

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Yan Matheus de Toledo**

**Metodologia de Restauração de Sistemas de Energia  
Elétrica Considerando Geração Distribuída e Aspectos  
Dinâmicos na Formação e Operação de Ilhas**

São Carlos – SP  
2021



**Yan Matheus de Toledo**

**Metodologia de Restauração de Sistemas de Energia  
Elétrica Considerando Geração Distribuída e Aspectos  
Dinâmicos na Formação e Operação de Ilhas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Benvindo Rodrigues Pereira Junior

São Carlos – SP

2021

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

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

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

D278m de Toledo, Yan Matheus  
Metodologia de restauração de sistemas de energia elétrica considerando geração distribuída e aspectos dinâmicos na formação e operação de ilhas / Yan Matheus de Toledo; orientador Benvido Rodrigues Pereira Junior. São Carlos, 2021.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Análise Dinâmica. 2. Busca em Vizinhança Variável. 3. Geração Distribuída. 4. Meta-heurística. 5. Restauração de Redes de Distribuição. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **YAN MATHEUS DE TOLEDO**.

Título da dissertação: "Metodologia de restauração de sistemas de energia elétrica considerando geração distribuída e aspectos dinâmicos na formação e operação de ilhas".

Data da defesa: 11/11/2021.

### Comissão Julgadora

### Resultado

Prof. Dr. **Benvindo Rodrigues Pereira Junior**

*APROVADO*

\_\_\_\_\_  
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Prof. Dr. **José Roberto Sanches Mantovani**

*APROVADO*

\_\_\_\_\_  
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-IIha Solteira)

Prof. Dr. **Luis Gustavo Wesz da Silva**

*APROVADO*

\_\_\_\_\_  
(Instituto Federal de Goiás/IFG)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:

Prof. Dr. **João Bosco Augusto London Junior**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**



*Este trabalho é dedicado a todos que acreditam que o conhecimento é transformador.*





# AGRADECIMENTOS

---

---

Agradeço à minha família, José Carlos, Benedita Bernadete e Bruno, pelo amor incondicional, por sempre me apoiarem em meus desafios e por todos os ensinamentos que moldaram os meus princípios e valores.

Agradeço a todas as pessoas que de alguma forma participaram desta minha árdua trajetória e que me apoiaram nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Benvindo Rodrigues Pereira Júnior, pela paciência, dedicação e acompanhamento para que este trabalho fosse realizado.

À todos os colegas e amigos do Laboratório de Análise de Sistemas de Energia Elétrica (LASEE), pela amizade e companheirismo durante esta etapa.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro para realização deste trabalho.



*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”*  
*(Albert Einstein)*



# RESUMO

TOLEDO, Y. M. **Metodologia de Restauração de Sistemas de Energia Elétrica Considerando Geração Distribuída e Aspectos Dinâmicos na Formação e Operação de Ilhas**. 102 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Diversos setores da sociedade são altamente dependentes da energia elétrica e sua falta pode acarretar graves consequências do ponto de vista social e econômico. Evitar a interrupção do fornecimento de energia elétrica é uma tarefa complexa, já que estas podem ser ocasionadas por contingências ou manutenções corretivas e/ou preventivas na rede. Nesse sentido, o desenvolvimento tecnológico vem intensificando a pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas para projetar um sistema mais confiável e que tenha a capacidade de recuperar cargas de maneira mais eficiente frente os cenários de interrupções de energia elétrica. Portanto, propõe-se neste trabalho a implementação de uma metodologia capaz de fornecer planos de reestabelecimento visando a minimização das cargas fora de serviço após um cenário de falta permanente. O método proposto é baseado em um algoritmo de Busca em Vizinhança Variável (VNS) em conjunto com um Algoritmo Genético (GA), capaz de identificar boas soluções topológicas de recuperação de carga que atendam às restrições físicas e operacionais impostas pelo modelo do problema. Além disso, a metodologia proposta é capaz de gerar planos de sequenciamento adequados de chaves que garantem a factibilidade de soluções intermediárias do plano de restauração. Por fim, este método integra restrições ao modelo com o objetivo de garantir a criação e a manutenção de ilhas de operação em sistemas que possuem a presença de Gerações Distribuídas (GDs). Os principais objetivos considerados no modelo são: a minimização da potência não suprida e a minimização do número de chaveamentos necessários para se ter a topologia final de restauração. Utiliza-se um sistema teste de 53 barras (3 Barras da Subestação (SE) e 50 barras de cargas) para a validação do algoritmo de restauração, e um sistema de 405 barras, baseado em um sistema real, para a realização dos testes de manutenção das ilhas formadas durante o processo de restabelecimento. Os resultados demonstram que o algoritmo é capaz de fornecer soluções de boa qualidade, inclusive soluções ótimas. Nesse sentido, uma análise comparativa com outros trabalhos da literatura especializada é realizada a fim de comprovar sua funcionalidade. Por fim, analisa-se a influência da inserção de GDs na recuperação das cargas fora de serviço, bem como a influência da inserção da restrição de transferência de carga no modelo para a formação e a manutenção de ilhas de operação.

**Palavras-chave:** Análise Dinâmica. Busca em Vizinhança Variável. Geração Distribuída. Meta-heurística. Restauração de Redes de Distribuição.



# ABSTRACT

TOLEDO, Y. M. **Restoration Method of Electric Power Systems Considering Distributed Generation and Dynamic Aspects in Operation Island Formation.** 102 p. Master Dissertation – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2021.

Many sectors of society are highly dependent on electricity and its lack can have serious social and economic consequences. Prevent an electricity interruption supply is a complex task, since these can be caused by contingencies or corrective and / or preventive maintenance on the network. In this sense, technological development has intensified the research and development of new techniques to design reliable systems to recover loads more efficiently in electrical power interruption situations. Therefore, it is proposed in this work a methodology capable to providing recovery plans aiming at minimizing out-of-service loads after a permanent fault scenario. The proposed method is based on a Variable Neighborhood Search (VNS) algorithm with a Genetic Algorithm (GA), able to identify good topological load recovery solutions that respect the physical and operational constraints imposed by the problem model. In addition, the proposed methodology is capable to generating appropriate switch sequencing plans that guarantee the feasibility of intermediate solutions for the restoration plan. Finally, this method integrates constraints to the model in order to guarantee the creation and maintenance of operation islands in systems that contain GDs. The main objectives considered in the model are: the minimization of the power not supplied and the minimization of the number of switching necessary to have the final restoration topology. A 53-bus test system (3 SE bus and 50 load bus) is used for the restoration algorithm validation and, a 405-bus system, based on a real system, is used for maintenance of operating islands performance tests. The results demonstrate that the algorithm is capable to provide good quality solutions, including optimal solutions. In this sense, a comparative analysis with other works in the specialized literature is carried out in order to verify its functionality. Finally, is analyzed the influence of the GDs insertion to recovery out-of-service loads, as well as the influence of the load transfer constraint insertion in the model for the formation and maintenance of operation islands.

**Keywords:** Dynamic Analysis. Variable Neighborhood Search. Distributed Generation. Meta-heuristic. Distribution Power System Restoration..





# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

---

---

Figura 1 – Capacidade Instalada de GDs no Brasil . . . . .	25
Figura 2 – Número de trabalhos publicados com o tema de restauração de sistemas de distribuição (2012 - primeiro semestre de 2021) . . . . .	27
Figura 3 – Estados Operativos do Sistema . . . . .	39
Figura 4 – Processo de Restauração de Cargas . . . . .	40
Figura 5 – Processo de Restauração de Cargas com GD Instalada . . . . .	41
Figura 6 – Representação em Grafo de um Sistema de Distribuição Composto por 5 Seções	42
Figura 7 – Representação das Profundidades do Alimentador S1 . . . . .	42
Figura 8 – Codificação da Representação Nó-Profundidade (RNP) em formato de lista .	43
Figura 9 – Diagrama de Controle de Velocidade . . . . .	49
Figura 10 – Diagrama do Excitatriz . . . . .	49
Figura 11 – Frequência Crítica Vs Transferência de Carga com Diferentes SetPoints . .	52
Figura 12 – Comparação do Processo de Restauração por Dois Planos de Sequências de Chaves . . . . .	53
Figura 13 – Processo de Busca Local . . . . .	56
Figura 14 – Processo de Busca em Vizinhança Variável . . . . .	57
Figura 15 – Pseudo-código VNS . . . . .	57
Figura 16 – Um exemplo da construção da codificação para uma determinada solução de restauração . . . . .	58
Figura 17 – Um exemplo da modificação do sistema pela Primeira Vizinhança . . . . .	60
Figura 18 – Exemplificação do efeito da modificação realizada pela Quarta Vizinhança .	62
Figura 19 – Processo de Combinação dos Indivíduos do AG . . . . .	64
Figura 20 – Pseudo-Código AG . . . . .	65
Figura 21 – Frequência da Barra de SE Frente ao Processo de Transferência de Carga . .	68
Figura 22 – Fluxograma do modo de execução do algoritmo de restauração implementado	69
Figura 23 – Topologia pré-falta do sistema teste de 53 barras utilizado . . . . .	72
Figura 24 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 3 . . . . .	73
Figura 25 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 3 sem a ação da Quarta Vizinhança . . . . .	74
Figura 26 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 11 . . . . .	75
Figura 27 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 14 . . . . .	76
Figura 28 – Topologia Inicial do Sistema de 405 Barras . . . . .	79

Figura 29 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 77 e a instalação de uma GD na barra 134 . . . . .	81
Figura 30 – Comparação da Frequência Dinâmica da GD entre Ambos os Casos de Teste para Falta na Barra 77 . . . . .	83
Figura 31 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 198 e a instalação de uma GD na barra 264 . . . . .	84
Figura 32 – Comparação da Frequência Dinâmica da GD entre Ambos os Casos de Teste para Falta na Barra 198 . . . . .	86
Figura 33 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 360 e a instalação de uma GD na barra 404 . . . . .	87
Figura 34 – Comparação da Frequência Dinâmica da GD entre Ambos os Casos de Teste para Falta na Barra 360 . . . . .	89

# LISTA DE TABELAS

---

---

Tabela 1 – Comparativo da literatura recente e relevante com relação aos aspectos de funções objetivos e sequenciamento de chaves . . . . .	37
Tabela 2 – Comparativo da literatura recente e relevante com relação aos aspectos de sistema e dinâmica . . . . .	38
Tabela 3 – Sequenciamento de chaves para a restauração do sistema de 53 barras considerando falta permanente na barra 3 . . . . .	74
Tabela 4 – Sequenciamento de chaves para a restauração do sistema de 53 barras considerando falta permanente na barra 11 . . . . .	76
Tabela 5 – Sequenciamento de chaves para a restauração do sistema de 53 barras considerando falta permanente na barra 14 . . . . .	77
Tabela 6 – Comparação dos Resultados Obtidos no Sistema Teste de 53 Barras . . . . .	77
Tabela 7 – Parâmetros Utilizados no Controle das GDs . . . . .	80
Tabela 8 – Resumo dos Resultados Encontrados para os Dois Cenários de Análise para Falta na Barra 77 . . . . .	80
Tabela 9 – Planos de Chaveamentos para o Caso de Falta na Barra 77 . . . . .	82
Tabela 10 – Resumo dos Resultados Encontrados para os Dois Cenários de Análise para a Falta na Barra 198 . . . . .	85
Tabela 11 – Planos de Chaveamentos para o Caso de Falta na Barra 198 . . . . .	85
Tabela 12 – Resumo dos Resultados Encontrados para os Dois Cenários de Análise para a Falta na Barra 360 . . . . .	88
Tabela 13 – Planos de Chaveamentos para o Caso de Falta na Barra 360 . . . . .	88



