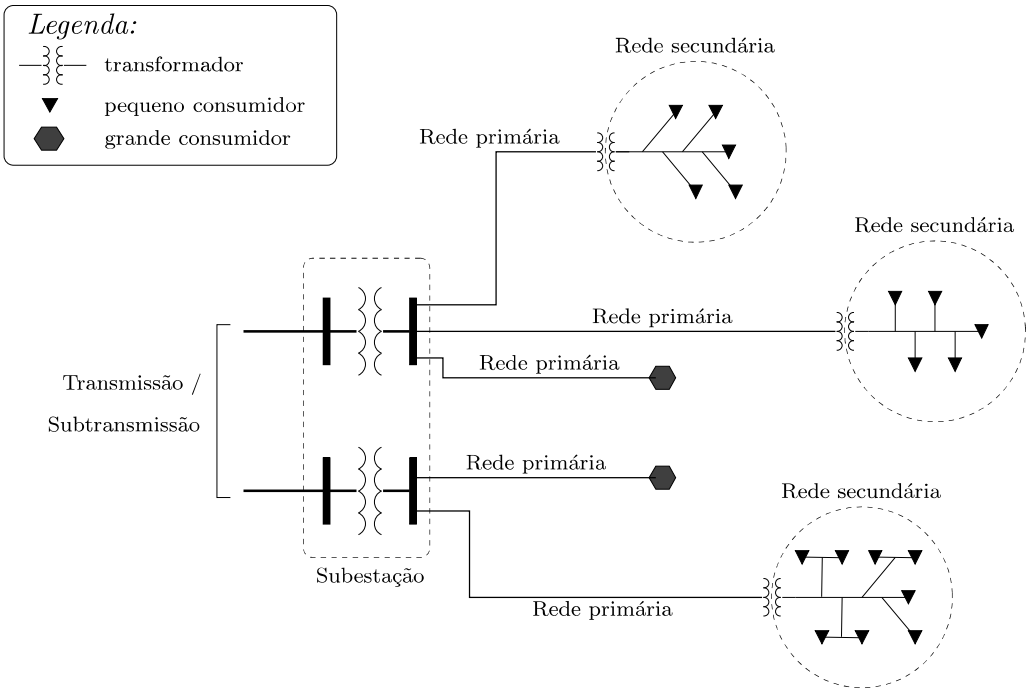
Uma falta é um fenômeno inevitável que acontece com muita frequência em redes de transmissão e de distribuição. Condições climáticas, condições de sobrecarga e mal funcionamento dos equipamentos de proteção são apenas alguns dos motivos que podem ocasionar na interrupção do fornecimento de energia elétrica. As faltas possuem impacto direto sobre os consumidores e uma pequena interrupção no fornecimento de energia pode acarretar em grandes transtornos sociais e econômicos (ZIDAN et al., 2016). Dessa forma, o sistema não está livre do aparecimento de faltas e o religamento de consumidores nesses casos precisa ser a mais breve possível. Portanto, o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica consiste em elaborar um plano de restauração que reestabeleça o fornecimento de energia para os consumidores afetados de tal forma que altere minimamente a topologia do sistema e, ao mesmo tempo, restaure o maior número de consumidores que estavam sem fornecimento (ZIDAN et al., 2016; PERALTA, 2019).

1.1 Sistemas de distribuição de energia elétrica radiais

Os sistemas elétricos de potência são divididos em três partes principais: a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica. A primeira parte é referente à parcela em que a energia elétrica é gerada para posteriormente ser transportada. Então, o transporte é realizado por meio dos sistemas de transmissão que levam a energia aos sistemas de distribuição. A principal função desses sistemas é a transmissão de energia elétrica desde as subestações de

distribuição até as unidades consumidoras. Conforme exposto na Figura 1, o sistema de distribuição é segmentado em dois níveis: primário e secundário. No primário estão presentes as subestações que rebaixam a tensão ao nível primário de distribuição, os consumidores de média tensão e os transformadores de distribuição, que por sua vez, rebaixam a tensão ao nível secundário de distribuição que é composto por consumidores de baixa tensão e por esses transformadores (RUPOLO, 2017; SOUZA, 2018).

Figura 1 - Estrutura básica de um sistema de distribuição



Fonte: Garcia (2005)

A topologia de operação dos sistemas de distribuição pode variar entre malhada e radial. A topologia malhada possui a vantagem de apresentar uma maior confiabilidade quando comparada com a radial. Porém, necessita de maiores investimentos em equipamentos de controle e proteção do que a radial. Os sistemas de distribuição aéreos geralmente operam de forma radial, o que facilita a coordenação da proteção dos mesmos e também favorece o isolamento de futuras faltas. Um sistema de distribuição radial geralmente é planejado com uma estrutura fracamente malhada, ou seja, existem chaves de interconexão entre os alimentadores do sistema. O objetivo da existência dessas chaves é possibilitar o remanejamento de cargas entre os alimentadores, alterando a topologia original do sistema.

1.2 O problema de restauração de sistemas de distribuição

O sistema de distribuição está susceptível a ocorrência de faltas, sejam elas permanentes ou não, e isso pode acontecer devido a uma má condição climática, ao mal funcionamento de algum dispositivo de segurança, às sobrecargas e até mesmo devido a manobra inadequada de

chaves no sistema. Por operar de forma radial, quando uma contingência permanente acontece no sistema de distribuição, toda a parcela à jusante do local da falta fica sem fornecimento de energia elétrica. Isso ocorre devido aos dispositivos de segurança que isolam a falta do sistema de distribuição e, por consequência da falta e do isolamento, os nós afetados precisam ser remanejados a alimentadores vizinhos. O remanejamento de cargas presentes na área fora-de-serviço a alimentadores vizinhos acontece por meio da operação de chaves normalmente abertas e chaves normalmente fechadas presentes no sistema. A estratégia que define quais chaves precisam ser operadas para que o restabelecimento de energia aconteça é a principal estratégia do Problema de Restauração de Sistemas de Energia Elétrica (PRSDEE) (ZIDAN et al., 2016).

Após a ocorrência de uma falta no sistema, a mesma é identificada e localizada. Em posse da informação referente a localização da falta, os dispositivos de segurança do sistema executam o isolamento da mesma e, posteriormente, é elaborado o plano de restauração. O objetivo desse plano é restabelecer o fornecimento de energia elétrica à maior quantidade de carga possível que foi contingenciada em virtude do isolamento da área afetada pela falta permanente. O processo de elaboração do plano é conhecido na literatura como restauração e, juntamente com o isolamento e com a identificação da falta, compõem o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

O PRSDEE é definido por Ciric e Popovic (2000) como um problema combinatório de natureza não-linear e multiobjetivo. A sua natureza multi-objetivo provém da necessidade em se obter o restabelecimento do maior montante de energia elétrica possível através da mínima alteração topológica. O plano de restauração obtido ao resolver o PRSDEE precisa cumprir dois conjuntos principais de restrições que modelam o funcionamento do sistema de distribuição. Esses conjuntos, definidos por Wu e Monticelli (1988), são: conjunto de restrições operacionais e de restrições de carga. O primeiro conjunto impõe o atendimento de demanda do sistema, já o segundo, impõe as restrições necessárias para que o sistema elétrico opere normalmente. Essas restrições são: limite de corrente nas linhas, limites de queda de tensão nas barras de carga, cumprimento das duas leis de Kirchhoff, limites de capacidade das subestações e também os fluxos de potência ativa e reativa. A operação radial do sistema de distribuição também configura uma restrição e deve ser cumprida no plano de restauração.

1.3 Revisão bibliográfica

O problema de restauração têm sido vastamente abordado na literatura especializada. Por se tratar de um problema combinatório e de alta complexidade, várias metodologias são propostas para a resolução do mesmo. Essas metodologias propostas podem ser divididas nas seguintes categorias principais: heurísticas e sistemas especialistas, meta-heurísticas , modelos matemáticos, propostas baseadas em grafos, inteligência artificial e matheurísticas.

1.3.1 Heurísticas e sistemas especialistas propostos na literatura

Inicialmente, na década de 80 e 90, as técnicas mais utilizadas abordavam sistemas especialistas ou processos de busca heurística (MORELATO; MONTICELLI, 1989; LEE et al., 1992; MIU et al., 1998). Com o decorrer dos anos, ambas as metodologias ainda continuaram a ser aplicadas para a resolução do problema, seja de forma híbrida (CIRIC; POPOVIC, 2000) ou até mesmo sendo a principal estratégia de otimização (CHEN et al., 2002; KLEINBERG et al., 2010; DIMITRIJEVIC; RAJAKOVIC, 2015; HAFEZ et al., 2016; GAO et al., 2016).

Um algoritmo baseado em regras heurísticas foi proposto por Morelato e Monticelli (1989) para a resolução do problema de restauração de redes. A metodologia realiza um balanceamento de carga entre os alimentadores e com ajuda de conjuntos de regras heurísticas identifica as melhores soluções presentes no espaço de busca. Quando acontece de aparecer uma solução infactível que não atende a uma ou mais restrições adotadas pelos autores, é feito um processo de retrocesso que possibilita o algoritmo a retornar a busca em uma direção nova. Como toda solução é sujeita a verificação das restrições, a melhor solução encontrada pelo algoritmo sempre irá respeitar o conjunto de restrições adotados. O sistema utilizado para realizar testes possui 20 barras de carga e 33 chaves.

Em 1992, Lee et al. (1992) propuseram um algoritmo baseado em um sistema especialista para a resolução do problema de restauração de redes. O sistema é composto por um conjunto de regras que determinam o plano de restauração para uma determinada falta e também elabora a sequência de chaveamentos necessários para o restabelecimento. O sistema especialista divide a elaboração do plano de restauração em três etapas fundamentais: agrupamento único, agrupamento múltiplo e modificação de grupos. O agrupamento único almeja restabelecer toda a área a jusante da falta permanente através de um único alimentador que esteja adjacente à contingência. Quando toda a parcela sem fornecimento não pode ser restaurada por inteiro, a etapa de agrupamento múltiplo inicia e, por sua vez, divide a parcela em grupos menores que possam ser restaurados através de alimentadores adjacentes. Sendo assim, as áreas sem fornecimento de energia elétrica são agrupadas entre si e inicia-se o processo de modificação de grupos. Este processo consiste em transferir cargas de um grupo para outro com o objetivo de restabelecer um dos grupos através de algum alimentador adjacente. Após o plano de restauração ser elaborado, o sistema especialista gera o sequenciamento de chaveamentos necessário para que a restauração aconteça da melhor forma possível. O sistema utilizado para validar a metodologia possui 6 alimentadores que fornecem um total de 43 zonas de cargas e possui 43 chaves seccionadoras.

Um algoritmo heurístico com uma busca baseada em ranqueamento multiobjetivo especializado na resolução do problema de restauração foi proposto por Miu et al. (1998). Os critérios de otimização considerados pelos autores são: maximização do montante de carga prioritária que foi restaurada, minimização do corte de carga e minimização do total de manobras de

chaveamentos necessárias para que a restauração da rede de distribuição aconteça. Além de considerar o ranqueamento multiobjetivo e o acontecimento de múltiplas faltas simultâneas, a busca heurística também contempla as restrições de limite máximo de tensão nas barras, amplitude máxima de corrente nas linhas e a capacidade máxima do alimentador, o que aumenta ainda mais a complexidade do problema de restauração. O processo de busca baseado em ranqueamento considera que as violações de sobrecarga são mais severas do que as violações de tensões na hora de trabalhar com a infactibilidade de uma proposta de solução. A busca consiste em tentar restabelecer o fornecimento de energia a cargas presentes na área fora-de-serviço, sendo que essa restauração prioriza as cargas consideradas prioritárias e, quando não for possível restabelecer a carga através de um alimentador específico, essa carga é sujeita a ser remanejada e fornecida por outro alimentador adjacente. Em caso da impossibilidade de fornecimento à carga, o corte da mesma é inevitável. Uma extensão desse trabalho é encontrada no trabalho de Miu et al. (1999), onde é implementada na metodologia, a instalação de capacitores na rede com o objetivo de aumentar a quantidade de carga restabelecida além de também considerar a distância geográfica entre as chaves com foco em diminuir o tempo necessário de manobra das mesmas. Os resultados da metodologia são apresentados para um sistema de distribuição com 416 nós com 53 chaves seccionadoras com a presença de zonas de cargas prioritárias.

Os autores Ciric e Popovic (2000) contribuíram para a literatura do problema de restauração propondo um algorítimo híbrido que combina técnicas heurísticas e programação inteira mista para a obtenção do plano de restauração. O método proposto tem como base uma lista de possíveis soluções que é obtida a partir do chaveamento de uma única chave seccionadora. Após a formação da lista, é escolhido um critério de otimização dentre cinco critérios disponíveis: minimizar o número de operações de chaveamento, maximizar a capacidade de reserva dos alimentadores, minimizar o desvio mínimo de tensão, tensão mínima aceitável e minimizar as perdas de potência ativa. Uma vez que a lista de proposta não possua nenhuma solução factível, é encontrada uma solução através da resolução de um problema de otimização inteiro misto. O método é aplicado em um sistema composto por 36 nós consumidores e 40 ramos. Os resultados apresentados realçam a efetividade dessa flexibilização do método.

Em 2002, Chen et al. (2002) propuseram um sistema especialista baseado em regras com um modelo de CPN *(Colored Petri-Net)* para a resolução do problema de restauração para um sistema de distribuição com presença de cargas prioritárias. O CPN é utilizado para modelar a rede de inferência e para auxiliar a tomada de decisão que compõem os chaveamentos necessários para os processos de localização, isolamento e restauração de falta. Após o acontecimento de uma falta permanente, as informações cruciais para a restauração da área fora-de-serviço são obtidas através da interação de regras heurística com o banco de dados do sistema. A área fora-de-serviço só pode ser restaurada por um alimentador suporte através do fechamento de uma chave normalmente aberta. Essa restauração só acontece se o alimentador suporte conseguir fornecer a nova área respeitando o seu limite de capacidade. Caso o alimentador suporte não

consiga fornecer por completo a área, a transferência de cargas para alimentadores adjacentes é realizada e, em caso da transferência não ser possível, inicia-se o processo de corte de carga. Este processo leva em conta quatro níveis de prioridade de cargas diferentes, dessa forma, a área que possuir maior prioridade possui uma chance maior de ser restaurada do que outras com baixa prioridades. Após definir como vai acontecer a restauração das cargas é definida a sequência de chaveamentos. O sistema utilizado para os testes é composto por 6 subestações, 18 alimentadores, 79 chaves e 86 ramos.

Um algoritmo heurístico foi proposto por Kleinberg et al. (2010) para a resolução do problema de restauração com a presença de cargas prioritárias. Os critérios de otimização da metodologia multi-objetivo são: maximização do montante de carga prioritária que foi restaurada, maximização do montante total de cargas restauradas, minimização do número de operações de chaveamentos e a minimização do total de corte de carga. As regras heurísticas utilizadas pelos autores possibilitam a transferência de cargas para transformadores vizinhos e a redução da demanda de cargas não afetadas pela falta. Os testes em um sistema de 416 barras comprovam a eficácia da estratégia ao apresentarem um número de manobras de chaveamentos menor e também um montante de carga restaurada maior do que testes que não possibilitam a redução de demanda e remanejamento de cargas presentes em uma área que não foi afetada pela falta.

Outro algoritmo heurístico foi proposto por Dimitrijevic e Rajakovic (2015), com o diferencial de ter uma abordagem em teoria do grafos para a resolução o problema de restauração. A abordagem multi-objetivo adota como critério de otimização primário a minimização de corte de carga, e como secundário, a minimização do custo de operações de chaveamentos. A teoria de grafos é utilizada na metodologia por meio um algoritmo que encontra a árvore geradora mínima que, com auxilio de indicadores, determina uma configuração radial para a rede. Os índices utilizados aumentam o custo de manobras de chaves da função objetivo de acordo com o estado aberto ou fechado, a região da rede em que a chave está presente e também se a chave é controlada manualmente ou remotamente. A grande contribuição do trabalho é o fato de que os nós presentes na área à jusante da falta são considerados como raízes das árvores geradores, implicando que o problema de restauração seja tratado como um processo que identifica múltiplas árvores geradoras, ou seja, uma floresta.

Em 2016, Hafez et al. (2016) propuseram um sistema multi-agente descentralizado para a resolução do problema de restauração com presença de consumidores prioritários e geração distribuída (GD). A metodologia propõe quatro diferentes tipos de agentes de área, sendo eles: agente da área em falta, agente da área fora-de-serviço, agente da área de intersecção e agente da área saudável. Após o acontecimento de uma contingência no sistema de distribuição, cada agente se identifica como um dos quatro tipos diferentes e, para cada tipo, uma lista diferente de regras é associada ao agente. O agente presente na área em falta é aquele que toma as decisões e entra em contato com os outros agentes com a finalidade de reestabelecer o fornecimento de

energia à área sem fornecimento. Foram feito testes considerando GD e também priorização de atendimento. A principal contribuição do trabalho é a descentralização e autonomia que cada agente oferece além da utilização de um agente reserva para assumir o papel do agente que toma as decisões.

Gao et al. (2016) propuseram um algoritmo heurístico de dois estágios para a resolução do problema de restauração de redes de distribuição. É considerada a presença de GD na rede de distribuição e a abordagem considera a possibilidade das microrredes funcionarem no estado de ilhamento. A metodologia é composta por duas etapas, na primeira é feita uma busca exaustiva que salva em uma tabela todos os caminhos de restauração possíveis entre cada microrrede presente no sistema de distribuição e cada área em falta. Posteriormente, na segunda etapa, é resolvido um problema de programação linear inteira que obtém a melhor solução presente na tabela formada na primeira etapa.

1.3.2 Meta-heurísticas propostas na literatura

Além da utilização de processos heurísticos, as meta-heurísticas também foram muito utilizadas na resolução do problema de restabelecimento, dentre elas pode-se citar: algoritmos genéticos e evolutivos (LUAN et al., 2002; MARQUES et al., 2017; FARIA et al., 2021), otimização por enxame de partículas (WANG; CHIANG, 2016) e algoritmos híbridos (CARVALHO et al., 2007).

Um algoritmo genético foi proposto por Luan et al. (2002) para a resolução do problema de restabelecimento de energia elétrica em redes de distribuição radiais. A metodologia utiliza de codificação inteira para representar uma proposta de solução do problema em que, cada cromossomo da população, representa uma lista de circuitos com chaves utilizadas para obter a restauração do corte de carga. Para casos em que o restabelecimento de energia não foi possível, um gene especial é utilizado indicando que o cromossomo representa uma solução com corte de carga e também indicando quais chaves podem ser manobravas para que a restauração aconteça. A radialidade da rede de distribuição é controlada através da teoria dos grafos, dessa forma, o algoritmo identifica a formação de laços durante a construção de cada cromossomo e evita a geração de soluções infactíveis. A recombinação adotada pelos autores consiste em preservar uma parte dos cromossomos de uma das soluções pais na solução descendente e, posteriormente, complementar os genes restantes do descendente com os genes da segunda solução pai. A mutação consiste em trocar a posição de dois genes no cromossomo. A função objetivo adotada é composta pela soma ponderada dos pesos associados a cinco termos: o montante de corte de carga, as perdas da topologia, o montante referente a sobrecarga de corrente nos circuitos, o desvio referente aos limites máximos e mínimos de tensão permitidos em cada barra do sistema e o custo referente a manobra de chaveamento.

Em 2007, Carvalho et al. (2007) resolveram o problema de restauração de redes de distribuição de energia elétrica utilizando uma metodologia composta por duas fases. Além de resolverem o problema de restauração, os autores também resolvem o problema de sequenciamento ótimo de chaves. A primeira fase dessa metodologia é composta por um algoritmo genético que utiliza uma árvore geradora para representar a rede de distribuição e também auxiliar no controle de radialidade da mesma. A recombinação adotada pelos autores consiste em trocar nas soluções pais, o caminho de dois nós aleatórios A e B, se possível. A segunda fase da metodologia utiliza programação dinâmica para resolver o problema de sequenciamento de chaves. Em posse do plano de restabelecimento de energia elétrica, o problema de sequenciamento consiste em encontrar a sequência ótima de operações de chaveamento com o objetivo de minimizar o montante de energia não-suprida da rede de distribuição a cada chaveamento. Os resultados para um sistema real com 633 barras validam a eficácia do método apresentado.

Marques et al. (2017) propuseram um algoritmo evolutivo multiobjetivo que combina tabelas de subpopulação com a codificação em grafos para resolver o problema de restauração de um sistema de distribuição. Na formulação do problema também é considerado três níveis diferentes de prioridade de atendimento e a presença de chaves controladas remotamente. A metodologia adotada, além de elaborar um plano de restauração, também realiza o sequenciamento das operações de chaveamento e é divida em três estágios. No primeiro, é determinado um conjunto de soluções candidatas obtidas pelo algoritmo evolutivo. A determinação das soluções candidatas acontece através de um processo iterativo caracterizado por um conjunto de treze tabelas de subpopulação em que cada uma possui um foco diferente. O primeiro estágio tem fim quando uma proposta de solução restaura toda a carga pertencente a área fora-de-serviço ou, devido a impossibilidade de restauração, o número máximo de geração de indivíduos foi atingido. No segundo estágio, uma das soluções obtidas é escolhida para que seja determinado o sequenciamento das operações de chaveamento que é feito no estágio final da metodologia. Os testes foram feitos em quatro sistemas de distribuição de grande porte diferentes e foram simuladas faltas únicas e múltiplas.

Uma expansão do algoritmo evolutivo multiobjetivo proposto por Marques et al. (2017) foi publicada em 2021 por Faria et al. (2021). A abordagem expandida para o problema de restauração passa a considerar GD e, principalmente, a possibilidade de se ocorrer ilhamento na rede durante o processo restaurativo. Para isso, os autores introduzem um conjunto de restrições que auxiliam no controle das ilhas de cargas formadas nas áreas fora-de-serviço. Esse conjunto de restrições auxilia no ilhamento do gerador calculando as demandas mínima e máxima da ilha e também garantindo que a proteção local do gerador não seja ativada. No trabalho também é feito um estudo a respeito das restrições referentes ao comportamento dos geradores distribuídos enquanto o funcionamento em ilhamento.

Em 2016, Wang e Chiang (2016) propuseram uma metodologia composta por três etapas

para a resolução do problema de reconfiguração restaurativa de sistemas de distribuição. Os critérios de otimização adotados pela metodologia são: maximização do montante de carga restaurada e a minimização do número de chaveamentos necessários para que o restabelecimento aconteça. A metodologia proposta é dividida em três etapas, a primeira é chamada de etapa de busca global e possui como objetivo encontrar soluções de alta qualidade e diversidade para serem entregues à próxima etapa, a segunda é chamada de etapa de envolvimento do usuário (operador do sistema de distribuição) que por sua vez realiza modificações no problema conforme as preferências do usuário e entrega o problema modificado para a terceira etapa. Essa última, denominada como etapa de busca local, é responsável por explorar as melhores soluções com base nas escolhas do usuário com o objetivo de encontrar uma ou mais soluções ótimas. Na primeira etapa é utilizado um método de otimização de enxame de partículas binário e baseado em grupos (do inglês, *binary particle swarm optimization* – BPSO) para uma busca eficiente em regiões ricas em soluções quase ótimas. Em posse de soluções quase-ótimas e divergentes, inicia-se a segunda etapa da metodologia através do engajamento do usuário com as soluções encontradas. Nessa etapa da metodologia, o usuário escolhe qual o objetivo preferido e o problema é modificado conforme as preferências do usuário. Portanto, o modelo matemático do problema de restauração se torna mono-objetivo e prioriza a otimização do objetivo escolhido. O outro objetivo é incorporado nas restrições do problema e o modelo matemático alterado é entregue para a etapa seguinte. Na última etapa da metodologia, uma busca local utilizando as melhores soluções escolhidas pelas preferências do usuário adotadas na segunda etapa é realizada. A procura por uma solução ótima é feita através de um método de busca de chaveamentos baseada em ranqueamento. A validação da metodologia proposta é feita através de sua aplicação nos sistemas de 123 e de 1101 nós.

1.3.3 Abordagens baseadas em modelagem matemáticas propostas na literatura

Por se tratar de um problema combinatorial multiobjetivo, não-linear e com a presença de uma grande quantidade de restrições, sejam elas lógicas ou operacionais, o problema de restauração acaba se tornando um problema muito complexo de se resolver (LI et al., 2014). Devido a esse fato, inicialmente o uso de técnicas clássicas de otimização era pouco popular e geralmente eram utilizadas apenas em pequenos processos da metodologia, como é o caso de (CIRIC; POPOVIC, 2000). Porém, a modelagem matemática do problema de restauração foi evoluindo, o que possibilitou o surgimento de novos trabalhos baseados em técnicas de otimização clássica. Dentre as principais técnicas de otimização clássica utilizadas, destacam-se: programação linear (CHEN et al., 2017a; CHEN et al., 2017b; LÓPEZ et al., 2017; MACEDO et al., 2021), programação cônica (ROMERO et al., 2016; SOUZA et al., 2020; VARGAS et al., 2021) e otimização robusta (CHEN et al., 2015; KOVAČKI; VIDOVIĆ, 2022).

Uma metodologia baseada em otimização robusta foi proposta por Chen et al. (2015) para

a resolução do problema de restauração com a presença de geradores distribuídos. O problema é modelado considerando a incerteza associada à GD e, para isso, é utilizado um modelo de duas etapas de programação linear inteira. A metodologia proposta é dividida em duas etapas, sendo que na primeira é feita a elaboração do plano de restauração do sistema que contém quais chaves precisam ser manobradas para que o restabelecimento aconteça. Na segunda etapa, é calculado o pior cenário possível e então as soluções obtidas são adaptadas para que as variáveis do problema estejam dentro dos limites aceitáveis até mesmo quando acontecer esse cenário.

Romero et al. (2016) propuseram um modelo matemático AC completo para o problema da restauração em redes de distribuição radiais de energia elétrica. O modelo matemático proposto apresenta aparência de um modelo de programação de segunda ordem inteira mista. A função objetivo considerada no mesmo é uma soma ponderada de quatro critérios de otimização diferentes. Sendo eles: minimizar o número de chaveamentos, minimizar o corte de carga, priorizar a operação de chaves controladas remotamente e priorizar o atendimento de cargas prioritárias. No modelo é incorporada a restrição de radialidade proposta em Lavorato et al. (2012) e contribui com a introdução do conceito de subestação fictícia e de ramos fictícios. Essa última proposta é de extrema importância para auxiliar no cumprimento das restrições topológicas do sistema de distribuição, principalmente as restrições de conectividade e de radialidade da rede, além de preservar a natureza de operação das chaves presentes na área que foi afetada pelo isolamento da falta.

Um modelo de programação não linear inteira-mista (PNLIM) foi proposto por López et al. (2017) para a resolução simultânea do problema de restauração e do problema de sequenciamento de chaveamentos ótimo para uma rede de distribuição trifásica e desbalanceada. O algoritmo considera que a cada iteração uma chave da rede de distribuição seja operada, respeitando as restrições físicas e operacionais da rede de distribuição e também com o objetivo de diminuir o montante de energia não-suprida da rede naquele instante. Na metodologia o modelo de PNLIM é linearizado e convertido em um modelo de programação linear inteira-mista (PLIM) através de técnicas de linearização e então é resolvido por *solvers* comerciais e aplicado em uma rede de distribuição trifásica com 123 nós.

Um modelo matemático de programação cônica de segunda ordem inteira-mista (PCSOIM) foi proposto pelos autores Koutsoukis et al. (2017) para a resolução do problema de restauração de redes de distribuição radiais. A metodologia é multi-objetivo e possui como critérios de otimização a minimização do corte de carga da rede, a minimização do número de chaveamentos necessários para que a restauração aconteça e também a minimização da mudança de estado do *tap* dos transformadores OLTC que podem ser instalados na rede. A complexidade do problema de restauração ao considerar a presença de transformadores OLTC aumenta, porém o modelo matemático é facilmente resolvido por *solvers* comerciais. No trabalho, os autores validaram sua metodologia efetuando testes em um sistema de distribuição com 83 barras.

Ainda em 2017, os autores Chen et al. (2017b) propuseram um modelo matemático de PLIM para a resolução do problema de restauração de redes de distribuição trifásicas, desbalanceadas e com a presença de GD. A metodologia adotada também modela banco de capacitores e reguladores de tensão presentes na rede. No trabalho os autores resolvem o problema de restauração adotando uma estratégia que permite dividir a rede em várias *microgrids* menores, considerando a possibilidade de ocorrer o ilhamento de uma parcela isolada da rede. No trabalho também é possível de encontrar uma estratégia de simplificação da rede de distribuição chamada pelos autores de *block-bus*, que consiste em agrupar todas as cargas que não possuem um circuito com chave entre si, dessa forma, a rede de distribuição simplificada passa a ter chaves em todos os circuitos, tornando a sua manobra mais fácil.

Outro modelo de PLIM foi proposto por Chen et al. (2017a) para a resolução dos problemas de restauração e o de sequenciamento de chaveamento ótimo. A problemática adotada pelos autores conta com a presença de GDs, sistemas de armazenamento de energia e a possibilidade de formação de microrredes. A resolução do problema de restauração é feita de forma iterativa, ou seja, a resolução do modelo PLIM gera um plano de restauração que indica a ordem das chaves que precisam ser manobradas e assim, de forma iterativa, acontece a operação de cada chave. Após toda operação de chaveamento, é verificado se a operação ocasionou o aparecimento de novos eventos. Caso aconteça algum imprevisto após uma operação de chaveamento, a metodologia volta ao início e o modelo de PLIM é resolvido novamente considerando o novo evento. Os testes foram realizados em um sistema de 123 barras.

Em 2020, Souza et al. (2020) propuseram um modelo de PCSOIM como ferramenta de otimização do problema de restauração de redes de distribuição radiais de grande porte. O modelo possui a característica de trabalhar com um número reduzido de variáveis binárias, o que faz com que o tempo de processamento necessário seja um pouco menor do que outros modelos. Os autores não consideram GD na rede de distribuição porém nenhuma forma de simplificação foi feita na mesma. O modelo resolve o problema sem que seja necessário agrupar as cargas de uma mesma zona em uma só, e conforme os resultados expostos, faz isso com um tempo adequado para o problema de restauração.

Em 2021 Macedo et al. (2021) propuseram um modelo de PLIM para a resolução do problema de restauração de redes de distribuição. É considerado no modelo a possibilidade de operação de ilhamento dos gerações distribuídos presentes na rede, reguladores de tensão e banco de capacitores. O modelo de PLIM considera de forma simultânea a formação de microrredes, o controle de tensão e a possibilidade de conexão de múltiplos geradores distribuídos em uma mesma microrrede. A avaliação da metodologia foi feita em um sistema de 53 barras e foram simuladas faltas múltiplas e únicas no sistema.

Um modelo de PCSOIM para a resolução do problema de restauração foi proposto por Vargas et al. (2021). O modelo considera em sua formulação a presença de GD, reguladores

de tensão e banco de capacitores na rede de distribuição. O grande diferencial da metodologia proposta é a possibilidade da rede de distribuição operar temporariamente com a presença de laços. Os testes de falta única e múltipla executados em um sistema de 53 barras evidenciam que, em alguns casos, a possibilidade da presença de laços possibilitou restaurar uma montante de carga ainda maior.

Em 2022, Kovački e Vidović (2022) propuseram uma metodologia baseada em otimização robusta para a resolução do problema de restauração considerando GD. A metodologia utiliza de uma estratégia para simplificar a rede de distribuição nomeada *path-switch-to-switch modelling* que é caracterizada pelo agrupamento de cargas que estão presentes na mesma zona, ou seja, cargas que que compartilham as mesmas chaves em seus limites. A metodologia é centralizada e é baseada na medição das correntes presentes na rede de distribuição. O ilhamento de cargas não é levado em consideração pelos autores, então, caso o gerador distribuído esteja presente na área afetada pela falta permanente, o mesmo é desligado pelo sistema de proteção e só torna a ligar após a restauração do sistema.

1.3.4 Propostas baseadas em grafos e inteligência computacional

Outras técnicas que não se encaixam nas categorias anteriores também podem ser citadas, são elas: técnicas baseadas em buscas exaustivas em grafos (LI et al., 2014; XU et al., 2016) e técnicas de aprendizado de máquinas (FERREIRA et al., 2019).

Em 2014, Li et al. (2014) resolveram o problema de restauração considerando a presença de *microgrid*s e a possibilidade de ilhamento na rede. A representação da rede de distribuição acontece de forma simplificada, isto é, as cargas que possuem as mesmas chaves de interconexão em suas extremidades são agrupadas e manobradas como se fossem apenas uma carga. O problema de restauração é modelado como se fosse um problema de árvore geradora mínima. Todos os alimentadores e geradores distribuídos presentes na redes são considerados os nós de referência do grafo. A metodologia proposta dos autores é separada em duas etapas, sendo que na primeira acontece a busca de uma topologia que restaure toda a carga presente na área fora-de-serviço da rede e, quando não é possível de se restaurar por completo, a segunda etapa da metodologia é acionada. Após a obtenção de um plano de restauração, um problema de sequenciamento de chaveamento ótimo também é resolvido.

Xu et al. (2016) resolveram o problema de restauração considerando níveis diferentes de prioridade de atendimento, GD e o ilhamento de setores de carga. A problemática adotada é mais focada para o fornecimento de energia às áreas com maior prioridade após o acontecimento de uma contingência. Para isso, a metodologia considera a possibilidade de uma área afetada pela falta e com a presença de uma *microgrid* seja fornecida e trabalhe de forma ilhada. A metodologia é dividida em quatro etapas sendo a primeira caracterizada pela elaboração dos

caminhos de reestabelecimento entre cada *microgrid* e cada área em falta que podem ser estabelecidos para que a área seja restabelecida. Na segunda etapa é feito o agrupamento das cargas presentes na mesma área e que fazem parte do mesmo caminho de reestabelecimento que foi estabelecido na etapa anterior. Na terceira etapa o problema de restauração é lido como um problema de cobertura máxima (*maximum coverage problem*) e, após a sua resolução, é determinado o conjunto de áreas de carga que foram restauradas e também o conjunto de cargas que compõem às áreas afetadas pela contingência. Por último, é determinado o conjunto de ações de chaveamentos necessário para que as áreas sem fornecimento sejam restauradas.