# LISTA DE SIGLAS

---

---

<b>AEMO</b>	<i>Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo</i>
<b>AG</b>	<i>Algoritmo Genético</i>
<b>ATP</b>	<i>Alternative Transients Program</i>
<b>BT</b>	<i>Busca Tabu</i>
<b>BTR</b>	<i>Busca Tabu Reativa</i>
<b>DEC</b>	<i>Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora</i>
<b>FEC</b>	<i>Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora</i>
<b>FO</b>	<i>Função Objetivo</i>
<b>FP</b>	<i>Fluxo de Potência</i>
<b>GD</b>	<i>Geração Distribuída</i>
<b>LIP</b>	<i>Linear Integer Problem (Problema Linear Inteiro)</i>
<b>NA</b>	<i>Normalmente Aberta</i>
<b>NF</b>	<i>Normalmente Fechada</i>
<b>ONS</b>	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>
<b>PNS</b>	<i>Potência não Surpida</i>
<b>PSA</b>	<i>Parallel Simulated Annealing (Arrefecimento Simulado Paralelo)</i>
<b>RSDEE</b>	<i>Restauração em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica</i>
<b>RNP</b>	<i>Representação Nó-Profundidade</i>
<b>RT</b>	<i>Regulador de Tensão</i>
<b>SEP</b>	<i>Sistema Elétrico de Potência</i>
<b>SE</b>	<i>Subestação</i>
<b>VNS</b>	<i>Variable Neighborhood Search (Busca em Vizinhança Variável)</i>



# SUMÁRIO

---

---

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	Justificativa	26
1.2	Objetivo	26
1.3	Estrutura do Trabalho	27
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>29</b>
2.1	O Algoritmo VNS no Contexto de Sistemas Elétricos de Potência	29
2.2	Revisão Sobre o Problema de RSDEE	31
2.2.1	Restauração de Sistemas com GDs Instaladas	33
2.3	Considerações Finais	35
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>39</b>
3.1	Representação Computacional do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	41
3.1.1	Representação Nó-Profundidade	42
3.2	O Problema de Restauração em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE) com Geração Distribuída	43
3.2.1	Controle Aplicado às GDs	48
3.2.2	Restrição de bloco de carga	50
3.3	O Plano de Sequenciamento de Chaves	52
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>55</b>
4.1	O Algoritmo VNS	55
4.1.1	Codificação Utilizada	58
4.1.2	Geração da Solução Inicial	59
4.1.3	Construção das Vizinhanças	59
4.1.3.1	Primeira Vizinhança	59
4.1.3.2	Segunda Vizinhança	60
4.1.3.3	Terceira Vizinhança	61
4.1.3.4	Quarta Vizinhança	61
4.2	Definição da Sequência de Chaveamentos	63
4.2.1	O Algoritmo Genético para a Determinação do Plano de Sequenciamento de Chaves	63
4.3	Avaliação das soluções	65
4.3.1	Fluxo de Potência	65

4.3.2	Funções Objetivo com Penalidades . . . . .	66
4.4	Comportamento do Algoritmo Frente ao Processo de Ilhamento . . . . .	67
4.4.1	Avaliação dinâmica dos geradores durante o ilhamento . . . . .	67
4.5	Considerações Finais . . . . .	69
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>71</b>
5.1	Testes Com o Sistema de 53 Barras Sem a Instalação de GD . . . . .	72
5.1.1	Falta Permanente na Barra 3 . . . . .	73
5.1.2	Falta Permanente na Barra 11 . . . . .	75
5.1.3	Falta Permanente na Barra 14 . . . . .	76
5.1.4	Análise dos Resultados Obtidos para o Sistema de 53 Barras . . . . .	77
5.2	Testes Realizados no Sistema de 405 Barras Considerando a Instalação de GD no Sistema . . . . .	78
5.2.1	Falta Permanente na Barra 77 . . . . .	80
5.2.2	Falta Permanente na Barra 198 . . . . .	83
5.2.3	Falta Permanente na Barra 360 . . . . .	87
5.3	Considerações Finais . . . . .	90
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>93</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	94
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>95</b>
	<b>APÊNDICE A FLUXO DE POTÊNCIA . . . . .</b>	<b>101</b>



---

## INTRODUÇÃO

---

A energia elétrica é um dos bens de consumo essenciais à sociedade, sendo associada ao conforto e à qualidade de vida. A indústria, o transporte, a iluminação pública, os sistemas de telecomunicações, entre outros setores da sociedade moderna, são altamente dependentes da energia elétrica e sua falta pode ocasionar transtornos sociais e, principalmente, econômicos. Contudo, eventuais interrupções no fornecimento de energia elétrica são inevitáveis, ocasionadas, por manutenções preditivas, e muitas vezes, por contingências (ELMITWALLY *et al.*, 2015). Estas podem ser definidas como eventos em equipamentos do sistema que deixam de operar devido a atuação da proteção frente a algum problema.

As contingências podem ocorrer em qualquer parte do Sistema Elétrico de Potência (SEP), Isto é, no sistema de geração, transmissão ou distribuição de energia. Porém, segundo Teng (2010), 80% das interrupções no fornecimento de energia estão associadas ao sistemas de distribuição. Tal fato, juntamente com os avanços tecnológicos empregados nestes sistemas, como: geração distribuída, armazenamento de energia e o conceito de *smart grid*, tornam o problema de minimização dos impactos causados pelas contingências um objeto de pesquisa muito atrativo para a comunidade científica.

Os sistemas de distribuição são normalmente projetados como sistemas malhados, entretanto, operam com uma condição topológica radial. Neste sentido, estes sistemas possuem ramais de interconexão, equipados com chaves de manobra com característica de operação Normalmente Aberta (NA), as quais juntamente com outras chaves instaladas no sistema (Normalmente Fechada (NF)), possibilitam a reconfiguração da rede nas mais diferentes configurações de operação do sistema de distribuição. Devido a característica de operação radial, sempre que o sistema opera em um cenário de contingência (devido a manutenções ou curto-circuitos) o fornecimento de energia é interrompido para todos os consumidores a jusante da região defeituosa. Portanto, na incidência de uma falta permanente em um sistema de distribuição de energia elétrica, define-se uma estratégia para a localização do problema e, uma vez localizada a região defeituosa,

elabora-se de um plano que possibilite o isolamento desta região e restaure o fornecimento ao maior número de consumidores saudáveis desligados (MARQUES, 2018).

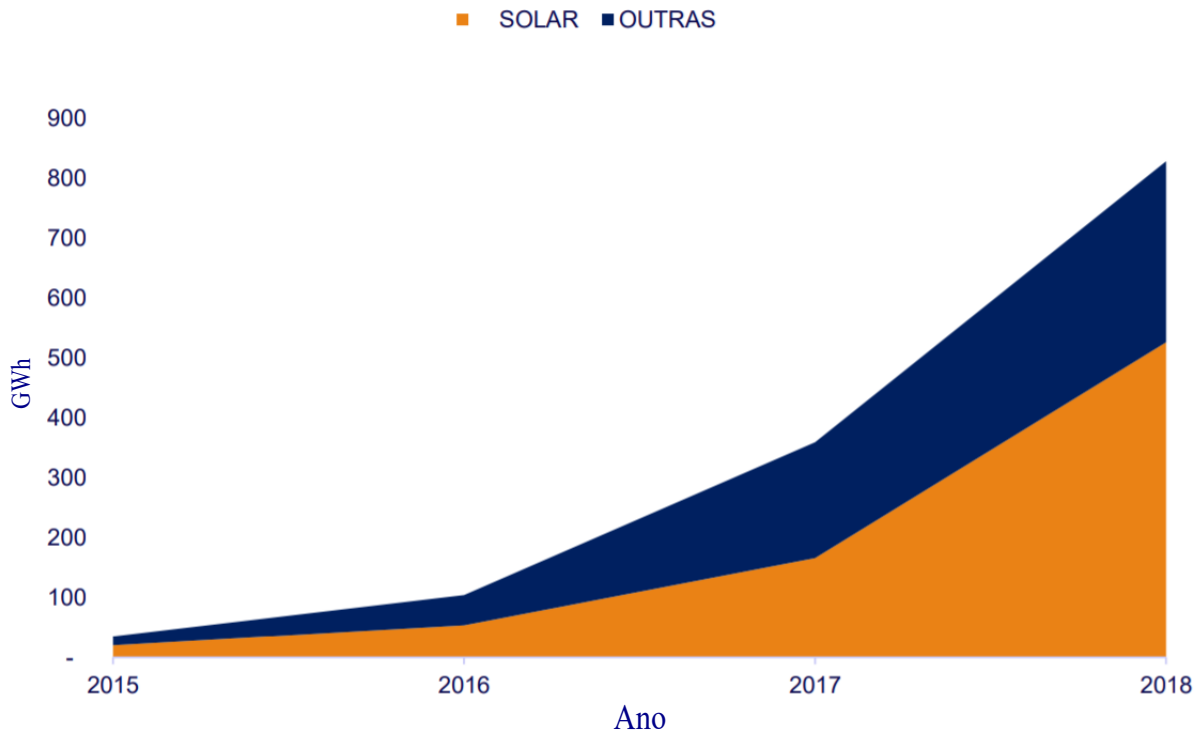
Um ponto importante a se observar neste processo é o tempo de ação gasto para a restauração do fornecimento de energia. Este ponto tem uma influência direta no desempenho dos indicadores de qualidade e de continuidade da empresa de distribuição de energia elétrica, como por exemplo a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e a Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). Nesse sentido, deve-se considerar o menor tempo possível para o processo, atendendo às restrições de tensão, corrente e topológica da rede.

Há uma tendência no desenvolvimento de técnicas de otimização incorporados à instrumentos eletrônicos a fim de realizar a restauração do sistema elétrico de forma automática e mais eficiente (MELLO, 2014). As empresas de distribuição de energia estão investindo em técnicas de automação e no desenvolvimento de novos instrumentos que visam a restauração das redes de distribuição de forma automática, proporcionando melhoras nos índices de confiabilidade, redução de tempos de restauração, diminuição dos custos de operação e, principalmente, beneficiando a reputação das empresas de energia elétrica (ANGELO; SELEJAN, 2013).

Uma das principais consequências do desenvolvimento tecnológico dos sistemas de distribuição mencionado anteriormente, é a mudança em sua forma de operação, justificada pelo aumento significativo de alocação de Geração Distribuída (GD) de diversas naturezas. Os números da (EPE, 2019) mostram que a alocação de GDs tem crescido de forma exponencial nos últimos anos, como apresentado na Figura 1. Este fato se dá pela diminuição de custo para a implantação do equipamento e, principalmente, pelos incentivos ao uso de energias renováveis. Dessa forma, a tendência é que a presença de GDs em sistemas de distribuição seja intensificada nos próximos anos (PERALTA, 2019), acentuando a relação de potência instalada de GDs pela demanda máxima do alimentador, definida como grau de penetração (AMARAL, 2018).

A presença de GDs em sistemas de distribuição pode trazer benefícios para os consumidores finais (GOMEZ; MORCOS, 2008) e alguns desafios que merecem a devida atenção dos órgãos reguladores. Em modo de operação normal, há uma melhora na qualidade do fornecimento com uma regulação dinâmica do perfil de tensão, além da diminuição das perdas técnicas no sistema (GUEDES, 2013). Porém, sistemas com alta penetração de GD, podem causar problemas de coordenação e seletividade do sistema de proteção da rede (FARIAS *et al.*, 2019) ou na presença de Reguladores de Tensão (RTs) instalados na rede, podem aumentar os níveis de tensão para limites acima dos aceitáveis (PERALTA, 2019). Em modo restaurativo, a GD pode atuar como uma fonte de energia local e, combinada com dispositivos de proteção, é possível a restauração da energia de cargas locais através do modo de operação ilhada, desde que haja um acordo firmado entre os proprietários dos geradores distribuídos, as distribuidoras e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ANEEL, 2016). Neste caso, é importante avaliar se a ilha é capaz de se manter em operação após sua formação (FARIAS *et al.*, 2019), verificar a

Figura 1 – Capacidade Instalada de GDs no Brasil



Fonte: (EPE, 2019)

capacidade do gerador em manter níveis aceitáveis de tensão, em todas as barras da região de ilhamento e, em casos de distúrbios, verificar se os geradores estão aptos a manter o controle de frequência na região ilhada dentro de uma faixa pré-estabelecida.

Diante deste contexto, a análise dos aspectos dinâmicos na formação de ilhas é muito importante e se torna um ponto crítico no contexto da restauração com geração distribuída. Porém, há uma certa escassez de trabalhos na literatura que analisam o ilhamento dessa forma. A maioria dos trabalhos que apresentam restauração de sistema de distribuição com a presença de GDs operando de forma ilhada, não consideram estas análises no processo de ilhamento, como é o caso dos estudos apresentados por [Peralta \(2019\)](#), [Marques \(2018\)](#) e [Neto \(2011\)](#). Por outro lado, [FARIA et al. \(2021\)](#) e [Xu et al. \(2018\)](#) adotam critérios de análise dinâmica da rede em seus modelos, porém, estudos mais detalhados ainda são necessários para o melhor entendimento sobre este assunto.

Assim sendo, propõe-se neste trabalho uma metodologia que fornece boas soluções topológicas em conjunto com um plano de sequência de chaveamento para o problema RSDEE, principalmente em sistemas que possuem GD, garantindo a formação e a manutenção de ilhas através das restrições dinâmicas de frequência impostas no modelo utilizado.

## 1.1 Justificativa

Segundo um estudo realizado pelo Departamento de Energia Elétrica dos Estados Unidos (LACOMMARE *et al.*, 2018), a falta de fornecimento de energia elétrica é responsável por perdas estimadas em 44 bilhões de dólares por ano. Nesse sentido, tem-se que o grande motor para a pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas que visam mitigar o efeito da falta de energia elétrica causadas por eventos de contingências são os prejuízos econômicos.

Nesse sentido, novas versões de dispositivos de proteção (relés, disjuntores, religadores) são desenvolvidos todos os anos visando a melhoria da resposta do sistema mediante a situações atípicas. Estes dispositivos apresentam a tendência de incorporar novas funcionalidades como: operação remota, autodiagnóstico, protocolos de comunicação, etc. Bem como auxiliar diretamente na eficiência de um plano de restauração de cargas em situações de contingências, isolando adequadamente a porção defeituosa do sistema. Paralelamente, fontes de geração distribuída com a possibilidade de operação ilhada são constantemente pesquisadas e, cada vez mais, são inseridas no sistema de distribuição (NETO, 2011).

Diante deste cenário, em regiões de grande densidade de cargas, a exemplo de áreas urbanas, a operação eficaz do sistema de distribuição tem se tornado cada vez mais complexa (BARBOSA, 2012). Sendo assim, há a necessidade de estudos aprofundados e o desenvolvimento de técnicas eficientes para garantir o reestabelecimento de cargas fora de serviço da maneira mais rápida possível em eventuais casos de contingências. Deste modo, destacam-se as técnicas baseadas em metas-heurísticas. Estas, quando comparadas aos métodos de otimização por modelos matemáticos, apresentam menor complexidade na elaboração e implementação, maior flexibilidade na resolução do problemas mono e multi-objetivos e apresentam resultados bastantes satisfatórios (MARQUES, 2013).

Devido à crescente inserção de GDs no sistema elétrico brasileiro, o estudo sobre restabelecimento tem se tornado cada vez mais complexo. Este trabalho tem como foco principal a análise do comportamento das GDs frente ao processo de ilhamento, no contexto de contingências em sistemas de distribuição. Diante da escassez de trabalhos sobre este tema, faz-se necessário o estudo aprofundado de técnicas de reestabelecimento de cargas que consideram a possibilidade de operações ilhadas, sobretudo aquelas que analisam os aspectos dinâmicos de frequência envolvidos na formação e manutenção de ilhas. Nesse sentido, este trabalho tem como uma das contribuições o estudo da análise dinâmica envolvidas no processo de formação de ilhas em cenários de contingências em sistemas que possuem GDs instaladas.

## 1.2 Objetivo

Apesar de ser amplamente estudado, o problema de RSDEE continua sendo um desafio para os pesquisadores. Prova disso, são as recentes pesquisas encontradas na literatura específica

abordando o tema (LI *et al.*, 2019; SHEN; WU; XUE, 2020; LI *et al.*, 2020; SEKHAVATMANESH; CHERKAOU, 2020; FARIA *et al.*, 2021). Na figura 2 ilustra-se o número de trabalhos publicados na literatura especializada, agrupados por ano de publicação, entre os anos de 2012 até o primeiro semestre de 2021 sobre o problema de RSDEE.

Figura 2 – Número de trabalhos publicados com o tema de restauração de sistemas de distribuição (2012 - primeiro semestre de 2021)



O problema RSDEE ainda é um tema amplamente estudado devido sua complexidade, dificuldades em sua resolução e grande quantidade de variáveis envolvidas no problema, principalmente quando se consideram as novas tecnologias de geração de energia. Além disso, muitas metodologias desenvolvidas simplificam o problema e não consideram os aspectos práticos da rede e, também, realizam as análises apenas sob a ótica do sistema em regime permanente.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo principal a proposição de uma metodologia para fornecer soluções de qualidade para o problema de RSDEE, com tempo computacional adequado e considerando, além da análise em regime permanente, a dinâmica envolvida na formação das ilhas, aspecto importante quando se tem a presença de GDs.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Antes de apresentar a metodologia proposta, no capítulo 2 tem-se uma revisão dos principais trabalhos utilizados como base nesta pesquisa. São apresentadas as noções básicas do problema de RSDEE no capítulo 3, bem como a definição da Função Objetivo (FO) e restrições que o problema investigado está sujeito, além das restrições dinâmicas acrescentadas ao modelo e o controle implementado para as GDs instaladas no sistema teste. São apresentados os conceitos

básicos do plano de chaveamento e a representação do sistema de distribuição através de grafos e RNP.

No capítulo 4 é apresentada, de forma detalhada, a metodologia proposta. Definem-se os algoritmos utilizados para a busca de soluções topológicas finais e planos de chaveamento. Definem-se, também, as codificações utilizadas, o método adotado para a construção das vizi-nhanças e como são realizadas as avaliações das soluções em potencial e o comportamento do algoritmo frente ao processo de ilhamento.

Diversos testes computacionais são realizados considerando vários casos distintos (mudança do ponto de falta e inserção de GD) e em dois sistemas diferentes: 53 barras e 405 barras, onde estes testes são demonstrados no capítulo 5 e, para validar a metodologia proposta, é feito uma comparação com os resultados encontrados na literatura. Além disso, apresentam-se os resultados das simulações dinâmicas realizadas juntamente com uma análise do impacto destas restrições na formação e manutenção de ilhas de operação. No capítulo 6, é apresentada uma discussão dos resultados encontrados e as conclusões obtidas neste trabalho.

turbina

---

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Com a finalidade de buscar elementos que possam auxiliar no desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho, este capítulo apresenta uma breve discussão de alguns dos principais trabalhos presentes na literatura. Estes trabalhos encontram-se na literatura especializada e tratam de metodologias baseadas no algoritmo *Variable Neighborhood Search* (Busca em Vizinhança Variável) (VNS) (algoritmo principal deste trabalho) para a resolução de problemas da área de Sistemas Elétricos de Potência e, especificamente, do problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

### 2.1 O Algoritmo VNS no Contexto de Sistemas Elétricos de Potência

O algoritmo VNS foi desenvolvido por (MLADENOVIC; HANSEN, 1995) e tem se mostrado uma ferramenta eficiente e de fácil aplicação para muitos problemas de otimização. Além disso, este algoritmo e suas variações são frequentemente utilizados para resolução de problemas complexos e combinacional (GARCÍA-LÓPEZ *et al.*, 2002; HANSEN; MLADENOVIC; PEREZ-BRITOS, 2001). Nesse sentido, alguns trabalhos vêm utilizando esta técnica no contexto dos Sistemas Elétricos de Potência.

Em (SOUZA, 2011) foi apresentado uma metodologia para a solução do problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando o algoritmo VNS. Consideram-se diferentes tipos de condutores para planejar a construção ou repotenciação das subestações e construção ou recondutoramento de circuitos. Implementou-se, também, um algoritmo heurístico construtivo para fornecer a solução inicial para o VNS implementado. A metodologia mostrou-se robusta e com capacidade de encontrar soluções factíveis de boa qualidade. Além disso, devido ao grande número de soluções exploradas, foi possível realizar uma análise de custo benefício de diferentes cenários para o problema estudado.

Em (POSSAGNOLO, 2015) foi proposta uma metodologia baseada em VNS para a resolução do problema de reconfiguração em vários níveis de carregamento do sistema. Foi proposto a implementação de 4 variações deste algoritmo denominados: Busca em Vizinhança Básica, Busca em Vizinhança Descendente, Busca em Vizinhança Reduzida e Busca em Vizinhança Geral. O trabalho visa encontrar uma única topologia para operar de forma consistente nos níveis de um determinado período. Foram utilizados sistemas de 33, 84, 136, 415 e 10477 barras para a realização das análises.

Em (FORTES *et al.*, 2018) o algoritmo VNS foi utilizado para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros de controladores suplementares de amortecimento (Estabilizadores de Sistemas de Potência e *Interline Power Flow Controller - Power Oscillation Damping*) em sistemas elétricos de potência multimáquinas. O objetivo principal foi inserir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas de baixa frequência classificadas como local e interárea. Três sistemas teste foram utilizados nas simulações realizadas neste trabalho, sendo: Simétrico de Duas Áreas, *New England* e o Sul Brasileiro Reduzido. Para efeito de comparação, o algoritmo VNS implementado foi comparado com um método *multi-start*. Os resultados mostraram que o algoritmo VNS foi mais eficiente para resolver o problema. Tornando-se, assim, uma boa ferramenta para o design de controladores e análise da estabilidade de pequenos sinais em sistemas de energia elétrica.

Foi apresentado em (RAMLI; BOUCHEKARA, 2020) uma versão melhorada do algoritmo de busca em vizinhança variável (IVNS) para solucionar o problema de alocação ótima de fontes de GDs em sistemas de distribuição. As principais modificações incorporadas ao algoritmo são: Normalização das variáveis, remoção das variáveis fixas e substituição da sequência de Fibonacci por uma sequência baseada na sequência de Lucas no método de busca de Fibonacci utilizado. Os testes foram realizados em dois sistemas diferentes: Um sistema de 33 barras com um total de 49 920 variáveis de decisão. Enquanto que o segundo sistema possui 180 barras com 154 800 variáveis de decisão. Os resultados encontrados pelo algoritmo proposto foi comparado com outros 5 algoritmos: *chaotic biogeography-based optimization* (CBBO), *cross-entropy method and evolutionary PSO* (CEEPSO), *chaotic differential evolution with PSO* (Chaotic-DEEPSO), *Levy differential evolution with PSO* (Levy-DEEPSO), *variable neighborhood search* (VNS). Em ambos os cenários estudados, o algoritmo proposto (IVNS) apresentou melhores resultados quando comparado aos outros 5 algoritmos.

Em (RUPOLO *et al.*, 2021) é apresentado uma nova metodologia baseada no algoritmo VNS, computação paralela e técnicas de decomposição para tentar resolver o problema de planejamento de sistemas de distribuição de larga escala, de média e baixa tensão. A metodologia considera a alocação de subestações, transformadores, circuitos de média e baixa tensão, fontes de energia renovável, fontes de armazenamento de energia. Além disso, diversos custos relacionados às alocações e manutenções dos dispositivos foram considerados no modelo. Os testes foram realizados em um sistema de larga escala de 200 barras em média tensão e 1672 barras em baixa



tensão. A metodologia proposta apresentou bons resultados e, de modo geral, pode ser aplicada ao planejamento de expansão de qualquer sistema de distribuição de média/baixa tensão. O bom desempenho da metodologia depende somente do correto pré-processamento de dados de entrada dos sistemas.

## 2.2 Revisão Sobre o Problema de RSDEE

O problema de RSDEE tem despertado grande interesse por parte de pesquisadores nos últimos anos. Concessionárias de energia vêm dispendo de investimentos em pesquisa e desenvolvimento sobre este tema (MARQUES, 2013). Com isso, surgiram diversas abordagens com o objetivo de propor soluções para o problema de RSDEE. As principais metodologias de resolução baseiam-se em sistemas especialistas, heurísticas, meta-heurísticas e métodos clássico de otimização.