Uma metodologia baseada em *machine learning* foi proposta por Ferreira et al. (2019) para a resolução do problema de restauração de redes de distribuição. A metodologia considera de forma simultânea a otimização de dois critérios, a restauração de cargas afetadas pela falta e o remanejamento de cargas com o intuito de evitar o sobrecarregamento do sistema. Ambos os critérios são otimizados de forma simultânea e centralizada. Foram simulados testes considerando faltas únicas e simultâneas em uma rede real de distribuição composta por duas subestações e três alimentadores.

1.3.5 Matheurísticas propostas na literatura

Dentro do contexto de do problema de restauração não é possível encontrar na literatura metodologias que utilizam do conceito de matheurísticas como principal ferramenta na resolução do problema. Porém, para outros problemas em redes de distribuição, como o problema de reconfiguração (ROMERO et al., 2021), o problema de expansão (HOME-ORTIZ et al., 2021) e para o problema do fluxo de potência ótimo (HOME-ORTIZ et al., 2020), já é possível encontrar, recentemente, trabalhos que utilizam algorítimos baseados em matheurísticas.

Home-Ortiz et al. (2020) propuseram um algoritmo matheurístico especializado na resolução do problema de expansão de redes de distribuição. O algoritmo híbrido é composto por estratégias baseadas na meta-heurística de busca em vizinhança variável de descida (VND) e por um modelo de programação cônica inteira-mista (PCIM). Está incluso na problemática do problema a presença de GD na rede, podendo ser despachada ou renovável, dispositivos de armazenamento de energia, construção e reforço de subestações, troca de tipo de condutores e, alterações topológicas na rede. Os autores apontam a relevância da abordagem matheurística para o problema e evidenciam a falta da aplicação da mesma na literatura. Os resultados obtidos nos testes realizados nas redes de distribuição de 24 e 182 barras demonstram um bom desempenho da metodologia.

Um algoritmo matheurístico especializado na resolução do problema de fluxo de potência ótimos foi proposto por Home-Ortiz et al. (2021). O algoritmo híbrido une um modelo de programação não-linear inteiro-misto com estratégias de busca em vizinhança provenientes

da meta-heurística VND. A revisão da literatura feita no trabalho evidencia a inexistência de aplicações baseadas em matheurística para o problema de fluxo de potência ótimo. Os resultados obtidos pela metodologia nomeada pelos autores como VND-MA são comparados com os resultados obtidos por outras técnicas de otimização e, é evidente que, a matheurística obteve maior destaque em sistemas de grande porte porém ainda encontrou bons resultados em sistemas menores.

Romero et al. (2021) propuseram uma metodologia híbrida para a resolução do problema de reconfiguração que considera a alocação de banco de capacitores na presença de GDs despacháveis e não despacháveis. A metodologia híbrida é um algoritmo matheurístico composto por estratégias de busca em vizinhança da meta-heurística VNS, a estratégia de memória e proibição característica da busca tabu e a resolução de um modelo estocástico de PCSOIM. Os autores apontam a falta de aplicações baseadas em matheurística para o problema de reconfiguração e os resultados obtidos pelos mesmos validam a qualidade da metodologia.

1.3.6 Resumo do levantamento bibliográfico

Com o objetivo de reunir todas as informações da revisão bibliográfica de forma sucinta e resumida, a Tabela 1 expõe os dados de todos os trabalhos revisados, evidenciando o que é considerado dentro do conceito da problemática, qual metodologia foi utilizada e também qual é a principal contribuição do trabalho.

Tabela 1 - Resumo do levantamento bibliográfico para o problema de restauração

Autores	Metodologia	Considera		Principal contribuição
		GD	Ilhamento	
Morelato e Monticelli (1989)	Heurística	✗	✗	Algoritmo heurístico que realiza balanceamento de carga entre os alimentadores com a estratégia de reiniciar o processo de busca quando encontrar uma solução infactível.
Lee et al. (1992)	Sistema especialista	✗	✗	Sistema especialista dividido em três etapas: agrupamento único, agrupamento múltiplo e modificação de grupo. A primeira restabelece por completo a falta, quando possível. A segunda é acionada quando a primeira falha e, se ainda existir carga para ser restaurada, a terceira etapa é iniciada.
Miu et al. (1998)	Heurística	✗	✗	Processo de busca baseado em ranqueamento que utiliza regras heurísticas para atingir o restabelecimento completo do sistema de distribuição. É considerada a presença de cargas prioritárias e realiza testes com faltas múltiplas.
Ciric e Popovic (2000)	Heurística híbrida	✗	✗	É feita a montagem de uma lista de possíveis soluções e quando acontecer da lista conter apenas soluções infactíveis, um problema de otimização inteira mista é resolvido para encontrar uma possível solução.
Chen et al. (2002)	Sistema especialista	✗	✗	Sistema especialista baseado em regras que utiliza um modelo chamado *colored petri-net*. São considerados na metodologia quatro níveis de prioridades diferentes para cada carga.
Luan et al. (2002)	Algoritmo genético	✗	✗	Algoritmo genético que utiliza da teoria dos grafos para auxiliar o controle da radialidade das soluções encontradas. A recombinação preserva uma parcela dos cromossomos na solução descendente e a mutação é caracterizada pela troca de posição de dois genes no cromossomo.
Carvalho et al. (2007)	Algoritmo genético híbrido	✗	✗	A rede é representada por nó-profundidade. O algoritmo é composto por duas fases sendo que na primeira é aplicado um algoritmo genético para gerar a solução do problema de restauração e na segunda fase utiliza-se da programação dinâmica para resolver o problema de sequenciamento de chaves.
Kleinberg et al. (2010)	Heuristíca	✗	✗	Regras heurísticas que consideram possível o remanejamento de cargas que não foram afetadas pela falta. A abordagem considera a presença de cargas prioritárias na rede.

continua na próxima página

Tabela 1 – continuação da página anterior

Autores	Metodologia	Considera		Principal contribuição
		GD	Ilhamento	
Li et al. (2014)	Árvore geradora mínima	✓	✓	É considerado na problemática a presença de geradores distribuídos e a possibilidade de operação em ilhamento dos mesmos. A metodologia adotada é baseada na representação em árvores da rede de distribuição e o problema a ser resolvido é transformado no problema da árvore geradora mínima.
Dimitrijevic e Rajakovic (2015)	Heurística	✗	✗	É feito um algoritimo heurístico com abordagem em teoria dos grafos que transforma o problema de restauração em um problema de múltiplas árvores geradoras mínimas. Isso acontece por considerar os nós presentes na área fora-de-serviço como raízes das árvores geradoras.
Chen et al. (2015)	Otimização robusta	✓	✗	É proposto um modelo de duas fases de programação linear inteira que considera a presença de GD na rede de distribuição. Na segunda etapa do modelo é feita a adequação das soluções com base no cenário de pior qualidade.
Romero et al. (2016)	PCSOIM	✗	✗	A linearização realizada no trabalho transforma o modelo não-linear em um modelo de programação cônica de segunda ordem. Na metodologia é considerado a priorização de cargas e de chaves remotamente controladas e é utilizada a estratégia de uma subestação fictícia para auxiliar no controle da radialidade das soluções.
Wang e Chiang (2016)	PSO binário	✗	✗	É proposto um algoritmo binário baseado na otimização de enxame de partículas (PSO) que é dividido em três etapas. Na primeira etapa o algoritmo baseado em PSO binário é utilizado para encontrar um grupo de soluções de boa qualidade. A segunda etapa é caracterizada pela montagem de uma tabela categorizada a partir das preferências do operador da rede e na terceira etapa é realizada uma busca local.
Hafez et al. (2016)	Sistema multi-agente	✓	✗	É proposto um sistema multi-agente descentralizado composto por quatro tipos de agentes diferentes. Além dos tipos diferentes, a metodologia também conta com uma estratégia de agente reserva, que assume a posição daquele que está tomando as decisões quando necessário.

continua na próxima página

Tabela 1 – continuação da página anterior

Autores	Metodologia	Considera		Principal contribuição
		GD	Ilhamento	
Xu et al. (2016)	Busca exaustiva em grafos	✓	✓	É proposta uma metodologia com base em teoria dos grafos que é dividida em quatro etapas. A primeira etapa lista os caminhos de restauração possíveis. A segunda agrupa os caminhos e as cargas afins. A terceira resolve um problema de cobertura máxima que determina as cargas que serão restauradas. Na quarta etapa são determinadas quais são as operações de chaveamentos necessárias.
Gao et al. (2016)	Heurística híbrida	✓	✓	É proposta uma metodologia de duas etapas onde na primeira é feita uma busca exaustiva que lista todos os caminhos de restauração possíveis em uma tabela. Na segunda etapa é encontrada a melhor solução presente na tabela.
Koutsoukis et al. (2017)	PCSOIM	✗	✗	É proposto um modelo de programação cônica de segunda ordem inteira-mista que também considera a mudança de estado *tap* dos transformadores OLTC que podem ser instalados na rede.
Chen et al. (2017b)	PLIM	✓	✗	É proposto um modelo linear inteiro-misto que considera redes de distribuição trifásicas, desbalanceadas e com a presença de GD. Também é proposta uma estratégia de simplificação da rede chamada de *block-bus* que agrupa cargas que não possuem chaves entre si.
López et al. (2017)	PLIM	✓	✗	É proposto um modelo linear inteiro-misto que resolve de forma simultânea o problema de restauração e de sequenciamento de chaveamento ótimo para uma rede de distribuição trifásica e desbalanceada.
Chen et al. (2017a)	PLIM	✓	✓	É proposto um modelo linear inteiro-misto que resolve o problema de restauração e o de sequenciamento considerando presença de geradores distribuídos, formação de microrredes e sistemas de armazenamento de energia.
Souza et al. (2020)	PCSOIM	✗	✗	É proposto um modelo cônico de segunda ordem inteiro-misto que resolve o problema de restauração de redes de grande porte com a particularidade de apresentar um número reduzido de variáveis e sem realizar nenhuma espécie de simplificação na rede.

continua na próxima página

Tabela 1 – continuação da página anterior

Autores	Metodologia	Considera		Principal contribuição
		GD	Ilhamento	
Faria et al. (2021)	Algoritmo evolutivo	✓	✓	É proposto um algoritmo evolutivo multiobjetivo que utiliza da estratégia de tabelas de subpopulações e também da representação da rede de distribuição em grafos. O destaque principal do trabalho é um conjunto de restrições referentes ao funcionamento dos geradores distribuídos enquanto o funcionamento em ilhamento.
Macedo et al. (2021)	PLIM	✓	✓	É proposto um modelo de programação linear inteira-mista que considera a possibilidade de operação em ilhamento de geradores distribuídos, reguladores de tensão e banco de capacitores.
Vargas et al. (2021)	PCSOIM	✓	✓	É proposto um modelo de programação cônica de segunda ordem inteira-mista que considera o ilhamento de geradores distribuídos, reguladores de tensão e banco de capacitores. O destaque do trabalho é a possibilidade da rede de distribuição de operar de forma temporária com a formação de laços fechados.
Ferreira et al. (2019)	Aprendizado de máquinas	✗	✗	É proposto um método baseado em *machine learning* que trabalha de forma simultânea e centralizada para restauração e o remanejamento de cargas da rede de distribuição.
Kovački e Vidović (2022)	Otimização robusta	✓	✗	É proposta uma abordagem baseada em otimização robusta para o problema de restauração com a presença de GD. É feita uma simplificação na rede, agrupando cargas presentes na mesma área limitada pelas mesmas chaves.
Marques et al. (2017)	Algoritmo evolutivo	✗	✗	É proposto um algoritmo evolutivo multiobjetivo que une a estratégia de tabelas de subpopulação com a representação em grafos da rede de distribuição. A metodologia é composta por três etapas, na primeira é feito a preenchimento das tabelas de subpopulação, na segunda é feita a escolha da melhor solução e na terceira é resolvido um problema de sequenciamento.

Fonte: Elaboração do autor

1.4 Justificativa

O PRDSEE tem sido resolvido desde os anos de 1980 por pesquisadores com a ajuda das mais variadas metodologias existentes. O alto interesse na resolução do problema pela comunidade científica evidencia que o problema continua sendo uma linha de pesquisa ativa até os dias de hoje. Por se tratar de um problema combinatório de alta complexidade e dificuldade, a técnica de otimização escolhida para resolver o problema precisa ser muito bem planejada e executada. Conforme pode ser observado ao revisar a literatura e o estado da arte, algoritmos baseados em busca em vizinhança não são geralmente aplicados para resolver problemas de restauração. Isto acontece devido ao elevado número de soluções locais e de variáveis presentes no problema (SHEN et al., 2019; ZIDAN et al., 2016). Outra metodologia que não foi explorada como ferramenta de resolução do problema de restauração é a matheurística. Sua aplicação na engenharia elétrica começou recentemente e ainda não se têm aplicações para a área de restauração.

De forma a contribuir com metodologias que não foram muito bem exploradas na literatura, neste trabalho é proposta a aplicação de um algoritmo baseado em busca em vizinhança variável, um modelo matemático de PLIM e um algoritmo matheuristíco baseado em busca em vizinhança variável.

1.5 Objetivos da tese

O objetivo deste trabalho é fornecer algoritmos baseados em busca em vizinhança variável como ferramenta de resolução do problema de restabelecimento do fornecimento de energia em sistemas de distribuição. Para isso, os seguintes objetivos específicos foram estipulados:

- Propor um modelo de PLIM que resolva o problema de restauração de sistemas de grande e pequeno porte com um tempo de processamento aceitável.
- Realizar um estudo a respeito das meta-heurísticas que utilizam busca em vizinhança variável e elaborar um algoritmo baseado em tais meta-heurística que resolva o problema de restauração.
- Propor uma nova maneira de se tratar o problema de restauração ao utilizar abordagens meta-heurísticas, transformando o problema em um problema de reconfiguração que apresenta complexidade menor.
- Implementar a ideia de busca em vizinhança variável em um modelo matemático, propondo um algoritmo matheurístico que utilize da busca em vizinhança e que seja resolvido através de *solvers* comerciais.

- Avaliar a eficácia dos algoritmos propostos comparando-os entre si e com os resultados obtidos a partir da implementação de um modelo matemático conhecido na literatura.

1.6 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está divido em seis capítulos. O Capítulo 2 apresenta a modelagem matemática para o problema e também é apresentado um modelo de programação linear inteira-mista especializado na resolução do problema. No Capítulo 3 é apresentada a meta-heurística de busca em vizinhança variável (VNS) e também um algoritmo meta-heurístico proposto para o problema de restabelecimento. No Capítulo 4 é introduzido o conceito de algoritmos matheurísticos e é proposto um algoritmo matheurístico especializado para o problema de restauração. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de cada uma das metodologias propostas no trabalho e também é feita a comparação das metodologias entre si e a discussão dos resultados obtidos. Finalmente, no Capítulo 6 as conclusões finais do trabalho são apresentadas.

2 MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

A modelagem matemática do PRSDEE é discutida e analisada neste capítulo. A programação matemática é uma das ferramentas clássicas de otimização utilizadas para a resolução de problemas combinatórios. Na Seção 2.1 a modelagem do PRSDEE é discutida, assim como cada conjunto de restrições que compõe o modelo e também as linearizações feitas para que as restrições de natureza não-linear fossem aproximadas. Posteriormente, na seção 2.2 um modelo de PLIM completo é proposto para a resolução do problema de restauração.

2.1 Modelagem matemática do PRSDEE

O PRSDEE é um problema combinatorial complexo que pode ser considerado do tipo *NP-Hard*. Esse tipo de problema é caracterizado pelo alto grau de complexidade e pelo necessidade de um elevado esforço computacional para a resolução do problema (KHUSHALANI et al., 2007).

O problema de restauração pode ser modelado através de um modelo de PNLIM que está sujeito a dois conjuntos de restrições: operacionais e físicas. As restrições que compõem cada conjunto são apresentadas e analisadas nesta seção assim como o critério de otimização adotado neste trabalho.

2.1.1 Restrições do estado de operação do sistema de distribuição

Para a formulação do modelo matemático do PRSDEE foram utilizadas as restrições referentes ao estado de operação de uma rede de distribuição desbalanceada que considera a presença de geração distribuída propostas por Franco et al. (2015). Neste trabalho, as restrições são adaptadas para um sistema de distribuição monofásico e são apresentadas em (1)–(14).

$$I_i^{Sre} + I_i^{Gre} + \sum_{ki \in \Omega_L} I_{ki}^{re} - \sum_{ij \in \Omega_L} I_{ij}^{re} = I_i^{Dre} \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{1}$$

$$I_i^{Sim} + I_i^{Gim} + \sum_{ki \in \Omega_L} I_{ki}^{im} - \sum_{ij \in \Omega_L} I_{ij}^{im} = I_i^{Dim} \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{2}$$

$$P_i^D = V_i^{re} I_i^{Dre} + V_i^{im} I_i^{Dim} \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{3}$$

$$Q_i^D = -V_i^{re} I_i^{Dim} + V_i^{im} I_i^{Dre} \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{4}$$

$$V_i^{re} - V_j^{re} = R_{ij} I_{ij}^{re} - X_{ij} I_{ij}^{im} \qquad \forall ij \in \Omega_L \qquad (5)$$

$$V_i^{im} - V_j^{im} = X_{ij} I_{ij}^{re} + R_{ij} I_{ij}^{im} \qquad \forall ij \in \Omega_L \qquad (6)$$

$$(I_i^{Sre})^2 + (I_i^{Sim})^2 \leq (\bar{I}_i^S)^2 \qquad \forall i \in \Omega_N | i \in \Omega_S \qquad (7)$$

$$P_i^G \geq 0 \qquad \forall i \in \Omega_N | i \in \Omega_{GD} \qquad (8)$$

$$(P_i^G)^2 + (Q_i^G)^2 \leq (\bar{S}_i^G)^2 \qquad \forall i \in \Omega_N | i \in \Omega_{GD} \qquad (9)$$

$$\left| Q_i^G \right| \leq P_i^G \tan(\arccos(pf_i)) \qquad \forall i \in \Omega_N \qquad (10)$$

$$P_i^G = V_i^{re} I_i^{Gre} + V_i^{im} I_i^{Gim} \qquad \forall i \in \Omega_N \qquad (11)$$

$$Q_i^G = -V_i^{re} I_i^{Gim} + V_i^{im} I_i^{Gre} \qquad \forall i \in \Omega_N \qquad (12)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_i^{re2} + V_i^{im2} \leq \overline{V}^2 \qquad \forall i \in \Omega_N \qquad (13)$$

$$0 \leq I_{ij}^{re2} + I_{ij}^{im2} \leq \bar{I}_{ij}^2 \qquad \forall ij \in \Omega_L \qquad (14)$$

Nas restrições (1)–(14) existem quatro conjuntos: Ω_N, Ω_L, Ω_S e Ω_{GD}. O primeiro é o conjunto de barras presentes no sistema de distribuição e o segundo é o conjunto de circuitos reais. O terceiro e o quarto representam, respectivamente, o conjunto de barras com geração distribuída e o conjunto de barras de subestação.

Nas relações (1) e (2) é feito o balanço das partes real e imaginária da corrente no ramo ij. As variáveis contínuas I_i^{Gre} e I_i^{Gim} representam as partes real e imaginária da corrente gerada na barra i, respectivamente. De forma análoga, I_{ij}^{re} e I_{ij}^{im} representam as partes real e imaginária da corrente no ramo ij. As variáveis contínuas I_i^{Sre} e I_i^{Sim} representam as partes real e imaginária da injeção de corrente na barra de subestação i. As variáveis contínuas V_i^{im} e I_i^{Dim} são as partes imaginárias da magnitude de tensão e da demanda de corrente da carga na barra i, de forma respectiva. Analogamente, as variáveis V_i^{re} e I_i^{Dre} representam as partes reais destas variáveis.

As demandas de corrente, I_i^{Dre} e I_i^{Dim}, pelas cargas são determinadas nas relações (3) e (4). Os parâmetros P_i^D e Q_i^D fornecem a quantidade de demanda de potência ativa e reativa, respectivamente, da carga na barra i. As restrições (5) e (6) impõem as condições necessárias para cumprimento da segunda Lei de Kirchhoff (Lei de Kirchhoff para tensões) nos laços fundamentais do sistema de energia elétrica. Sendo que laço fundamental é o laço formado através da conexão das barras i e j à terra, uma vez que o circuito ij esteja ativo. Os parâmetros R_{ij} e X_{ij} representam, de forma respectiva, a resistência e a reatância referentes ao ramo ij. O cumprimento da primeira Lei de Kirchhoff (Lei de Kirchhoff para correntes) é imposto pela relações (1) e (2). A restrição (7) representa o limite de capacidade de corrente das subestações, em que o parâmetro $\bar{I}_i^S$ fornece o valor de capacidade da barra de subestação i.

Os limites de operação de GDs são representados pelas relações (8)–(10). As variáveis contínuas P_i^G e Q_i^G determinam a quantidade de potência ativa e reativa gerada na barra i, respectivamente. As equações (11) e (12), por sua vez, definem a potência ativa e reativa das GDs,

respectivamente.

Finalmente, as relações (13) e (14) definem, respectivamente, o limite da magnitude de tensão e o limite de corrente para cada circuito do sistema. Nas relações, os parâmetros $\underline{V}$ e $\overline{V}$ representam os limites de tensão mínimo e máximo permitidos na barra e, o parâmetro $\overline{I}_{ij}$, por sua vez, representa o limite de corrente permitido no circuito ij.

2.1.2 Linearização das restrições não-lineares

As relações (3), (4) e (11)–(14) são restrições não-lineares e a resolução de um modelo não-linear acaba se tornando inviável para o PRSDEE por se tratar de um problema que precisa ser resolvido o mais rápido possível. Por este motivo, a resolução de um modelo linearizado é mais atrativa e viável. Dessa forma, as linearizações e aproximações feitas para a eliminação da não-linearidade são expostas e comentadas nas subseções a seguir.

2.1.2.1 Linearização da demanda de corrente das cargas

Da mesma forma que foi feito por Franco et al. (2015) e López et al. (2017), as relações referentes a demanda de corrente das cargas (3) e (4) são linearizadas conforme apresentado em (15)–(18).

$$g(V_i^{re}, V_i^{im}) = \frac{P_i^D V_i^{re} + Q_i^D V_i^{im}}{(V_i^{re})^2 + (V_i^{im})^2} \qquad \forall i \in \Omega_N \qquad (15)$$

$$h(V_i^{re}, V_i^{im}) = \frac{P_i^D V_i^{im} - Q_i^D V_i^{re}}{(V_i^{re})^2 + (V_i^{im})^2} \qquad \forall i \in \Omega_N \qquad (16)$$

$$I_i^{D^{re}} \approx g^* + \frac{\partial g}{\partial V_i^{re}}\bigg|^* (V_i^{re} - V_i^{re*}) + \frac{\partial g}{\partial V_i^{im}}\bigg|^* (V_i^{im} - V_i^{im*}) \qquad \forall i \in \Omega_N \qquad (17)$$

$$I_i^{D^{im}} \approx h^* + \frac{\partial h}{\partial V_i^{re}}\bigg|^* (V_i^{re} - V_i^{re*}) + \frac{\partial h}{\partial V_i^{im}}\bigg|^* (V_i^{im} - V_i^{im*}) \qquad \forall i \in \Omega_N \qquad (18)$$

As restrições (17) e (18) representam as funções auxiliares obtidas do lado direito de (5) e (6). A linearização acontece através de uma aproximação baseada na expansão da série de Taylor nos pontos estimados para a parte real e imaginária das tensões nodais V_i^{re*} e V_i^{im*} e as relações (17) e (18) são os termos de primeira ordem da expansão. Dessa forma, as restrições linearizadas referentes a demanda de corrente real e imaginária das cargas são reescritas, respectivamente, como (19) e (20).

$$I_i^{D^{re}} = \frac{P_i^D V_i^{re*} + Q_i^D V_i^{im*}}{(V_i^{re*})^2 + (V_i^{im*})^2} + \frac{P_i^D((V_i^{im*})^2 - (V_i^{re*})^2) - 2Q_i^D V_i^{re*}(V_i^{im*})^2}{((V_i^{re*})^2 + (V_i^{im*})^2)^2}(V_i^{re} - V_i^{re*}) +$$

$$\frac{Q_i^D((V_i^{re*})^2-(V_i^{im*})^2)-2P_i^D V_i^{re*}(V_i^{im*})^2}{((V_i^{re*})^2+(V_i^{re*})^2)^2}(V_i^{im}-V_i^{im*}) \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{19}$$

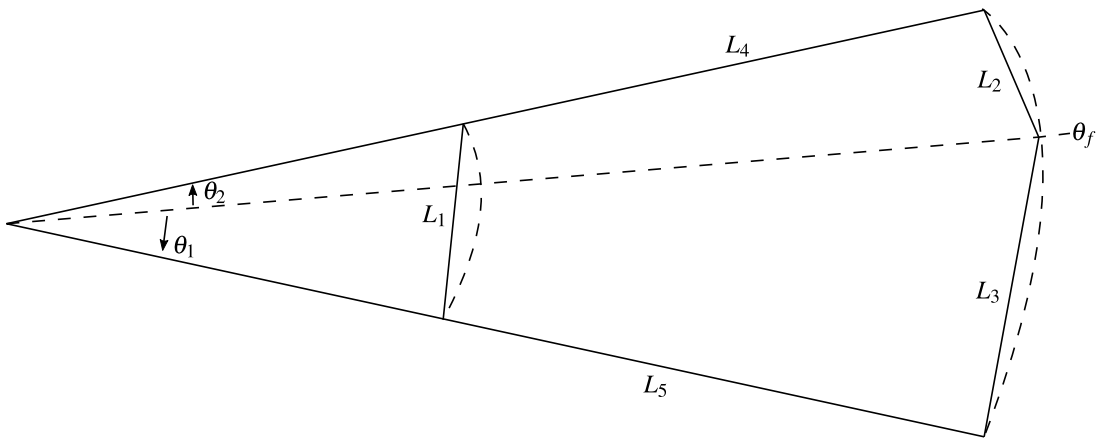
$$I_i^D = \frac{P_i^D V_i^{im*}-Q_i^D V_i^{re*}}{(V_i^{re*})^2+(V_i^{im*})^2}+\frac{Q_i^D((V_i^{re*})^2-(V_i^{im*})^2)-2P_i^D V_i^{re*}(V_i^{im*})^2}{((V_i^{re*})^2+(V_i^{im*})^2)^2}(V_i^{re}-V_i^{re*})+$$
$$\frac{P_i^D((V_i^{re*})^2-(V_i^{im*})^2)+2Q_i^D V_i^{re*}(V_i^{im*})^2}{((V_i^{re*})^2+(V_i^{re*})^2)^2}(V_i^{im}-V_i^{im*}) \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{20}$$

Essa aproximação possui um erro relativamente pequeno pois a magnitude de tensão em cada barra é limitado em um pequeno intervalo. Os valores estimados V_i^{re*} e V_i^{im*} podem ser selecionados através de um fluxo de carga inicial, utilizando o histórico de dados ou até mesmo por meio do conhecimento do operador do sistema de distribuição (SD).

2.1.2.2 Linearização da restrição de limite de tensão

A restrição que limita a magnitude de tensão nas barras também precisa ser linearizada. Para isso, é feita uma aproximação considerando que a variação angular em torno da tensão de referência em um SDEEE é pequena. Assim, a relação (13) é representada de forma linearizada, de acordo com a Figura 2, onde as relações (21)–(25) estão relacionadas às linhas L_1–L_5.

Figura 2 - Linearização da tensão



Fonte: Adaptado de Franco et al. (2015)

$$\underline{V}^{re} \leq V_i^{re} \leq \overline{V}^{re} \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{21}$$

$$\underline{V}^{im} \leq V_i^{im} \leq \overline{V}^{im} \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{22}$$

$$V_i^{im} \leq \frac{\text{sen}(\theta_2)-\text{sen}(-\theta_1)}{\cos(\theta_2)-\cos(-\theta_1)}(V_i^{re}-\underline{V}\cos(\theta_2))+\underline{V}\text{sen}(\theta_2) \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{23}$$

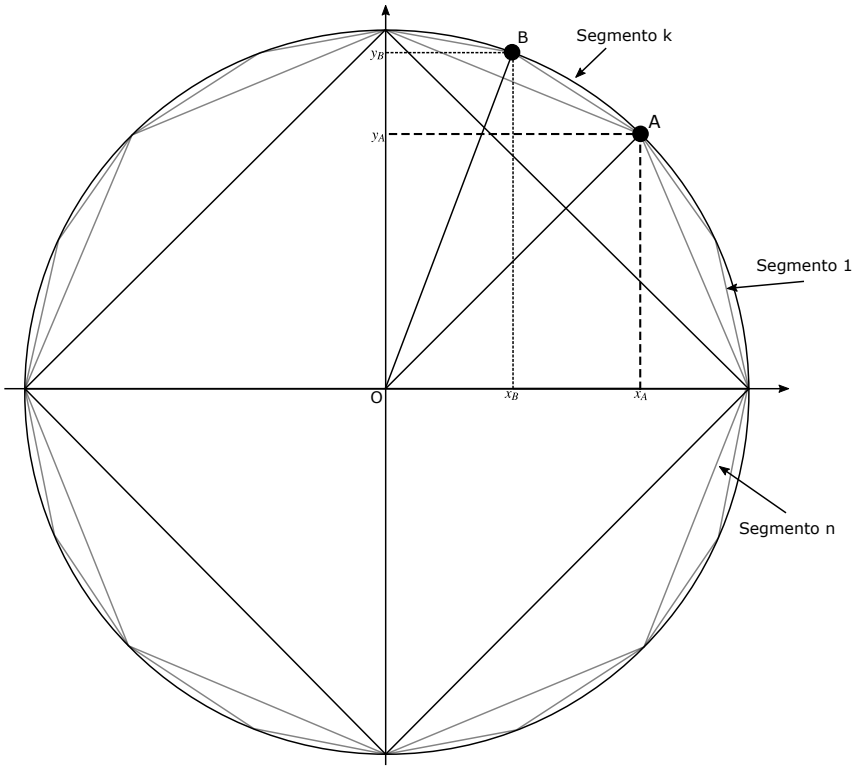
$$V_i^{im} \leq V_i^{re} \tan(\theta_2) \qquad \forall i \in \Omega_N \qquad (24)$$

$$V_i^{im} \geq V_i^{re} \tan(-\theta_1) \qquad \forall i \in \Omega_N \qquad (25)$$

2.1.2.3 Linearização da restrição de limite de corrente

Para a aproximação da restrição referente ao limite das correntes em cada ramo ij, a linearização apresentada em Akbari e Bina (2014) é utilizada. Dessa forma, de acordo com a Figura 3, o conjunto de restrições (26)–(30) é utilizado para a aproximação da relação (14).

Figura 3 - Linearização do limite de corrente nas linhas



Fonte: Adaptado de Akbari e Bina (2014)

$$I_{ij}^{re+} \leq \bar{I}_{ij} \qquad \forall ij \in \Omega_L \qquad (26)$$

$$I_{ij}^{re-} \leq \bar{I}_{ij} \qquad \forall ij \in \Omega_L \qquad (27)$$

$$I_{ij}^{im+} \leq \bar{I}_{ij} \qquad \forall ij \in \Omega_L \qquad (28)$$

$$I_{ij}^{im-} \leq \bar{I}_{ij} \qquad \forall ij \in \Omega_L \qquad (29)$$

$$\left[\text{sen}\left(\frac{2\pi k}{nl}\right) - \text{sen}\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](I_{ij}^{re+} + I_{ij}^{re-}) -$$

$$\left[\cos\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](I_{ij}^{im+}+I_{ij}^{im-})\leq \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{nl}\right)\bar{I}_{ij} \quad \forall ij\in\Omega_L, k\in[1,..,nl] \tag{30}$$

2.1.2.4 Linearização das restrições referentes a capacidade de geração da subestação e da GD

Para a aproximação da restrição referente ao limite de capacidade de geração da GD e das subestações, as relações não-lineares (9)–(12) são aproximadas pelo conjunto de relações (31)–(32).

$$\begin{aligned}&\left[\operatorname{sen}\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\operatorname{sen}\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](P_i^G)-\\&\left[\cos\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](Q_i^G)\leq \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{nl}\right)\bar{S}_i^G \quad \forall i\in\Omega_{GD}, k\in[1,..,nl]\end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}&\left[\operatorname{sen}\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\operatorname{sen}\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](I_i^{Sim})-\\&\left[\cos\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](I_i^{Sre})\leq \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{nl}\right)\bar{I}_i^S \quad \forall i\in\Omega_S, k\in[1,..,nl]\end{aligned} \tag{32}$$

Em ambas restrições, o parâmetro $\bar{S}_i^G$ fornece o limite de capacidade permitido de geração da barra i, enquanto que $\bar{I}_i^S$ representa a capacidade da subestação da barra i. Sendo que o limite capacitativo de geração das barras com GD é limitado na inequação (31) e o limite capacitativo das subestações, por sua vez, é limitado na relação relação (32).

2.1.3 Restrições topológicas do SDEE

Além do conjunto de restrições apresentados na Subseção 2.1.1 também é considerado na formulação do modelo matemático do PRSDEE um conjunto de restrições que impõem as condições necessárias para a operação do sistema. Essa operação geralmente acontece de forma radial e conexa. A topologia radial do sistema é comumente utilizada devido a simplificação de processos de proteção e manutenção. As restrições operacionais e topológicas utilizadas no modelo matemático foram adaptadas de Romero et al. (2016) e são apresentadas em (33)– (37).

$$\sum_{ji\,\in\,\Omega_L\,\cup\,\Omega_H} H_{ji}-\sum_{ij\,\in\,\Omega_L\,\cup\,\Omega_H} H_{ij}+H_i^G=y_i \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{33}$$

$$-|\Omega_L\cup\Omega_H|\,(x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-})\leq H_{ij} \qquad \forall ij\in\Omega_L\cup\Omega_H|i\neq S^f \tag{34}$$

$$0\leq H_{ij} \qquad \forall ij\in\Omega_L\cup\Omega_H|i=S^f \tag{35}$$

$$H_{ij}\leq|\Omega_L\cup\Omega_H|\,(x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-}) \qquad \forall ij\in\Omega_L \tag{36}$$

$$\left|y_i-y_j\right|\leq[1-(x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-})] \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{37}$$

Assim como é apresentado por Romero et al. (2016), neste trabalho também se utiliza de uma subestação fictícia conectada ao SDEE. A utilidade da subestação é fornecer geração artificial à parcela que ficou desenergizada e, dessa forma, aumentar o controle sobre a radialidade da parte que está sem fornecimento. Para toda barra i do sistema de distribuição é construído virtualmente um circuito que liga a barra i e a subestação fictícia S^f. O conjunto de circuitos fictícios presentes no sistema é representado por Ω_H. Inicialmente todos os ramos fictícios estão abertos, ou seja, com $x_{ij}^+ = x_{ij}^- = 0$. Sendo que x_{ij}^+ e x_{ij}^- são variáveis de decisão do problema referente ao estado operativo do circuito ij. Portanto, se o circuito ij está fechado, a soma $x_{ij}^+ + x_{ij}^-$ possui valor unitário. Separadamente, x_{ij}^- e x_{ij}^+ representam a direção do fluxo no circuito ij. Quando $x_{ij}^+ = 1$, o fluxo sai da barra i em direção da barra j e, quando $x_{ij}^- = 1$, o fluxo possui direção contrária, isto é, sai da barra j em direção a barra i. A variável y_i, por sua vez, é a variável de decisão do problema referente ao ato de energizar ou desenergizar a barra i, isto é, quando a barra i está desenergizada, y_i tem valor unitário, e quando a barra está energizada, y_i assume valor nulo.