Um dos primeiros trabalhos a propor a mudança topológica em redes de distribuição foi (MERLIN; BACK, 1975). Este trabalho apresenta uma metodologia baseada em uma variação do algoritmo de programação inteira *branch-and-bound*, cujo o objetivo era a minimização de perdas resistivas em uma rede, realizando um processo de reconfiguração topológica. Apresentou-se, também, uma heurística na qual calcula-se um Fluxo de Potência (FP) linearizado considerando todas as chaves do sistema fechadas e, posteriormente, define-se a abertura da chave que conduz a menor corrente e que ao mesmo tempo não deixe o sistema desconexo. Este processo é repetido até a obtenção de uma configuração radial do sistema. A heurística apresentou pequena complexidade computacional, por outro lado, o algoritmo de programação inteira demandou grande esforço computacional quando aplicado a um sistema mais robusto.

Uma interessante combinação entre o Algoritmo Genético (AG) e a lógica fuzzy para a resolução do problema RSDEE foi demonstrado em (HSIAO; CHIEN, 2000). O trabalho mostrou a modelagem do problema com cinco diferentes funções objetivos relacionadas à maximização da quantidade de carga total a ser restaurada, em que cada uma destas funções são transcritas para o sistema fuzzy. Considerou-se o objetivo de minimização de comutação de chave, sujeito às restrições de tensão nas barras, corrente no alimentador e carregamento do transformador. Os testes foram realizados em um sistema que possui 10 alimentadores, 102 barras e 217 chaves de manobra.

Uma análise comparativa entre quatro algoritmos de metas-heurísticas aplicados ao problema RSDEE foi apresentada em (TOUNE *et al.*, 2002). O trabalho considerou o AG, *Parallel Simulated Annealing* (Arrefecimento Simulado Paralelo) (PSA), a Busca Tabu (BT) e uma variação do algoritmo de Busca Tabu denominado Busca Tabu Reativa (BTR). Os resultados mostraram que o algoritmo de BTR obteve uma melhor desempenho frente aos outros algoritmo considerados devido a sua condição Reativa, esta condição propõe a implementação de uma lista tabu variável e a implementação de uma análise de configurações repetidas na lista de solução.

As comparações foram feitas de forma quantitativa e qualitativa. Os testes foram realizados em sistemas com 18, 24, 30, 36, 48 e 60 seções, sem a inserção de GDs.

Para melhorar a eficiência do AG aplicado ao problema de RSDEE, o trabalho de (MENDOZA *et al.*, 2006) propôs uma metodologia de operadores genéticos especializados de combinação e mutação. A metodologia considera uma solução inicial baseada nos laços básicos referentes ao sistema de distribuição analisado. Essa metodologia permite gerar boa parte dos indivíduos factíveis com relação ao critério de radialidade podendo violar apenas, as restrições de operação do sistema, gerando um conjunto de soluções de boa qualidade.

Uma metodologia baseada no algoritmo de BT é proposta em (PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012). A técnica visa minimizar a quantidade de cargas fora de serviço em um cenário de falta permanente em um sistema de distribuição. Cada proposta de solução é avaliada através de uma função de adaptação que considera a FO mais a penalização das restrições violadas. Foi utilizado um fluxo de potência monofásico para se obter os valores das variáveis de operação do sistema. Os testes computacionais foram realizados em um sistema de 53 barras, onde os resultados dos tempos computacionais foram menores do que 1 segundo. Entretanto, a metodologia apresenta uma premissa de não considerar alterações topológicas de barras saudáveis do sistema. Além disso, a metodologia não apresenta um plano e sequência de manobras e não considera GDs instaladas no sistema.

Em (CAMILO, 2013) foi desenvolvida uma metodologia baseada na combinação de um Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo (AEMO) com uma heurística para a determinação de um plano de restabelecimento de energia elétrica no contexto de falta permanente. A metodologia faz o uso de uma codificação baseada na estrutura RNP a fim de se obter apenas indivíduos factíveis e melhorar o tempo de processamento. A metodologia apresentou resultados consistentes e satisfatórios do ponto de vista de tempo computacional (média de 13 segundos).

Além das heurísticas e meta-heurísticas, alguns trabalhos da literatura apresentam soluções para o problema da restauração através de modelo matemático, como é o caso de (ROMERO *et al.*, 2016). Neste trabalho foi realizado a conversão do problema de programação cônica de segunda ordem inteiro misto para um problema de programação linear inteiro misto. Foram realizados testes em um sistema de 53 barras através do solver CPLEX e, dada a modelagem linear do problema, a solução ótima é garantida pelo modelo proposto. Vale destacar que este trabalho possui a característica de permitir a validação de outras metodologias através da comparação dos resultados apresentado por ele, uma vez que há a garantia da otimalidade, considerando as simplificações realizadas no problema.

Uma combinação de um algoritmo de busca exaustiva local com um AEMO em tabelas para o restabelecimento de energia elétrica em redes reais de grande porte foi proposto em (MARQUES, 2018). A metodologia faz o uso de priorização de atendimento entre consumidores, seletividade de cargas menos prioritárias e priorização de chaves operadas remotamente. A metodologia utiliza uma codificação baseada na RNP para determinar o plano de restabelecimento

de energia, bem como uma sequência de operação de chaves para a implementação do plano de restabelecimento. Foram realizados testes em vários sistemas, onde o maior deles é o sistema de distribuição real de Londrina-PR que possui pouco mais de 40 mil barras, 83 alimentadores e 15 subestações. Os resultados mostraram-se adequados ao tratamento dos casos de faltas simples e múltiplas, assim como as sequências de chaves associadas, havendo a priorização de cargas e chaves automáticas.

O (SOUZA; PUERTA; ROMERO, 2020) propõe uma metodologia de otimização clássica para o problema de RSDEE em sistemas relativamente grandes. A abordagem utiliza técnicas aprimoradas aplicadas a um modelo matemático, sem simplificação topológica do sistema e usando apenas dois tipos de variáveis binárias. Os testes foram realizados em um sistema de 417 barras adaptado para se ter chaves de manobras estrategicamente alocadas. Analisaram-se diversos casos de faltas e o menor tempo computacional foi de 19 segundos. A metodologia não apresenta um plano de sequenciamento de chaves e não considera a inserção de geração distribuída no sistema.

### **2.2.1 Restauração de Sistemas com GDs Instaladas**

Neste trabalho, será considerada a instalação de GDs na rede de distribuição. Nesse sentido, existem trabalhos na literatura que decorrem desde a modelagem até análises dos efeitos da inclusão de GDs no sistema de distribuição, podendo estes GDs operarem em condições ilhadas ou não.

Um método robusto para a resolução do problema de RSDEE considerando a presença de GDs no sistema foi desenvolvido em (CHEN; WU; ZHANG, 2016). O trabalho afirma que a inserção de GDs no sistema introduz uma significativa incerteza quanto ao processo de restauração, sendo assim, o método proposto considera duas etapas de funcionamento: A primeira etapa fornece estratégias ótimas para o processo de restauração, enquanto que a segunda etapa abrange os piores casos dos cenários de flutuação de cargas. O modelo foi testado em um sistema modificado (com alteração quanto à alocação de chaves de manobras) de 69 barras e em um sistema de 246 barras para efeitos de comparação com um modelo de otimização determinístico.

Em (HAFEZ; OMRAN; HEGAZY, 2018) foi proposto uma abordagem multi-agente descentralizada para encontrar boas soluções para o reestabelecimento de cargas fora de serviço em sistemas de distribuição. A técnica utiliza regras de sistemas especialistas e considera priorização de consumidores. As simulações foram realizadas em um sistema de distribuição de 11kV com GDs instalada. Os testes foram realizados em vários casos de estudo: consideraram-se priorização de carga ou não, GDs instaladas ou não e adotaram-se variações de locais de falta. Os resultados apresentaram propostas de chaveamentos, mas não foi apresentado o tempo computacional. Além disso, a metodologia não apresenta um plano completo de sequenciamento de chaves e não permitiu a operação ilhada das GDs, ou seja, as GDs localizadas no mesmo alimentador da ocorrência da falta foram completamente desligadas.

Em (DIETMANNBERGER *et al.*, 2018) foi proposta uma metodologia de restauração de redes sob condições de ilhamento com a presença de GDs. Na abordagem, propôs-se um conceito de GDs flexíveis e escaláveis, onde comunicação não é necessária e, na falha da GD principal, o sistema é balanceado pela geração de outras GDs presentes no sistema. A estratégia de controle aplicada garante o rastreamento dos níveis de tensão e frequência das GDs no estado estacionário. Foi considerado, também, a influência de GDs não controladas no sistema, onde verificou-se a eficácia do modelo para estes casos.

Um modelo cônico inteiro misto de segunda ordem foi proposto em (LI *et al.*, 2019). Este modelo tem como objetivo a restauração de cargas fora de serviço em sistemas de distribuição que possuem GDs instaladas. Além disso, adotou-se uma abordagem cônica quadrática relaxada em relação ao formato original não convexo de fluxo de carga, onde sugeriu-se que esta abordagem é importante para a garantia da qualidade da solução. Os testes foram realizados em sistemas de 33 e 84 barras, em que as barras foram modeladas no formato PQ e PV (para as GDs). Os resultados obtidos apresentaram tempos computacionais aceitáveis, variando de 1,2 até 8 segundos dependendo do caso teste. Porém, observou-se que a abordagem não sugere um plano de sequenciamento bem definido e, também, não considera a variação dinâmica das GDs em caso de transferência de cargas e formação de ilhas de operação.

Uma metodologia para solucionar o problema de RSDEE em larga escala foi proposta em (PERALTA; LEITE; MANTOVANI, 2019). O modelo é submetido a ilhamento intencional de geração distribuída e controle de tensão através de ajustes otimizados em bancos de capacitores e reguladores de tensão apoiado por um algoritmo de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa. Para os testes, foram utilizados um sistema teste fictício de 53 barras e um sistema real com 7052 barras. Os resultados demonstraram a melhoria na qualidade de soluções quando os controles são considerados no modelo. A inserção de GDs também aumenta a qualidade das soluções durante as etapas do procedimento de restauração. A metodologia se mostrou robusta e determina soluções de boa qualidade em tempo de processamento suficiente que garante seu uso para restaurar redes de distribuição reais de grande porte. A metodologia apresentou aceitáveis tempos computacionais, com menos de 1 segundo para os testes realizados sistema teste de 53 barras e um intervalo de 19 a 335 segundos para os testes realizados no sistema de 7052 barras, a depender do caso de falta estudado. Além disso, foi apresentada a possibilidade de operação ilhada, porém, não foi analisado os limites de frequência dinâmica envolvida na transferência de cargas para a ilha de operação.

Um algoritmo baseado em teoria dos grafos foi apresentado em (KHEDERZADEH; ZANDI, 2019). Nesta abordagem propôs-se definir planos de restauração de cargas fora de serviço em um contexto de um desastre natural, onde múltiplas faltas poderiam acontecer. Utilizam-se microrredes presentes no sistema para a geração de planos de chaveamentos, a fim de restaurar cargas prioritárias. Os objetivos principais adotados foram: redução de cargas fora de operação, perdas resistivas no sistema e redução do número de chaveamentos. Os testes

foram realizados em um sistema desbalanceado de 1069 barras. Os resultados apresentam um sequenciamento de chaves bem definidos para se obter a topologia final de restauração, não foram demonstrados os resultados de tempos computacionais e, também, não apresenta uma análise dinâmica da frequência dos geradores das microrredes que podem ser afetadas pela transferência de cargas.

Em (LI *et al.*, 2020) foi proposta uma abordagem multi-agente descentralizada para a construção de uma estrutura de serviço de restauração para um sistema de distribuição com geradores distribuídos. Esta abordagem foi projetada para estabelecer um modelo reduzido do sistema, onde a complexidade computacional pôde ser reduzida drasticamente. Os testes computacionais foram realizados em sistemas de 84 e 22 barras, permitindo a operação ilhada. A abordagem apresentou tempos computacionais aceitáveis, variando entre 0,2 e 11 segundos, dependendo do caso de falta estudado. Entretanto, não foi apresentado um plano de chaveamento bem definido e desconsiderou-se a oscilação de frequência das GDs em casos de transferência de carga.

Com a introdução de GDs no sistema de distribuição, os aspectos dinâmicos destas na formação das ilhas se tornam indispensáveis para a consolidação das soluções de restauração. Em (FARIAS *et al.*, 2019) é demonstrado que GDs podem ser desligadas pelos dispositivos de proteção de frequência quando há uma variação muito brusca de carga na ilha de operação, visto que as restrições de frequência não são respeitadas e, assim, a ilha não se mantém após sua formação. Portanto, metodologias de restabelecimento propostas para sistemas que possuem GDs instaladas e que permitem a operação ilhada, deveriam considerar os aspectos dinâmicos na formação da ilha. Porém, há uma escassez de trabalhos na literatura que apresentam uma análise dinâmica na formação de ilhas de operação. Em (XU *et al.*, 2018) é proposta uma metodologia baseada em sistemas resilientes que usa microrredes para restaurar cargas críticas em alimentadores de distribuição após um cenário de grande desastre. Foi analisada a estabilidade das microrredes e limites de desvio de frequência, onde os limites de tensão e corrente transitória das GDs foram incorporados como restrições do problema crítico de restauração de carga. O problema é transformado em um problema de cobertura máxima com a introdução do conceito de árvore de restauração e grupos de carga, classificado como um *Linear Integer Problem* (Problema Linear Inteiro) (LIP). Os testes foram realizados em um sistema de 1069 barras, com 4 microrredes. Além disso, os recursos para a geração de energia nas microrredes também são analisados.

## 2.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma sucinta revisão bibliográfica da literatura sobre o tema de restauração de redes de distribuição e da utilização do algoritmo VNS para resolver problemas de sistemas elétricos de potência. Trabalhos com bons resultados para aplicações do algoritmo

VNS demonstram a eficácia e fácil implementação e flexibilidade deste algoritmo.

Nas tabelas 1 e 2 apresentam-se os comparativos dos principais aspectos abordados por trabalhos relevantes da literatura, comparados à metodologia proposta neste trabalho, no que diz respeito a características da FO, ao plano de sequenciamento de chaves, as GDs e as características dinâmicas envolvidas no processo de ilhamento.

Pela variedade das datas dos trabalhos publicados sobre o problema de RSDEE, nota-se que o tema estudado desperta o interesse de pesquisadores há muitos anos. Os trabalhos que consideram o comportamento dinâmico das GDs na formação de ilhas são bastante escassos na literatura. Nesse sentido, há uma janela para o surgimento de novas técnicas que fazem esse tipo de análise. Sendo assim, este trabalho contribui para a resolução do problema abordado, considerando a inserção de GDs no sistema e, constatando a validade dinâmica das soluções encontradas na formação de ilhas de operação. Além disso, este trabalho contribui, também, no sentido de propor a incorporação de uma restrição ao modelo que possibilite a garantia da construção e a manutenção das ilhas do ponto de vista dinâmico.

Tabela 1 – Comparativo da literatura recente e relevante com relação aos aspectos de funções objetivos e sequenciamento de chaves

Referência	Funções Objetivo			Sequenciamento	
	Min. consumido- res fora de serviço	Min. num. de ma- nobras	Min. perdas resis- tivas	Fornece plano seq. de chaves	Verifica seq. de chaveamento
<b>Este Trabalho</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
(LI <i>et al.</i> , 2020)	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
(SOUZA; PUERTA; ROMERO, 2020)	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
(KHEDERZADEH; ZANDI, 2019)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
(PERALTA; LEITE; MANTOVANI, 2019)	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
(LI <i>et al.</i> , 2019)	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
(DIETMANNNSBERGER <i>et al.</i> , 2018)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
(HAFEZ; OMRAN; HEGAZY, 2018)	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO
(XU <i>et al.</i> , 2018)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
(MARQUES, 2018)	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
(CHEN; WU; ZHANG, 2016)	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
(ROMERO <i>et al.</i> , 2016)	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
(CAMILLO, 2013)	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
(PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012)	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO

Tabela 2 – Comparativo da literatura recente e relevante com relação aos aspectos de sistema e dinâmica

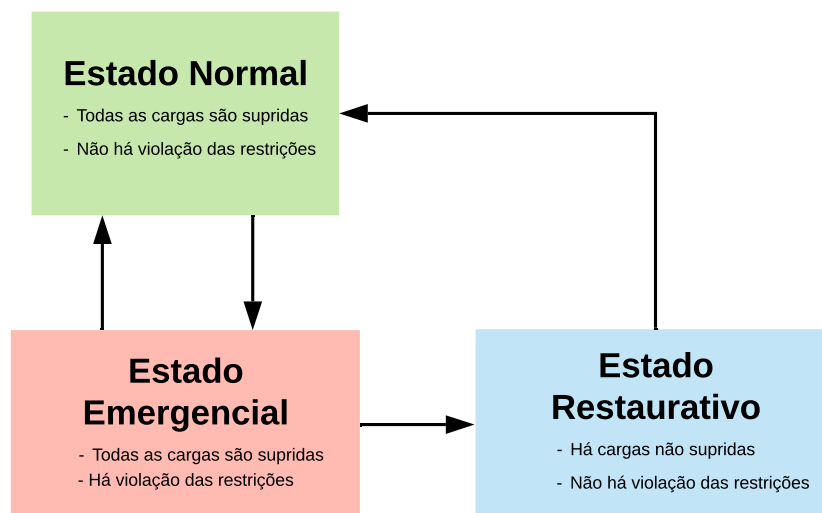
Referência	Sistema		Dinâmica	
	Considera GDS	Operações ilhadas	Análise dinâmica da solução	Restrições dinâmicas no modelo
<b>Este Trabalho</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
(LI <i>et al.</i> , 2020)	SIM	SIM	NÃO	NÃO
(SOUZA; PUERTA; ROMERO, 2020)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
(KHEDERZADEH; ZANDI, 2019)	SIM	SIM	NÃO	NÃO
(PERALTA; LEITE; MANTOVANI, 2019)	SIM	SIM	NÃO	NÃO
(LI <i>et al.</i> , 2019)	SIM	SIM	SIM	NÃO
(DIETMANNBERGER <i>et al.</i> , 2018)	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
(HAFEZ; OMRAN; HEGAZY, 2018)	SIM	SIM	NÃO	SIM
(XU <i>et al.</i> , 2018)	SIM	SIM	SIM	NÃO
(MARQUES, 2018)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
(CHEN; WU; ZHANG, 2016)	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
(ROMERO <i>et al.</i> , 2016)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
(CAMILO, 2013)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
(PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO



## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo (SONG; DEMAREE; JING, 2010), mais de 80% das interrupções do fornecimento de energia elétrica que acontecem em um sistema elétrico são decorrentes de faltas no sistema de distribuição. As faltas podem ser classificadas em dois tipos, temporárias e permanentes. Para faltas temporárias, a operação de um dispositivo com capacidade de religamento automático é o método mais comum para a restauração das seções afetadas pela falta (CONCEIÇÃO, 2018). Porém, quando se trata de uma falta permanente, o sistema passa do estado normal de operação para um estado restaurativo, como ilustrado na Figura 3. Diante disso, as empresas que administram o sistema elétrico de potência, buscam aplicar uma estratégia de chaveamento para restaurar o maior número de cargas desconectadas (com exceção das seções em falta), levando em consideração as violações operacionais do sistema, caracterizados pelas restrições de tensão, corrente e frequência.

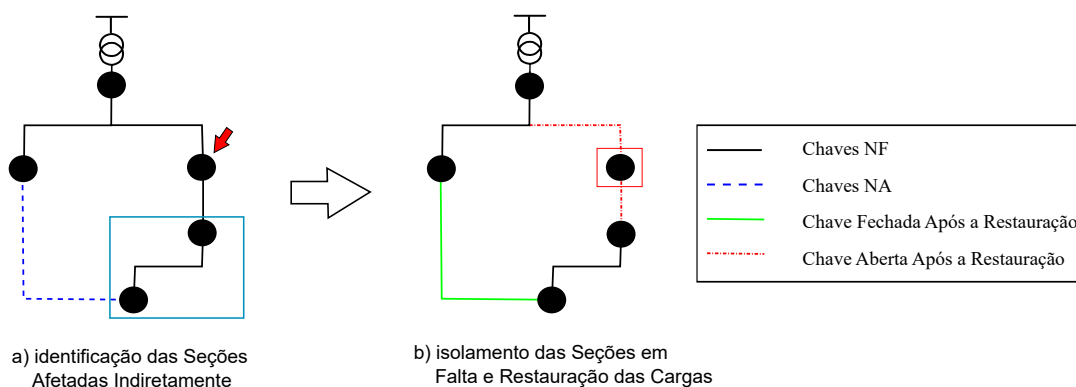
Figura 3 – Estados Operativos do Sistema



Fonte: Elaborada pelo autor.

O processo de restauração tem início com a identificação e o isolamento da seção<sup>1</sup> em falta. Posteriormente, identifica-se a existência de seções à jusante da seção em falta que sofreram interrupções de energia, atingidas indiretamente pela falta (seções saudáveis fora de serviço). Conhecidas as seções que podem ser religadas, o último passo é a definição de um plano de operação de manobras das chaves existentes no sistema para tentar restabelecer o fornecimento de energia das seções fora de serviço. Na Figura 4 demonstra-se um exemplo do processo de restauração, considerando como seção em falta a seção indicada com a seta vermelha e as cargas a serem restauradas demarcadas pelo quadrado azul.

Figura 4 – Processo de Restauração de Cargas



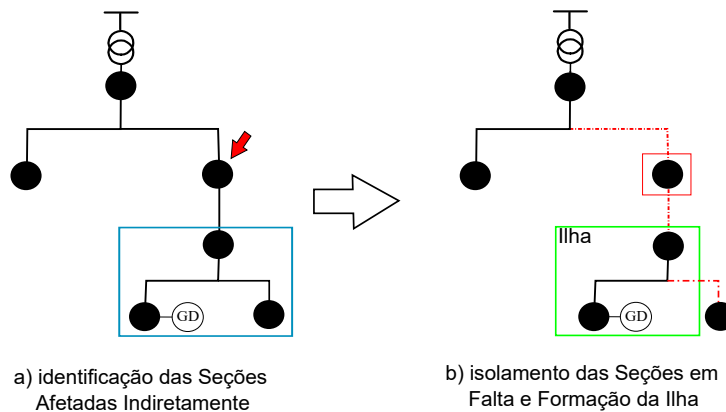
Fonte: Elaborada pelo autor.

O processo é semelhante para o caso de GDs instaladas no sistema. Isola-se a seção em falta e identificam-se as seções à jusante da seção em falta, atingidas indiretamente pela falta. Define-se o plano de operação de manobras das chaves existentes no sistema e, posteriormente, no processo de formação da ilha, verifica-se a capacidade de alimentação das cargas através da GD e forma-se a ilha. Ou seja, uma ilha é caracterizada por uma parcela de carga isolada da SE em que sua alimentação provém de uma GD, também isolada da SE. A figura 5 demonstra o processo de restauração e formação de ilhas, considerando que a GD instalada não é capaz de suprir todas as seções fora de serviço.

Após o processo de restauração, o sistema deve manter sua topologia radial e atender às restrições de operação, como: limites de correntes e limites de tensão. O problema de RSDEE pode apresentar objetivos variados, sendo um dos mais comuns o reestabelecimento da maior quantidade de carga possível e, ao mesmo tempo, efetuar o menor número de manobras nas chaves do sistema. A minimização do número de manobras implica na diminuição das ações das equipes de manutenção e, conseqüentemente, no tempo total para a restauração (PERALTA, 2015). Adicionalmente, diminui-se o efeito dos transitórios eletromagnéticos decorrente de chaveamentos. Além disso, em alguns casos podem haver algumas cargas críticas no sistema, refletindo em um cenário com priorização de cargas a serem restauradas.