A relação (33) garante que a geração artificial só pode acontecer na subestação fictícia S^f. As relações (34)–(36) limitam o fluxo artificial permitido no sistema, sendo que o total permitido é sempre igual ao número de barras presentes na parcela desenergizada. As relações (34) e (35) exigem que o fluxo artificial em circuitos abertos seja sempre nulo. Por último, a relação (37) auxilia no cálculo das variáveis de decisão (y_i , y_j, x_{ij}^+ e x_{ij}^-), uma vez que quando o circuito ij está aberto implica que y_i ou y_j possuem valor unitários, ou seja, pelo menos uma das barras está desenergizada.

2.1.3.1 Restrições de radialidade do SDEE

Na literatura especializada, a radialidade do sistema de distribuição é abordada de diversas formas, podendo ser imposta de forma implícita, isso é, a metodologia garante que uma topologia é radial realizando manipulações na mesma de uma forma que não interfira na radialidade. Porém, a radialidade também pode ser imposta de forma explicita através de um conjunto de restrições que, na resolução de um modelo matemático, garantem que a topologia de uma solução factível seja radial e conexa.

Na literatura, as primeiras propostas que utilizam da modelagem matemática para impor, de forma explícita, a restrição de radialidade do sistema de distribuição podem ser encontradas nos trabalhos de Lavorato et al. (2012) e Jabr et al. (2012).

Em Lavorato et al. (2012), os autores propõem uma formulação que impõe as condições necessárias que asseguram a operação radial do sistema de distribuição de energia elétrica. A mesma formulação é utilizada por Romero et al. (2016) e está exposta na relação (38).

$$\sum_{ij \in \Omega_L \cup \Omega_H} (x_{ij}^{+} + x_{ij}^{-}) = |\Omega_N| - n_s \tag{38}$$

Dessa forma, as restrições de balanço de potência juntamente com a relação (38) impõem as condições necessárias para que o SDEE seja radial e conexo. A restrição (38) por si só impõe que a quantidade de circuitos ativos no sistema seja sempre igual a diferença $|\Omega_N| - n_s$, em que $|\Omega_N|$ é o total de barras presentes no sistema e n_s o total de barras de subestações.

Outra formulação da restrição de radialidade foi proposta por Jabr et al. (2012) e uma adaptação da mesma para o PRSDEE é apresentada em (39)–(40).

$$\beta_{ij} + \beta_{ji} = x_{ij}^{+} + x_{ij}^{-} \qquad \forall ij \in \Omega_L \cup \Omega_H \tag{39}$$

$$\sum_{ij \in \Omega_{BBF}} \beta_{ij} = 1 \qquad \forall i \in \Omega_N | i \notin \Omega_S \tag{40}$$

$$\beta_{ij} = 0 \qquad \forall ij \in \Omega_L | i \in \Omega_S \tag{41}$$

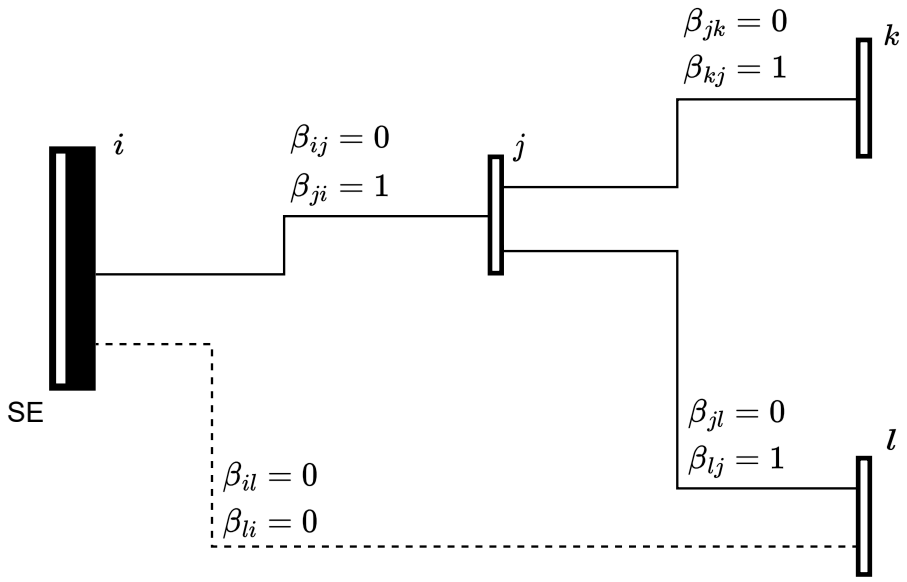
$$\beta_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall ij \in \Omega_{BBF} \tag{42}$$

Para essa formulação, o conjunto Ω_{BBF} é composto por todos circuitos ij e ji presentes no sistema de distribuição, ou seja, para o ramo hipotético 14-15 haverá valores da variável auxiliar $\beta_{i,j}$ tanto para $\beta_{14,15}$ quanto para $\beta_{15,14}$. De forma singular, a variável representa o sentido do fluxo no circuito, sendo assim se $\beta_{14,15} = 0$ então o fluxo nesse circuito é do sentido da barra 14 para a barra 15. A relação (42) impõe a natureza binária da variável auxiliar $\beta_{i,j}$. A relação (41) limita que em todas as barras de subestação o fluxo sempre saia da barra de subestação i em direção da barra de carga j, ou seja, $\beta_{i,j} = 0$. Na equação (40) é imposto que a somatória de todos os $\beta_{i,j}$ e $\beta_{j,i}$ associados a mesma barra i equivale a 1. De forma conjunta, as restrições (39)–(42), impossibilitam a formação de laços e juntamente com as restrições de balanço de potência impõem as condições necessárias para que a radialidade do SDEE seja garantida.

Para o melhor entendimento da formulação, a Figura 4 representa um sistema hipotético composto por 4 barras, sendo 3 barras de carga e uma barra de subestação, e 4 circuitos. A barra i é a barra de subestação e as barras j, k e l são barras de cargas. Na topologia desse sistema há quatro circuitos, sendo 3 fechados e 1 aberto. Os circuitos fechados são: ij, jl e jk. O único circuito aberto é il. Para essa topologia, a equação (41) implica que o valor de $\beta_{i,j}$ e de $\beta_{i,l}$ sejam nulo. Como o ramo ij está fechado, a equação (39) implica que $\beta_{i,j} + \beta_{j,i} = 1$, como $\beta_{i,j}$ possui valor nulo então $\beta_{j,i} = 1$. Por consequência, a restrição (40) implica que $\beta_{j,i} + \beta_{j,k} + \beta_{j,l} = 1$, ou seja, $\beta_{j,k} = \beta_{j,l} = 0$. De forma análoga para as barras k e l os valores de $\beta_{k,j}$ e $\beta_{l,j}$ são unitários. Como essa topologia não tem formação de laços, nenhuma das

restrições é violada.

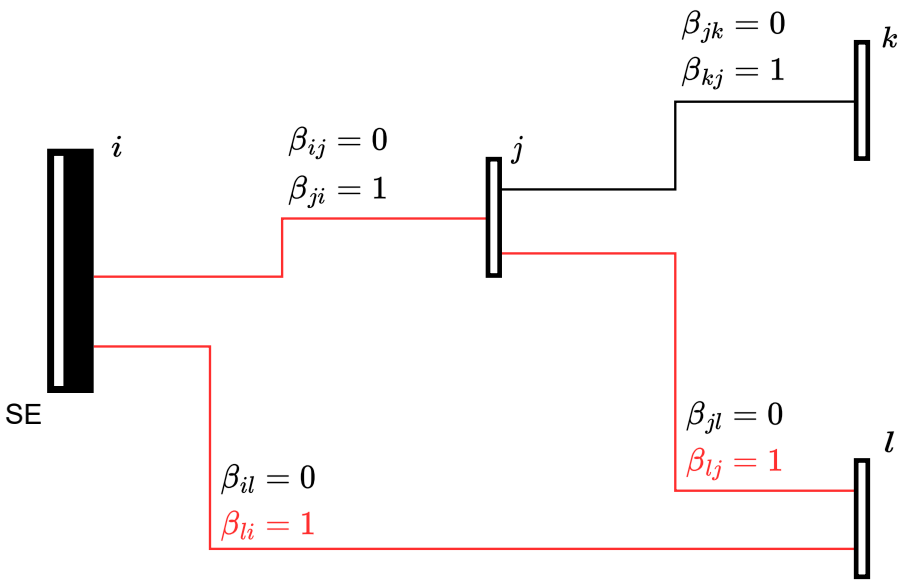
Figura 4 - Representação de uma topologia para a formulação de radialidade



Fonte: Elaboração do próprio autor

Para uma topologia com a presença de um laço, conforme pode ser observado na Figura 5, o fechamento do circuito *il* implica que $x_{il}^{+} + x_{il}^{-} = 1$. A restrição (39) por sua vez, implica que $\beta_{i,l} + \beta_{l,i} = 1$. Como o valor de $\beta_{i,l}$ é nulo devido a restrição (41) então, $\beta_{l,i} = 1$. Dessa forma a restrição (40) para a barra *l* diz que $\beta_{l,i} + \beta_{l,j,} = 1$ o que não está sendo respeitado, uma vez que $\beta_{l,i} = \beta_{l,j} = 1$.

Figura 5 - Representação de uma topologia com laço para a formulação de radialidade



Fonte: Elaboração do próprio autor

2.1.4 Função objetivo do modelo matemático

O critério de otimização comumente utilizado na literatura consiste em minimizar o corte de carga do sistema e, ao mesmo tempo, alterar minimamente a topologia da rede. Neste trabalho, a função objetivo adotada é uma soma ponderada dos três critérios de otimização adotados: a minimização do corte de carga, a minimização do número de operação de chaveamentos e a minimização do custo de operação da GD. O primeiro critério é de extrema importância para o problema de restauração pois, na maior parte dos casos, após o isolamento da falta permanente, uma parcela do sistema de distribuição fica sem o fornecimento de energia elétrica. O segundo critério de otimização também possui a sua importância pois cada operação de chaveamento no sistema de distribuição pode gerar ainda mais contingências e também aumentar o tempo em que a parcela fora-de-serviço permanece contingenciada. O terceiro critério também é importante, pois visa minimizar o custo de operação dos geradores distribuídos presentes no SD. A função objetivo é apresentada em (43).

$$\text{minimizar } v = \sum_{ij \in \Omega_A} \gamma_{ij}(x_{ij}^{+} + x_{ij}^{-}) + \sum_{ij \in \Omega_F} \lambda_{ij}(1 - (x_{ij}^{+} + x_{ij}^{-})) + \sum_{i \in \Omega_N} \alpha_i (P_i^D + Q_i^D) y_i + \sum_{i \in \Omega_{GD}} (P_{\Delta_i}^G + Q_{\Delta_i}^G) C_i^{op} \tag{43}$$

A primeira e a segunda parcela da soma ponderada compreendem o critério de otimização referente à minimização da alteração topológica da rede de distribuição. A terceira parcela é

referente à minimização do corte de carga. As variáveis de decisão x_{ij}^{+} e x_{ij}^{-} são binárias e indicam o estado operativo do ramo ij. Dessa forma quando $x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-}$ tem valor nulo quer dizer que o ramo ij está desconectado do sistema e, quando a soma tem valor unitário ($x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-}=1$) o ramo está conectado, isto é, a chave no ramo ij está fechada. Outra variável de decisão binária utilizada na função objetivo é a y_i, que representa a decisão de energizar ou desenergizar a barra i. O parâmetros γ e λ são os pesos associados aos custos de operação de abertura e fechamento da chave presente no ramo ij, respectivamente. O parâmetro α é o peso associado ao custo do corte da carga i. É valido ressaltar que quanto maior o peso, maior a prioridade da carga.

A quarta parcela da função objetivo é referente ao custo de operação de um gerador distribuído alocado na barra i, na somatória o conjunto Ω_{GD} é o conjunto de geradores distribuídos presentes no sistema. O custo de operação do gerador distribuído i é representado pelo parâmetro C_i^{op} enquanto os valores de potência ativa e reativa do gerador são representados pelas variáveis P_i^G e Q_i^G, respectivamente.

2.2 Proposta de modelo linear inteiro misto para o PRSDEE

Nesta seção o modelo de PLIM proposto para a resolução do PRSDEE é apresentado e discutido. Todas as linearizações apresentadas na seção anterior são utilizadas no modelo, assim como alguns conjuntos de restrições e também a função objetivo. Portanto, o modelo é composto pelas relações (44)– (85):

$$\text{minimizar} \qquad v=\sum_{(ij)\in\Omega_A}\gamma_{ij}(x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-})\;+\sum_{(ij)\in\Omega_F}\lambda_{ij}(1-(x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-}))+\sum_{i\in\Omega_N}\alpha_i(P_i^D+Q_i^D)y_i+\sum_{i\in\Omega_{GD}}(P_{\Delta_i}^G+Q_{\Delta_i}^G)\,C_i^{op} \tag{44}$$

$s.a:$

$$\sum_{ji\in\Omega_L}(I_{ji}^{re+}-I_{ji}^{re-})-\sum_{ij\in\Omega_L}(I_{ij}^{re+}-I_{ij}^{re-})+I_i^{S^{re}}+I_i^{G^{re}}=I_i^{D^{re}} \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{45}$$

$$\sum_{ji\in\Omega_L}(I_{ji}^{im+}-I_{ji}^{im-})-\sum_{ij\in\Omega_L}(I_{ij}^{im+}-I_{ij}^{im-})+I_i^{S^{im}}+I_i^{G^{im}}=I_i^{D^{im}} \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{46}$$

$$\left|\,\mathrm{I}_i^{D^{re}}-\frac{P_i^DV_i^{re*}+Q_i^DV_i^{im*}}{(V_i^{re*})^2+(V_i^{im*})^2}+\frac{P_i^D[(V_i^{im*})^2-(V_i^{re*})^2]-2Q_i^DV_i^{re*}V_i^{im*}}{[(V_i^{im*})^2+(V_i^{re*})^2]^2}(V_i^{re}-V_i^{re*})+\right.$$

$$+\frac{Q_i^D((V_i^{re*})^2-(V_i^{im*})^2)-2P_i^DV_i^{im*}V_i^{re*}}{[(V_i^{im*})^2+(V_i^{re*})^2]^2}(V_i^{im}-V_i^{im*})\Bigg| \leq My_i \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{47}$$

$$\Bigg|I_i^{D^{im}}-\frac{P_i^DV_i^{im*}+Q_i^DV_i^{re*}}{(V_i^{re*})^2+(V_i^{im*})^2}+\frac{Q_i^D((V_i^{re*})^2-(V_i^{im*})^2)-2P_i^DV_i^{re*}V_i^{im*}}{((V_i^{re*})^2+(V_i^{im*})^2)^2}(V_i^{re}-V_i^{re*})+$$
$$+\frac{P_i^D((V_i^{re*})^2-(V_i^{im*})^2)-2Q_i^DV_i^{re*}V_i^{im*}}{((V_i^{re*})^2+(V_i^{im*})^2)^2}(V_i^{im}-V_i^{im*})\Bigg| \leq My_i \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{48}$$

$$\left|I_i^{D^{re}}\right| \leq M(1-y_i) \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{49}$$

$$\left|I_i^{D^{im}}\right| \leq M(1-y_i) \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{50}$$

$$V_i^{re}-V_j^{re}+bl_{ij}^{re}=R_{ij}(I_{ij}^{re+}-I_{ij}^{re-})-X_{ij}(I_{ij}^{im+}-I_{ij}^{im-}) \qquad \forall (ij) \in \Omega_L \tag{51}$$

$$V_i^{im}-V_j^{im}+bl_{ij}^{im}=X_{ij}(I_{ij}^{re+}-I_{ij}^{re-})-R_{ij}(I_{ij}^{im+}-I_{ij}^{im-}) \qquad \forall (ij) \in \Omega_L \tag{52}$$

$$\left|bl_{ij}^{re}\right| \leq (\bar{V}^{re}-\underline{V}^{re})(1-(x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-})) \qquad \forall (ij) \in \Omega_l \tag{53}$$

$$\left|bl_{ij}^{im}\right| \leq (\bar{V}^{im}-\underline{V}^{im})(1-(x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-})) \qquad \forall (ij) \in \Omega_l \tag{54}$$

$$\underline{V}^{re} \leq V_i^{re} \leq \bar{V}^{re} \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{55}$$

$$\underline{V}^{im} \leq V_i^{im} \leq \bar{V}^{im} \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{56}$$

$$V_i^{im} \leq \frac{[(\text{sen}(\theta_2)-\text{sen}(-\theta_1)]}{\cos(\theta_2)-\cos-\theta_1}(V_i^{re}-\underline{V}\cos\theta_2)+\underline{V}\text{sen}\theta_2 \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{57}$$

$$V_i^{im} \leq V_i^{re}\tan(\theta_2) \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{58}$$

$$V_i^{im} \geq V_i^{re}\tan(-\theta_1) \qquad \forall i \in \Omega_N \tag{59}$$

$$I_{ij}^{re+} \leq \bar{I}_{ij}x_{ij}^{+} \qquad \forall (ij) \in \Omega_L \tag{60}$$

$$I_{ij}^{re-} \leq \bar{I}_{ij}x_{ij}^{-} \qquad \forall (ij) \in \Omega_L \tag{61}$$

$$I_{ij}^{im+} \leq \bar{I}_{ij}(x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-}) \qquad \forall (ij) \in \Omega_L \tag{62}$$

$$I_{ij}^{im-} \leq \bar{I}_{ij}(x_{ij}^{+}+x_{ij}^{-}) \qquad \forall (ij) \in \Omega_L \tag{63}$$

$$\left[\text{sen}\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\text{sen}\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](I_{ij}^{re+}+I_{ij}^{re-})-$$
$$\left[\cos\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](I_{ij}^{im+}+I_{ij}^{im-}) \leq \text{sen}\left(\frac{2\pi}{nl}\right)\bar{I}_{ij} \quad \forall (ij) \in \Omega_L, k \in [1,..,nl] \tag{64}$$

$$\left[\text{sen}\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\text{sen}\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](P_i^G)-$$
$$\left[\cos\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](Q_i^G)\leq \text{sen}\left(\frac{2\pi}{nl}\right)\bar{S}_i^G \qquad \forall i\in\Omega_{GD}, k\in[1,..,nl] \tag{65}$$

$$\left[\text{sen}\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\text{sen}\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](I_i^{Sim})-$$
$$\left[\cos\left(\frac{2\pi k}{nl}\right)-\cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{nl}\right)\right](I_i^{Sre})\leq \text{sen}\left(\frac{2\pi}{nl}\right)\bar{I}_i^S \qquad \forall i\in\Omega_S, k\in[1,..,nl] \tag{66}$$

$$P_i^G = V_i^{re*}I_i^{G^{re}}+V_i^{im*}I_i^{G^{im}} \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{67}$$

$$Q_i^G = -V_i^{re*}I_i^{G^{im}}+V_i^{im*}I_i^{G^{re}} \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{68}$$

$$-P_i^G\tan(\cos^{-1}(\underline{\sigma}_i))\leq\left|Q_i^G\right|\leq -P_i^G\tan(\cos^{-1}(\bar{\sigma}_i)) \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{69}$$

$$\left|P_i^G-P_{0_i}^G\right|\leq P_{\Delta_i}^G \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{70}$$

$$\left|Q_i^G-Q_{0_i}^G\right|\leq Q_{\Delta_i}^G \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{71}$$

$$\sum_{ji\in\Omega_L} fe_{ji}-\sum_{ij\in\Omega_L} fe_{ij}+fge_i = x_i^G(1-y_i) \qquad \forall i\in N|i\notin S^f \tag{72}$$

$$\left|fe_{ij}\right|\leq(x_{ij}^+ + x_{ij}^-)\left|\Omega_L\right| \qquad \forall(ij)\in\Omega_L \tag{73}$$

$$\sum_{ji\in\Omega_L\cup\Omega_H} H_{ji}-\sum_{ij\in\Omega_L\cup\Omega_H} H_{ij}+H_i^G = y_i \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{74}$$

$$\left|H_{ij}\right|\leq|\Omega_L\cup\Omega_H|(x_{ij}^+ + x_{ij}^-) \qquad \forall(ij)\in\Omega_L\cup\Omega_H|i\notin S^f \tag{75}$$

$$0\leq H_{ij} \qquad \forall(ij)\in\Omega_L\cup\Omega_H|i\in S^f \tag{76}$$

$$\left|y_i-y_j\right|\leq(1-(x_{ij}^+ + x_{ij}^-)) \qquad \forall(ij)\in\Omega_L \tag{77}$$

$$x_{ij} = x_{ij}^+ + x_{ij}^- \qquad \forall(ij)\in\Omega_L\cup\Omega_H \tag{78}$$

$$x_{ij}^+ + x_{ij}^-\leq 1 \qquad \forall(ij)\ \in\ \Omega_L \tag{79}$$

$$\beta_{ij}+\beta_{ji} = (x_{ij}^+ + x_{ij}^-) \qquad \forall ij\in\Omega_L\cup\Omega_H \tag{80}$$

$$\sum_{ij\in\Omega_{BBF}}\beta_{ij} = 1 \qquad \forall i\in\Omega_N|i\notin\Omega_S \tag{81}$$

$$\beta_{ij} = 0 \qquad \forall ij\in\Omega_L|i\in\Omega_S \tag{82}$$

$$\beta_{ij}\in\{0,1\} \qquad \forall ij\in\Omega_{BBF} \tag{83}$$

$$y_i\ \in\ \{0,1\} \qquad \forall i\in\Omega_N \tag{84}$$

$$x_{ij}^+, x_{ij}^-\ \in\ \{0,1\} \qquad \forall ij\in\Omega_L\cup\Omega_H \tag{85}$$

A função objetivo adotada no modelo é uma soma ponderada composta por dois critérios de otimização e é representada pela relação matemática (44). O balanço das partes reais e

imaginárias da corrente no ramo ij é feito nas igualdades (45) e (46). A demanda da corrente pelas cargas ($I_i^{D^{re}}$ e $I_i^{D^{im}}$) é imposta pelas restrições (47) e (48). As relações (49) e (50) limitam que as partes reais e imaginárias da corrente demandada pela barra i sejam nulas quando a barra estiver desenergizada, isto é, $I_i^{D^{re}}$ e $I_i^{D^{im}}$ possuem o valor nulo quando $y_i = 1$.

As condições necessárias para o cumprimento da primeira Lei de Kirchhoff são impostas pelas relações (45) e (46). A segunda Lei, por sua vez, é imposta para cada laço fundamental do sistema de distribuição pelas restrições (51) e (52). A queda de tensão nos ramos é representada também pelas equações (51) e (52). As relações (53) e (54) atuam como restrições auxiliares e possuem a função de fornecer o valor necessário de bl_{ij}^{re} e bl_{ij}^{im} para as restrições (51) e (52) quando o ramo ij possui uma chave aberta, ou seja, quando $x_{ij}^{+} = x_{ij}^{-} = 0$.

A magnitude de tensão nas barras é imposta pelas relações linearizadas (55)–(59). O limite de corrente em cada ramo ij do sistema de distribuição é imposto pelas relações (60)–(64). As relações (65) e (66), por sua vez, impõe o limite capacitativo de geração da GD e da subestação.

O conjunto de restrições composto por (67)–(73) determina os valores de geração dos geradores distribuídos e também impõe as restrições operacionais dos mesmos. As equações (67) e (68) definem a injeção de potência ativa e reativa na barra com GD i. Em (69) é feita a limitação de geração dos geradores com base nos valores de fator de potência indutivo e capacitativo de cada gerador. As variáveis contínuas P_i^G e Q_i^G representam, respectivamente, a geração de potência ativa e reativa do gerador distribuído na barra i. Os fatores de potência indutivo e capacitivo são dados pelos parâmetros $\underline{\sigma_i}$ e $\bar{\sigma}_i$, de forma respectiva. As inequações (70) e (71) realizam o cálculo da variação de geração de potência ativa e reativa pela GD, respectivamente. Os parâmetros $P_{0_i}^G$ e $Q_{0_i}^G$ representam os valores iniciais de geração de potência ativa e reativa pela GD. As variáveis contínuas $P_{\Delta_i}^G$ e $Q_{\Delta_i}^G$ representam a variação da geração de potência pela GD. Na equação (72) é feito o balanço de um fluxo artificial para cada *microgrid* existente no sistema. A variável auxiliar fe_{ij} é o fluxo artificial do circuito ij, a variável auxiliar fg_i representa a quantidade de fluxo artificial gerado no gerador distribuído i e x_i^G é um parâmetro que informa se o gerador distribuído presente na barra i pode operar de forma ilhada. Portanto, se a barra i for desconectada do sistema ($y_i = 1$ e possuir um gerador distribuído que possa operar de forma ilhada ($x_i^G = 1$) então $fg_i = 1$. Na relação (72) o valor do fluxo artificial fe_{ij} é associado com os valores das variáveis de decisão do ramo ij.

O conjunto de relações matemáticas formado por (74)–(79) são restrições que garantem que a rede será separada em uma parcela energizada e uma desenergizada. Na equação (74) é feito o balanço de fluxo artificial do sistema. O máximo de fluxo artificial no ramo ij é limitado pela relação (75) nas barras de carga e, no caso das barras de subestação, o fluxo é limitado ao valor nulo pela relação (76). Nas relações (77)–(79) os valores das variáveis de decisão são associados entre si, o que facilita no cálculo das mesmas. A inequação (77) condiciona o valor das variáveis x_{ij}^{+} e x_{ij}^{-} aos valores de y_i e y_j. Portanto se em um circuito ij a barra i se encontra

energizada e a barra j desenergizada, então, através de (77), o valor de $x_{ij}^{+} + x_{ij}^{-}$ não pode ser unitário o que implica que a chave presente no ramo ij está aberta ($x_{ij}^{+} = x_{ij}^{-} = 0$).

As relações (45), (46) e (80)-(83) impõem as condições necessárias para que o sistema de distribuição seja conexo e radial. As equações (80) e (81) associam as variáveis de decisão x_{ij}^{+} e x_{ij}^{-} com o parâmetro β_{ij} que, por sua vez, auxilia a evitar a formação de laços. A equação (82) fixa o valor de β_{ij} em 0 para todos os circuitos presentes na saída da subestação. A equação (83) impõe a natureza binária da variável auxiliar β_{ij}.

Por fim, as relações (84) e (85) impõe que as variáveis de decisão y_i, x_{ij}^{+} e x_{ij}^{-} possuem natureza binária.

3 META-HEURÍSTICA DE BUSCA EM VIZINHANÇA ESPECIALIZADA NA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A meta-heurística de busca em vizinhança variável é estudada, analisada, implementada e discutida neste capítulo. Na Seção 3.1 a meta-heurística VNS é apresentada, tais como as suas variações existentes. Na Seção 3.2 a meta-heurística VND é implementada como metodologia de resolução do problema de restauração de redes de distribuição radiais e a sua estrutura é discutida.

3.1 Introdução sobre VNS

A meta-heurística VNS é caracterizada pela mudança sistemática de vizinhança aliada a uma estratégia de busca local na mesma. Essa meta-heurística foi proposta por Mladenović e Hansen (1997) e possui um grande número de variações e extensões que serão discutidas nas próximas subseções. A ideia principal do VNS baseia-se em duas estratégias: como a variação da vizinhança vai acontecer e como será feita a busca local nessa vizinhança. Essas estratégias estão fundamentalmente relacionadas a três fatos levantados pelos autores:

i. **Fato 1:** Um ótimo local relacionado a uma determinada estrutura de vizinhança não necessariamente é o mesmo ótimo local de outra estrutura de vizinhança;

ii. **Fato 2:** Um ótimo global é também um ótimo local para todas as estruturas de vizinhanças possíveis;

iii. **Fato 3:** Para muitos problemas, ótimos locais relacionados a uma ou várias estruturas de vizinhanças são relativamente próximos um dos outros.

O último fato, de forma empírica, implica que um ótimo local geralmente fornece informações valiosas sobre um ótimo global. Isto é, algumas variáveis podem possuir o mesmo valor em ambos os ótimos, porém é desconhecido quais são essas variáveis. Para resolver um problema combinatório pode-se utilizar os fatos mencionados e a ideia principal do VNS em três diferentes estratégias: (a) determinística, (b) estocástica e (c) determinística e estocástica. Portanto, quatro algoritmos de VNS baseados nessas estratégias mencionadas são propostos e discutidos nas próximas subseções.

3.1.1 Algoritmo VNS de descida

A meta-heurística de busca em vizinhança variável de descida é obtida ao adotar uma estratégia determinística aliada às principais características do VNS: a variação das estruturas de vizinhança e a busca local a ser realizada nessas estruturas de vizinhança. O algoritmo de descida faz uma busca determinística através da vizinhança da solução corrente e, só passa para o próximo nível de vizinhança, caso não tenha encontrado uma solução vizinha de melhor qualidade no nível atual. Dessa forma, o VND consiste em escolher uma solução inicial x, encontrar o melhor vizinho de x pertencente a estrutura de vizinhança $N(x)$ e mover para esse vizinho caso cumpra com a condição escolhida. A estrutura básica do VND proposta por Hansen et al. (2001) é exposta na Figura 6.

Figura 6 - Estrutura básica do algoritmo VND

Inicialização: Selecione um conjunto de estruturas de vizinhanças N_j, com $j = 1, ..., j_{max}$, que será utilizado na descida; encontre uma solução inicial x;

Repita os seguintes passos até que nenhuma melhoria na solução seja obtida:
(1) Faça $j \leftarrow 1$;
(2) **Repita** os seguintes passos até que $j = j_{max}$;
(a) Exploração da estrutura de vizinhança: encontre a melhor solução vizinha x' da solução corrente x ($x' \in N_j(x)$);
(b) Mover ou não: se a solução vizinha x' for melhor que x, faça $x \leftarrow x'$ e $j \leftarrow 1$, em caso contrário, faça $j \leftarrow j + 1$;

Fonte: Adaptado de Hansen e Mladenovic (2003)

Ao se aplicar a estrutura básica de um algoritmo VND é necessário discutir as seguintes perguntas:

i. Qual a complexidade que os diferentes tipos de movimentos possuem?

ii. Qual é a melhor ordem para aplicá-los?

iii. Os movimentos considerados são suficientes para garantir a exploração completa da região que contém x?

iv. O quão precisa é a solução desejada?

A questão (i) refere-se à seleção e ao ranqueamento dos movimentos: se o tipo de movimento envolver uma troca de muitos elementos (por exemplo alterando três componentes ou

mais de um vetor binário), então a heurística resultante pode ficar lenta e levar o mesmo tempo de resolução que um algoritmo exato para resolver problemas de porte pequeno ou médio.

A questão (ii) também refere-se a relação entre o tempo computacional e a qualidade das soluções obtidas. Uma implementação muito utilizada consiste em ordenar os movimentos por complexidade, dando prioridade para os movimentos com um grau de complexidade menor e assim prosseguindo para os mais complexos. Os tipos de movimentos diferentes dependem do número de vizinhanças adotado e geralmente sempre que um passo é dado, retorna-se ao primeiro tipo de movimento.

A questão (iii) é um ponto crucial a ser analisado: para alguns problemas elementares, os movimentos não são suficientes para escapar de um ótimo local e heurísticas utilizando esses movimentos podem encontrar apenas resultados de baixa qualidade.

Finalmente, na questão (iv) a precisão da solução é almejada e, a mesma, depende se a meta-heurística VND irá ser utilizada sozinha ou integrada à uma outra meta-heurística. No primeiro caso, será encontrada a melhor solução possível sob o tempo máximo de execução escolhido. Já no segundo caso, uma boa solução pode ser encontrada com o VND e depois uma melhoria nessa solução é feita.

3.1.2 VNS reduzida (RVNS)

Uma vez que é encontrado um mínimo local de x, deseja-se sair da região do mínimo e encontrar um outro ainda menor. Sendo assim, surge os seguintes questionamentos:

i. Em qual direção prosseguir?

ii. Quão longe deve-se prosseguir?

iii. Como alterar os movimentos uma vez que eles não produzem resultados de boa qualidade?

A primeira questão, (i), é referente a possibilidade de alcançar qualquer ponto factível $x \in X$, ou mínimo local. A solução mais simples para essa pergunta é a escolha aleatória de uma direção. Isto é, escolher de maneira aleatória um ponto qualquer pertencente às proximidades do ponto x.

A questão (ii) é crucial e está relacionada ao *Fato 2* comentado no início da sessão, isto é, em vários problemas de otimização combinatorial, é comum que um ótimo local tende a estar próximo de um outro ótimo local. Dessa forma, assim que um ótimo local é encontrado, sua solução pode conter informações valiosas sobre outros ótimos locais ou até mesmo sobre um ótimo global, portanto é natural que explore-se a vizinhança dessa solução. Entretanto,

se a região em volta do ótimo local for muito grande, a busca por uma solução melhor pode não encontrar nada e uma forma de contornar esse problema é a resposta para a questão (iii): continuar procurando em regiões ainda maiores.