<sup>1</sup> Seção neste trabalho é definido como o conjunto de cargas e ramos dos sistema de distribuição situados entre dois elementos de seccionamento, sejam eles dispositivos de proteção ou de manobra.

Figura 5 – Processo de Restauração de Cargas com GD Instalada



Fonte: Elaborada pelo autor.

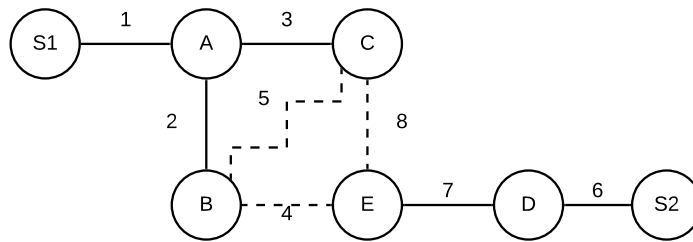
### 3.1 Representação Computacional do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Um importante ponto a se analisar em um problema de RSDEE é a representação computacional do sistema. Uma boa representação computacional auxilia na realização do cálculo de fluxo de potência de forma mais eficiente, e facilita a implementação do algoritmo de otimização. Além disso, garante uma visualização clara e precisa da estrutura topológica do sistema. Nesse sentido, uma boa forma de se representar um sistema de distribuição de energia elétrica é através de grafos.

Um grafo é uma estrutura matemática, formada por um conjunto finito de vértices  $V(G)$  e um conjunto finito de arestas  $E(G)$ , onde  $G = (V(G), E(G))$  é um grafo formado por pares de vértices interligados por uma aresta (ZORZI, 2019). Para a representação do sistema de distribuição de energia elétrica, optou-se, neste trabalho, pela utilização de um grafo simples, sem peso nas arestas e não-dirigidos, o que significa que cada aresta é um conjunto de exatamente dois vértices distintos. Portanto, um vértice e uma aresta, representam, respectivamente, uma seção/barras e um ramo do sistema.

Devido sua característica radial, um sistema de distribuição com vários alimentadores pode ser representado por uma floresta de grafos. Desse modo, para a representação de um sistema de distribuição sob a ótica da teoria de grafos tem-se, neste trabalho, as barras da SE e as barras de carga representadas por nós, enquanto que as chaves seccionadoras são representadas como arestas, onde as chaves NF são representadas por arestas contínuas e as chaves NA são representadas pelas arestas pontilhadas. A Figura 6 demonstra a representação de um sistema de distribuição composta por dois alimentadores com duas barras de SE (S1 e S2).

Figura 6 – Representação em Grafo de um Sistema de Distribuição Composto por 5 Seções

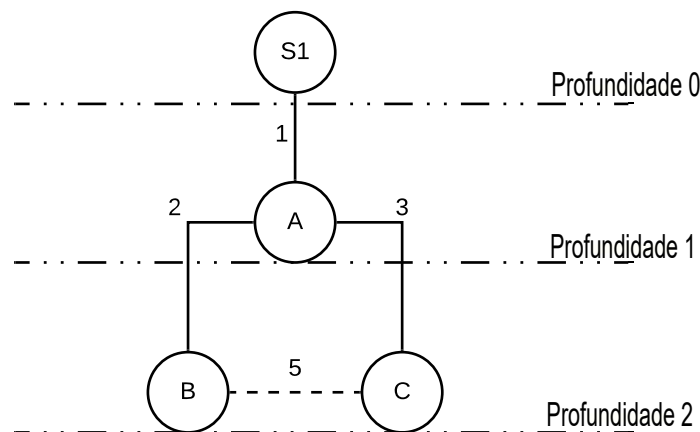


Fonte: (MARQUES, 2013)

### 3.1.1 Representação Nó-Profundidade

A representação de sistemas elétricos por meio de grafos possibilita a utilização de uma codificação desenvolvida por (DELBEM *et al.*, 2004), denominada de RNP. Este método possibilita a representação eficiente de sistemas de grande porte e auxilia na manipulação computacional do sistema, facilitando a aplicação de algoritmos para o cálculo do fluxo de potência e algoritmos utilizados para a resolução do problema de RSDEE. A RNP baseia-se no conceito de nós e ramos da representação por grafos, classificando os nós com base em sua localização no grafo a partir de um nó inicial (nó raiz). A Figura 7 ilustra a classificação dos nós do alimentador S1, apresentado na Figura 6, com base em suas profundidades a partir de um nó raiz.

Figura 7 – Representação das Profundidades do Alimentador S1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma boa prática é considerar o nó raiz (profundidade igual a 0) como sendo o nó da SE e construir a RNP a partir dos nós subsequentes. A partir da identificação dos nós e suas respectivas profundidades, a RNP pode ser representada através de uma lista, onde armazenam-se, na primeira linha, os nós do sistema enquanto que a segunda linha apresenta a profundidade

equivalente de cada nó na primeira linha. Forma-se, então, pares do tipo Nó-Profundidade, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Codificação da RNP em formato de lista

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Nó} \\ \hline \text{Profundidade} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|cccc|} \hline \text{S1} & \text{A} & \text{B} & \text{C} \\ \hline 0 & 1 & 2 & 2 \\ \hline \end{array}$$

Fonte: Adaptado de (MARQUES, 2013)

A ordem em que os pares são dispostos na lista é extremamente importante e pode ser determinada através de um algoritmo de busca em profundidade, no qual, utiliza-se o nó raiz como o ponto referencial de partida da busca. No formato computacional, a RNP é representada por uma matriz  $2 \times N$ , onde  $N$  é a quantidade de barras existentes no alimentador e cada alimentador gerará uma matriz de RNP. Vale destacar que a RNP utilizada para a representação da ilha de operação segue o mesmo conceito apresentado, a variação acontece apenas no nós raiz, onde, este caso, o nó raiz é o nó da GD que alimenta a ilha.

Por sua facilidade de implementação e eficiência de manipulação computacional, a RNP é amplamente utilizada por diversos trabalhos que tratam de restauração de sistemas de distribuição. Nesse sentido, a literatura especializada apresenta trabalhos que utilizam abordagens de combinação da RNP com o algoritmo NSGA-II (MANSOUR, 2009), RNP com metodologia baseada no algoritmo BT (PERALTA, 2015), RNP com metodologia para lidar com sistemas de grande porte (SANTOS *et al.*, 2010), entre outros.

## 3.2 O Problema de RSDEE com Geração Distribuída

O sistema de distribuição é idealizado para funcionar de forma contínua, econômica e confiável, respeitando restrições técnicas como magnitude de tensão e corrente, frequência do sinal, distorção harmônica das formas de onda de tensão e corrente, etc. (POSSAGNOLO, 2015). Para alcançar tais objetivos relacionados à continuidade, os sistemas de distribuição são projetados de forma malhada, entretanto sua operação é usualmente radial para a diminuição do custo de implementação e operação e para facilitar manutenções. Porém, a principal desvantagem de se adotar a topologia radial é que na ocorrência de uma contingência, toda a parcela além do ponto de falha ficará fora de serviço. Na ocorrência de uma situação de contingência é função dos dispositivos de proteção e seccionamento detectar e isolar a menor parcela do sistema a ser afetada pelo defeito. A correta atuação destes dispositivos juntamente com a existência de malhas permite que partes do sistema afetadas pela contingência sejam reestabelecidas através da atuação dos dispositivos de manobras, sejam eles automáticos ou manuais. Identificar qual dispositivo seccionador deve abrir ou fechar dá origem ao problema conhecido como Restauração do Sistema de Distribuição ou Reestabelecimento de Energia do Sistema de Distribuição, o qual

deve acontecer o mais rápido possível, a fim de poupar os consumidores e as distribuidoras de energia elétrica de possíveis prejuízos econômicos e sociais (FILHO; RODRIGUES; SOUZA, 1999).

Neste trabalho, o problema de RSDEE foi formulado considerando os seguintes objetivos: minimizar a quantidade de consumidores desconectados da rede (Potência não Surpida (PNS)), minimizar o número de chaveamentos necessários para implementar a topologia de restauração e minimizar as perdas por efeito Joule do sistema, sujeito as restrições de limites de correntes, tensão e radialidade do sistema. A minimização das perdas resistivas do sistema no contexto do problema de RSDEE, proposta inicialmente por (SANTOS *et al.*, 2010), foi considerada um dos objetivos a fim de aumentar a diversificação das soluções encontradas, apesar de não ser um objetivo exclusivamente do problema.

As variáveis de decisão consideradas são:  $x_{ij}$  que representa o estado atual da chave entre as seções  $i$  e  $j$  (1 se estiver fechada, 0 caso contrário) e  $y_i$  representa o estado de suprimento de potência da seção  $i$  (1 caso a seção seja alimentada, 0 caso contrário). Além disso, adotou-se o critério de ponderações de pesos para a elaboração da Função Objetivo (FO). Esta estratégia utiliza uma ponderação de coeficientes diferentes para cada termo da FO do problema de RSDEE, a fim de definir uma hierarquia entre os termos para garantir sua prioridade. Os valores dos pesos de cada termo da FO são escolhidos considerando a importância que cada um representa para a resolução do problema em si. Nesse sentido, o modelo da Função Objetivo (FO) considerada é:

$$\text{Min } FO = \sum_{i \in \Omega_{bs}} w_1 \cdot (\sqrt{(P_i^D)^2 + (Q_i^D)^2}) \cdot (1 - y_i) + \sum_{i,j \in \Omega_{ch}} w_2 \cdot |x_{ij} - x_{ij}^0| + \sum_{i,j \in \Omega_{rm}} w_3 \cdot (R_{ij} \cdot I_{ij}^2) \cdot x_{ij} \quad (3.1)$$

Onde:

- $x_{ij}^0$  representa o estado inicial da chave no ramo  $ij$ .
- $\Omega_{bs}$  representa o conjunto de seções.
- $\Omega_{ch}$  conjunto de chaves do sistema.
- $\Omega_{rm}$  conjunto de ramos do sistema.
- $P_i^D$  é a demanda de potência ativa da seção  $i$ .
- $Q_i^D$  é a demanda de potência reativa da seção  $i$ .
- $R_{ij}$  é a resistência no ramo  $ij$ .
- $I_{ij}$  é a corrente do ramo  $ij$ .
- $w_1$  é a constante de peso 1.

- $w_2$  é a constante de peso 2.
- $w_3$  é a constante de peso 3.

Na abordagem proposta neste trabalho, o principal termo da FO do problema RSDEE é a minimização da quantidade de PNS no sistema. Ou seja, deve-se tentar reconectar à rede o máximo de consumidores após o cenário de isolamento da falta. Para isso, considera-se a demanda de potência de cada barra do sistema como forma de representar os consumidores. Outro ponto importante é a quantidade de chaveamento. O exagerado número de manobras pode causar uma série de problemas técnicos no sistema, transitórios eletromagnéticos de corrente e de tensão e danificar equipamentos das redes primária e secundária. O tempo total necessário para a restauração e retorno ao estado normal de operação do sistema de distribuição está intimamente ligado ao tempo para efetuar estes chaveamentos, uma vez que existe uma grande quantidade de chaves manuais em operação nos sistemas de distribuição. As perdas resistivas no sistema elétrico é um fenômeno natural e muito difícil de ser evitado. No entanto, o termo da FO que representa as perdas resistivas em um sistema serve como parâmetro de decisão entre soluções que possuem praticamente os mesmos valores de PNS e de número de chaveamentos. Por mais que as perdas resistivas não sejam o foco principal no contexto da restauração, essa parcela pode fazer diferença para a análise das soluções encontradas. Por fim, destaca-se que os valores utilizados não foram normalizados para sua utilização nos termos da FO.

A minimização da FO está sujeita a um conjunto de restrições que definem o correto funcionamento do sistema do ponto de vista físico e operacional. O sistema reconfigurado para o restabelecimento de energia, deve atender às restrições de potência ativa (eq. 3.2) e reativa (eq. 3.3), as quais garantem que as demandas do sistema sejam atendidas. A garantia de que as restrições de potência ativa e reativa sejam satisfeitas está relacionada à queda de tensão entre os nós, dada pelas equações (3.4) e (3.5). Estas equações são derivadas das primeira e segunda leis de Kirchhoff.

$$P_i^s - (P_i^D - P_i^G) - \sum_{j \in \Omega_{bvi}} P_{ij} = 0 \quad , \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3.2)$$

$$Q_i^s - (Q_i^D - Q_i^G) - \sum_{j \in \Omega_{bvi}} Q_{ij} = 0 \quad , \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3.3)$$

$$V_i^2 - V_j^2 = 2 \times (P_{ij} \cdot R_{ij} + Q_{ij} \cdot X_{ij}) + Z_{ij}^2 \cdot I_{ij}^2 \quad , \quad \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.4)$$

$$V_j^2 \cdot I_{ij}^2 = P_{ij}^2 \cdot Q_{ij}^2 \quad , \quad \forall i, j \in \Omega_l \quad (3.5)$$

Onde:

- $P_i^s$  e  $Q_i^s$  representam as potências ativas e reativas fornecidas pela SE  $s$  na barra  $i$ .
- $P_i^G$  e  $Q_i^G$  representam as potências ativas e reativas fornecidas pela GD  $G$  na barra  $i$ .
- $P_{ij}$  e  $Q_{ij}$  representam os fluxos de potência ativa e reativa que fluem pelo ramo  $ij$ .
- $V_i$  e  $V_j$  representam a magnitudes de tensão nas barras  $i$  e  $j$  referente ao ramo  $ij$ .
- $R_{ij}$ ,  $X_{ij}$  e  $Z_{ij}$  representam, respectivamente, a resistência, reatância e a impedância do ramo  $ij$ .
- $\Omega_l$  é o conjunto de circuitos em funcionamento do sistema durante a restauração.
- $\Omega_b$  representa o conjunto de barras.
- $\Omega_{bvi}$  é o conjunto de barras vizinhas da barra  $i$ .

As subestações presentes no sistema estão sujeitas às restrições de potência, dadas por:

$$0 \leq P_s \leq P_{sMAX} \quad \forall s \in \Omega_s \quad (3.6)$$

$$0 \leq Q_s \leq Q_{sMAX} \quad \forall s \in \Omega_s \quad (3.7)$$

$$\sqrt{P_s^2 + Q_s^2} \leq S_s \quad \forall s \in \Omega_s \quad (3.8)$$

Onde:

- $\Omega_s$  é o conjunto de SEs presentes no sistema.
- $P_s$  e  $Q_s$  são as potências, respectivamente, ativa e reativa fornecidas pela SE.
- $P_{sMAX}$  é a potência ativa máxima gerada pela SE.
- $Q_{sMAX}$  é a potência reativa máxima gerada pela SE.

Além das subestações, os geradores também possuem restrições de potência, na qual a potência gerada deve respeitar sua capacidade de geração. Estas restrições são dadas por:

$$P_{GMIN} \leq P_G \leq P_{GMAX} \quad \forall G \in \Omega_g \quad (3.9)$$

$$Q_{GMIN}(P_G) \leq Q_G \leq Q_{GMAX}(P_G) \quad \forall G \in \Omega_g \quad (3.10)$$



$$\sqrt{P_G^2 + Q_G^2} \leq S_G \quad \forall G \in \Omega_g \quad (3.11)$$

Em que:

- $\Omega_G$  é o conjunto de GDs presentes no sistema.
- $P_{GMIN}$  são as potências ativas mínimas geradas pelo gerador G.
- $P_{GMAX}$  é a potência ativa máxima gerada pelo gerador G.
- $Q_{GMIN}$  é a potência reativa mínima fornecida pelo gerador G.
- $Q_{GMAX}$  é a potência reativa máxima fornecida pelo gerador G.

As magnitudes tensão das barras do sistema devem permanecer dentro dos parâmetros máximo e mínimo estabelecidos. Portanto, as restrições de tensão são definidas por:

$$V_{MIN} \leq V_i \leq V_{MAX} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3.12)$$

Em que:

- $V_{MIN}$ : limite mínimo de tensão em cada barra do sistema.
- $V_{MAX}$ : limite máximo de tensão em cada barra do sistema.

Da mesma forma que as tensões, as magnitudes de corrente são limitadas por parâmetros máximos. A corrente que flui por um determinado ramo  $ij$  deve respeitar o limite máximo de corrente estabelecido para este ramo, como apresentado em 3.13.

$$I_{ij} \leq I_{ijMAX} \quad \forall ij \in \Omega_{rm} \quad (3.13)$$

- $I_{ijMAX}$ : limite máximo de corrente em cada ramo do sistema.

Além disso, definiu-se na abordagem proposta por este trabalho que a topologia do sistema deve ser radial. Assim a restrição 3.14 juntamente com a primeira e segunda lei de kirchhoff (Eqs: 3.2-3.5) garantem a radialidade do sistema ([LAVORATO et al., 2011](#)).

$$\sum_{j \in \Omega_b} x_{ij} \leq N_b - 1 \quad , \forall i \in \Omega_b \quad (3.14)$$

Em que:

- $N_b$  = número de barras do sistema.

Por fim, como as variáveis de decisão  $x$ ,  $y$  são de natureza binária, deve-se limitar seus valores ao conjunto dos números binários, representado por:

$$x, y \in \{0, 1\} \quad (3.15)$$

As equações (3.1)-(3.15) são as equações básicas para o problema de RSDEE. Estas equações garantem o funcionamento do sistema considerando as condições técnicas e de operação em regime permanente. O modelo matemático completo para o problema de RSDEE pode ser encontrado em (ROMERO *et al.*, 2016).

Além das restrições que regem o comportamento do sistema em regime permanente, é necessário, também, acrescentar algumas restrições para que, do ponto de vista da dinâmica do sistema, o sistema tenha um correto funcionamento no que diz respeito ao isolamento da GD e na construção de ilhas no contexto contingências.

Desse modo, primeiramente é importante definir o sistema de controle, responsável pelo controle da máquina síncrona, utilizada como GD neste trabalho.

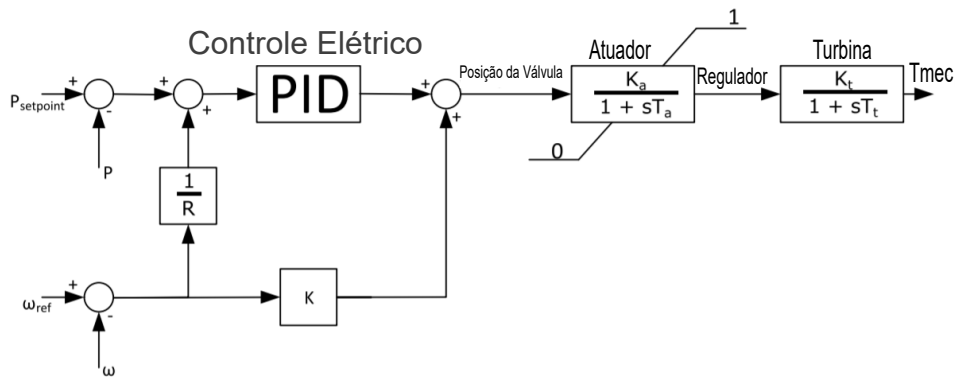
### 3.2.1 Controle Aplicado às GDs

A inserção de GDs nos sistemas de distribuição de energia é um dos principais avanços tecnológicos observado nos últimos anos. A presença de GDs pode trazer diversos benefícios ao sistema, desde melhora do perfil de tensão até a diminuição de perdas técnicas (GUEDES, 2013). Além disso, há um destaque na diversidade de tecnologias empregadas como fontes de energia primária, por exemplo: eólicas, solares, diesel, carvão, etc (MELLO, 2014). Para os testes realizados neste trabalho, optou-se pela utilização de geradores síncronos movidos por turbinas a vapor, devido a sua vasta utilização no contexto de cogeração (FARIA *et al.*, 2021).

Para a utilização de geradores síncronos conectados à rede principal, cada GD pode possuir diferentes modos de operação: potência ativa constante, potência reativa constante, controle  $V$ - $VAr$  (controle de tensão e reativos) e *frequency-droop* (controle de frequência) (IEEE Standards Association, 2018). Nesse sentido, foi projetado para este trabalho um regulador de velocidade baseado em um esquema genérico para turbinas a vapor com controle PID, apresentado em (POURBEIK *et al.*, 2013). Também, projetou-se uma excitatriz de corrente contínua, baseado em (IEEE Standards Association, 2016). As Figuras 9 e 10 demonstram o esquemático do projeto do controlador.

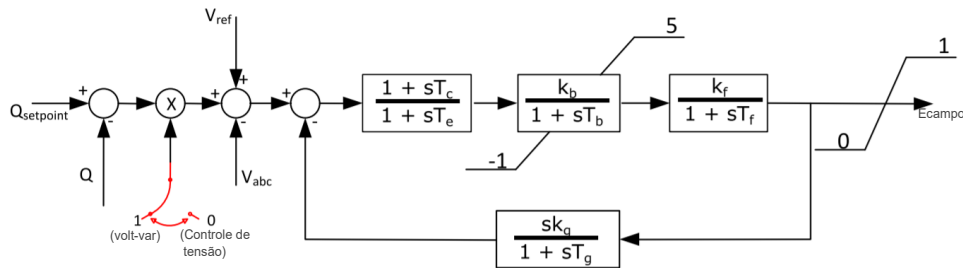
Pela Figura 9, verifica-se que em condições normais de operação, ou seja, com a GD operando conectada ao alimentador principal, tem-se a injeção de potência no sistema, desde que a SE proporcione frequência e tensão nominal. Além disso, a Figura 10 mostra que a GD é capaz de injetar reativo no sistema caso a SE não garanta a tensão na barra da GD. Por

Figura 9 – Diagrama de Controle de Velocidade



Fonte: Adaptado de (FARIA *et al.*, 2021)

Figura 10 – Diagrama do Excitatriz



Fonte: Adaptado de (FARIA *et al.*, 2021)

outro lado, a correta definição da modelagem das GDs no contexto de operações ilhadas é um fator extremamente importante a se analisar. Porém, segundo Pourbeik *et al.* (2013), é difícil definir uma especificação de modelo generalista de uma GD, dado as inúmeras possibilidades do sistema e condições de estudo. Nesse sentido, adota-se, neste trabalho, a modelagem das GDs trabalhando de forma ilhada como barras PVs. A escolha desta modelagem se deu porquê, na prática, temos um controle V-VAr que mantém a injeção de potência reativa constante ao custo de pequenos desvios de tensão. Porém, quando há um desvio demasiadamente grande, uma ação de controle é responsável por direcionar a tensão para a faixa aceitável em torno da referência. Desse modo, a ação de controle é definida por um sinal elétrico que por sua vez controla a tensão de campo. A natureza dos transitórios elétricos (extremamente rápidos) faz com que o controle seja praticamente instantâneo. Ao passo que, o controle de frequência envolve grandezas mecânicas, onde a frequência depende da resultante entre o torque elétrico e o mecânico da máquina. Este fato resultaria em um tempo de acomodação maior, o que poderia causar a atuação da proteção. Portanto, a modelagem das GDs como  $\theta V$  poderia falhar ao não representar os transitórios de frequência, sendo que, na prática, as soluções encontradas com este modelo poderiam ser ineficazes.

Baseado nas características do controlador, foi definido uma restrição para garantir que a frequência em regime permanente permaneça dentro dos limites aceitáveis após a formação da

ilha. Da figura 9, tem-se que o *input* do controle PID é dado por:

$$P_{setpoint} - P_{ilha} = \frac{1}{R} \times (\omega_{ref} - \omega_{ilha}) \quad (3.16)$$

Onde:

- $P_{setpoint}$  é o *setpoint* da potência ativa definido para a GD.
- $P_{ilha}$  é a demanda de potência ativa da ilha.
- $R$  é o parâmetro de *droop* do controlador.
- $\omega_{ref}$  é a velocidade angular da máquina em operação nominal.
- $\omega_{ilha}$  é a velocidade angular da máquina durante o ilhamento.