Todos esses objetivos são atendidos pelo algoritmo de busca em vizinhança reduzida (RVNS) e sua estrutura básica é exposta na Figura 7. Considere um conjunto de estruturas de vizinhança $N_1(x), N_2(x), ..., N_{jmax}(x)$ centrado na solução corrente x (que pode ou não ser um ótimo local). Geralmente, essas estruturas de vizinhanças vão estar aninhadas, isto é, cada estrutura de vizinhança contém a anterior. Sendo assim um ponto é escolhido randomicamente na primeira estrutura de vizinhança. Se o valor dessa solução vizinha for melhor que o valor da incumbente, a busca é centralizada na solução vizinha ($x \leftarrow x'$). Em caso contrário, a busca procede para a próxima estrutura de vizinhança ($j \leftarrow j+1$). Esse processo iterativo é repetido até que o critério de parada seja cumprido (o que geralmente é o número máximo de iterações).

Figura 7 - Estrutura básica do algoritmo RVNS

Inicialização: Selecione um conjunto de estruturas de vizinhanças N_j, com $j = 1, ..., j_{max}$, que será utilizado na busca; encontre uma solução inicial x; escolha um critério de parada;

Repita os seguintes passos até que o critério de parada seja cumprido:
(1) Faça $j \leftarrow 1$;
(2) **Repita** os seguintes passos até que $j = j_{max}$;
(a) Agitação: Gere randomicamente um ponto x' pertencente à j-ésima estrutura de vizinhança de x ($x' \in N_j(x)$);
(b) Mover ou não: se a solução vizinha x' for melhor que a incumbente, mova ($x \leftarrow x'$) e continue a busca em $N_1(j \leftarrow 1)$; em caso contrário, faça $j \leftarrow j+1$;

Fonte: Adaptado de Hansen e Mladenovic (2003)

3.1.3 VNS básico (BVNS)

A versão básica do algoritmo de busca em vizinhança variável (BVNS) é obtida ao combinar uma busca local com a mudança sistemática de estruturas de vizinhanças. Um esquema básico do algoritmo BVNS é exposto na Figura 8. Considere um conjunto de estruturas de vizinhança $N_1(x), N_2(x), ..., N_{jmax}(x)$. Uma solução vizinha é escolhida aleatoriamente na primeira vizinhança N_1, então uma busca local em torno dessa solução é realizada e um ótimo local x'' é encontrado. Se o ótimo local x'' for melhor que a incumbente x, a busca é centralizada em x'' e prossegue, caso contrário $k \leftarrow k+1$.

Figura 8 - Estrutura básica do algoritmo BVNS

Inicialização: Selecione um conjunto de estruturas de vizinhanças N_j, com $j = 1, ..., j_{max}$, que será utilizado na busca; encontre uma solução inicial x; escolha um critério de parada;

Repita os seguintes passos até que o critério de parada seja cumprido:

(1) Faça $j \leftarrow 1$;

(2) **Repita** os seguintes passos até que $j = j_{max}$;

(a) Agitação: Gere randomicamente um ponto x' pertencente à j-ésima estrutura de vizinhança de x ($x' \in N_j(x)$);

(a) Busca local: Aplique um método de busca local com x' de solução inicial; denote como x'' o ótimo local encontrado;

(b) Mover ou não: se o ótimo local x'' for melhor que a incumbente x, mova ($x \leftarrow x''$) e continue a busca em $N_1(j \leftarrow 1)$; em caso contrário, faça $j \leftarrow j + 1$;

Fonte: Adaptado de Hansen e Mladenovic (2003)

3.1.4 VNS generalizado (GVNS)

A meta-heurística de busca em vizinhança variável generalizada (GVNS) une os três algoritmos discutidos anteriormente. A busca local do GVNS é substituída pelo VNS de descida e a solução inicial é encontrada pelo RVNS. Um esquema básico de GVNS é exposto na Figura 9.

Figura 9 - Estrutura básica do algoritmo GVNS

Inicialização: Selecione um conjunto de estruturas de vizinhanças N_k, com $k = 1, ..., k_{max}$, que será utilizado na fase de agitação; defina um conjunto de estruturas de vizinhanças N_l, com $l = 1, ..., l_{max}$ que será utilizado na busca local; encontre uma solução inicial x e melhore-a utilizando o algoritmo RVNS; defina um critério de parada;

Repita os seguintes passos até que o critério de parada seja cumprido:

(1) Faça $k \leftarrow 1$;

(2) **Repita** os seguintes passos até que $k = k_{max}$;

(a) Agitação: Gere randomicamente um ponto x' pertencente à k-ésima estrutura de vizinhança de x ($x' \in N_k(x)$);

(b) Busca local do VND:

(b1) Faça $l \leftarrow 1$;

(b2) Repita os seguintes passos até que $l = l_{max}$];

. *Exploração da vizinhança:* Encontre o melhor vizinho x'' de x' em $N_l(x')$;

. *Mova ou não:* Se $f(x'') < f(x')$ faça $x' \leftarrow x''$ e $l \leftarrow 1$; se não, faça $l \leftarrow l + 1$;

(c) Mover ou não: se o ótimo local for melhor que a incumbente, mova ($x \leftarrow x''$) e continue a busca em $N_1(k \leftarrow 1)$; em caso contrário, faça $k \leftarrow k + 1$;

Fonte: Adaptado de Hansen e Mladenovic (2003)

Vários questionamentos precisam ser levantados sobre como realizar a seleção das estruturas de vizinhanças são apresentados a seguir.

i. Quais propriedades das estruturas de vizinhança são imprescindíveis para que o esquema resultante seja apto a encontrar uma solução ótima ou quase-ótima?

ii. Quais propriedades das estruturas de vizinhança são úteis na busca por uma solução quase-ótima?

iii. As estruturas de vizinhanças devem conter uma às outras? Em caso contrário, como elas deveriam estar ordenadas?

iv. Quais são as propriedades desejáveis a respeito do tamanho das estruturas de vizinhanças?

As duas primeiras questões são referentes a habilidade da meta-heurística VNS de encontrar os melhores vales, e de fazer isso de maneira rápida (EZUGWU et al., 2022). Para evitar que a busca por um ótimo global seja bloqueada pelos vales mais profundos, a união de todas as estruturas de vizinhança em torno de uma solução factível x deve conter todo o conjunto de soluções factíveis, conforme exposto em (86):

$$X \subseteq N_1(x) \cup N_2(x) \cup \cdots \cup N_{k_{max}}(x), \forall x \in X. \tag{86}$$

Esses conjuntos devem cobrir X completamente sem necessariamente particioná-lo, o que é mais fácil de implementar, por exemplo, ao utilizar estruturas de vizinhas aninhadas, como pode ser observado em (87):

$$N_1(x) \subseteq N_2(x) \subseteq \cdots \subseteq N_{k_{max}}(x), \forall x \in X. \tag{87}$$

Se essas propriedades não são asseguradas, não se pode garantir que a busca explore X por completo.

As estruturas de vizinhança são fáceis de serem obtidas para vários problemas combinatoriais ao definir a primeira estrutura de vizinhança $N_1(x)$ por um tipo de movimento, e em seguida, iterar esse movimento k vezes para obter a estrutura de vizinhança $N_k(x)$ para $k = 2, ..., k_{max}$. Esse tipo de estrutura de vizinhança faz com que o tamanho das vizinhanças cresça de maneira gradativa e com que as primeiras vizinhanças sempre sejam exploradas completamente. Essa exploração é desejada considerando o *Fato 3* comentado anteriormente, uma vez que um ótimo local tenda a estar próximo de outro ótimo local.

Restringir todos os movimentos possíveis ao conjunto factível X pode ser muito restritivo, principalmente se o conjunto for desconexo. Muitas vezes os movimentos podem levar a soluções infactíveis. Uma forma de contornar essa dificuldade é penalizar as infactibilidades na função objetivo.

3.2 Implementação da meta-heurística VND no PRSDEE

Nesta seção é discutida a proposta de um algoritmo de VND especializado para o PRSDEE. A metodologia proposta é uma adaptação do algoritmo de busca em vizinhança proposto por Possagnolo (2015) para a resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. Todas as adaptações realizadas na metodologia são expostas e discutidas.

Tanto o problema de restauração quanto o de reconfiguração alteram a topologia do sistema de distribuição almejando satisfazer um objetivo. Partindo desse pensamento inicial, o algoritmo VND proposto para a reconfiguração pode ser adaptado e utilizado como ferramenta de resolução de um problema de reconfiguração topológica do sistema de distribuição em estado restaurativo. Para que isso aconteça, algumas adaptações na metodologia e na rede de distribuição precisam ser feitas. A grande diferença entre os dois problemas está na presença de cargas desconectadas que necessitam ser restauradas através da alteração topológica da rede. Divergindo-se da reconfiguração, a restauração nem sempre trabalha com todas as barras do sistema de distribuição conectadas, a ocorrência de uma falta permanente no sistema de distribuição pode ocasionar no corte de grandes quantidades de barras que antes estavam conectadas. É nesse cenário que o problema de restauração acontece.

3.2.1 Função objetivo e restrições operacionais

A função objetivo utilizada para avaliar a qualidade das propostas de solução é a mesma soma ponderada presente na equação (43) do modelo matemático apresentado no Capítulo 2. Nesta equação, a primeira e a segunda parcela da soma são referentes ao primeiro critério de otimização considerado, i.e., a minimização do número de chaveamentos necessários para que a restauração do sistema de distribuição aconteça. Os parâmetros β e μ referem-se, respectivamente, ao custo de manobra de chaves normalmente abertas e normalmente fechadas. A variável $x_{i,j}$ é referente a decisão de fechar ou abrir a chave presente no circuito ij. A terceira parcela da soma ponderada, por sua vez, refere-se ao segundo critério de otimização adotado, a minimização do corte de carga. O parâmetro α é o peso referente ao custo de se cortar o fornecimento de energia de uma barra.

O funcionamento do sistema de distribuição de energia elétrica está condicionado ao cumprimento de restrições topológicas e de operação do sistema. As restrições referentes ao balanço de potência ativa e reativa são satisfeitas através do uso de um algoritmo de fluxo de carga radial. Entretanto, as restrições referentes ao limite de tensão nas barras e de corrente máxima nos ramos são penalizadas na função objetivo, com o intuito de tornar soluções infactíveis não atrativas. A equação (88) mostra a função objetivo penalizada:

$$\text{minimizar } v' = v + \lambda \left(\sum_{i \in \Omega_b} \gamma_i (\underline{V}_i - \bar{V}_i) + \sum_{i,j \in \Omega_l} \tau_{i,j} (I_{i,j} - \bar{I}_{i,j}) \right) \tag{88}$$

Em (88), λ é o fator de penalização, que deve ser grande o suficiente para tornar as soluções infactíveis menos atrativas; γ_i tem valor 0 se a tensão em uma barra i do sistema não estiver violando o limite inferior e vale 1 em caso contrário; $\tau_{i,j}$ tem valor 0 se a corrente em um ramo ij do sistema, não estiver violando o limite superior e vale 1 em caso contrário. O limite de tensão superior não é verificado, pois a maior tensão no sistema de distribuição será a da subestação, a qual é conhecida. Para casos em que exista a presença de geração distribuída no sistema, o limite de tensão superior deve ser verificado.

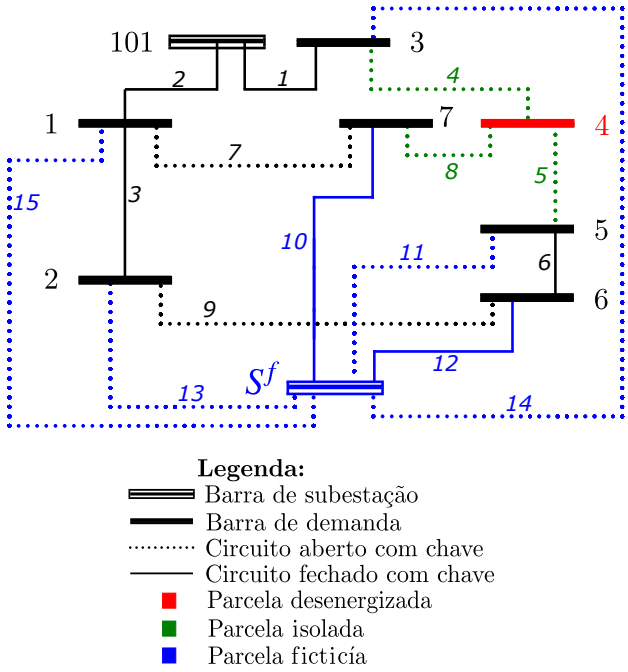
3.2.2 Representação de uma proposta de solução

A representação utilizada para a resolução do PRSDEE manteve-se igual a que foi utilizada pelo algoritmo VND proposto por Possagnolo (2015). Sendo assim, a representação é composta por um vetor de tamanho n que carrega informações sobre todos os ramos abertos no sistema de distribuição. Para o PRSDEE, o comprimento do vetor de solução continua sendo igual ao número de ramos abertos presentes no sistema de distribuição. Essa estratégia de representação auxilia na preservação da radialidade da rede, uma vez que durante todo o processo iterativo

do algoritmo, o número de ramos abertos será o mesmo, isto é, será equivalente ao número de ramos de ligação presentes no sistema de distribuição, dificultando a formação de laços.

Considere um sistema de distribuição hipotético com 7 barras de carga e uma subestação, como pode ser observado na Figura 10. Dessa forma, a topologia do sistema possui os seguintes ramos abertos: 4, 5, 8, 7, 9, 11, 13, 14 e 15. Sendo assim, a representação da proposta de solução para esse topologia é apresentada na Figura 11.

Figura 10 - Sistema de distribuição de 7 barras



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 11 - Representação da proposta de solução inicial para um sistema de 7 barras

$$\boldsymbol{x} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 7 & 9 & 11 & 13 & 14 & 15 \\ \hline \end{array}$$

Fonte: Elaboração do próprio autor

3.2.3 Solução inicial

A solução inicial utilizada pelo algoritmo VND equivale exatamente à topologia resultante do sistema de distribuição após o isolamento da região afetada e a conexão entre as barras presentes na parcela desenergizada e a subestação fictícia. Para cada ilha de carga existente na área fora-de-serviço é realizado o fechamento de um circuito fictício que conecta a ilha de carga com a subestação. Por exemplo, para a topologia exposta na Figura 10, após a falta na barra 4, as barra 7 e a ilha de carga formada pelas barras 5 e 6 ficaram desenergizadas. Sendo assim, a topologia inicial para esse caso de falta pode ser observada na Figura 11.

3.2.4 Estrutura de vizinhança

A principal ideia de um algoritmo VND é a mudança sistemática no tamanho das vizinhanças aliada com uma busca local (descida). Dessa forma, a escolha de uma estrutura para representar a vizinhança de uma solução precisa seguir estratégias que garantem a obtenção de soluções quase-ótimas ou ótimas globais. Portanto, a estrutura utilizada neste trabalho é definida a partir da troca de estado de operação de k pares de chave, sendo o par obrigatoriamente composto por uma chave fechada e uma chave aberta. O algoritmo VND proposto trabalha com três níveis de vizinhança aninhados, isto é, a vizinhança N_1 está presente por completo no interior da vizinhança N_2 que, por sua vez, está contida na vizinhança N_3.

Para garantir a preservação da radialidade das soluções vizinhas à solução corrente, a chave a ser fechada deve pertencer a um dos ramos de interligação inicialmente abertos e a chave a ser aberta, por sua vez, deve estar presente no laço gerado após o fechamento da primeira chave. Essa estratégia de estrutura de vizinhança auxilia a preservação da radialidade de uma solução corrente já radial.

Para a solução inicial da topologia apresentada na Figura 10, o primeiro nível de vizinhança é exposto na Figura 12 e o segundo nível na Figura 13. A vizinhança de nível um possui 11 soluções vizinhas e o seu primeiro vizinho é obtido através do fechamento da chave 7 e a abertura da chave 10. A segunda vizinhança, por sua vez, possui 93 vizinhos e o seu primeiro vizinho é obtido através do fechamento das chaves 7 e 9 e a abertura das chaves 10 e 12. Finalmente, a terceira vizinhança da solução inicial, possui 122 vizinhos e o seu primeiro vizinho é obtido através do fechamento das chaves 7, 9 e 11, juntamente com a abertura das chaves 6, 10 e 12.

Figura 12 - Vizinhança de nível um para a solução inicial

v1 =	10	9	11	13	14	15
v2 =	2	9	11	13	14	15
v3 =	7	12	11	13	14	15
v4 =	7	2	11	13	14	15
v5 =	7	3	11	13	14	15
v6 =	7	9	6	13	14	15
v7 =	7	9	12	13	14	15
v8 =	7	9	11	3	14	15
v9 =	7	9	11	2	14	15
v10 =	7	9	11	13	1	15
v11 =	7	9	11	13	14	2

Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 13 - Vizinhança de nível dois para a solução inicial

v1	=	10	12	11	13	14	15	v32	=	7	2	12	13	14	15	v63	=	2	9	11	3	14	15
v2	=	10	3	11	13	14	15	v33	=	7	2	11	12	14	15	v64	=	10	9	11	3	14	15
v3	=	10	2	11	13	14	15	v34	=	7	2	11	13	1	15	v65	=	7	12	11	3	14	15
v4	=	10	9	6	13	14	15	v35	=	7	2	11	13	14	3	v66	=	7	9	6	3	14	15
v5	=	10	9	12	13	14	15	v36	=	7	2	11	13	14	12	v67	=	7	9	12	3	14	15
v6	=	10	9	11	3	14	15	v37	=	2	3	11	13	14	15	v68	=	7	9	11	3	1	15
v7	=	10	9	11	2	14	15	v38	=	10	3	11	13	14	15	v69	=	7	9	11	3	14	2
v8	=	10	9	11	13	1	15	v39	=	7	3	6	13	14	15	v70	=	3	9	11	2	14	15
v9	=	10	9	11	13	14	2	v40	=	7	3	12	13	14	15	v71	=	10	9	11	2	14	15
v10	=	2	12	11	13	14	15	v41	=	7	3	11	6	14	15	v72	=	7	12	11	2	14	15
v11	=	2	3	11	13	14	15	v42	=	7	3	11	12	14	15	v73	=	7	9	6	2	14	15
v12	=	2	9	6	13	14	15	v43	=	7	3	11	13	1	15	v74	=	7	9	12	2	14	15
v13	=	2	9	12	13	14	15	v44	=	7	3	11	13	14	2	v75	=	7	9	11	2	1	15
v14	=	2	9	11	3	14	15	v45	=	2	9	6	13	14	15	v76	=	7	9	11	2	14	3
v15	=	2	9	11	10	14	15	v46	=	10	9	6	13	14	15	v77	=	10	9	11	13	1	15
v16	=	2	9	11	13	1	15	v47	=	7	2	6	13	14	15	v78	=	2	9	11	13	1	15
v17	=	2	9	11	13	14	7	v48	=	7	3	6	13	14	15	v79	=	7	3	11	13	1	15
v18	=	2	9	11	13	14	10	v49	=	7	12	6	13	14	15	v80	=	7	2	11	13	1	15
v19	=	10	12	11	13	14	15	v50	=	7	9	6	2	14	15	v81	=	7	12	11	13	1	15
v20	=	2	12	11	13	14	15	v51	=	7	9	6	3	14	15	v82	=	7	9	6	13	1	15
v21	=	7	12	6	13	14	15	v52	=	7	9	6	13	1	15	v83	=	7	9	12	13	1	15
v22	=	7	12	3	13	14	15	v53	=	7	9	6	13	14	2	v84	=	7	9	11	9	1	15
v23	=	7	12	2	13	14	15	v54	=	2	9	12	13	14	15	v85	=	7	9	11	2	1	15
v24	=	7	12	11	3	14	15	v55	=	10	9	12	13	14	15	v86	=	7	9	11	13	1	2
v25	=	7	12	11	2	14	15	v56	=	7	6	12	13	14	15	v87	=	10	9	11	13	14	2
v26	=	7	12	11	13	1	15	v57	=	7	2	12	13	14	15	v88	=	7	3	11	13	14	2
v27	=	7	12	11	13	14	2	v58	=	7	3	12	13	14	15	v89	=	7	12	11	13	14	2
v28	=	10	2	11	13	14	15	v59	=	7	9	12	3	14	15	v90	=	7	9	6	13	14	2
v29	=	3	2	11	13	14	15	v60	=	7	9	12	2	14	15	v91	=	7	9	12	13	14	2
v30	=	12	2	11	13	14	15	v61	=	7	9	12	13	1	15	v92	=	7	9	11	3	14	2
v31	=	7	2	6	13	14	15	v62	=	7	9	12	13	14	2	v93	=	7	9	11	13	1	2

Fonte: Elaboração do próprio autor

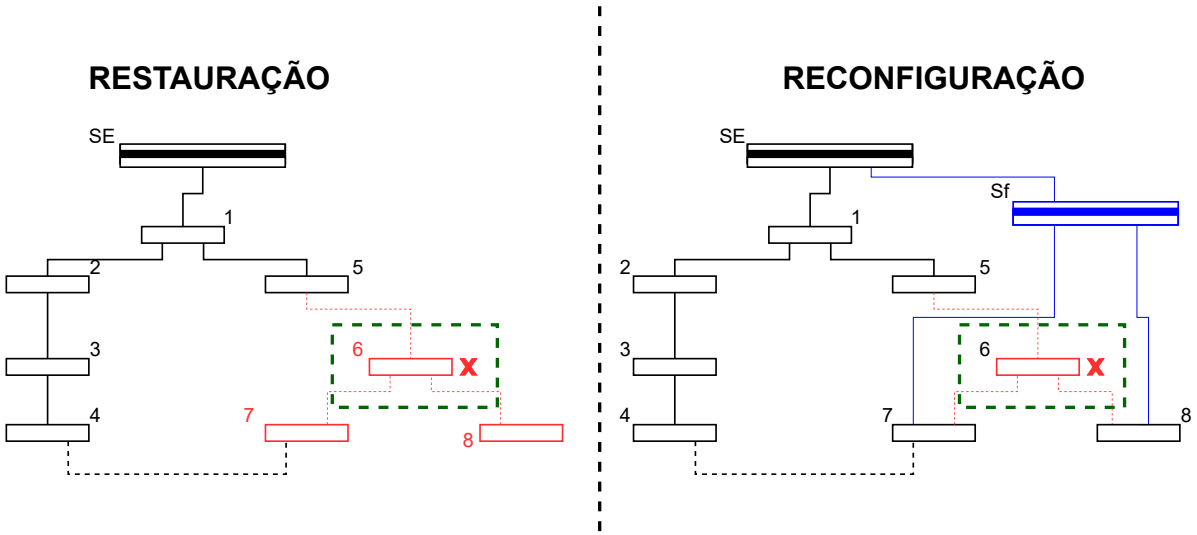
3.2.5 Controle da radialidade da rede

A habilidade de um algoritmo baseado em meta-heurística de produzir apenas soluções radiais para problemas como o PRSDEE é essencial para que o mesmo seja considerado eficaz. Dessa forma, para o algoritmo proposto, o controle da radialidade acontece através da união da proposta de solução inicial, com a proposta de estrutura de vizinhança e também com a utilização de subestações fictícias. A última, representa a ideia principal deste trabalho que é a introdução do conceito de subestação fictícia como ferramenta da metodologia durante o processo de restauração do sistema de distribuição. O propósito desta subestação é manter a conexão com a parcela do sistema que não consegue ser restaurada. Essa conexão é feita através

do fechamento de circuitos artificiais criados entre cada barra presente na parcela desenergizada do sistema e a subestação fictícia. Portanto, os circuitos artificiais e a subestação fictícia garantem que a parcela não-restaurada do sistema de distribuição apresente uma topologia radial e impedem que chaves normalmente fechadas presentes nessa parcela sejam indicadas para abertura.

Inicialmente, todas as barras presentes na parcela que está desenergizada são conectadas à subestação fictícia de forma que a radialidade seja preservada. Sendo assim, com o auxílio da subestação fictícia o sistema de distribuição se mantém radial durante todo o processo iterativo do algoritmo. Dessa forma, o PRSDEE é lidado pelo algoritmo VND como se fosse um problema de reconfiguração. Um exemplo de como essa transformação acontece pode ser observado com a ajuda da Figura 14. A figura representa um sistema de distribuição fictício com 1 barra de subestação e 8 barras de carga. Quando acontece a falta permanente na barra 6 a mesma é isolada da rede e, em virtude do isolamento, as barras 7 e 8 ficam sem fornecimento de energia elétrica. Com o auxílio da subestação fictícia, o problema de restauração pode ser transformado em um problema de reconfiguração que possui como objetivo principal a redução dos fluxos presentes no ramo que conecta a subestação fictícia à subestação real. Neste caso hipotético, seria possível restaurar a carga da barra 7, fechando o circuito fictício que a conecta a subestação fictícia e fechando o circuito presente entre as barras 7 e 4. A barra 8, por sua vez, continua sem o fornecimento de energia pois não há circuitos abertos que possibilitam a restauração da carga.

Figura 14 - Transformação de um problema de restauração em um problema de reconfiguração



Fonte: Elaboração do próprio autor

3.2.6 Fluxograma do algoritmo VND proposto

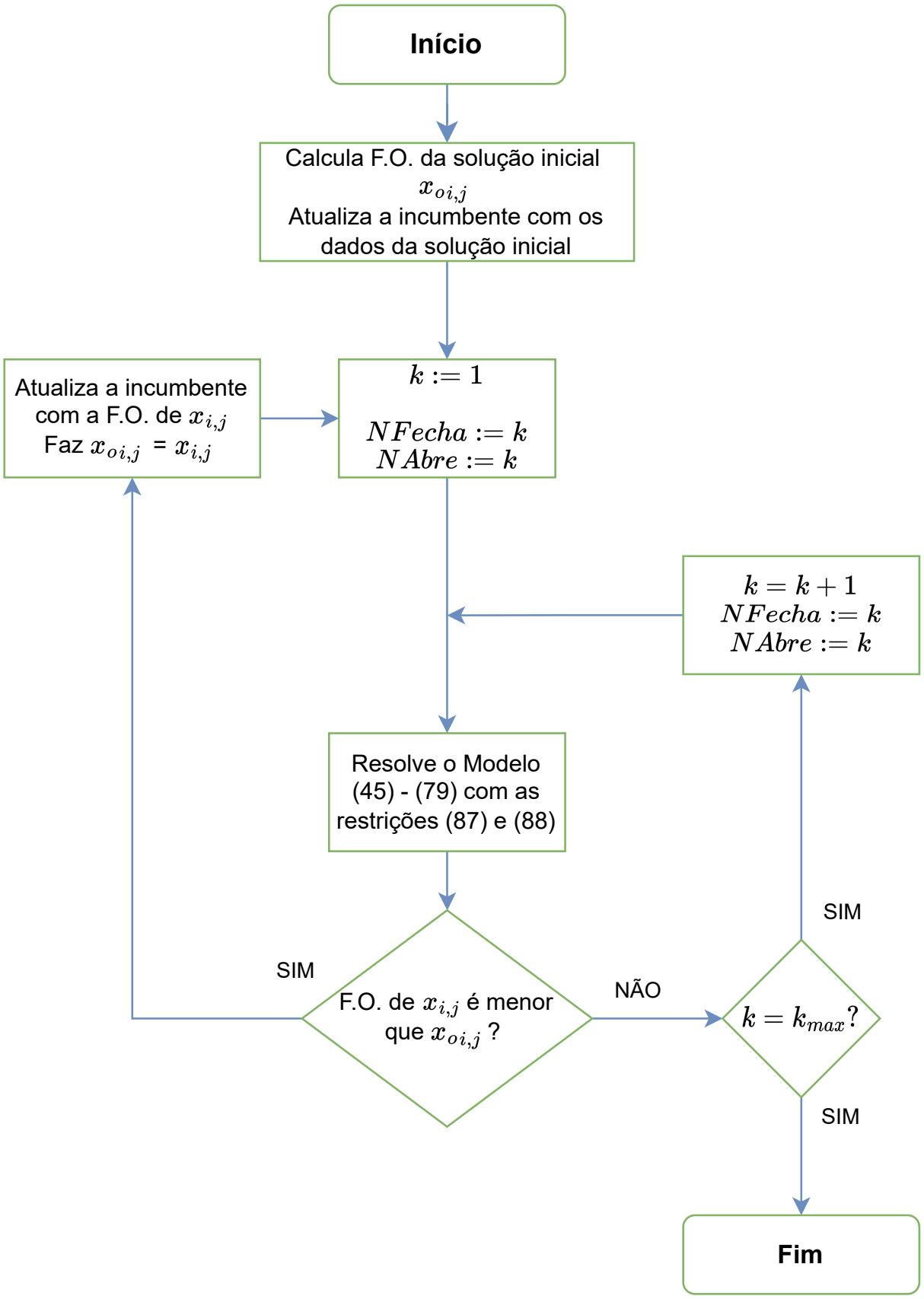
O fluxograma que representa o algoritmo VND proposto para resolver o problema de restauração em sistemas de distribuição radiais é apresentado na Figura 15 e explicado a seguir.

De início é feito o isolamento da falta, ou seja, é excluído dos dados do sistema os circuitos que estão conectados a falta. Como consequência da exclusão, a parcela presente na área à jusante da falta é conectada através do fechamento de circuitos fictícios à subestação fictícia. A topologia formada após esse processo passa a ser a solução inicial do algoritmo, é realizado o cálculo da função objetivo da solução inicial e salva como incumbente.

Com posse do valor da incumbente, o processo iterativo do algoritmo tem início e assume-se o valor inicial $k = 1$. A busca inicia na vizinhança de nível N_k da solução corrente. É feita a exploração da vizinhança e todas as soluções vizinhas pertencentes são avaliadas. O melhor vizinho de nível N_k é escolhido e é verificado se a função objetiva do vizinho é de melhor qualidade que a armazenada na incumbente. Em caso de que seja melhor, a solução vizinha passa a ser a solução corrente, o valor da incumbente é atualizado, o processo é centralizado na solução corrente e k passa a assumir seu valor inicial ($k = 1$).

Em casos onde o valor do melhor vizinho de uma vizinhança $N_k(x_{ij}^o)$ não seja melhor do que a incumbente, é feito um teste de parada em que verifica se o parâmetro k atingiu o seu valor máximo k_{max}. Se o valor está em seu máximo, o processo iterativo tem o seu fim e a incumbente armazenada é a melhor solução encontrada pelo algoritmo. Em caso contrário, o valor de k é incrementado ($k = k + 1$) e o processo iterativo é reiniciado.

Figura 15 - Fluxograma do algoritmo VND proposto



Fonte: Elaboração do próprio autor

4 MATHEURÍSTICA ESPECIALIZADA EM PROBLEMAS DE RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Neste capítulo é proposto um algoritmo especializado em PRSDEE e baseado em uma metodologia híbrida chamada de matheurística. Inicialmente, na Seção 4.1, a metodologia híbrida é introduzida e apresentada. Posteriormente, nas Seção 4.2, as técnicas de programação matemática (MP) conhecidas na literatura e a técnica escolhida para aplicar na metologia híbrida são apresentadas. Finalmente, na Seção 4.3, o algoritmo matheurístico proposto é apresentado e explicado.

4.1 Introdução

A natureza do PRSDEE é combinatória e, conforme apresentado no Capítulo 1.3, as principais técnicas de otimizações utilizadas na resolução do problema são técnicas heurísticas, meta-heurísticas e também técnicas de otimização clássica. A vantagem de utilizar uma técnica de otimização em específico, atrai pesquisadores a tentarem combinar a mesma com outras metodologias. Conforme visto na revisão da literatura, também é possível encontrar várias metodologias híbridas que combinam processos heurísticos e meta-heurísticos com a programação matemática. É a partir dessa combinação de metodologias que é possível encontrar a matheurística (FISCHETTI; FISCHETTI, 2018; BLUM et al., 2011).

A definição a respeito do que é necessário ter para que um algoritmo híbrido seja considerado uma matheurística ou não, ainda é muito nebulosa na literatura. O termo surgiu entre os anos 2008 e 2009 porém a sua definição exata continua sendo muito questionada na literatura. (RUVALCABA-SANDOVAL et al., 2021).

Segundo Raidl et al. (2019), a nebulosidade da definição exata do termo incentiva o aparecimento de técnicas híbridas novas, uma vez que ao definir de forma exata, a criatividade necessária para o surgimento de novas pesquisas pode ser prejudicada. Os autores também apontam que as metodologias híbridas surgem com a finalidade de explorar e unir as vantagens únicas que diferentes algoritmos apresentam. Atualmente, a chave principal para resolver os problemas combinatórios mais complexos é obter uma combinação de várias estratégias diferentes e especializar essa combinação de metodologias para resolver o problema em questão (RAIDL et al., 2019).

Para Hong et al. (2022), a matheurística é uma nova abordagem para resolver problemas de otimização baseada na combinação entre a programação matemática e processos heurísticos.

Porém, os autores apontam que algumas abordagens baseadas em meta-heurísticas podem utilizar um modelo matemático para averiguar a qualidade de suas soluções e enfatizam que isso não caracteriza uma matheurística, uma vez que a programação matemática não faz parte da busca por uma solução em si.

Segundo Boschetti e Maniezzo (2022), o termo não define nenhuma metodologia especializada na resolução de problemas combinatórios e sim uma nomenclatura utilizada para compreender técnicas que usufruem de ferramentas matemáticas e de processos heurísticos.

A definição a ser utilizada no trabalho presente é a mesma proposta por Boschetti et al. (2009), em que a matheurística compreende os algoritmos heurísticos elaborados por meio da interoperação entre meta-heurísticas e técnicas de programação matemática. Sendo que a principal vantagem desse algoritmo híbrido é a exploração heurística do espaço de busca que é feita utilizando de características e informações derivadas do modelo matemático dos problemas de interesse.

Durante o desenvolvimento de um algoritmo baseado em matheurística, uma grande variedade de técnicas de programação matemática pode ser utilizada. Essas técnicas auxiliam no processo de busca do algoritmo podendo fornecer tanto intensificação quanto diversificação. A eficiência da aplicação do algoritmo híbrido está ligada diretamente a estratégia, a técnica de programação matemática utilizada e a especialização dos processos heurísticos com base nas informações do problema que está sendo resolvido (MANIEZZO et al., 2021).

4.2 Técnicas de programação matemática

Na literatura é possível encontrar diversas técnicas de programação matemáticas utilizadas para a elaboração de algorítimos híbridos para os mais variados problemas combinatórios. Nesta seção algumas das técnicas mais conhecidas são apresentadas e explicadas.

Entre as principais técnicas de programação matemática presentes na literatura, pode-se citar: *local branching* de Fischetti e Lodi (2003), *relaxation induced neighbourhood search* (RINS) de Danna et al. (2005), técnicas baseadas em decomposição, entre outras.

4.2.1 *Local branching*

O *local branching*, proposto por Fischetti e Lodi (2003), é uma técnica de programação matemática que consiste em construir uma vizinhança em torno de uma solução já conhecida. A sua aplicação pode acontecer de formas variadas, seja para adquirir uma solução de ótima qualidade logo no início ou até mesmo para realizar uma busca local em torno de uma solução. Para uma melhor representação da técnica, considere o seguinte problema inteiro:

$$\text{minimizar} \quad c^T x \tag{89}$$

Sujeito a:

$$Ax \geq b \tag{90}$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in \Gamma \tag{91}$$

Considere uma solução factível de referência $\bar{x}$ do problema (89)–(91) e que o conjunto $\bar{S} = \{j \in \Delta : \bar{x}_j = 1\}$ seja o suporte binário da solução de referência. Dessa forma, a k-ésima vizinhança de $\bar{x}$, para qualquer valor inteiro do parâmetro k, define um subproblema contendo o conjunto de soluções viáveis referentes a (89)–(91) e que satisfazem a seguinte restrição de *local branching:*

$$\Delta(x,\bar{x}) := \sum_{j \in \Gamma : \bar{x}_j = 0} x_j + \sum_{j \in \Gamma : \bar{x}_j = 1} (1 - x_j) \leq k. \tag{92}$$

Na restrição de *local branching* é feita a contagem de todas as variáveis binárias na solução que tiveram seu valor trocado em relação a solução de referência $\bar{x}$. Isto é, todas as variáveis que eram nulas na solução de referência e passaram a obter valor unitário ($x_j = 1$), assim como as variáveis que eram unitárias na solução de referência e passaram a obter valor nulo ($x_j = 0$). O parâmetro k define o número total de trocas de valor nas variáveis binárias. A inclusão dessa restrição implica na construção de uma vizinhança em torno da solução de referência $\bar{x}$.

Segundo Mendonca (2011), o *local branching* pode ser usado para melhorar o comportamento do *solver* sem comprometer a qualidade das soluções do mesmo. O controle de como a exploração da vizinhança vai ser feito pode ocorrer alterando o valor determinado para k. Uma proposta de diversificação da exploração viável é incrementar o valor de k quando a vizinhança $N(\bar{x},k)$ não possui uma solução melhor do que solução de referência atual $\bar{x}$. Assim, após o incremento de k a busca é re-centralizada em $\bar{x}$ só que com uma vizinhança maior do que a anterior.

Uma aplicação da técnica de *local branching* para o PRSDEE é apresentada na Seção 4.3.

4.2.2 *Relaxation induced neighbourhood search*

Outra técnica de programação matemática clássica que pode ser utilizada em algoritmos matheurísticos é a chamada RINS. A técnica foi proposta por Danna et al. (2005) e consiste em direcionar a busca pela solução em torno de duas soluções alvos, sendo elas a solução incumbente e a solução atual relaxada. O algoritmo RINS pode ser descrito como:

Dado determinado nó da árvore *branch-and-cut*:

i. Fixe as variáveis que possuem o mesmo valor na incumbente e na solução atual relaxada;

ii. Defina um critério de parada baseado no valor da incumbente atual;

iii. Resolva o subproblema com as variáveis que não foram fixadas;

O RINS é uma ferramenta de programação matemática que une busca local, busca em vizinhança e conceitos de programação inteira em uma única estrutura (FROTA, 2008). Uma aplicação de RINS em algoritmos matheurísticos pode ser vista em Carrese et al. (2021).

4.2.3 *Técnicas baseadas em decomposição*

Outra ferramenta de programação matemática comumente utilizada em algoritmos híbridos é a decomposição. Sua ideia principal é, como o nome sugere, decompor o problema principal em problemas menores que são resolvidos de forma independente. As técnicas de decomposição matemática mais conhecidas são: decomposição de cortes de Benders, decomposição de Dantzig-Wolfe e a relaxação Lagrangeana.

A decomposição de cortes de Benders consiste em resolver o problema principal com algumas variáveis fixadas para calcular o valor da limitante inferior e depois, com o objetivo de melhorar essa limitante, resolver subproblemas que acrescentam novas restrições ao problema principal (BENDERS, 1962).

A decomposição de Dantzig-Wolf é um processo iterativo que consiste em aproximar uma relaxação linear de um problema P a partir da sua decomposição em problemas menores. A resolução desses subproblemas gera de forma dinâmica as colunas de um problema mestre que corresponde a relaxação linear de P (DANTZIG; WOLFE, 1960).

A relaxação Lagrangeana é um processso que permite obter o valor da limitante inferior do problema P a partir da resolução de um problema dual que é resolvido através de penalizações lagrangeanas (GEOFFRION, 2010).

Algoritmos matheurísticos que utilizam essas técnicas podem ser encontrados no trabalho de Maniezzo et al. (2021).

4.3 Algoritmo matheurístico especializado em PRSDEE

Para a resolução do PRSDEE, um algoritmo híbrido composto por uma busca local em vizinhança variável aliado à resolução de um modelo matemático de PLIM é proposto. Para

isso, a técnica de programação de *local branching* apresentada na seção anterior foi escolhida para ser utilizada juntamente com o modelo matemático do Capítulo 2.

A utilização da restrição de *local branching* permite a criação de uma vizinhança $N(\bar{x},k)$ da solução de referência $\bar{x}$. Dessa forma, essa vizinhança pode ser utilizada para buscar uma solução x' que seja melhor que $\bar{x}$.

Para aplicar essa restrição no modelo do PRSDEE é necessário pensar em uma estratégia em que a factibilidade e, principalmente, a radialidade da solução de referência seja preservada e mantida por toda a vizinhança. Dessa forma, a estratégia adotada consiste em dividir a equação (92) em outras duas equações:

$$\sum_{ij \in (\Omega_L \cup \Omega_H) : x_{ij} = 0} (x_{ij} - x^o_{ij}) \leq NFecha \tag{93}$$

$$\sum_{ij \in (\Omega_L \cup \Omega_H) : x_{ij} = 1} (x^o_{ij} - x_{ij}) \leq NAbre \tag{94}$$

A solução x^o_{ij} é introduzida nas restrições e representa a solução incumbente, que é utilizada para auxiliar a montagem da vizinhança $N(x^o_{ij},k)$. Em (93), é feita a contagem de todas as variáveis binárias que tiveram o valor nulo alterado para unitário, em outras palavras, conta-se todas as chaves abertas na solução incumbente que passaram ser a fechadas na solução vizinha.

Na restrição 94, acontece o contrário, é feita a contagem de todas as chaves fechadas na solução incumbente que passaram a assumir o valor nulo (estado aberto) na solução vizinha. Assim, o montante de chaves que foram fechadas tem que ser inferior ou igual ao parâmetro *NFecha* e, de forma análoga, o montante de chaves que foram abertas tem que ser menor ou igual ao parâmetro *NAbre*.

Essas duas restrições garantem que todas as soluções vizinhas à solução incumbente sejam consideradas no modelo. A estrutura de vizinhança adotada pela matheurística é a mesma que foi utilizada no algoritmo VND proposto no Capítulo 4. Dessa forma, o nível de vizinhança condiz com o número de par de chaves que estão sendo trocados. No primeiro nível de vizinhança, é efetuada a troca de um par de chaves (uma chave é fechada para que uma outra seja aberta), no segundo nível, dois pares de chaves são trocados e no terceiro, finalmente, três pares de chaves possuem sua natureza binária alterada. Assim como no algorítimo VND, o tamanho máximo de vizinhança considerado na matheurística é de três trocas.

O algoritmo matheurístico proposto é constituído pelo modelo de PLIM formado pelas relações (44)–(85) com a inclusão das restrições (93) e (94). Os parâmetros que limitam o nível da vizinhança *NFecha* e *NAbre*, recebe inicialmente o valor de 1 e, toda vez em que a solução incumbente não possui melhora em uma vizinhança, o processo de busca é re-centralizado na

solução incumbente e *NFecha* e *NAbre* recebem o acréscimo de um. O processo tem fim quando atinge o valor máximo aceitável de nível de vizinhança e a incumbente do problema é adotada como ótima global. A otimalidade da melhor solução do algoritmo é dependente do tamanho das vizinhanças adotadas, segundo Fischetti e Lodi (2003), o parâmetro tem que ser grande o suficiente para conter todas as soluções do problema sem as restrições de *local branching* porém, não tão grande a ponto de a busca demandar bastante tempo de processamento.

4.3.1 Fluxograma do algoritmo matheurístico proposto

O fluxograma que representa o algoritmo matheurístico proposto é apresentado na Figura 16 e explicado a seguir.

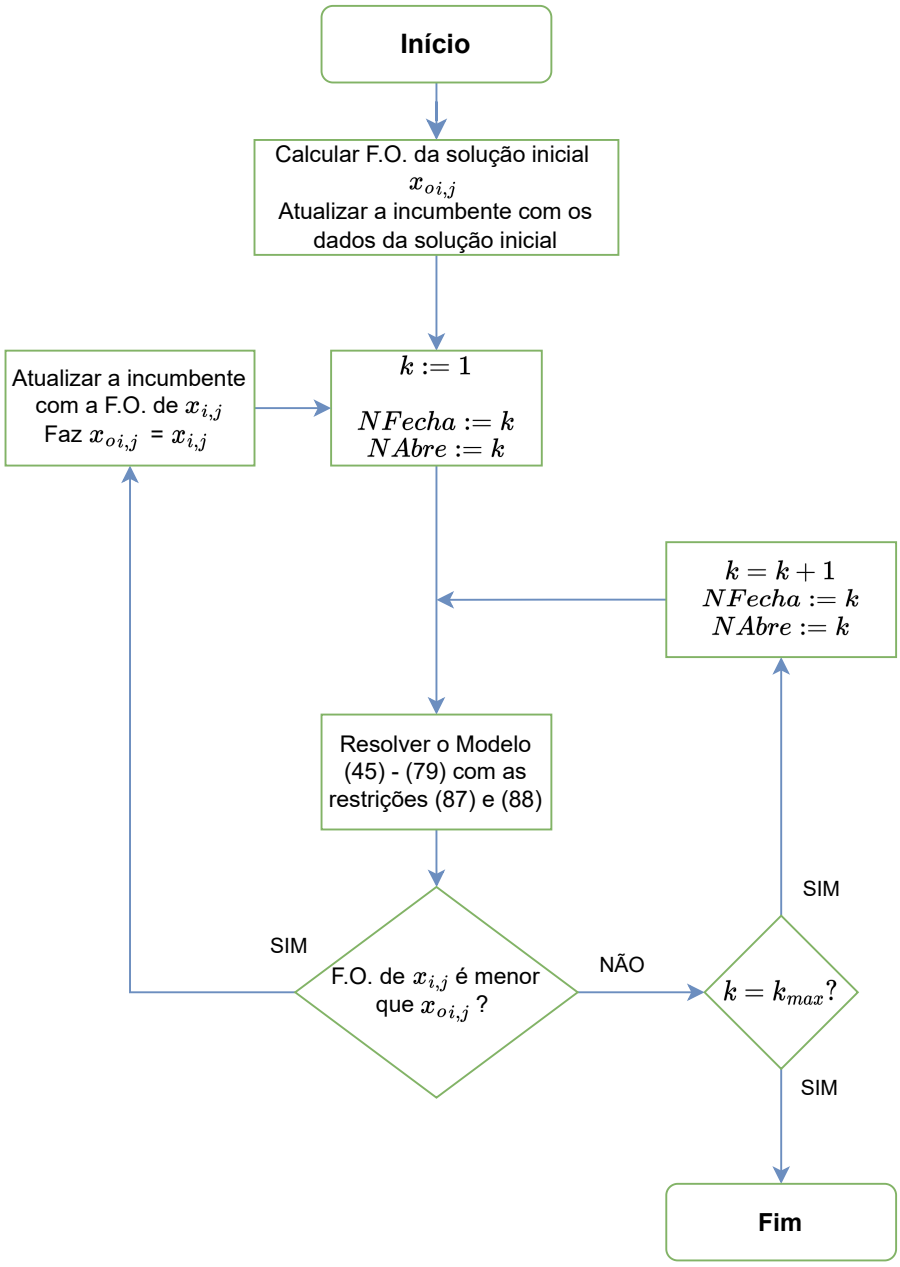
Inicialmente é realizado o isolamento da falta, isto é, os circuitos que estão conectados à falta são excluídos do banco de dados do problema. Em virtude do isolamento, a parcela à jusante da falta é reconectada à subestação fictícia e essa topologia é considerada a solução inicial do problema. Antes do processo iterativo ter início, a função objetivo da solução inicial é calculada e armazenada na incumbente.

Assim, com o valor da incumbente em mãos, é iniciado o processo iterativo de resolução do algoritmo. De início, o parâmetro referente ao tamanho da vizinhança recebe seu valor inicial ($k = 1$) e as restrições de *local branching* (93) e (94) são inseridas no modelo de PLIM (44)–(85).

O modelo é resolvido por um *solver* e a função objetivo do melhor vizinho da vizinhança de nível um ($N_k(x^o_{ij})$) da solução inicial x^o_{ij} é comparada com o valor armazenado na incumbente. Se essa função objetivo é melhor do que a incumbente, o valor da incumbente é atualizado e a solução incumbente passa a ser a solução corrente. O parâmetro k volta a valer um e o processo iterativo é repetido.

Em casos onde o valor do melhor vizinho de uma vizinhança $N_k(x^o_{ij})$ não seja melhor do que a incumbente, é feito um teste de parada em que se verifica se o parâmetro k atingiu o seu valor máximo k_{max}. Se o valor está em seu máximo, o processo iterativo tem o seu fim e a incumbente armazenada é a melhor solução encontrada pelo algoritmo. Em caso contrário, o valor de k é incrementado ($k = k + 1$) e o processo iterativo é reiniciado.

Figura 16 - Fluxograma do algoritmo matheurístico especializado em PRSDEE



Fonte: Elaboração do próprio autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo todas as três metodologias apresentadas nos capítulos anteriores são implementadas em suas respectivas plataformas específicas, sendo que para o modelo matemático e para o algoritmo matheurístico, a implementação aconteceu no ambiente de programação matemática AMPL (FOURER et al., 2003) e a resolução por meio do *solver* comercial CPLEX de versão 20.1.0.0 (IBM ILOG CPLEX, 2021). Para o algoritmo VND, a implementação e a resolução do mesmo aconteceram por meio do MATLAB. O computador utilizado para as simulações possui um processador Intel® Core ™ i7-8700 de 3.30 GHz e 32.0 GB de RAM.

Os testes foram separados em três casos de estudos principais: Caso A, Caso B e Caso C. No primeiro caso são simuladas faltas permanentes em um sistema de distribuição de 53 barras. Foram simuladas faltas únicas em todas as barras do sistema e apenas as faltas em cenários críticos foram discutidas e analisadas. Já para o segundo caso, o sistema utilizado para a simulação de faltas é um sistema de grande porte que possui 417 barras e foram simulados 7 cenários de falta única diferentes. No terceiro caso são feitos testes especiais considerando geração distribuída no sistema de 417 barras e faltas múltiplas nos sistemas de 53 e de 417 barras. Para o primeiro e o segundo casos, além das três metodologias propostas, um modelo de programação cônica de segunda ordem inteira-mista proposto por Romero et al. (2016) também foi implementado e resolvido com o objetivo de servir de base para comparar a eficácia das metodologias propostas.

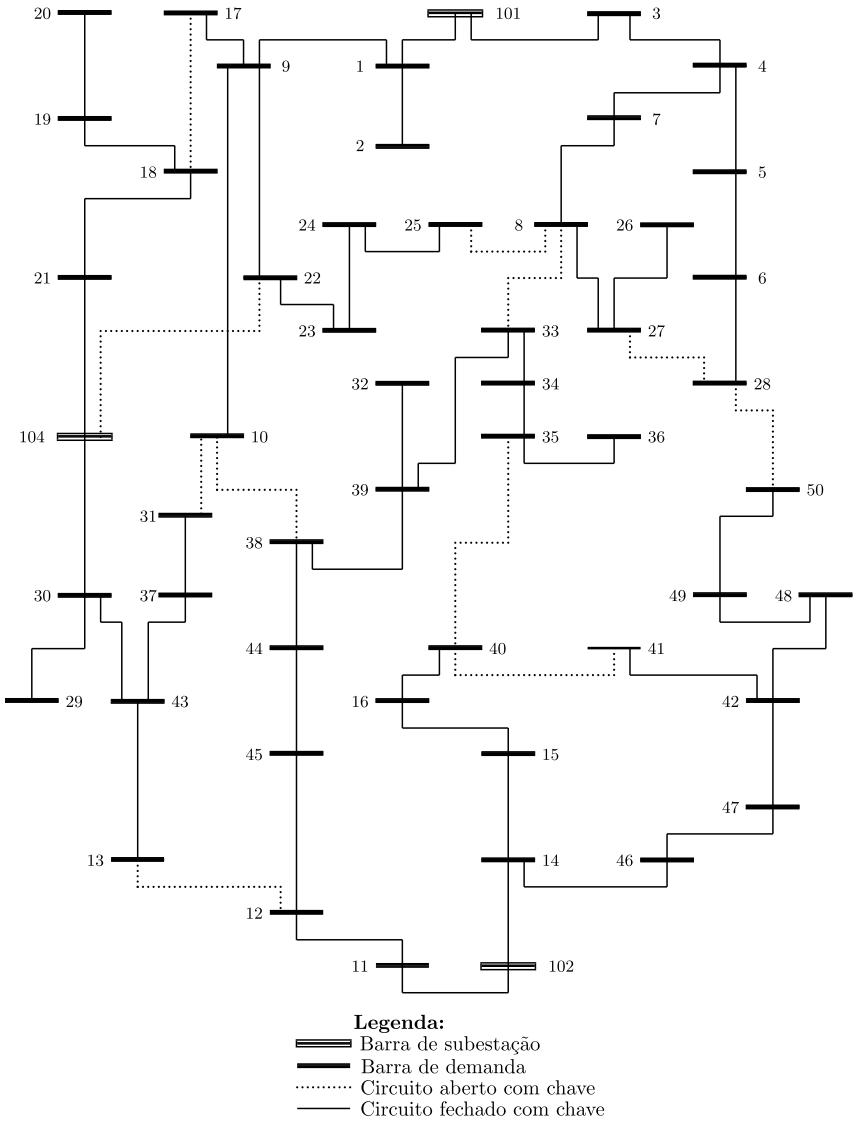
5.1 Caso de estudo A

Nesta seção, o caso de estudo A é apresentado e discutido. O sistema utilizado neste caso é o sistema de 53 barras apresentado por Romero et al. (2016). Esse sistema de distribuição possui 53 barras, sendo 3 subestações e 50 barras de carga, e 61 ramos. A tensão nominal do sistema é 13,8 kV e os limites mínimo e máximo de tensão permitidos são, respectivamente, 0,95 e 1,0 pu. O sistema apresenta uma demanda aparente total de 50.742,95 kVA e os demais dados do sistema podem ser encontrados no Apêndice A.

A topologia inicial do sistema é apresentada na Figura 17 e, em posse dessa topologia, foram simulados 50 cenários diferentes de faltas únicas na rede. Na Tabela 2 é possível encontrar as informações referentes a cada cenário de falta única possível neste sistema. É válido ressaltar que quando acontece uma falta permanente na rede de distribuição, a mesma precisa ser isolada e é após o isolamento que inicia-se o processo de restauração da parcela à jusante da

falta. Quando a contingência permanente ocorre em uma barra terminal do sistema, a parcela à jusante não existe, ou seja, não há cargas para serem restauradas e, sendo assim, a solução é trivial. Os cenários de falta que ocorrem em barras terminais estão identificados na tabela através de um asterisco (*).

Figura 17 - Topologia inicial do sistema de 53 barras



Fonte: Elaboração do autor

Para a resolução do problema foram utilizadas quatro metodologias: um modelo de PC-SOIM, o modelo de PLIM, um algoritmo baseado na meta-heurística VND e a matheurística de busca em vizinhança variável. Todas as metodologias com exceção do modelo PCSOIM que foi proposto por Romero et al. (2016) foram apresentadas e explicadas nos capítulos anteriores.

Para facilitar a comparação entre si dos resultados obtidos pelas metologias, os cenários críticos foram separados e os seus resultados serão apresentados de maneira uniforme na mesma tabela. É considerado como cenário crítico aquele em que a contingência permanente acontece na saída das subestações. Portanto, o plano de restauração obtido pelas metologias para os

Tabela 2 - Informações dos cenários de falta permanente simulados no sistema de 53 barras

Barra Isolada	**Barras desconectadas**	**Carga não atendida (kVA)**
1	2, 9, 10, 17, 22, 23, 24 e 25	7.546,00
2*	–	–
3	4, 5, 6, 7, 8, 26, 27 e 28	8.238,99
4	5, 6, 7, 8, 26, 27, e 28	7.391,98
5	6 e 28	1.077,99
6	28	538,99
7	8, 26 e 27	3.541,99
8	26 e 27	2.078,99
9	10, 17, 22, 23, 24 e 25	5.467,00
10*	–	–
11	12, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 44 e 45	10.087,01
12	32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 44 e 45	8.701,01
13*	–	–
14	15, 16, 40, 41, 42, 46, 47, 48, 49 e 50	9.008,96
15	16 e 40	2.540,98
16	40	1.077,98
17*	–	–
18	19 e 20	1.693,98
19	20	616,00
20*	–	–
21	18, 19 e 20	2.617,99
22	23, 24 e 25	1.847,98
23	24 e 25	1.077,98
24	25	693,00
25*	–	–
26*	–	–
27	26	924,01
28*	–	–
29*	–	–
30	13, 29, 31, 37 e 43	5.082,01
31*	–	–
32*	–	–
33	34, 35 e 36	1.848,02
34	35 e 36	924,01
35	36	231,01
36*	–	–
37	31	538,99
38	32, 33, 34, 35, 36 e 39	6.160,03
39	32, 33, 34, 35 e 36	5.390,03
40*	–	–
41*	–	–
42	41, 48, 49 e 50	2.309,98
43	13, 31 e 37	3.003,01
44	32, 33, 34, 35, 36, 38 e 39	7.007,03
45	32, 33, 34, 35, 36, 38, 39 e 44	8.085,02
46	41, 42, 47, 48, 49 e 50	4.003,99
47	41, 42, 48, 49 e 50	3.233,99
48	49 e 50	1.000,98
49	50	616,00
50*	–	–

Fonte: Elaboração do autor

cenários de falta nas barras 1, 3, 11, 14, 21 e 30 é discutido e apresentado a seguir.

5.1.1 Falta na barra 1 (Saída da subestação 101)

Nesse cenário de falta, após a ocorrência de uma falta permanente na barra 1, a mesma necessita ser isolada e, para isso, os ramos 101-1 e 1-9 são desconectados do sistema e excluídos do problema. Consequentemente, as barras 2, 9, 10, 17, 22, 23, 24 e 25 ficam desenergizadas, o que totaliza 7.546,00 kVA de carga não atendida. Os resultados obtidos pelas metodologias são apresentados na Tabela 3. Segundo o plano de restauração obtido pelo algoritmo VND, a barra 17 passa a ser fornecida pela subestação 104 através da abertura da chave **chave 17-9** e do fechamento da **chave 18-17**. O plano também indica o fechamento da **chave 104-22** que, por sua vez, restabelece o fornecimento de energia para as barras 9, 10, 22, 23, 24 e 25. Nesse cenário de falta, não foi possível restaurar a barra 2 o que implica em um corte de carga no valor de 503,43 kVA. As outras metodologias, encontraram uma solução alternativa que possui o mesmo valor de função objetivo, que é composta pela abertura da **chave 10-9** e pelo fechamento das **chaves 104-22 e 10-38**. Com este plano, as barras 9, 17, 22, 23 e 24 passam a ser fornecidas pela subestação 104 enquanto a barra 10 é transferida para a subestação 102.

Tabela 3 - Resultados obtidos para falta na barra 1

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	10-9	104-22, 10-38	3	1.154,99	93,32%	1
PLIM	10-9	104-22, 10-38	3	1.154,99	93,32%	<1
VND	17-9	18-17, 104-22	3	1.154,99	**93,32%**	30
Matheurística	10-9	104-22, 10-38	3	1.154,99	93,32%	1

Fonte: Elaboração do autor

5.1.2 Falta na barra 3 (Saída da subestação 101)

Nesse cenário de falta, uma contingência na barra 3 é analisada. Para que a falta seja isolada, os ramos 101-3 e 4-3 são desconectados do sistema e excluídos do problema. Como consequência da falta e do isolamento, as barras 4, 5, 6, 7, 8, 26, 27 e 28 ficaram desenergizados, totalizando 8.238,99 kVA de carga não atendida. Os resultados obtidos pelas metodologias são apresentados na Tabela 4. Conforme o plano de restauração obtido pelas metodologias, as barras 28 e 27 passam a ser fornecidas pela subestação 102 através do fechamento da **chaves 28-50 e 28-27**, as barras 7 e 8 também são fornecidas pela subestação 102 através do fechamento da **chave 8-33** e da abertura da **chave 27-8**. Para preservar a factibilidade da solução, a **chave 35-40** é proposta para ser fechada e as **chaves 26-27**, **28-6**, **5-4** e **33-34** são abertas, o que implica no corte das barras 5, 6 e 26. Nesse cenário, houve um corte de carga equivalente a 3.465,00 kVA. A topologia após ser aplicado o plano de restauração é apresentada na Figura 18.

Tabela 4 - Resultados obtidos para falta na barra 3

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	5-4, 27-8, 26-27, 28-6, 34-33	28-27, 8-33, 35-40, 28-50	10	3.465,00	**57,94%**	4
PLIM	5-4, 27-8, 26-27, 28-6, 34-33	28-27, 8-33, 35-40, 28-50	10	3.465,00	**57,94%**	1
VND	5-4, 27-8 26-27, 28-6 34-33	28-27, 8-33 35-40, 28-50	10	3.465,00	**57,94%**	56
Matheurística	5-4, 27-8, 26-27, 28-6, 34-33	28-27, 8-33, 35-40, 28-50	10	3.465,00	**57,94%**	5

Fonte: Elaboração do autor

5.1.3 Falta na barra 11 (Saída da subestação 102)

Nesse cenário de falta, uma falta permanente na barra 11 é analisada. Para que a falta seja isolada, os ramos 102-11 e 12-11 são desconectados do sistema e excluídos do problema. Em consequência da ocorrência do contingenciamento e do isolamento, as barras 12, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 44 e 45 ficaram desenergizados, totalizando 10.087,01 kVA de cargas não atendidas. Os resultados obtidos pelas metodologias são apresentados na Tabela 4. O plano de restauração obtido pelas metodologias sugere que a barra 12 passa a ser fornecida pela subestação 104 através do fechamento da **chave 13-12**. Além disso, o plano propõe a abertura das **chaves 45-12 e 39-38** juntamente com o fechamento da **chave 10-38** que, consequentemente, restabelece o fornecimento de energia às barras 38, 44 e 45. A abertura da **chave 34-33** divide as barras restantes na área desenergizada em duas ilhas de cargas, a ilha composta pelas barras 32, 33 e 39 passa a ser fornecida pela subestação 101 através do fechamento da **chave 8-33** e a segunda ilha, composta pelas barras 34, 35 e 36, volta a ser fornecida pela subestação 102 através do fechamento da **chave 35-40**. Nesse cenário de falta não houve corte de carga. A topologia após ser aplicado o plano de restauração é apresentada na Figura 21.

5.1.4 Falta na barra 14 (Saída da subestação 102)

Nesse cenário de falta, uma falta na barra 14 é analisada. Para que a falta seja isolada, os ramos 102-14, 15-14 e 14-46 são desconectados do sistema e excluídos do problema. Como consequência da falta e do isolamento, as barras 15, 16, 40, 41, 42, 46, 47, 48, 49 e 50 ficaram desenergizados, totalizando 9.008,96 kVA de cargas não atendidas. Os resultados obtidos pelas metodologias são apresentados na Tabela 6. Conforme o plano de restauração obtido pelas metodologias, as barras 42, 49, 48 e 50 passam a ser fornecidas pela subestação 101 através

Tabela 5 - Resultados obtidos para falta na barra 11

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	45-12, 39-38 35-34	13-12, 8-33, 35-40, 10-38	7	00,00	**100,00%**	2
PLIM	45-12, 39-38 35-34	13-12, 8-33, 35-40, 10-38	7	00,00	**100,00%**	1
VND	45-12, 39-38 34-33	13-12, 8-33 35-40, 10-18	7	00,00	**100,00%**	105
Matheurística	45-12, 39-38 35-34	13-12, 8-33, 35-40, 10-38	7	00,00	**100,00%**	2

Fonte: Elaboração do autor

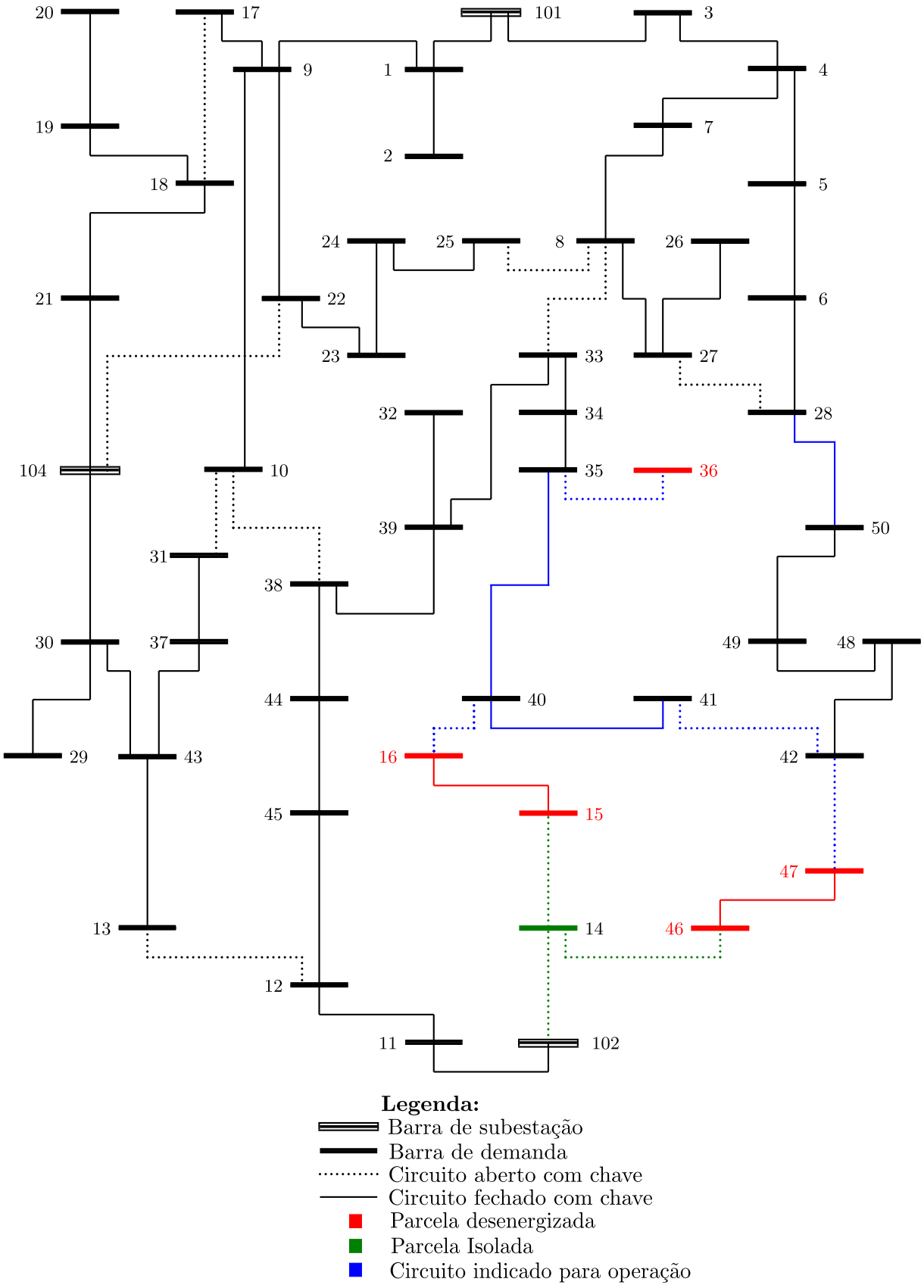
do fechamento da **chave 28-50** e a abertura das **chaves 42-41 e 47-42**. A barra 40 é passa a ser fornecida pela subestação 104 a partir do fechamento da **chave 35-40** e da abertura da **chave 16-40** que implica no corte das barras 15 e 16. A topologia após ser aplicado o plano de restauração é apresentada na Figura 19.

Tabela 6 - Resultados obtidos para falta na barra 14

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	16-40, 42-41 47-42, 14-46	35-40, 28-50	5	5.389,98	**40,17%**	2
PLIM	16-40, 42-41 47-42, 14-46	35-40, 28-50	5	5.389,98	**40,17%**	1
VND	16-40, 42-41 47-42, 14-46	35-40, 28-50	5	5.389,98	**40,17%**	45
Matheurística	16-40, 42-41 47-42, 14-46	35-40, 28-50	5	5.389,98	**40,17%**	2

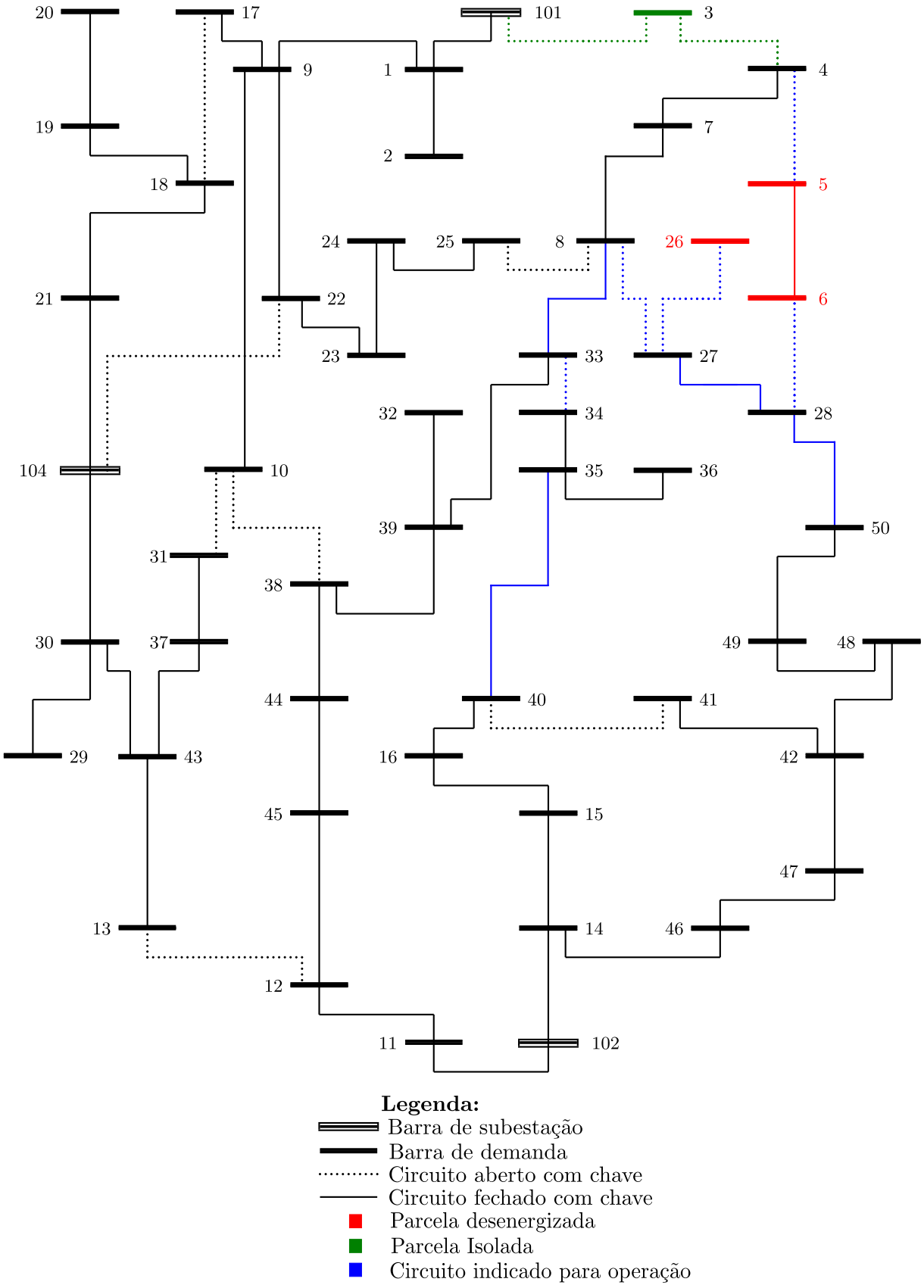
Fonte: Elaboração do autor

Figura 19 - Plano de restauração para falta na barra 14



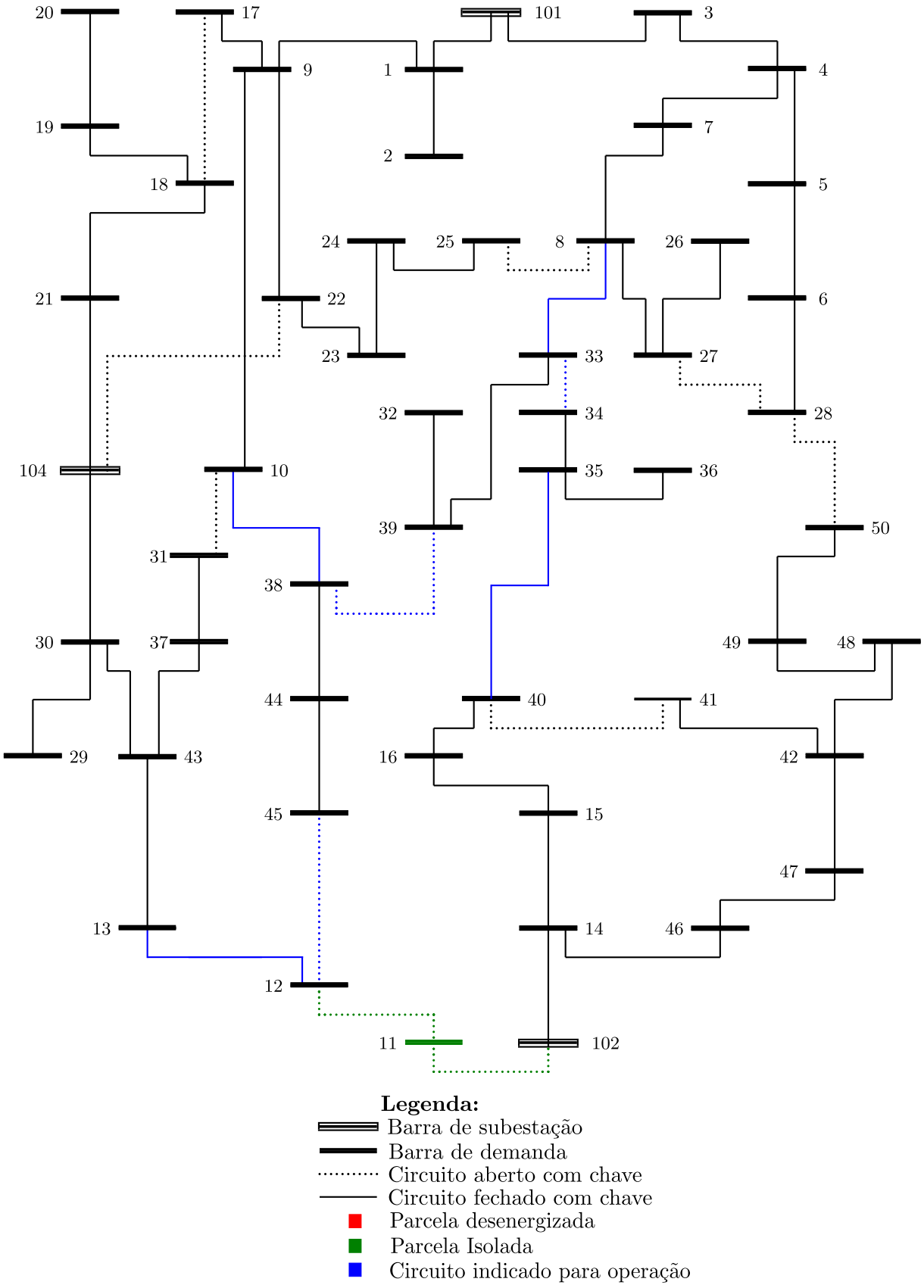
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 20 - Plano de restauração para falta na barra 3



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 21 - Plano de restauração para falta na barra 11



Fonte: Elaboração do próprio autor

5.1.5 Falta na barra 21 (Saída da subestação 104)

Nesse cenário de falta, o isolamento da barra 21 através da abertura das chaves 104-21 e 18-21 interrompe o fornecimento de energia às barras 18, 19 e 20, totalizando 2.617,99 kVA de carga não atendida. Os resultados obtidos pelas metodologias são apresentados na Tabela 7. Para este cenário, conforme o plano de restauração obtido pelas metodologias, a restauração completa da área fora-de-serviço acontece após o fechamento da **chave 18-17**.

Tabela 7 - Resultados obtidos para falta na barra 21

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	–	18-17	1	00,00	**100,00%**	<1
PLIM	–	18-17	1	00,00	**100,00%**	<1
VND	–	18-17	1	00,00	**100,00%**	13
Matheurística	–	18-17	1	00,00	**100,00%**	1

Fonte: Elaboração do autor

5.1.6 Falta na barra 30 (Saída da subestação 104)

Nesse cenário de falta, uma contingência na barra 30 é analisada. Para isolar a área afetada pela falta é necessário realizar a abertura das chaves 104-30, 30-29 e 43-30. Consequentemente, as barras 13, 29, 31, 37 e 43 ficam sem fornecimento de energia, o que representa um montante de 5.082,01 kVA de carga não atendida. Os resultados obtidos pelas metodologias são apresentados na Tabela 8. Segundo o plano de restauração obtido pela resolução do modelo PLIM e da matheurística: a barra 31 passa a ser fornecida pela subestação 101 por meio do fechamento da **chave 10-31** e a abertura da **chave 31-37**, e as barras 13 e 43 passam a ser fornecidas pela subestação 102 após o fechamento da **chave 13-12**. O plano de restauração obtido pela meta-heurística e pelo modelo PCSOIM possui a mesma função objetivo porém em vez de abrir a chave 31-37, a abertura da chave 37-43 faz com que a barra 37 passe a ser fornecida pela subestação 101 juntamente com a barra 31. Neste cenário de falta, o corte de carga é inevitável e tem o valor de 1.077,98 kVA.

5.2 Caso de estudo B

Nesta seção, o caso de estudo B é apresentado e discutido. O sistema utilizado neste caso é o sistema de 417 barras utilizado em Souza et al. (2020). Esse sistema de distribuição possui 417 barras, sendo 3 subestações e 414 barras de cargas, e 473 ramos. Em Souza et al. (2020) o sistema de distribuição foi adaptado e foram alocadas chaves em pontos estratégico do sistema, porém, para este caso de estudo, é considerado que todos os circuitos do sistema possuem

Tabela 8 - Resultados obtidos para falta na barra 30

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	31-37	10-31, 13-12	3	1.077,98	**78,79%**	1
PLIM	37-43	10-31, 13-12	3	1.077,98	**78,79%**	<1
VND	31-37	10-31, 13-12	3	1.077,98	**78,79%**	13
Matheurística	37-43	10-31, 13-12	3	1.077,98	**78,79%**	1

Fonte: Elaboração do autor

chaves, ou seja, todos os circuitos podem ser chaveados. A tensão nominal do sistema é de 10,0 kV e os limites mínimo e máximo de tensão permitidos são, respectivamente, de 0,93 e 1,05 pu. O sistema apresenta uma demanda aparente total de 30.486,88 kVA; os demais dados do sistema podem ser encontrados no Apêndice A.

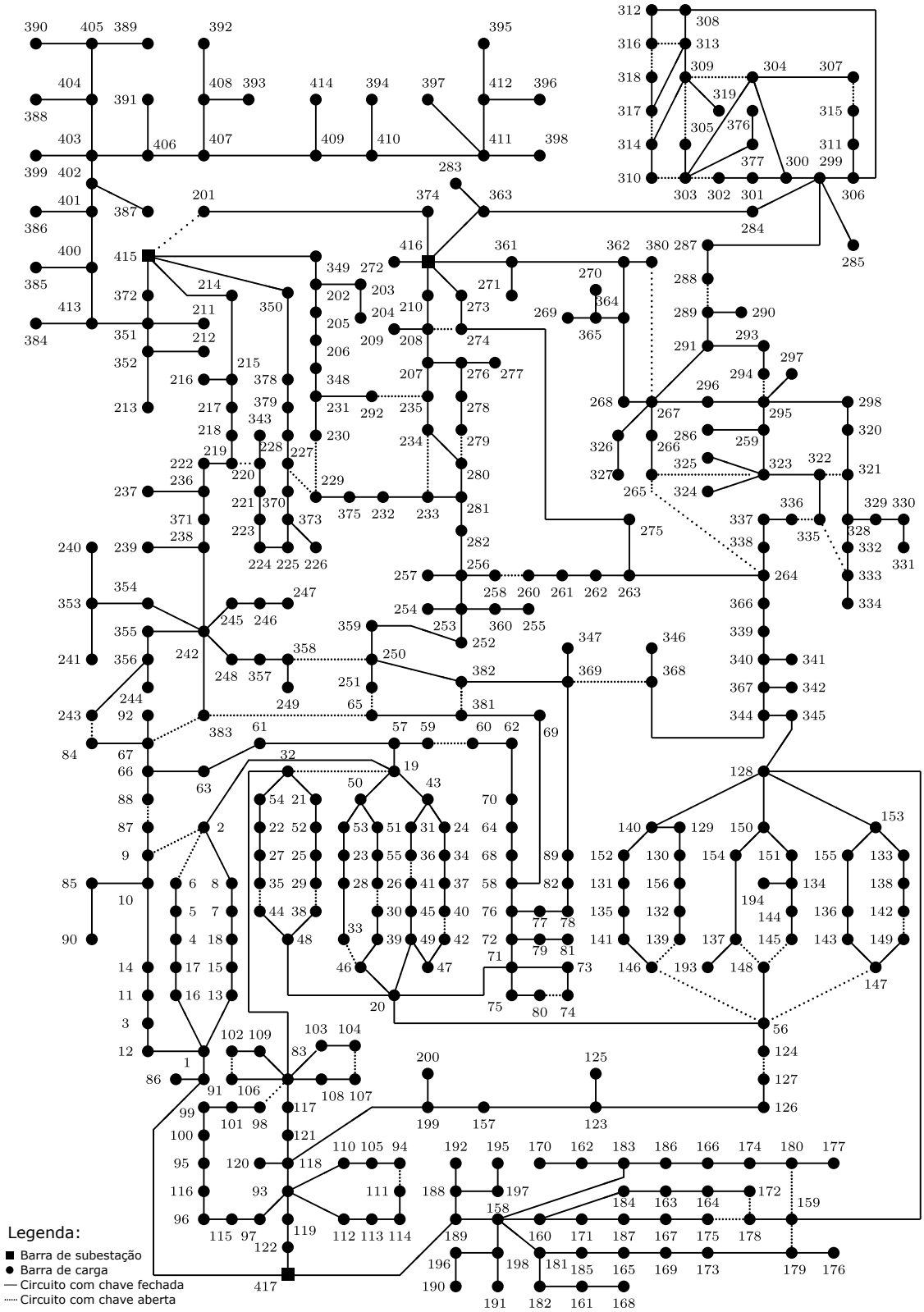
A topologia inicial do sistema é apresentada na Figura 22 e, em posse dessa topologia, foram simulados 7 cenários de faltas únicas diferentes na rede. As informações referentes a cada cenário de falta são apresentados na Tabela 9. Para a resolução do problema foram utilizadas as mesmas quatro metodologias do caso de estudo A: um modelo de PCSOIM, o modelo de PLIM, o algoritmo baseado na meta-heurística VND e a matheurística de busca em vizinhança. Após o surgimento de uma falta permanente na rede de distribuição e o isolamento da mesma, é ideal que a restauração da rede aconteça o quanto antes. Sendo assim, o tempo de processamento de todas as metodologias foi limitado a no máximo 15 minutos, uma vez que esse é o tempo considerável aceitável para o PRSDEE.

Tabela 9 - Informações dos cenários de falta permanente simulados no sistema de 417 barras

Barra Isolada	**Carga não atendida (kVA)**	**Barras desconectadas**
91	3.215,84	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 24, 26, 28, 31, 33, 34, 36, 37, 40, 43, 50, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 63, 66, 67, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 92
119	3.254,32	21, 22, 25, 27, 29, 32, 35, 52, 54, 83, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 123, 125, 126, 127, 157, 199, 200
189	2.488,58	158, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 190, 191, 192, 195, 196, 197, 198
210	6.288,41	20, 30, 38, 39, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 56, 58, 60, 62, 64, 65, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 89, 124, 148, 207, 208, 209, 229, 232, 233, 234, 235, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 347, 359, 360, 369, 375, 381, 382
214	1.234,90	215, 216, 217, 218, 219, 222, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 371, 383
222	847,13	236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 371, 383
345	2.903,60	128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 159, 178, 193, 194

Fonte: Elaboração do autor

Figura 22 - Topologia inicial do sistema de 417 barras



Fonte: Adaptado de Souza et al. (2020)

5.2.1 Falta na barra 91

Neste cenário, uma falta permanente na barra 91 é analisada. Para que a falta seja totalmente isolada da rede é necessário a abertura das chaves 91-86, 91-1 e 417-91. Em virtude do isolamento, um montante de 3.215,84 kVA fica sem o fornecimento de energia elétrica. De acordo com os planos elaborados pelos algoritmos e expostos na Tabela 10, a matheurística é a única metodologia que consegue convergir com um tempo abaixo de 900 segundos. Segundo o seu plano de restauração, é possível restaurar 99,27% da carga que estava em falta, o que equivale a um montante de 3.056,98 kVA, por meio da abertura das chaves 57-19 e 2-19, e o fechamento das chaves 19-32, 87-88 e 84-243. Neste cenário a única barra que não foi restaurada é a barra 86. Para as demais metodologias, os resultados expostos na tabela representam o último resultado factível encontrado pela metodologia dentro do limite de 900 segundos que foi estipulado. O último resultado factível encontrado a partir da resolução do modelo de PLIM possui o mesmo valor de corte de carga que o algoritmo matheurístico, porém com um número maior de operações de chaveamento. O algoritmo VND, por sua vez, encontra uma solução com o mesmo valor de função objetivo que a matheurística, porém o algoritmo não conseguiu convergir a tempo. O último resultado factível encontrado pelo modelo cônico é de pior qualidade que os demais, sugerindo um número maior de operações de chaveamento e também um corte de carga maior.

Tabela 10 - Resultados obtidos para falta na barra 91

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	15-18, 37-40 50-51, 63-66 76-58, 242-248	65-383, 26-30 19-32, 87-88 84-243, 358-250	12	158,78	**95,06%**	900
PLIM	3-11, 57-19, 2-19	383-67, 19-32, 2-9, 87-88	7	23.26	**99,27%**	900
VND	57-19, 2-19	383-67, 19-32, 87-88	5	23,26	**99,27%**	900
Matheurística	57-19, 2-19	19-32, 87-88, 84-243	5	23,26	**99,27%**	52

Fonte: Elaboração do autor

5.2.2 Falta na barra 119

Neste cenário uma falta permanente na barra 119 é analisada. O isolamento da falta acontece após a abertura das chaves 119-122 e 119-93. Consequentemente, um montante de 3.254,32 kVA fica sem o fornecimento de energia elétrica. De acordo com os planos elaborados pelos

algoritmos e expostos na Tabela 11, nenhuma das metodologias conseguiu convergir antes do tempo máximo porém, a matheurística foi a metodologia que obteve o melhor valor de função objetivo. Segundo o seu plano de restauração, é possível que aconteça a restauração de apenas 18,51% das cargas que estão em falta, o que representa um montante de 602,37 kVA.

Tabela 11 - Resultados obtidos para falta na barra 119

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	–	–	0	3.254,32	**00,00%**	900
PLIM	93-118, 118-121, 57-19, 20-49	41-36, 84-243 124-127	7	3.103,13	**4,64%**	900
VND			0	3.254,32	**00,00%**	900
Matheurística	52-21, 56-148 199-118, 76-58	65-383, 38-29, 124-127, 148-137	8	2.649,62	**18,57%**	900

Fonte: Elaboração do autor

5.2.3 Falta na barra 189

Neste cenário uma contingência na barra 189 é analisada. Para que o isolamento da falta aconteça, é necessário a abertura das chaves 189-188, 158-189 e 417-189. Em virtude do isolamento, um montante de 2.488,58 kVA fica sem o fornecimento de energia elétrica. De acordo com os planos elaborados pelos algoritmos e expostos na Tabela 12, nenhuma das metodologias conseguiu convergir antes do tempo máximo porém, a matheurística foi a metodologia que obteve o melhor valor de função objetivo. Segundo o seu plano de restauração, é possível que aconteça a restauração de 88.52% das cargas que estão em falta, o que representa um montante de 2.202,89 kVA.

Tabela 12 - Resultados obtidos para falta na barra 189

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	128-140, 136-143, 149-147, 196-190, 180-177, 128-150, 20-56	159-179, 56-146, 124-127, 142-149, 147-56, 148-137	13	390,46	**84,32%**	900
PLIM	141-135, 155-136, 138-142, 183-186, 184-163, 20-56, 173-179, 158-181	159-179, 56-146, 124-127, 142-149 175-178, 147-56 172-178	15	1.357,87	**45,44%**	900
VND	167-175, 173-179 56-146, 160-171	175-178, 159-179 141-135		2.046,12	**17,78%**	900
Matheurística	128-140, 136-143, 158-198, 183-186, 128-150, 20-56, 158-183	159-179, 56-146 159-180, 124-127, 147-56, 145-148	13	286,27	**88.52%**	900

Fonte: Elaboração do autor

5.2.4 Falta na barra 210

Neste cenário, uma falta permanente na barra 210 é analisada. O isolamento da falta acontece proveniente da abertura das chaves 208-210 e 210-416. Após o isolamento, um montante de 5.659,00 kVA fica sem o fornecimento de energia elétrica. De acordo com os planos elaborados pelos algoritmos e expostos na Tabela 13, todas as quatro metodologias chegaram na mesma função objetivo, porém, apenas a matheurística conseguiu convergir antes do tempo máximo imposto. Segundo o plano de restauração obtido pela mesma, a restauração completa do sistema acontece a partir da abertura das chaves 76-77, 280-234 e 20-71, e fechamento das chaves 65-383, 292-235, 124-127 e 229-227.

Tabela 13 - Resultados obtidos para falta na barra 210

Método	Chaves indicadas para operação			Total de cargas (kVA)		Tempo (s)
	Abertura	Fechamento	Total	Cortadas	Restauradas (%)	
PCSOIM	250-359, 128-345 20-71	65-383, 274-208 38-29, 159-179	7	0	**100,00%**	900
PLIM	71-72, 125-345 280-234	368-369, 292-235 159-179, 124-127	7	0	**100,00%**	900
VND	76-77, 280-234 20-71	65-383, 292-235 124-127, 229-227	7	0	**100,00%**	900
Matheurística	76-77, 280-234, 20-71	65-383, 292-235 124-127, 229-227	7	0	**100,00%**	178

Fonte: Elaboração do autor

5.2.5 Falta na barra 214

Neste cenário, uma falta permanente na barra 214 é analisada. O isolamento da falta acontece proveniente da abertura das chaves 214-215 e 415-214. Após o isolamento, um montante de 1.234,90 kVA fica sem o fornecimento de energia elétrica. De acordo com os planos elaborados pelos algoritmos e expostos na Tabela 14, todas as metodologias convergiram dentro do limite proposto e em todos os planos de restauração é prevista a restauração completa da parcela que ficou desenergizada.

Tabela 14 - Resultados obtidos para falta na barra 214

Método	Chaves indicadas para operação			Total de cargas (kVA)		Tempo (s)
	Abertura	Fechamento	Total	Cortadas	Restauradas (%)	
PCSOIM	382-369	220-219, 381-382	3	0	**100,00%**	14
PLIM	–	220-219	1	0	**100,00%**	3
VND	–	220-219	1	0	**100,00%**	800
Matheurística	–	220-219	1	0	**100,00%**	10

Fonte: Elaboração do autor

5.2.6 Falta na barra 222

Neste cenário, uma contingência na barra 222 é analisada. Para que a falta seja completamente isolada da rede, é necessário a abertura das chaves 222-236 e 219-222. Após o isolamento, um montante de 762,00 kVA fica sem o fornecimento de energia elétrica. De acordo com os planos elaborados pelos algoritmos e expostos na Tabela 15, apenas a meta-heurística

VND não encontrou a solução que restaura completamente o sistema dentro do tempo limite.

Tabela 15 - Resultados obtidos para falta na barra 222

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	71-72	124-127, 358-250	3	0	**100,00%**	15
PLIM	72-76	124-127, 65-383	3	0	**100,00%**	6
VND	236-237, 245-246, 20-48, 242-248	65-383, 35-44, 84-243, 358-250	8	297.87	**60,90%**	900
Matheurística	20-71	124-127, 358-250	3	0	**100,00%**	57

Fonte: Elaboração do autor

5.2.7 Falta na barra 345

Neste cenário uma contingência na barra 345 é analisada. Para que a falta seja completamente isolada da rede, é necessária a abertura das chaves 344-345 e 128-345. Após o isolamento, um montante de 2.614,00 kVA fica sem o fornecimento de energia elétrica. De acordo com os planos elaborados pelos algoritmos e expostos na Tabela 15, todas as metodologias convergiram dentro do limite proposto e em todos os planos de restauração é prevista a restauração completa da parcela que ficou desenergizada.

Tabela 16 - Resultados obtidos para falta na barra 345

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PCSOIM	78-82	159-179, 381-382	3	0	**100,00%**	20
PLIM	–	159-179	1	0	**100,00%**	8
VND	–	159-179	1	0	**100,00%**	680
Matheurística	–	159-179	1	0	**100,00%**	7

Fonte: Elaboração do autor

5.3 Caso de estudo C

Nesta seção, o caso de estudo C é apresentado e discutido. Este caso de estudo é divido em três categorias de testes específicos. Na primeira categoria são simuladas faltas múltiplas nos sistemas de 53 e 417 barras. Na segunda categoria é considerada a presença de geração distribuída em seis barras do sistema de 417 barras. Na terceira categoria é considerado possível o remanejamento de carga em faltas únicas e múltiplas nos sistemas de 53 e 417 barras. Para

a execução dos testes, apenas duas das três metodologias foram utilizadas: o modelo PLIM e a matheurística. O objetivo deste caso de estudo é evidenciar a flexibilidade das metodologias ao considerar problemáticas diferentes das abordados nos outros dois casos de estudo.

5.3.1 Simulação de faltas múltiplas nos sistemas de 53 e 417 barras

A topologia inicial do sistema de 53 barras é a mesma utilizada no caso de estudo A. As barras escolhidas para a simulação das faltas também são as mesmas, uma vez que, geram-se os cenários de falta com os maiores valores de corte de carga. Foram simulados quatro cenários diferentes de falta múltiplas e as informações referentes aos cenários são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Informações dos cenários de faltas múltiplas simulados no sistema de 53 barras

Barras Isoladas	**Barras desconectadas**	**Carga não atendida (kVA)**
1 e 3	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 17, 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28	15.784,99
3 e 11	4, 5, 6, 7, 8, 12, 26, 27, 28, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 44 e 45	18.326,00
11 e 14	12, 15, 16, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49 e 50	19.095,97
14 e 21	15, 16, 18, 19, 20, 40, 41, 42, 46, 47, 48, 49 e 50	11.626,95

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontecem contingências permanentes nas barras 1 e 3 simultaneamente estão expostos na Tabela 18. Neste cenário de falta, um montante de 15.784,99 kVA de carga não atendida pode ser restaurado. As duas metodologias chegaram em planos de restauração similares, porém o modelo de PLIM conseguiu restaurar um montante de carga maior e, ao mesmo tempo, com um número de chaveamentos também menor. O plano de restauração obtido pelo modelo linearizado sugere a abertura das chaves **5-4, 25-24, 27-8, 26-27, 28-6 e 34-33**, e o fechamento das chaves **104-22, 28-27, 8-33, 35-40 e 28-50**. Com esse plano de restauração é possível restaurar um total de 10.472,00 kVA.

Tabela 18 - Resultados obtidos para falta múltipla nas barras 1 e 3

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	7-4, 10-9, 27-8, 26-27, 28-6, 34-33	104-22, 28-27, 8-33, 35-40, 10-38, 28-50	12	5.467,00	**65,37%**	7
Matheurística	5-4, 25-24, 27-8, 26-27, 28-6, 34-33	104-22, 28-27, 8-33, 35-40, 28-50	11	5.312,99	**66,34%**	7

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontecem contingências permanentes nas barras 3 e 11 simultaneamente estão expostos na Tabela 19. Neste cenário de falta, o montante de carga não atendida é de 18.236,00 kVA. Ambas as metodologias utilizadas encontraram planos de restauração similares, porém o modelo de PLIM encontrou uma solução com um valor maior de cargas restauradas. O plano obtido pela metodologia indica a abertura das chaves **8-7, 31-37, 22-9, 27-8, 26-27, 28-6, 44-45, 38-44, 33-39 e 34-33**, e fechamento das chaves **10-31, 13-12, 104-22, 8-25, 28-27, 35-40, 10-38 e 28-50**. Neste cenário de falta há um total de 9.843,00 kVA de carga restaurada.

Tabela 19 - Resultados obtidos para falta múltipla nas barras 3 e 11

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	8-7, 31-37, 22-9, 27-8, 26-27, 28-6, 44-45, 38-44, 33-39 e 34-33	10-31, 13-12, 104-22, 8-25, 28-27, 35-40, 10-38 e 28-50	18	8.393,00	**54,20%**	2
Matheurística	8-7, 45-12, 22-9, 27-8, 26-27, 28-6, 32-39, 33-39 e 34-33	13-12, 104-22, 8-25, 28-27, 35-40, 10-38 e 28-50	16	8.624,01	**52,94%**	5

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontecem contingências permanentes nas barras 11 e 14 simultaneamente estão expostos na Tabela 20. Neste cenário de falta, o montante de carga não atendida é de 19.095,97 kVA. Ambas as metodologias utilizadas encontraram planos de restauração similares, porém o modelo de PLIM encontrou uma solução com um valor maior de cargas restauradas. O plano obtido pela metodologia indica a abertura das chaves **31-37, 22-9, 44-45, 38-44, 33-39, 49-48 e 14-46**, e fechamento das chaves **10-31, 13-12, 104-22, 8-33, 10-38 e 28-50**. Neste cenário de falta há um total de 10.010,01 kVA de carga restaurada.

Tabela 20 - Resultados obtidos para falta múltipla nas barras 11 e 14

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	31-37, 22-9, 44-45, 38-44, 33-39, 49-48 e 14-46	10-31, 13-12, 104-22, 8-33, 10-38 e 28-50	13	9.085,96	**52,42%**	1
Matheurística	45-12, 22-9, 32-39, 33-39, 49-48 e 14-46	13-12, 104-22, 8-33, 10-38 e 28-50	11	9.316,97	**51,21%**	5

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontecem contingências permanentes nas barras 14 e 21 simultaneamente estão expostos na Tabela 21. Neste cenário de falta o montante de carga não atendida é de 11.626,95 kVA. Ambas as metodologias utilizadas encontraram a mesma solução. O plano obtido pelas metodologias indica a abertura das chaves **16-40, 42-41 e 47-42**, e fechamento das chaves **18-17, 35-40, e 28-50**. Neste cenário de falta há um total de 3.233,95 kVA de carga restaurada.

Tabela 21 - Resultados obtidos para falta múltipla nas barras 14 e 21

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	16-40, 42-41 e 47-42	18-17, 35-40, 28-50	18	8.393,00	**53,64%**	1
Matheurística	16-40, 42-41 e 47-42	18-17, 35-40, 28-50	18	8.393,00	**53,64%**	1

Fonte: Elaboração do autor

A topologia inicial do sistema de 417 barras é a mesma utilizada no caso de estudo A. As barras escolhidas para a simulação também são as mesmas que foram escolhidas no caso A. Foram simulados três cenários diferentes de falta múltiplas e as informações referentes aos cenários são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Informações dos cenários de faltas múltiplas simulados no sistema de 417 barras

Barra Isolada	**Carga não atendida (kVA)**	**Barras desconectadas**
119 e 210	9.542,73	20, 21, 22, 25, 27, 29, 30, 32, 35, 38, 39, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 54, 56, 58, 60, 62, 64, 65, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 89, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 123, 124, 125, 126, 127, 148, 157, 199, 200, 207, 208, 209, 229, 232, 233, 234, 235, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 347, 359, 360, 369, 375, 381 e 382
214 e 222	1.189,28	215, 216, 217, 218, 219, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 371 e 383
214 e 345	4.138,49	128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 159, 178, 193, 194, 215, 216, 217, 218, 219, 222, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 371 e 383

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontece, de forma simultânea, contingências permanentes nas barras 119 e 210 estão expostos na Tabela 23. Neste cenário de falta o montante de carga não atendida é de 9.542,73 kVA. O algoritmo matheurístico encontrou uma solução de melhor qualidade que a solução encontrada pelo modelo PLIM. O plano obtido pela metodologia híbrida indica a abertura das chaves **63-66, 76-77, 46-20, 199-118, 280-234, 20-71 e 20-56**, e fechamento das chaves **383-67, 65-383, 26-30, 292-235, 56-146, 124-127 e 229-227**. Neste cenário de falta há um total de 5.757,54 kVA de carga restaurada.

Tabela 23 - Resultados obtidos para faltas múltiplas nas barras 119 e 210

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	178-159, 234-235, 281-233 e 267-291	292-235, 172-178, 289-288 e 229-227	8	7.403,54	**22,41%**	900
Matheurística	63-66, 76-77, 46-20, 199-118, 280-234, 20-71 e 20-56	383-67, 65-383, 26-30, 292-235, 56-146, 124-127 e 229-227	14	3.785,19	**60,32%**	900

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontece, de forma simultânea, contingências permanentes nas barras 214 e 222 estão expostos na Tabela 24. Neste cenário de falta

o montante de carga não atendida é de 1.189,28 kVA. Ambas as metodologias encontraram soluções diferentes porém com o mesmo valor de função objetivo. Em ambas as metodologias é proposto o fechamento das chaves **65-383, 220-214 e 124-127**. A chave indicada pelo algoritmo para ser aberta é a chave **72-76** enquanto o modelo de PLIM sugere a abertura da chave **71-72**. Neste cenário de falta foi possível restaurar 100% da carga que estava sem atendimento.

Tabela 24 - Resultados obtidos para faltas múltiplas nas barras 214 e 222

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	71-72	65-383, 220-219 e 124-127	4	–	**100,00%**	266
Matheurística	72-76	65-383, 220-219 e 124-127	4	–	**100,00%**	58

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontece, de forma simultânea, contingências permanentes nas barras 214 e 345 estão expostos na Tabela 25. Neste cenário de falta o montante de carga não atendida é de 4.138,49 kVA. Ambas as metodologias encontraram a mesma solução. O plano de restauração obtido pelas metodologias sugere o fechamento das chaves **220-219 e 159-179**. Neste cenário de falta foi possível restaurar 100% da carga que estava sem atendimento.

Tabela 25 - Resultados obtidos para faltas múltiplas nas barras 214 e 345

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	–	220-219 e 159-179	2	–	**100,00%**	6
Matheurística	–	220-219 e 159-179	2	–	**100,00%**	13

Fonte: Elaboração do autor

5.3.2 Simulação de falta no sistema de 417 barras com presença de geração distribuída

Neste cenário de simulação de falta o objetivo é avaliar como as metodologias se comportam e também comparar com os resultados adquiridos no caso de estudo B que não considera a presença de GD no sistema. As barras que possuem GD são: 168, 200, 226, 237, 327 e 334. As informações referentes às barras com GDs são apresentadas na Tabela 26 e a topologia inicial do sistema de 417 barras com a presença de GD é apresentada na Figura 23. Foram simulados os mesmo cenários de faltas do caso B e as informações referentes aos cenários são apresentadas novamente na Tabela 27.

Tabela 26 - Informações dos GDs adicionados no sistema de distribuição de 417 barras

Parâmetros	**GD 1**	**GD 2**	**GD 3**	**GD 4**	**GD 5**	**GD 6**
Barra	168	200	226	237	327	334
S_{max} **(kVA)**	900,00	900,00	900,00	900,00	900,00	900,00
$P_{pré-falta}$ **(kW)**	722,99	722,99	722,99	722,99	722,99	722,99
$Q_{pré-falta}$ **(kVAr)**	353,94	353,94	353,94	353,94	353,94	353,94
Fator de potência	0,8 cap.	0,8 cap.	0,8 cap.	0,8 cap.	0,8 cap.	0,8 cap.
limite	0,8 ind.	0,8 ind.	0,8 ind.	0,8 ind.	0,8 ind.	0,8 ind.

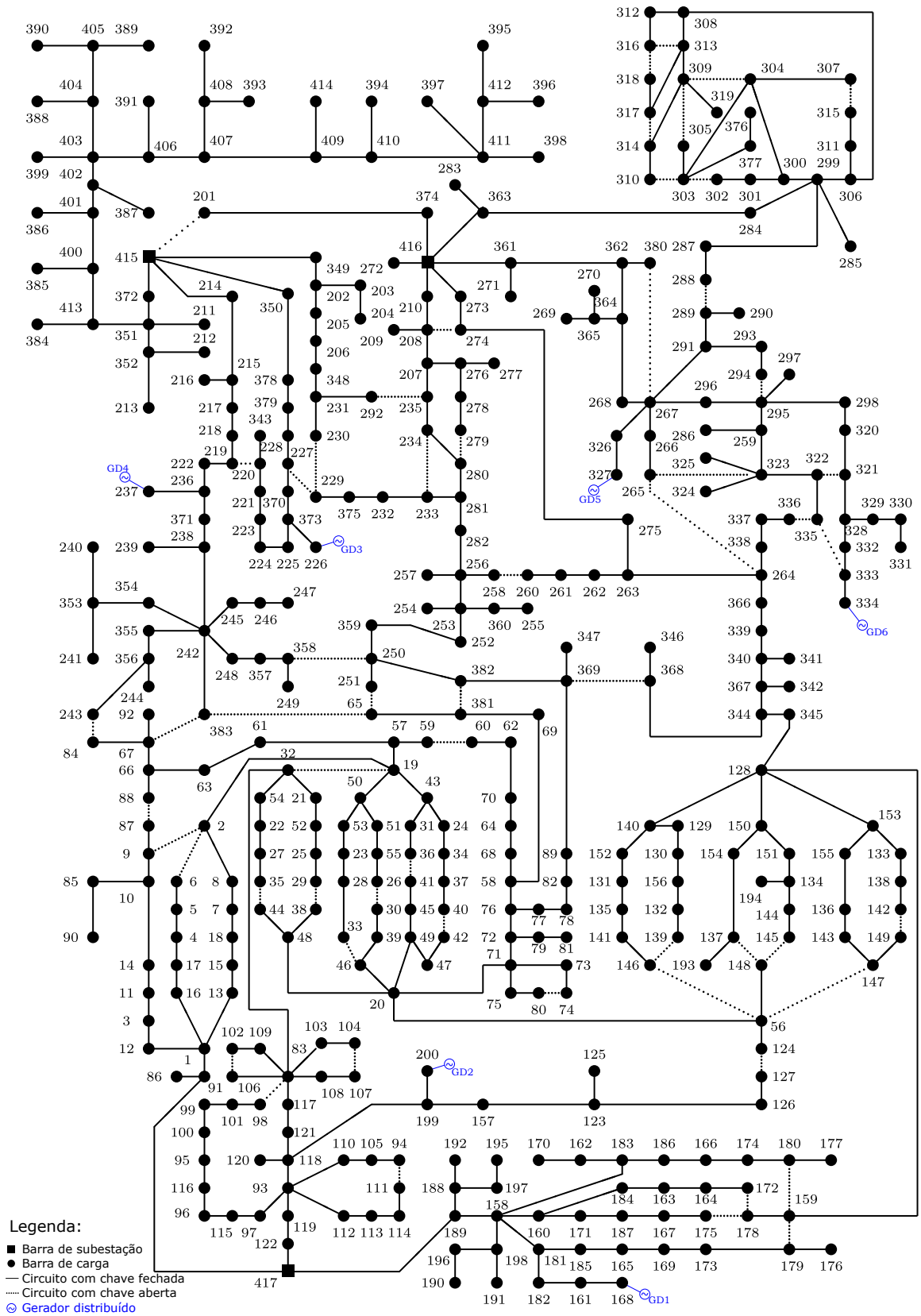
Fonte: Elaboração do autor

Tabela 27 - Informações dos cenários de falta simulados no sistema de 417 barras com GD

Barra Isolada	**Carga não atendida (kVA)**	**Barras desconectadas**
91	3.215,84	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 24, 26, 28, 31, 33, 34, 36, 37, 40, 43, 50, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 63, 66, 67, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 92
119	3.254,32	21, 22, 25, 27, 29, 32, 35, 52, 54, 83, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 123, 125, 126, 127, 157, 199, 200
189	2.488,58	158, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 190, 191, 192, 195, 196, 197, 198
210	6.288,41	20, 30, 38, 39, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 56, 58, 60, 62, 64, 65, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 89, 124, 148, 207, 208, 209, 229, 232, 233, 234, 235, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 347, 359, 360, 369, 375, 381, 382
214	1.234,90	215, 216, 217, 218, 219, 222, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 371, 383
222	847,13	236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 371, 383
345	2.903,60	128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 159, 178, 193, 194

Fonte: Elaboração do autor

Figura 23 - Topologia inicial do sistema do sistema de 417 barras com GD



Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontece uma falta permanente na barra 91 estão expostos na Tabela 28. Após o isolamento da falta, um montante de 3.215,84 kVA fica sem o fornecimento de energia elétrica. Neste cenário de falta ambas as metodologias conseguiram convergir dentro do tempo estipulado porém o modelo PLIM levou menos tempo. Os planos de restauração obtidos pelas metodologias é de mesma qualidade dos resultados obtidos no caso B para o cenário de falta na mesma barra. Os planos possuem o mesmo valor de função objetivo e o plano obtido pelo modelo PLIM sugere a abertura das chaves **(19-50 e 20-71)** e o fechamento das chaves **(383-67, 26-30 e 124-127)**. Para este cenário, um montante de 3.056,98 kVA de carga é restaurado.

Tabela 28 - Resultados obtidos para falta na barra 91 - Caso C

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	19-50 e 20-71	383-67, 26-30 e 124-127	5	23,26	**99,27%**	212
Matheurística	19-43 e 20-71	383-67, 40-42 e 124-127	5	23,26	**99,27%**	407

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontece uma contingência permanente na barra 119 estão expostos na Tabela 29. Neste cenário de falta, após o isolamento da mesma, um montante de 3.254,32 kVA fica sem o fornecimento. Para este cenário, apenas a matheurística conseguiu convergir dentro do tempo limite estipulado e, ao comparar com o cenário de falta na mesma barra do caso B, o valor da função objetivo da solução encontrada é de melhor qualidade. O plano de restauração obtido pelo algoritmo híbrido indica o fechamento das chaves **65-383 e 35-44** e a abertura das chaves **118-121, 105-94, 116-96, 83-32 e 76-58** , com isso, é capaz de se restaurar 58,67% da carga que estava presente na área fora-de-serviço.

Tabela 29 - Resultados obtidos para falta na barra 119 - Caso C

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	93-118, 83-103, 103-104, 101-99, 32-54 e 76-58	65-383, 104-107, 38-29 e 83-98	10	1.454,50	**55,29%**	900
Matheurística	118-121, 105-94, 116-96, 83-32 e 76-58	65-383 e 35-44	7	1.344,96	**58,67%**	715

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontece uma falta permanente na

barra 189 estão expostos na Tabela 30. Neste cenário de falta, um montante de 2.488,58 kVA fica sem fornecimento de energia elétrica. Neste cenário de falta, nenhuma metodologia conseguiu convergir dentro do tempo estipulado. Porém, o modelo PLIM encontra uma solução de melhor qualidade que o algoritmo matheurístico. O plano de restauração obtido pelo modelo sugere o fechamento das chaves **56-146, 124-127, 175-178 e 148-137** e a abertura das chaves **128-140, 128-150 e 20-71**. Após a operação dos chaveamentos indicados, é possível reestabelecer 98,84% das cargas que estão em falta, o que totaliza um montante de 2.459,72 kVA. Ao comparar os resultados obtidos neste caso de estudo com àqueles gerados no caso de estudo B é possível verificar que a presença de GD no sistema possibilitou a restauração de um montante maior de cargas.

Tabela 30 - Resultados obtidos para falta na barra 189 - Caso C

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	128-140, 128-150 e 20-71	56-146, 124-127, 175-178 e 148-137	7	29,09	**98,84%**	900
Matheurística	154-150, 183-186, 180-177, 167-175 e 158-181	159-179, 159-180, 175-178 e 148-137	9	1.148,59	**53,84%**	900

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontece uma falta permanente na barra 210 estão expostos na Tabela 31. Neste cenário de falta, após o isolamento da mesma, um montante de 5.659,00 kVA fica sem o fornecimento de energia elétrica. Os planos de restauração elaborados pelas metodologias possuem o mesmo valor de f.o. e só se diferem na abertura de uma chave. Ambas as metodologias conseguiram convergir dentro do tempo limite o que não aconteceu para o cenário de falta na barra 119 do caso de estudo B. A presença de GD no sistema possibilitou que uma quantidade de carga maior fosse restaurada e, também, auxiliou na convergência do modelo de PLIM dentro do tempo limite. O tempo de processamento que o algoritmo matheurístico precisou também foi menor. A proposta obtida pelas metodologias prevê a restauração completa da área que ficou sem fornecimento de energia.

Tabela 31 - Resultados obtidos para falta na barra 210 - Caso C

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	282-281 e 71-72	65-383, 124-127 e 229-227	5	–	**100,00%**	177
Matheurística	256-282 e 72-76	292-235, 124-127 e 358-250	5	–	**100,00%**	86

Fonte: Elaboração do autor

Os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontece uma falta permanente na barra 214 e na barra 222 estão expostos nas Tabela 32 e 33. Ambos os cenários são triviais e, como pode ser observado na tabela, a restauração completa do sistema é atingida com poucas operações de chaveamentos. Os resultados obtidos são os mesmos que o do caso de estudo B. O tempo de processamento em ambos os casos de estudos são similares.

Tabela 32 - Resultados obtidos para falta na barra 214 - Caso C

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	–	220-219	1	–	**100,00%**	2
Matheurística	–	220-219	1	–	**100,00%**	11

Fonte: Elaboração do autor

Tabela 33 - Resultados obtidos para falta na barra 222 - Caso C

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	20-71	65-383 e 35-44	3	–	**100,00%**	23
Matheurística	–	220-219	1	–	**100,00%**	10

Fonte: Elaboração do autor

Finalmente, os resultados obtidos pelas metodologias para quando acontece uma falta permanente na barra 345 estão expostos na Tabela 34. Assim como os dois últimos cenários, esse cenário também é trivial e ambas as metodologias obtiveram um plano de restauração com re-estabelecimento total. Os resultados são os mesmos obtidos no caso de estudo B e o tempo de processamento é similar.

Tabela 34 - Resultados obtidos para falta na barra 345 - Caso C

Método	**Chaves indicadas para operação**			**Total de cargas (kVA)**		**Tempo (s)**
	Abertura	**Fechamento**	**Total**	**Cortadas**	**Restauradas (%)**	
PLIM	–	159-179	1	–	**100,00%**	3
Matheurística	–	159-179	1	–	**100,00%**	7

Fonte: Elaboração do autor

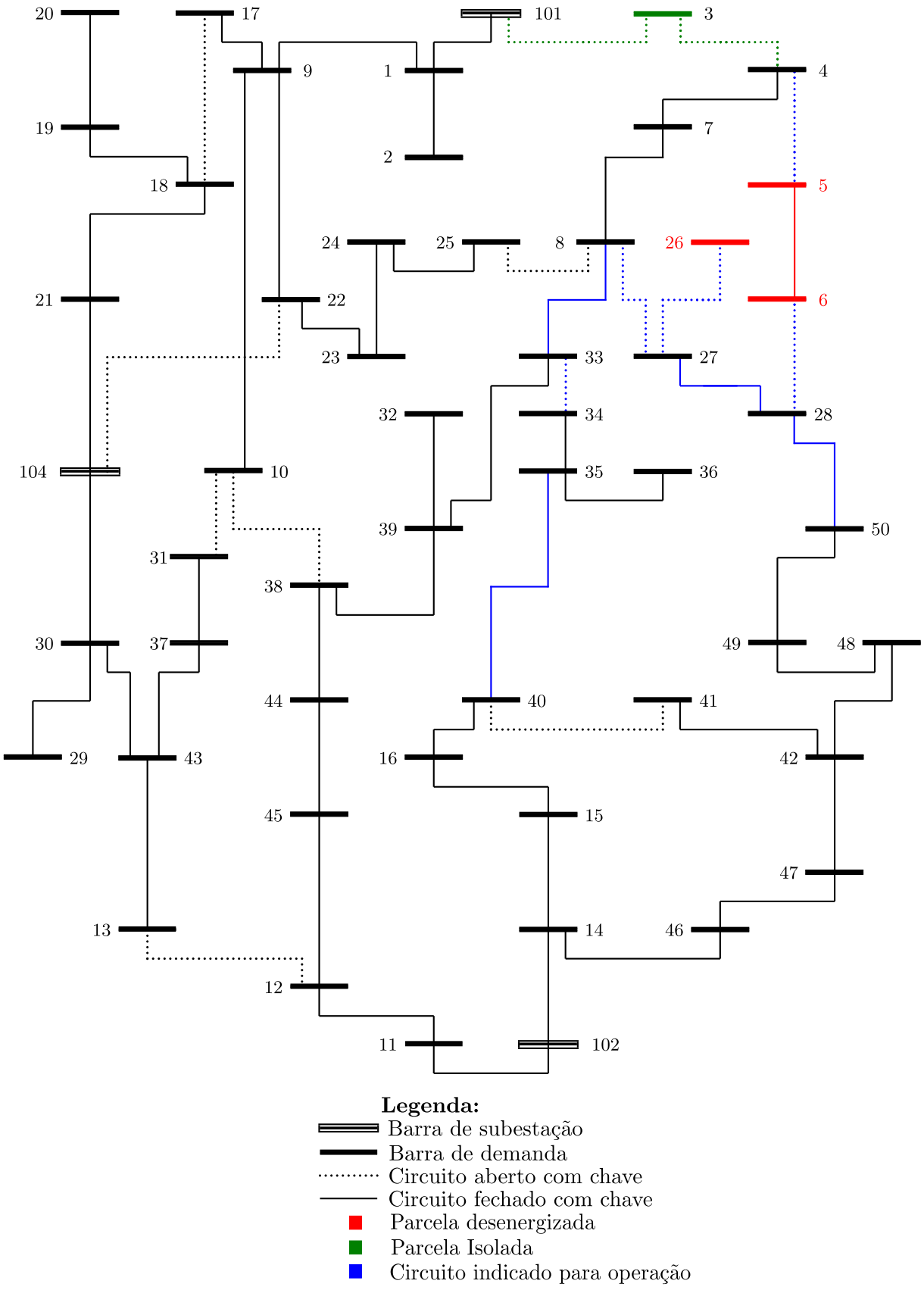
5.4 Discussões

Nesta seção, os resultados obtidos pelas metodologias são comparados e analisados. Como pode ser visto na Seção 5.1, tanto a matheurística quanto o modelo PLIM encontraram a solução ótima em um tempo bem baixo, enquanto a meta-heurística demorou um pouco mais para fechar a sua busca e encontrar a melhor solução. Para os casos mais críticos do caso de estudo A, o modelo matemático PLIM encontrou a solução ótima de forma bem rápida.

Já nos resultados obtidos para o Caso de estudo B, que considera um sistema de grande porte, a Matheurística demonstrou um excelente desempenho, conseguindo encontrar a melhor solução em um tempo aceitável para o PRSDEE e também, em um tempo menor do que o das outras metodologias. Para os casos de faltas nas barras 91, 222 e 345. Os resultados obtidos pelas metodologias também podem ser comparados com os encontrados por Souza et al. (2018). Portanto ao analisar o caso de falta na barra 91, é notável que a Matheurística se destaca das demais metodologias ao encontrar uma solução que possui o mesmo valor de função objetivo que a solução encontrada por Souza et al. (2018) utilizando um modelo de PCSOIM.

Os resultados obtidos no caso de estudo C, que considera testes especiais no sistema de distribuição, qualificam a versatilidade do modelo matemático e, por consequência, do algoritmo matheurístico. A possibilidade de se fazer testes com múltiplas faltas e também com a presença de GD, é uma característica que vem sido muito explorada na literatura do PRSDEE.

Figura 18 - Plano de restauração para falta na barra 3



Fonte: Elaboração do próprio autor

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou três metodologias especializadas na resolução do PRSDEE, sendo que duas das três metodologias propostas possuem uma busca baseada em vizinhança variável.

Inicialmente, foi realizado um breve levantamento referente ao estado de arte para a problema do trabalho, onde pode-se notar que os algoritmos propostos não haviam sido utilizados na literatura com a mesma abordagem.

Em seguida, foi desenvolvida a primeira metodologia proposta neste trabalho, um modelo matemático de PLIM especializado para o problema de restauração. Logo em seguida, a segunda metodologia é proposta, um algoritmo baseado na meta-heurística VND que transforma o problema de restauração em um problema de reconfiguração e depois resolve o problema de reconfiguração, diminuindo a complexidade e dificuldade inerentes à resolução do problema. Também realizou-se um estudo referente a outras meta-heurísticas baseadas em busca em vizinhança, levantando a vantagem de cada aplicação em singular tal como as vantagens em se utilizar o VND. Posteriormente, a terceira metodologia proposta foi desenvolvida, o algoritmo híbrido matheurístico que incorpora restrições referentes a vizinhança de uma solução no modelo matemático de PLIM.

As principais contribuições do trabalho são: um modelo PLIM especializado na resolução do problema de restauração, uma meta-heurística VND que trata o problema de restauração como se fosse um problema de reconfiguração e uma matheurística especializada para a resolução do problema.

Os resultados obtidos pelas metodologias foram comparados com os resultados obtidos por um modelo matemático de PCSOIM já conhecido na literatura e pôde-se notar que pelo menos uma das metodologias propostas encontrou uma solução de melhor qualidade ou de mesma qualidade em todos os casos, principalmente nos resultados referentes a um sistema de grande porte. A principal desvantagem de se utilizar metodologias baseadas em busca de vizinhança é que a estrutura de vizinhança precisa ser muito bem definida para que nenhuma possível solução de ótima qualidade não seja contemplada pela vizinhança.

Finalmente, como trabalho futuro, propõe-se:

- Desenvolver algoritmos baseados nas outras variantes do VNS: o GVNS, o BVNS e o RVNS.
- Considerar outras restrições como forma de representar a radialidade do sistema de dis-

tribuição.

- Otimizar as sub-rotinas utilizadas no algoritmo VND a fim de melhorar o seu tempo de processamento.
- Estudar o uso e a aplicação de outras técnicas de programação inteira com o intuito de otimizar o algoritmo matheurístico.

6.1 Publicações

Ao longo do doutorado foram desenvolvidos trabalhos em parceria com professores e colegas do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Unesp de Ilha Soleira. Os trabalhos desenvolvidos são listados a seguir:

i. SOUZA, E. S.; **PUERTA, G. F.**; ROMERO, R. An ac mathematical model for solving complexrestoration problems in radial distribution systems in a treatable runtime. *IEEE Access*, IEEE. v. 8, p. 228303–228314, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3046238.

ii. TABARES, A.; **PUERTA, G. F.**; FRANCO, J.F.; ROMERO, R. Planning of Reserve Branches to Increase Reconfiguration Capability in Distribution Systems: A Scenario-Based Convex Programming Approach. *IEEE Access*, IEEE. vol. 9, pp. 104707-104721, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3099435.

REFERÊNCIAS

AKBARI, T.; BINA, M. T. A linearized formulation of ac multi-year transmission expansion planning: A mixed-integer linear programming approach. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, Lausanne, v. 114, p. 93–100, 2014.

BENDERS, J. F. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische Mathematik*, Berlin, v. 4, n. 1, p. 238–252, 1962.

BLUM, C.; PUCHINGER, J.; RAIDL, G. R.; ROLI, A. Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey. *Applied soft computing*, Elsevier, Amsterdam, v. 11, n. 6, p. 4135–4151, 2011.

BOSCHETTI, M. A.; MANIEZZO, V. Matheuristics: using mathematics for heuristic design. *4OR*, Springer, Berlin, p. 1–36, 2022.

BOSCHETTI, M. A.; MANIEZZO, V.; ROFFILLI, M.; RÖHLER, A. B. Matheuristics: Optimization, simulation and control. In: SPRINGER. *International Workshop on Hybrid Metaheuristics*. Udine, Itália, 2009. p. 171–177.

CARRESE, S.; D'ANDREAGIOVANNI, F.; GIACCHETTI, T.; NARDIN, A.; ZAMBERLAN, L. An optimization model and genetic-based matheuristic for parking slot rent optimization to carsharing. *Research in Transportation Economics*, Elsevier, Netherlands, v. 85, p. 100962, 2021.

CARVALHO, P.; FERREIRA, L.; BARRUNCHO, L. Optimization approach to dynamic restoration of distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, United Kingdom, v. 29, n. 3, p. 222–229, 2007.

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*, IEEE, United States, v. 9, n. 6, p. 6793–6805, 2017.

CHEN, B.; CHEN, C.; WANG, J.; BUTLER-PURRY, K. L. Sequential service restoration for unbalanced distribution systems and microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, New York, v. 33, n. 2, p. 1507–1520, 2017.

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

CHEN, X.; WU, W.; ZHANG, B. Robust restoration method for active distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, New York, v. 31, n. 5, p. 4005–4015, 2015.

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, Elsevier, Oxford, v. 22, n. 7, p. 497–505, 2000.

DANNA, E.; ROTHBERG, E.; PAPE, C. L. Exploring relaxation induced neighborhoods to improve mip solutions. *Mathematical Programming*, Springer, Berlin, v. 102, n. 1, p. 71–90, 2005.

DANTZIG, G. B.; WOLFE, P. Decomposition principle for linear programs. *Operations research*, INFORMS, United States, v. 8, n. 1, p. 101–111, 1960.

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

EZUGWU, A. E.; IKOTUN, A. M.; OYELADE, O. O.; ABUALIGAH, L.; AGUSHAKA, J. O.; EKE, C. I.; AKINYELU, A. A. A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, Netherlands, v. 110, p. 104743, 2022.

FARIA, W. R.; CARVALHO, E. O.; DANTAS, L. B.; MACIEL, C. D.; ALBERTO, L. F.; JR, J. B. L.; JR, B. R. P. Service restoration in modern distribution systems addressing grid-connected and islanded operations. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, Lausanne, v. 196, p. 107238, 2021.

FERREIRA, L. R.; AOKI, A. R.; LAMBERT-TORRES, G. A reinforcement learning approach to solve service restoration and load management simultaneously for distribution networks. *IEEE Access*, IEEE, United States, v. 7, p. 145978–145987, 2019.

FISCHETTI, M.; FISCHETTI, M. Matheuristics. In: MARTÍ, R.; PARDALOS, P. M.; RESENDE, M. G. C. (Ed.). *Handbook of Heuristics*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 121–153. ISBN 978-3-319-07124-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07124-4_14>.

FISCHETTI, M.; LODI, A. Local branching. *Mathematical programming*, Springer, Berlin, v. 98, n. 1, p. 23–47, 2003.

FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*. United States: Thomson/Brooks/Cole, 2003. 517 p. ISBN 0534388094.

FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. A mixed-integer linear programming model for the electric vehicle charging coordination problem in unbalanced electrical distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, United States, v. 6, n. 5, p. 2200–2210, 2015.

FROTA, Y. A. D. M. *Problemas de Coloração em Grafos*. Tese (Tese) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/URFJ, Rio de Janeiro, 2008.

GAO, H.; CHEN, Y.; XU, Y.; LIU, C.-C. Resilience-oriented critical load restoration using microgrids in distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, United States, v. 7, n. 6, p. 2837–2848, 2016.

GARCIA, V. J. *Metaheurísticas multiobjetivo para o problema de restauração do serviço em redes de distribuição de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas– UNICAMP, 2005.

GEOFFRION, A. M. Lagrangian relaxation for integer programming. In: *50 Years of Integer Programming 1958-2008*. Netherlands: Springer, 2010. p. 243–281.

HAFEZ, A. A.; OMRAN, W. A.; HEGAZY, Y. G. A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, United States, v. 9, n. 3, p. 1911–1919, 2016.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. A tutorial on variable neighborhood search. *Les Cahiers du GERAD*, Citeseer, Montreal, v. 711, p. 2440, 2003.

HANSEN, P.; MLADENOVIĆ, N.; PEREZ-BRITOS, D. Variable neighborhood decomposition search. *Journal of Heuristics*, Springer, United States, v. 7, n. 4, p. 335–350, 2001.

HOME-ORTIZ, J. M.; OLIVEIRA, W. C. D.; MANTOVANI, J. R. S. Optimal power flow problem solution through a matheuristic approach. *IEEE Access*, IEEE, United States, v. 9, p. 84576–84587, 2021.

HOME-ORTIZ, J. M.; POURAKBARI-KASMAEI, M.; LEHTONEN, M.; MANTOVANI, J. R. S. A mixed integer conic model for distribution expansion planning: Matheuristic approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, United States, v. 11, n. 5, p. 3932–3943, 2020.

HONG, J.; MOON, K.; LEE, K.; LEE, K.; PINEDO, M. L. An iterated greedy matheuristic for scheduling in steelmaking-continuous casting process. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, United Kingdom, v. 60, n. 2, p. 623–643, 2022.

IBM ILOG CPLEX. 2021. [Online]. Available at: <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer>.

JABR, R. A.; SINGH, R.; PAL, B. C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, New York, v. 27, n. 2, p. 1106–1115, 2012.

KHUSHALANI, S.; SOLANKI, J. M.; SCHULZ, N. Optimized restoration of unbalanced distribution systems. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS PWRS*, IEEE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS, v. 22, n. 2, p. 624, 2007.

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*, IEEE, New York, v. 26, n. 3, p. 1110–1117, 2010.

KOUTSOUKIS, N. C.; KARAFOTIS, P. A.; GEORGILAKIS, P. S.; HATZIARGYRIOU, N. D. Optimal service restoration of power distribution networks considering voltage regulation. In: IEEE. *2017 IEEE Manchester PowerTech*. Manchester, UK, 2017. p. 1–6.

KOVAČKI, N. V.; VIDOVIĆ, P. M. Distribution network supply restoration using measurement-based robust optimization approach. *Electric Power Systems Research*, Elsevier,

Lausanne, v. 210, p. 108170, 2022.

LAVORATO, M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, New York, v. 27, n. 1, p. 172–180, 2012.

LEE, S.; KIM, K.; KIM, H.; LEE, J.; NAM, K. Expert system-aided service restoration in distribution automation. In: IEEE. *[Proceedings] 1992 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Chicago, IL, USA, 1992. p. 157–161.

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*, IEEE, New York, v. 29, n. 6, p. 3021–3029, 2014.

LÓPEZ, J. C.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Optimal restoration/maintenance switching sequence of unbalanced three-phase distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, United States, v. 9, n. 6, p. 6058–6068, 2017.

LUAN, W.; IRVING, M. R.; DANIEL, J. S. Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, IET, United Kingdom, v. 149, n. 2, p. 145–151, 2002.

MACEDO, L. H.; MUÑOZ-DELGADO, G.; CONTRERAS, J.; ROMERO, R. Optimal service restoration in active distribution networks considering microgrid formation and voltage control devices. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, Istanbul, Turkey, v. 57, n. 6, p. 5758–5771, 2021.

MANIEZZO, V.; STÜTZLE, T.; VOSS, S. *Matheuristics*. Switzerland: Springer, 2021.

MARQUES, L. T.; DELBEM, A. C. B.; LONDON, J. B. A. Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, United States, v. 9, n. 3, p. 2359–2370, 2017.

MENDONCA, A. A. A. Modelos e técnicas de local branching para o problema de abastecimento de linhas de montagem. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

MIU, K. N.; CHIANG, H.-D.; MCNULTY, R. J. Multi-tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks. In: IEEE. *Proceedings of the 21st International Conference on Power Industry Computer Applications. Connecting Utilities. PICA 99. To the Millennium and Beyond (Cat. No. 99CH36351)*. Santa Clara, CA, USA, 1999. p. 153–159.

MIU, K. N.; CHIANG, H.-D.; YUAN, B.; DARLING, G. Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, New York, v. 13, n. 3, p. 789–795, 1998.

MLADENOVIĆ, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, Elsevier, United Kingdom, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997.

MORELATO, A.; MONTICELLI, A. Heuristic search approach to distribution system restoration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, New York, v. 4, n. 4, p. 2235–2241,

1989.

PERALTA, R. A. V. *Restauração automática de sistemas de distribuição de energia elétrica*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2019.

POSSAGNOLO, L. H. F. M. *Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2015.

RAIDL, G. R.; PUCHINGER, J.; BLUM, C. Metaheuristic hybrids. In: *Handbook of metaheuristics*. United States: Springer, 2019. p. 385–417.

ROMERO, J. G. Y.; HOME-ORTIZ, J. M.; JAVADI, M. S.; GOUGH, M.; MANTOVANI, J. R. S.; CATALÃO, J. P. Matheuristic algorithm based on neighborhood structure to solve the reconfiguration problem of active distribution systems. In: IEEE. *2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. Bari, Italy, 2021. p. 1–6.

ROMERO, R.; FRANCO, J. F.; LEÃO, F. B.; RIDER, M. J.; SOUZA, E. S. de. A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, New York, v. 31, n. 2, p. 1259–1268, 2016.

RUPOLO, D. *Planejamento integrado de redes de distribuição de energia elétrica com fontes renováveis de geração distribuída na média e baixa tensão*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"– UNESP, Ilha Solteira, 2017.

RUVALCABA-SANDOVAL, D. A.; OLIVARES-BENITEZ, E.; ROJAS, O.; SOSA-GÓMEZ, G. Matheuristics for the design of a multi-step, multi-product supply chain with multimodal transport. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Switzerland, v. 11, n. 21, p. 10251, 2021.

SHEN, F.; WU, Q.; XUE, Y. Review of service restoration for distribution networks. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, SGEPRI, China, v. 8, n. 1, p. 1–14, 2019.

SOUZA, E. S.; PUERTA, G. F.; ROMERO, R. An ac mathematical model for solving complex restoration problems in radial distribution systems in a treatable runtime. *IEEE Access*, IEEE, United States, v. 8, p. 228303–228314, 2020.

SOUZA, E. S.; ROMERO, R.; FRANCO, J. F. Restoration of electrical distribution systems using a relaxed mathematical model. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, United States, v. 29, n. 2, p. 259–269, 2018.

SOUZA, E. S. d. *Propostas de modelagem matemática para o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais* 2014. 167 f. 1-167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"– UNESP, Ilha Solteira, 2014.

SOUZA, E. S. d. *Novas modelagens matemáticas para otimização do problema de restauração*

em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"– UNESP, Ilha Solteira, 2018.

VARGAS, R.; MACEDO, L. H.; HOME-ORTIZ, J. M.; ROMERO, R. Optimal restoration of distribution systems considering temporary closed-loop operation. *IEEE Systems Journal*, IEEE, 2021.

WANG, S.; CHIANG, H.-D. Multi-objective service restoration of distribution systems using user-centered methodology. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, United Kingdom, v. 80, p. 140–149, 2016.

WU, F. F.; MONTICELLI, A. Analytical tools for power system restoration-conceptual design. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, New York, v. 3, n. 1, p. 10–26, 1988.

XU, Y.; LIU, C.-C.; SCHNEIDER, K. P.; TUFFNER, F. K.; TON, D. T. Microgrids for service restoration to critical load in a resilient distribution system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, United States, v. 9, n. 1, p. 426–437, 2016.

ZIDAN, A.; KHAIRALLA, M.; ABDRABOU, A. M.; KHALIFA, T.; SHABAN, K.; ABDRABOU, A.; SHATSHAT, R. E.; GAOUDA, A. M. Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: State-of-the-art and future trends. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, United States, v. 8, n. 5, p. 2170–2185, 2016.

ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS

A.1 Sistema de 53 barras

Tabela 35 - Dados de capacidade de carregamento das subestações do sistema de 53 barras

Subestação	**Potência nominal (kVA)**
101	33.400,00
103	30.000,00
104	22.000,00

Fonte: Souza (2014)

Tabela 36 - Dados de impedância das linhas do sistema de 53 barras

Circuito $i-j$		**Resistência**	**Reatância**	**Corrente**	**Circuito $i-j$**		**Resistência**	**Reatância**	**Corrente**
Barra	**Barra**	**(Ω)**	**(Ω)**	**Máx. (A)**	**Barra**	**Barra**	**(Ω)**	**(Ω)**	**Máx. (A)**
101	**1**	0,0543	0,0675	600	**28**	**6**	0,3655	0,2520	150
101	**3**	0,0421	0,0524	600	**104**	**30**	0,0543	0,0675	600
4	**3**	0,0603	0,0749	600	**29**	**30**	0,2281	0,1572	150
7	**4**	0,0483	0,0600	600	**43**	**30**	0,1916	0,1950	250
5	**4**	0,1472	0,1499	250	**37**	**43**	0,1828	0,1260	150
8	**7**	0,0603	0,0749	600	**31**	**37**	0,1367	0,0942	150
6	**5**	0,1179	0,1201	250	**10**	**31**	0,2281	0,1572	150
9	**1**	0,0663	0,0824	600	**43**	**13**	0,1095	0,0925	400
2	**1**	0,1472	0,1499	250	**45**	**12**	0,0483	0,0600	600
10	**9**	0,3388	0,3449	250	**44**	**45**	0,0421	0,0524	600
102	**14**	0,0725	0,0901	600	**38**	**44**	0,0603	0,0749	600
15	**14**	0,1769	0,1802	250	**39**	**38**	0,0809	0,0824	500
16	**15**	0,1326	0,1350	250	**32**	**39**	0,2968	0,2046	150
102	**11**	0,0543	0,0675	600	**33**	**39**	0,1326	0,1350	250
12	**11**	0,0603	0,0749	600	**8**	**33**	0,2208	0,2248	250
13	**12**	0,3194	0,2202	150	**34**	**33**	0,1367	0,0942	150
20	**19**	0,2281	0,1572	150	**35**	**34**	0,1594	0,1099	150
19	**18**	0,1828	0,1260	150	**36**	**35**	0,1594	0,1099	150
18	**17**	0,2968	0,2046	150	**40**	**41**	0,2741	0,1890	150
17	**9**	0,1256	0,1060	400	**16**	**40**	0,1828	0,1260	150
21	**18**	0,1472	0,1499	250	**42**	**41**	0,2741	0,1890	150
104	**21**	0,0730	0,0617	400	**48**	**42**	0,1828	0,1260	150
104	**22**	0,1769	0,1802	250	**49**	**48**	0,2741	0,1890	150
22	**9**	0,2208	0,2248	250	**50**	**49**	0,1594	0,1099	150
24	**23**	0,2507	0,1729	150	**47**	**42**	0,0911	0,0769	400
23	**22**	0,2054	0,1416	150	**46**	**47**	0,1472	0,1499	250
25	**24**	0,1594	0,1099	150	**14**	**46**	0,1002	0,0846	400
8	**25**	0,2054	0,1416	150	**35**	**40**	0,1301	0,0897	150
27	**8**	0,1769	0,1802	250	**10**	**38**	0,1828	0,1260	150
26	**27**	0,2507	0,1729	150	**28**	**50**	0,1126	0,0776	150
28	**27**	0,2281	0,1572	150					

Fonte: Souza (2014)

Tabela 37 - Dados de demanda das barras do sistema de 53 barras

Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
101	0,00	0,00	**25**	623,70	302,07
102	0,00	0,00	**26**	831,60	402,78
104	0,00	0,00	**27**	1.039,50	503,42
1	2.910,60	1.409,64	**28**	485,10	234,93
2	1.039,50	503,43	**29**	970,20	469,85
3	485,10	234,93	**30**	1.801,80	872,64
4	762,30	369,22	**31**	485,10	234,93
5	1.801,80	872,64	**32**	1.178,10	570,57
6	485,10	234,93	**33**	2.009,70	973,36
7	693,00	335,64	**34**	831,60	402,79
8	1.316,70	637,71	**35**	623,70	302,07
9	831,60	402,79	**36**	207,90	100,72
10	2.009,70	973,36	**37**	1.455,30	704,86
11	207,90	100,72	**38**	762,30	369,21
12	1.247,40	604,14	**39**	693,00	335,64
13	762,30	369,22	**40**	970,20	469,85
14	693,00	335,64	**41**	623,70	302,07
15	970,20	469,85	**42**	831,60	402,79
16	1.316,70	637,71	**43**	900,90	436,36
17	485,10	234,93	**44**	970,20	469,85
18	831,60	402,79	**45**	554,40	268,50
19	970,20	469,85	**46**	1.247,40	604,14
20	554,40	268,50	**47**	693,00	335,64
21	1.247,40	604,14	**48**	554,40	268,50
22	762,30	369,22	**49**	346,50	167,78
23	693,00	335,64	**50**	554,40	268,50
24	346,50	167,78			

Fonte: Souza (2014)

A.2 Sistema de 417 barras

Tabela 38 - Dados de demanda das barras do sistema de 417 barras

Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
800	0	0	**206**	118	57
415	0	0	**207**	318	154
416	0	0	**208**	161	78
417	0	0	**209**	126	61
1	0	0	**210**	59	29
2	122	59	**211**	24	12
3	0	0	**212**	24	12

continua na próxima página

Tabela 38 – continuação da página anterior

Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
4	0	0	**213**	5	2
5	114	55	**214**	126	61
6	51	25	**215**	56	27
7	83	40	**216**	62	30
8	0	0	**217**	0	0
9	122	59	**218**	32	15
10	122	59	**219**	158	77
11	77	37	**220**	126	61
12	5	3	**221**	202	98
13	68	33	**222**	41	20
14	71	34	**223**	81	39
15	0	0	**224**	126	61
16	0	0	**225**	202	98
17	77	37	**226**	18	9
18	30	14	**227**	202	98
19	13	6	**228**	106	51
20	0	0	**229**	175	85
21	194	94	**230**	174	84
22	77	37	**231**	113	55
23	77	37	**232**	202	98
24	77	37	**233**	0	0
25	122	59	**234**	202	98
26	104	51	**235**	403	195
27	0	0	**236**	202	98
28	77	37	**237**	126	61
29	243	118	**238**	0	0
30	77	37	**239**	29	14
31	77	37	**240**	9	4
32	0	0	**241**	5	2
33	121	58	**242**	0	0
34	194	94	**243**	18	9
35	122	59	**244**	45	22
36	77	37	**245**	32	16
37	0	0	**246**	61	30
38	0	0	**247**	81	39
39	96	47	**248**	126	61
40	122	59	**249**	23	11
41	70	34	**250**	14	7
42	58	28	**251**	18	9
43	0	0	**252**	126	61
44	122	59	**253**	5	3
45	122	59	**254**	26	13

continua na próxima página

Tabela 38 – continuação da página anterior

Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
46	122	59	**255**	18	9
47	86	42	**256**	126	61
48	77	37	**257**	81	39
49	0	0	**258**	0	0
50	122	59	**259**	126	61
51	122	59	**260**	41	20
52	122	59	**261**	0	0
53	0	0	**262**	28	14
54	42	20	**263**	30	14
55	122	59	**264**	81	39
56	13	6	**265**	202	98
57	77	37	**266**	318	154
58	50	24	**267**	176	85
59	0	0	**268**	126	61
60	60	29	**269**	6	3
61	71	34	**270**	31	15
62	122	59	**271**	60	29
63	77	37	**272**	56	27
64	95	46	**273**	126	61
65	121	58	**274**	118	57
66	77	37	**275**	126	61
67	103	50	**276**	202	98
68	52	25	**277**	10	5
69	57	27	**278**	126	61
70	171	83	**279**	202	98
71	121	58	**280**	318	154
72	39	19	**281**	82	40
73	119	58	**282**	126	61
74	49	24	**283**	22	10
75	0	0	**284**	13	6
76	50	24	**285**	71	34
77	44	21	**286**	101	49
78	82	40	**287**	113	54
79	132	64	**288**	126	61
80	194	94	**289**	0	0
81	5	3	**290**	34	17
82	122	59	**291**	83	40
83	3	1	**292**	59	29
84	52	25	**293**	126	61
85	103	50	**294**	145	70
86	21	10	**295**	202	98
87	21	10	**296**	50	24

continua na próxima página

Tabela 38 – continuação da página anterior

Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
88	21	10	**297**	41	20
89	5	3	**298**	202	98
90	5	3	**299**	77	37
91	0	0	**300**	161	78
92	21	10	**301**	477	231
93	18	9	**302**	68	33
94	122	59	**303**	14	7
95	116	56	**304**	4	2
96	7	3	**305**	5	3
97	64	31	**306**	66	32
98	49	24	**307**	5	3
99	16	8	**308**	60	29
100	77	37	**309**	95	46
101	119	58	**310**	5	3
102	71	34	**311**	19	9
103	77	37	**312**	67	32
104	194	94	**313**	18	9
105	122	59	**314**	33	16
106	55	27	**315**	21	10
107	38	18	**316**	33	16
108	22	10	**317**	42	20
109	5	3	**318**	52	25
110	77	37	**319**	43	21
111	122	59	**320**	126	61
112	38	18	**321**	107	52
113	122	59	**322**	202	98
114	27	13	**323**	126	61
115	64	31	**324**	24	12
116	0	0	**325**	101	49
117	0	0	**326**	81	39
118	0	0	**327**	155	75
119	0	0	**328**	23	11
120	79	38	**329**	31	15
121	247	119	**330**	126	61
122	0	0	**331**	13	6
123	0	0	**332**	56	27
124	0	0	**333**	120	58
125	5	3	**334**	126	61
126	0	0	**335**	403	195
127	0	0	**336**	81	39
128	77	37	**337**	177	86
129	122	59	**338**	151	73

continua na próxima página

Tabela 38 – continuação da página anterior

Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
130	62	30	**339**	9	4
131	105	51	**340**	29	14
132	122	59	**341**	14	7
133	77	37	**342**	23	11
134	77	37	**343**	45	22
135	0	0	**344**	0	0
136	85	41	**345**	36	17
137	8	4	**346**	5	2
138	122	59	**347**	9	4
139	35	17	**348**	80	39
140	55	27	**349**	0	0
141	153	74	**350**	0	0
142	316	153	**351**	0	0
143	105	51	**352**	0	0
144	20	10	**353**	0	0
145	95	46	**354**	0	0
146	38	18	**355**	0	0
147	83	40	**356**	0	0
148	50	24	**357**	0	0
149	77	37	**358**	0	0
150	122	59	**359**	0	0
151	102	49	**360**	0	0
152	60	29	**361**	0	0
153	77	37	**362**	0	0
154	194	94	**363**	0	0
155	56	27	**364**	0	0
156	122	59	**365**	0	0
157	0	0	**366**	0	0
158	3	1	**367**	0	0
159	0	0	**368**	0	0
160	52	25	**369**	0	0
161	194	94	**370**	5	3
162	10	5	**371**	0	0
163	128	62	**372**	0	0
164	16	8	**373**	0	0
165	37	18	**374**	0	0
166	154	75	**375**	0	0
167	0	0	**376**	86	41
168	5	3	**377**	86	41
169	78	38	**378**	0	0
170	5	3	**379**	0	0
171	27	13	**380**	5	3

continua na próxima página

Tabela 38 – continuação da página anterior

Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Barra	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
172	103	50	**381**	0	0
173	122	59	**382**	0	0
174	72	35	**383**	5	3
175	5	3	**384**	68	33
176	122	59	**385**	15	7
177	194	94	**386**	56	27
178	5	3	**387**	12	6
179	77	37	**388**	50	24
180	82	40	**389**	115	56
181	53	26	**390**	14	7
182	122	59	**391**	5	2
183	64	31	**392**	19	9
184	86	42	**393**	34	17
185	82	40	**394**	10	5
186	0	0	**395**	40	19
187	167	81	**396**	28	14
188	0	0	**397**	14	7
189	0	0	**398**	17	8
190	131	64	**399**	41	20
191	21	10	**400**	0	0
192	21	10	**401**	0	0
193	21	10	**402**	0	0
194	21	10	**403**	0	0
195	5	3	**404**	0	0
196	0	0	**405**	0	0
197	0	0	**406**	0	0
198	0	0	**407**	0	0
199	0	0	**408**	0	0
200	52	25	**409**	0	0
201	202	98	**410**	0	0
202	202	98	**411**	0	0
203	73	35	**412**	0	0
204	81	39	**413**	0	0
205	115	56	**414**	19	9

Fonte: Adaptado de Souza et al. (2020)

Tabela 39 - Dados de ramos do sistema de 417 barras

Barra inicial	**Barra final**	**Resistência [Ω]**	**Reatância [Ω]**	**Corrente Máx. (A)**	**Barra inicial**	**Barra final**	**Resistência [Ω]**	**Reatância [Ω]**	**Corrente Máx. (A)**
273	**274**	0,083699	0,057708	300	**196**	**190**	0,010965	0,007560	200
274	**275**	0,115863	0,079884	300	**182**	**181**	0,032895	0,022680	200
275	**263**	0,115132	0,079380	300	**161**	**182**	0,084065	0,057960	200
261	**262**	0,063094	0,053266	300	**168**	**161**	0,076755	0,052920	200
260	**261**	0,037973	0,032058	300	**181**	**185**	0,048300	0,056975	500
338	**264**	0,067983	0,046872	200	**185**	**165**	0,037744	0,038432	400
337	**338**	0,042033	0,028980	200	**162**	**183**	0,075946	0,064116	300
336	**337**	0,029240	0,020160	200	**170**	**162**	0,064262	0,054252	300
264	**366**	0,008772	0,006048	200	**183**	**186**	0,035052	0,029592	300
366	**339**	0,001097	0,000756	200	**186**	**166**	0,084709	0,071514	300
339	**340**	0,027412	0,018900	200	**166**	**174**	0,090551	0,076446	300
340	**341**	0,113305	0,078120	200	**174**	**180**	0,084709	0,071514	300
367	**342**	0,009137	0,006300	200	**180**	**177**	0,058480	0,040320	200
367	**344**	0,115132	0,079380	200	**184**	**163**	0,091375	0,063000	200
344	**345**	0,058480	0,040320	200	**163**	**164**	0,032895	0,022680	200
344	**368**	0,052998	0,036540	200	**164**	**172**	0,138890	0,095760	200
368	**346**	0,131580	0,090720	200	**171**	**187**	0,091375	0,063000	200
128	**140**	0,032131	0,027126	300	**187**	**167**	0,091375	0,063000	200
152	**140**	0,073025	0,061650	300	**167**	**175**	0,113305	0,078120	200
131	**152**	0,087720	0,060480	200	**169**	**173**	0,029210	0,024660	300
135	**131**	0,149855	0,103320	200	**173**	**179**	0,063693	0,064854	400
141	**135**	0,080410	0,055440	200	**179**	**176**	0,054825	0,037800	200
146	**141**	0,105995	0,073080	200	**372**	**351**	0,104167	0,071820	200
154	**150**	0,069445	0,047880	200	**351**	**211**	0,113670	0,078372	200
137	**154**	0,105995	0,073080	200	**351**	**352**	0,213817	0,147420	200
137	**193**	0,012793	0,008820	200	**352**	**212**	0,201025	0,138600	200
150	**151**	0,054825	0,037800	200	**352**	**213**	0,050073	0,034524	200
151	**134**	0,076755	0,052920	200	**351**	**413**	0,070541	0,048636	200
134	**194**	0,009137	0,006300	200	**413**	**384**	0,072003	0,049644	200
134	**144**	0,142545	0,098280	200	**400**	**385**	0,059211	0,040824	200
144	**145**	0,032895	0,022680	200	**400**	**401**	0,070907	0,048888	200
153	**155**	0,032131	0,027126	300	**401**	**386**	0,056653	0,039060	200
155	**136**	0,084065	0,057960	200	**401**	**402**	0,059576	0,041076	200
136	**143**	0,095030	0,065520	200	**402**	**387**	0,083334	0,057456	200
143	**147**	0,095030	0,065520	200	**402**	**403**	0,068349	0,047124	200
149	**147**	0,021930	0,015120	200	**399**	**403**	0,047515	0,032760	200
178	**159**	0,069445	0,047880	200	**404**	**388**	0,058846	0,040572	200
129	**130**	0,054825	0,037800	200	**404**	**405**	0,071638	0,049392	200
130	**156**	0,036550	0,025200	200	**405**	**389**	0,045322	0,031248	200
156	**132**	0,113305	0,078120	200	**405**	**390**	0,073100	0,050400	200
132	**139**	0,105995	0,073080	200	**406**	**391**	0,078582	0,054180	200

continua na próxima página

Tabela 39 – continuação da página anterior

Barra inicial	**Barra final**	**Resistência [Ω]**	**Reatância [Ω]**	**Corrente Máx. (A)**	**Barra inicial**	**Barra final**	**Resistência [Ω]**	**Reatância [Ω]**	**Corrente Máx. (A)**
133	**138**	0,119761	0,101106	300	**406**	**407**	0,048977	0,033768	200
138	**142**	0,062135	0,042840	200	**407**	**408**	0,066887	0,046116	200
119	**122**	0,294875	0,300250	400	**408**	**392**	0,073831	0,050904	200
119	**93**	0,253828	0,258455	400	**408**	**393**	0,069080	0,047628	200
93	**118**	0,056028	0,066091	500	**409**	**414**	0,065790	0,045360	200
118	**120**	0,010223	0,008631	300	**409**	**410**	0,064328	0,044352	200
118	**121**	0,051170	0,035280	200	**410**	**394**	0,059576	0,041076	200
121	**117**	0,201025	0,138600	200	**410**	**411**	0,067617	0,046620	200
117	**83**	0,040205	0,027720	200	**411**	**397**	0,071638	0,049392	200
83	**103**	0,073100	0,050400	200	**411**	**398**	0,056653	0,039060	200
103	**104**	0,049657	0,041922	300	**411**	**412**	0,087355	0,060228	200
83	**106**	0,065790	0,045360	200	**412**	**395**	0,069445	0,047880	200
110	**105**	0,065790	0,045360	200	**412**	**396**	0,070541	0,048636	200
105	**94**	0,084065	0,057960	200	**361**	**271**	0,016448	0,011340	200
112	**113**	0,076755	0,052920	200	**362**	**361**	0,018872	0,019216	400
113	**114**	0,047515	0,032760	200	**362**	**380**	0,263160	0,181440	200
114	**111**	0,040205	0,027720	200	**364**	**362**	0,048359	0,049241	400
115	**97**	0,062135	0,042840	200	**364**	**365**	0,025585	0,017640	200
96	**115**	0,043860	0,030240	200	**365**	**269**	0,100513	0,069300	200
116	**96**	0,040205	0,027720	200	**365**	**270**	0,016448	0,011340	200
95	**116**	0,078582	0,054180	200	**267**	**268**	0,054965	0,055967	400
100	**95**	0,105995	0,073080	200	**266**	**267**	0,156434	0,107856	200
99	**100**	0,058480	0,040320	200	**265**	**266**	0,099416	0,068544	200
101	**99**	0,054825	0,037800	200	**267**	**326**	0,038378	0,026460	200
98	**101**	0,051170	0,035280	200	**326**	**327**	0,054825	0,037800	200
199	**200**	0,007310	0,005040	200	**267**	**291**	0,098685	0,068040	200
157	**199**	0,021930	0,015120	200	**291**	**289**	0,016813	0,011592	200
123	**157**	0,102340	0,070560	200	**289**	**290**	0,005483	0,003780	200
125	**123**	0,029240	0,020160	200	**293**	**291**	0,091741	0,063252	200
126	**123**	0,029240	0,020160	200	**294**	**293**	0,022661	0,015624	200
127	**126**	0,270470	0,186480	200	**296**	**295**	0,050439	0,034776	200
21	**32**	0,043860	0,030240	200	**295**	**297**	0,037646	0,025956	200
52	**21**	0,040205	0,027720	200	**295**	**259**	0,047880	0,033012	200
25	**52**	0,100513	0,069300	200	**259**	**286**	0,035819	0,024696	200
29	**25**	0,054825	0,037800	200	**259**	**323**	0,107823	0,074340	200
32	**54**	0,043860	0,030240	200	**323**	**324**	0,048246	0,033264	200
54	**22**	0,076755	0,052920	200	**323**	**325**	0,005483	0,003780	200
22	**27**	0,069445	0,047880	200	**323**	**322**	0,087720	0,060480	200
27	**35**	0,091375	0,063000	200	**335**	**322**	0,054825	0,037800	200
108	**107**	0,049657	0,041922	300	**320**	**298**	0,070176	0,048384	200
102	**109**	0,076755	0,052920	200	**321**	**320**	0,095030	0,065520	200

continua na próxima página

Tabela 39 – continuação da página anterior

Barra inicial	**Barra final**	**Resistência [Ω]**	**Reatância [Ω]**	**Corrente Máx. (A)**	**Barra inicial**	**Barra final**	**Resistência [Ω]**	**Reatância [Ω]**	**Corrente Máx. (A)**
91	**86**	0,012852	0,010850	300	**321**	**328**	0,031433	0,021672	200
91	**1**	0,341012	0,235116	200	**328**	**329**	0,026682	0,018396	200
1	**16**	0,087720	0,060480	200	**329**	**330**	0,041667	0,028728	200
16	**17**	0,116960	0,080640	200	**330**	**331**	0,027412	0,018900	200
17	**4**	0,122442	0,084420	200	**328**	**332**	0,058480	0,040320	200
4	**5**	0,049342	0,034020	200	**332**	**333**	0,041667	0,028728	200
5	**6**	0,040205	0,027720	200	**333**	**334**	0,055921	0,038556	200
13	**15**	0,098685	0,068040	200	**363**	**283**	0,104167	0,071820	200
15	**18**	0,157165	0,108360	200	**363**	**284**	0,058480	0,040320	200
18	**7**	0,021930	0,015120	200	**299**	**285**	0,109650	0,075600	200
7	**8**	0,095030	0,065520	200	**287**	**299**	0,186771	0,128772	200
8	**2**	0,014620	0,010080	200	**288**	**287**	0,046784	0,032256	200
12	**3**	0,045276	0,038223	300	**300**	**301**	0,055556	0,038304	200
3	**11**	0,067183	0,056718	300	**301**	**302**	0,045322	0,031248	200
11	**14**	0,105156	0,088776	300	**300**	**304**	0,043860	0,030240	200
14	**10**	0,132906	0,112203	300	**304**	**307**	0,050439	0,034776	200
9	**10**	0,046736	0,039456	300	**311**	**306**	0,072369	0,049896	200
9	**87**	0,109537	0,092475	300	**315**	**311**	0,105264	0,072576	200
10	**85**	0,035052	0,029592	300	**308**	**306**	0,098685	0,068040	200
85	**90**	0,095030	0,065520	200	**308**	**312**	0,078582	0,054180	200
19	**43**	0,014620	0,010080	200	**312**	**316**	0,068349	0,047124	200
43	**24**	0,127925	0,088200	200	**303**	**305**	0,069445	0,047880	200
24	**34**	0,127925	0,088200	200	**303**	**377**	0,058846	0,040572	200
34	**37**	0,080410	0,055440	200	**377**	**376**	0,111477	0,076860	200
37	**40**	0,104167	0,071820	200	**309**	**313**	0,072369	0,049896	200
31	**43**	0,255850	0,176400	200	**309**	**319**	0,012793	0,008820	200
36	**31**	0,105995	0,073080	200	**313**	**317**	0,072369	0,049896	200
57	**19**	0,592110	0,408240	200	**318**	**317**	0,066521	0,045864	200
59	**57**	0,010965	0,007560	200	**314**	**310**	0,083334	0,057456	200
50	**51**	0,069445	0,047880	200	**416**	**272**	0,014254	0,009828	200
51	**55**	0,116960	0,080640	200	**416**	**273**	0,115498	0,079632	300
55	**26**	0,095030	0,065520	200	**262**	**263**	0,068714	0,047376	200
50	**53**	0,054825	0,037800	200	**263**	**264**	0,072369	0,049896	300
53	**23**	0,073100	0,050400	200	**340**	**367**	0,179095	0,123480	200
23	**28**	0,095030	0,065520	200	**128**	**345**	0,261698	0,180432	200
28	**33**	0,115132	0,079380	200	**159**	**128**	0,227838	0,192348	300
61	**63**	0,060307	0,041580	200	**128**	**153**	0,035052	0,029592	300
63	**66**	0,044957	0,030996	200	**128**	**150**	0,032895	0,022680	200
88	**66**	0,107823	0,074340	200	**140**	**129**	0,046736	0,039456	300
66	**67**	0,086258	0,059472	200	**153**	**133**	0,078867	0,066582	300
67	**84**	0,029240	0,020160	200	**122**	**417**	0,013524	0,015953	500

continua na próxima página

Tabela 39 – continuação da página anterior

Barra inicial	**Barra final**	**Resistência [Ω]**	**Reatância [Ω]**	**Corrente Máx. (A)**	**Barra inicial**	**Barra final**	**Resistência [Ω]**	**Reatância [Ω]**	**Corrente Máx. (A)**
67	**92**	0,084065	0,057960	200	**93**	**112**	0,032895	0,022680	200
350	**378**	0,023392	0,016128	200	**93**	**110**	0,065790	0,045360	200
378	**379**	0,103403	0,087296	300	**97**	**93**	0,040205	0,027720	200
379	**228**	0,041186	0,034771	300	**199**	**118**	0,076755	0,052920	200
228	**227**	0,063094	0,053266	300	**83**	**32**	0,042033	0,028980	200
370	**373**	0,039434	0,033291	300	**83**	**108**	0,047515	0,032760	200
373	**225**	0,002337	0,001973	300	**109**	**83**	0,043860	0,030240	200
373	**226**	0,003655	0,002520	200	**417**	**91**	0,388892	0,268128	200
224	**223**	0,069445	0,047880	200	**1**	**13**	0,016448	0,011340	200
223	**221**	0,069445	0,047880	200	**1**	**12**	0,032131	0,027126	300
221	**220**	0,087720	0,060480	200	**2**	**19**	0,610385	0,420840	200
220	**343**	0,029240	0,020160	200	**19**	**50**	0,087720	0,060480	200
349	**202**	0,023392	0,016128	200	**57**	**61**	0,129387	0,089208	200
202	**203**	0,051118	0,043155	300	**415**	**350**	0,226610	0,156240	200
203	**204**	0,062135	0,042840	200	**227**	**370**	0,046736	0,039456	300
202	**205**	0,103403	0,087296	300	**225**	**224**	0,027412	0,018900	200
205	**206**	0,059881	0,050553	300	**415**	**349**	0,226610	0,156240	200
348	**206**	0,032131	0,027126	300	**416**	**374**	0,010965	0,007560	200
231	**348**	0,075946	0,064116	300	**210**	**416**	0,056287	0,038808	400
231	**230**	0,096857	0,066780	200	**280**	**234**	0,049342	0,034020	300
231	**292**	0,074927	0,051660	200	**253**	**256**	0,078867	0,066582	300
374	**201**	0,149855	0,103320	200	**359**	**252**	0,049708	0,034272	200
208	**210**	0,055921	0,038556	400	**89**	**369**	0,157896	0,108864	200
208	**209**	0,116960	0,080640	200	**76**	**58**	0,387430	0,267120	200
207	**208**	0,038378	0,026460	400	**71**	**73**	0,021930	0,015120	200
207	**235**	0,076755	0,052920	400	**20**	**71**	0,193715	0,133560	200
234	**235**	0,042033	0,028980	300	**20**	**48**	0,135235	0,093240	200
207	**276**	0,067252	0,046368	200	**20**	**56**	0,215645	0,148680	200
276	**277**	0,032895	0,022680	200	**415**	**214**	0,347591	0,239652	200
276	**278**	0,048246	0,033264	200	**219**	**222**	0,070980	0,059924	300
278	**279**	0,034357	0,023688	200	**238**	**242**	0,083541	0,070528	300
280	**281**	0,053728	0,037044	300	**242**	**248**	0,048781	0,041182	300
281	**233**	0,055499	0,046854	300	**417**	**189**	0,141540	0,144120	400
233	**232**	0,027749	0,023427	300	**160**	**171**	0,087720	0,060480	200
232	**375**	0,011684	0,009864	300	**160**	**184**	0,131580	0,090720	200
375	**229**	0,027749	0,023427	300	**158**	**183**	0,226610	0,156240	200
282	**281**	0,066307	0,055978	300	**158**	**181**	0,054096	0,063812	500
256	**282**	0,053746	0,045374	300	**165**	**169**	0,037744	0,038432	400
256	**257**	0,105995	0,073080	200	**415**	**372**	0,027778	0,019152	200
256	**258**	0,068714	0,047376	200	**413**	**400**	0,072734	0,050148	200
252	**253**	0,045860	0,038716	300	**403**	**404**	0,040205	0,027720	200

continua na próxima página

Tabela 39 – continuação da página anterior

Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Corrente Máx. (A)	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Corrente Máx. (A)
253	**254**	0,027412	0,018900	200	**403**	**406**	0,083334	0,057456	200
253	**360**	0,058846	0,040572	200	**407**	**409**	0,055191	0,038052	200
360	**255**	0,040205	0,027720	200	**361**	**416**	0,024150	0,028487	500
250	**359**	0,098685	0,068040	200	**268**	**364**	0,070770	0,072060	400
250	**251**	0,188232	0,129780	200	**267**	**296**	0,050439	0,034776	200
382	**250**	0,010965	0,007560	200	**298**	**295**	0,038012	0,026208	200
382	**369**	0,018275	0,012600	200	**416**	**363**	0,285090	0,196560	200
369	**347**	0,118788	0,081900	200	**299**	**284**	0,081141	0,055944	200
82	**89**	0,120981	0,083412	200	**299**	**300**	0,093202	0,064260	200
78	**82**	0,241230	0,166320	200	**306**	**299**	0,078217	0,053928	200
77	**78**	0,021930	0,015120	200	**303**	**304**	0,208335	0,143640	200
76	**77**	0,051170	0,035280	200	**313**	**308**	0,069810	0,048132	200
72	**76**	0,076755	0,052920	200	**309**	**314**	0,061404	0,042336	200
71	**72**	0,098685	0,068040	200	**383**	**67**	0,0310675	0,02142	200
75	**71**	0,054825	0,037800	200	**65**	**383**	0,0347225	0,02394	200
80	**75**	0,052998	0,036540	200	**220**	**219**	0,084065	0,05796	200
72	**79**	0,073100	0,050400	200	**74**	**80**	0,084065	0,05796	200
81	**79**	0,073100	0,050400	200	**26**	**30**	0,10234	0,07056	200
58	**68**	0,021199	0,014616	200	**274**	**208**	0,139621	0,096264	200
68	**64**	0,031068	0,021420	200	**60**	**59**	0,04386	0,03024	200
64	**70**	0,071273	0,049140	200	**33**	**46**	0,1736125	0,1197	200
70	**62**	0,022661	0,015624	200	**258**	**260**	0,0511175	0,043155	300
62	**60**	0,109650	0,075600	200	**368**	**369**	0,208335	0,14364	200
58	**69**	0,053728	0,037044	200	**40**	**42**	0,11696	0,08064	200
69	**381**	0,031068	0,021420	200	**19**	**32**	0,06579	0,04536	200
381	**65**	0,032895	0,022680	200	**94**	**111**	0,032895	0,02268	200
73	**74**	0,105995	0,073080	200	**6**	**2**	0,051901	0,035784	200
46	**20**	0,084065	0,057960	200	**35**	**44**	0,13158	0,09072	200
39	**46**	0,091375	0,063000	200	**279**	**280**	0,062135	0,04284	200
30	**39**	0,105995	0,073080	200	**234**	**233**	0,083334	0,057456	200
20	**49**	0,036550	0,025200	200	**104**	**107**	0,06579	0,04536	200
47	**49**	0,073100	0,050400	200	**41**	**36**	0,0676175	0,04662	200
42	**47**	0,080410	0,055440	200	**38**	**29**	0,11696	0,08064	200
45	**49**	0,036550	0,025200	200	**292**	**235**	0,069445	0,04788	200
45	**41**	0,025585	0,017640	200	**106**	**102**	0,054825	0,0378	200
48	**44**	0,043860	0,030240	200	**83**	**98**	0,13158	0,09072	200
48	**38**	0,087720	0,060480	200	**2**	**9**	0,1078225	0,07434	200
56	**124**	0,091375	0,063000	200	**87**	**88**	0,08041	0,05544	200
56	**148**	0,069445	0,047880	200	**313**	**316**	0,0815065	0,056196	200
214	**215**	0,105995	0,073080	200	**159**	**179**	0,04386	0,03024	200
215	**216**	0,099314	0,083844	300	**309**	**304**	0,082603	0,056952	200

continua na próxima página

Tabela 39 – continuação da página anterior

Barra inicial	**Barra final**	**Resistência [Ω]**	**Reatância [Ω]**	**Corrente Máx. (A)**	**Barra inicial**	**Barra final**	**Resistência [Ω]**	**Reatância [Ω]**	**Corrente Máx. (A)**
215	**217**	0,065790	0,045360	200	**56**	**146**	0,157165	0,10836	200
217	**218**	0,002924	0,002016	200	**381**	**382**	0,1502205	0,103572	200
218	**219**	0,080410	0,055440	200	**65**	**251**	0,192984	0,133056	200
222	**236**	0,081788	0,069048	300	**159**	**180**	0,091375	0,063	200
236	**237**	0,062217	0,052526	300	**84**	**243**	0,1399865	0,096516	200
236	**371**	0,053746	0,045374	300	**124**	**127**	0,02193	0,01512	200
371	**238**	0,026581	0,022441	300	**201**	**415**	0,48246	0,33264	200
238	**239**	0,005842	0,004932	300	**139**	**146**	0,15351	0,10584	200
242	**355**	0,009137	0,006300	200	**142**	**149**	0,098685	0,06804	200
355	**356**	0,051170	0,035280	200	**175**	**178**	0,06579	0,04536	200
356	**243**	0,012793	0,008820	200	**147**	**56**	0,1462	0,1008	200
356	**244**	0,005483	0,003780	200	**145**	**148**	0,054825	0,0378	200
383	**242**	0,227341	0,156744	200	**172**	**178**	0,113305	0,07812	200
242	**354**	0,005483	0,003780	200	**148**	**137**	0,127925	0,0882	200
354	**353**	0,127925	0,088200	200	**289**	**288**	0,062866	0,043344	200
353	**240**	0,073100	0,050400	200	**264**	**265**	0,1078225	0,07434	200
353	**241**	0,018275	0,012600	200	**305**	**309**	0,126463	0,087192	200
242	**245**	0,036513	0,030825	300	**358**	**250**	0,1407175	0,09702	200
245	**246**	0,052632	0,036288	200	**316**	**318**	0,123539	0,085176	200
246	**247**	0,072734	0,050148	200	**302**	**303**	0,195177	0,134568	200
248	**357**	0,043129	0,029736	200	**317**	**314**	0,069445	0,04788	200
357	**358**	0,005483	0,003780	200	**310**	**303**	0,105264	0,072576	200
358	**249**	0,020102	0,013860	200	**307**	**315**	0,2218585	0,152964	200
189	**188**	0,073100	0,050400	200	**333**	**335**	0,0712725	0,04914	200
188	**192**	0,023392	0,016128	200	**323**	**265**	0,103802	0,071568	200
188	**197**	0,109650	0,075600	200	**380**	**267**	0,3095785	0,213444	200
197	**195**	0,036550	0,025200	200	**335**	**336**	0,0646935	0,044604	200
158	**189**	0,235900	0,240200	400	**322**	**321**	0,0676175	0,04662	200
158	**160**	0,084065	0,057960	200	**229**	**230**	0,0455676	0,0384696	300
158	**198**	0,270470	0,186480	200	**295**	**294**	0,0741965	0,051156	200
198	**191**	0,014620	0,010080	200	**229**	**227**	0,026289	0,022194	300
198	**196**	0,069445	0,047880	200					

Fonte: Adaptado de Souza et al. (2020)