Dado que as velocidades angulares das máquina podem ser representadas em termos de frequência e, desenvolvendo a equação 3.16, temos que:

$$P_{ilha} \leq P_{setpoint} + \frac{f_{ref} - f_{min}}{R} \quad (3.17)$$

$$P_{ilha} \geq P_{setpoint} - \frac{f_{max} - f_{ref}}{R} \quad (3.18)$$

Onde:

- $f_{ref}$  é a frequência nominal da ilha.
- $f_{max}$  é o limite de frequência máximo estabelecido para a ilha.
- $f_{min}$  é o limite de frequência mínimo estabelecido para a ilha.

Portanto, para que a ilha tenha um comportamento esperado com relação à frequência em regime permanente, deve-se, necessariamente, garantir que a demanda de potência ativa corrente da ilha esteja dentro dos limites estabelecidos pelas equações 3.17 e 3.18.

### 3.2.2 Restrição de bloco de carga

Uma das contribuições deste trabalho é o estudo da incorporação de restrições ao modelo que garanta a correta formação e manutenção de ilhas, considerando os aspectos transitórios de frequência ao se adicionar ou remover cargas na ilha. Nesse sentido, além das restrições 3.17 e

3.18 apresentadas, adiciona-se uma restrição que limita a magnitude de cargas transferidas em um único chaveamento.

$$P_{Gat} - P_{Gn} \leq \zeta \quad (3.19)$$

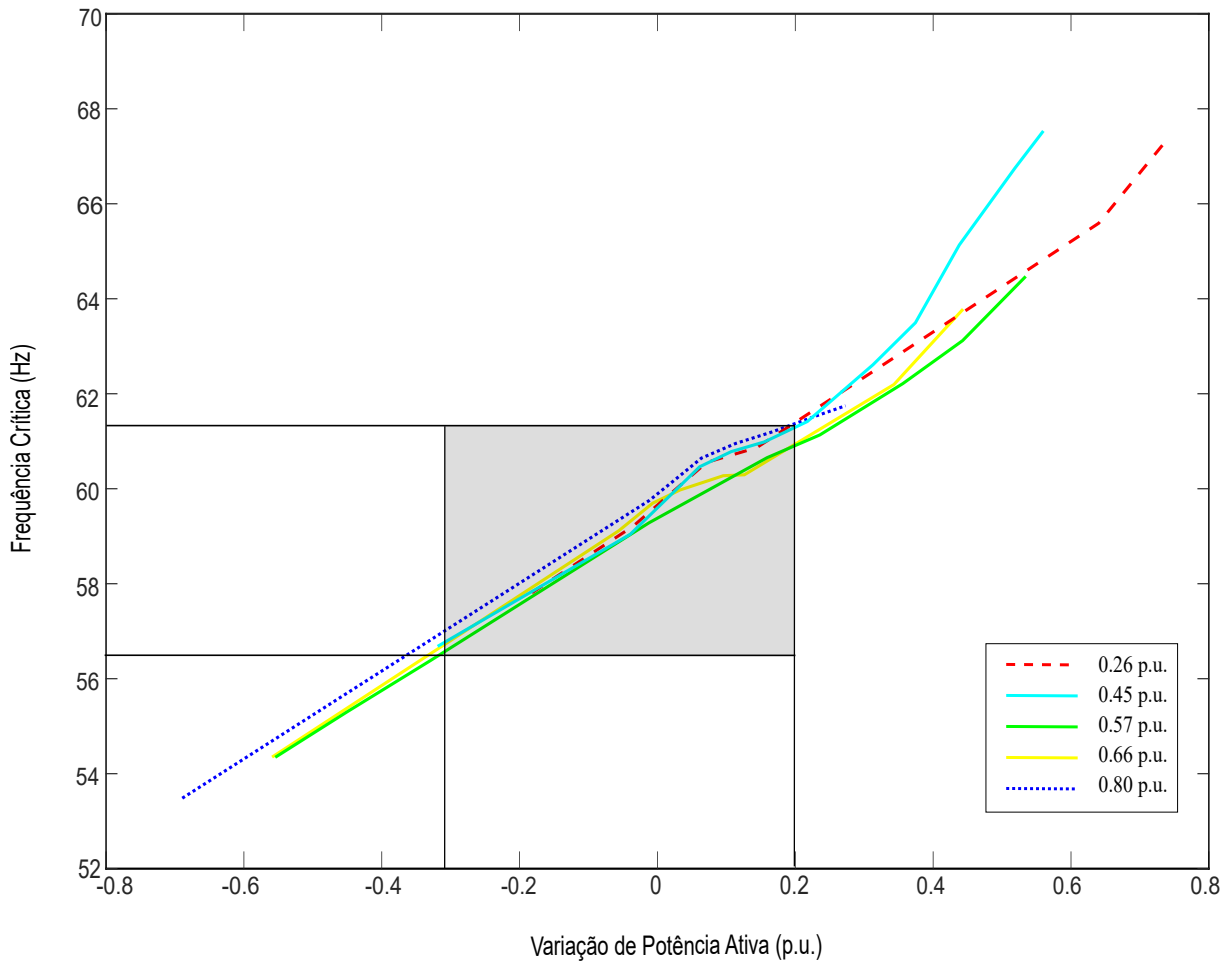
$$P_{Gat} - P_{Gn} \geq \xi \quad (3.20)$$

- $P_{Gat}$  é a potência ativa atual injetada pela GD da ilha.
- $P_{Gn}$  é a nova potência ativa injetada pela GD da ilha após a transferência de carga.
- $\zeta$  é o limite máximo de carga a ser retirado da ilha através de uma única operação de chaveamento.
- $\xi$  é o limite máximo de carga a ser adicionado a ilha através de uma única operação de chaveamento.

Os valores de  $\xi$  e  $\zeta$  podem ser definidos através da realização de um ensaio com diferentes casos de transferências de cargas para a ilha (acréscimo e retirada de blocos de cargas com diferentes capacidades). Este tem por finalidade a criação de cenários a fim de relacionar a variação de carga na ilha com a frequência crítica da GD ao se realizar a operação. A Figura 11 ilustra os resultados deste tipo de ensaio.

Realiza-se este ensaio considerando diversos cenários de *setpoints* para a GD. Nesse sentido, foi possível determinar uma faixa factível de transferência de carga, onde a frequência crítica da GD não ultrapasse os limites de frequência determinados (62 e 56,5 Hz, conforme (IEEE Standards Association, 2018)). Esta faixa factível pode ser vista na área sombreada, presente na Figura 11. Desse modo, para este trabalho, adotou-se os valores de  $\xi$  e  $\zeta$ , de -0,35 p.u e 0,2 p.u, respectivamente como uma estimativa limite de transferência de carga.

Figura 11 – Frequência Crítica Vs Transferência de Carga com Diferentes SetPoints



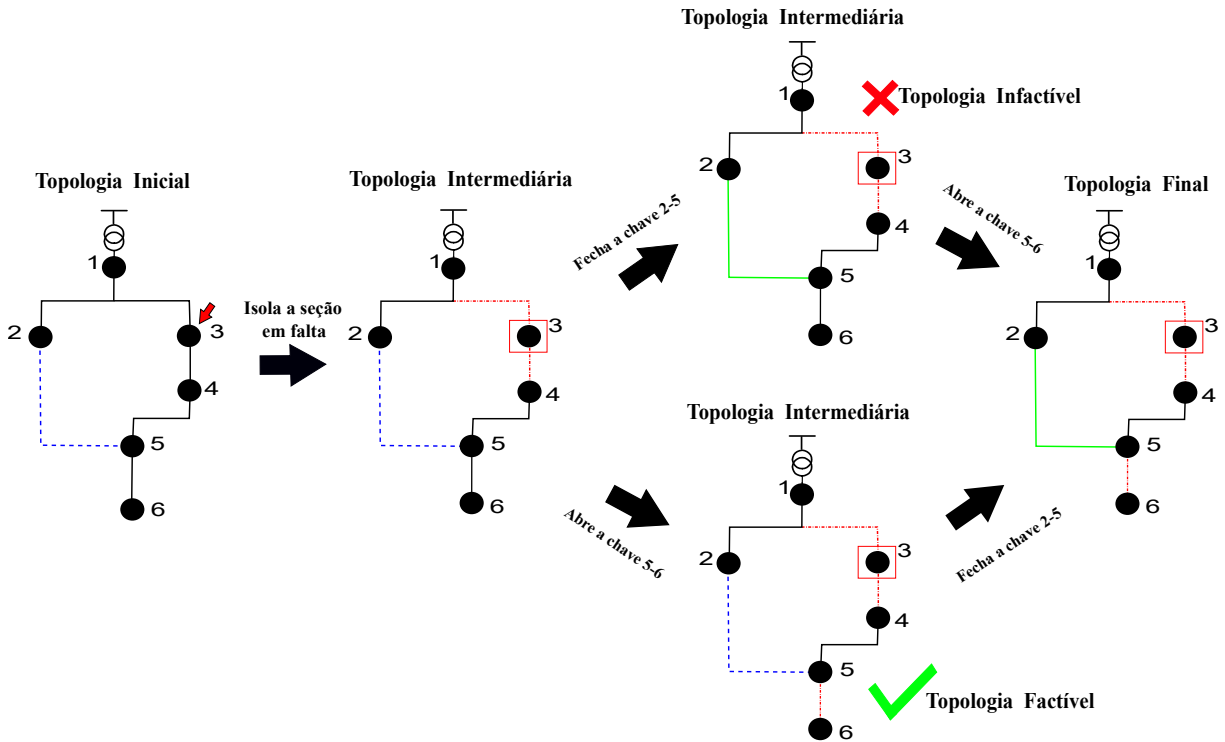
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3 O Plano de Sequenciamento de Chaves

Além do resultado final do plano de restabelecimento, é de suma importância conhecer as topologias intermediárias necessárias para se obter a nova topologia final. Assim, o problema de RSDEE além de fornecer a topologia final, deve fornecer também a sequência de chaveamento adequada. Neste trabalho, o plano de sequenciamento de chaves é considerado um sub-problema da restauração de cargas. Desta forma, a correta definição de um plano de sequenciamento de chaves é uma etapa muito importante do processo como um todo, visto que este é responsável por guiar o operador da rede no processo de isolamento da seção em falta e, ainda, na restauração da maior quantidade de seções fora de serviço.

Um plano de chaveamento bem definido determina uma sequência de operações de abertura e fechamento de chaves do sistema para se obter a topologia final de restauração (definida, neste caso, pelo algoritmo VNS), na qual, cada topologia intermediária deverá atender às restrições operacionais e de radialidade do modelo. A Figura 12 ilustra o processo de restauração comparando dois planos distintos de sequenciamento de chaves.

Figura 12 – Comparação do Processo de Restauração por Dois Planos de Sequências de Chaves



Fonte: Elaborada pelo autor.

O primeiro sequenciamento mostrado pela Figura 12 é definido por: isolamento da seção em falta (abertura das chaves 1-3 e 3-4), fechamento da chave 2-5 e abertura da chave 5-6. Identifica-se que a topologia intermediária gerada por este plano atende à restrição de radialidade do sistema, porém, não atende às restrições operacionais (limites de corrente e tensão). Portanto, este plano de chaveamento não deve ser considerado parte do plano de restauração do sistema. Por outro lado, o segundo plano de chaveamento, definido por: isolamento da seção em falta (abertura das chaves 1-3 e 3-4), abertura da chave 5-6 e fechamento da chave 2-5, gera uma topologia intermediária factível, atendendo todas as restrições impostas pelo problema.

Nesse sentido, estabelece-se como modelo de sequenciamento a função objetivo para minimizar a quantidade de energia não suprida do sistema durante o processo de execução da sequência de chaveamento e penalizar as soluções infactíveis encontradas. Portanto, a função objetivo é definida por:

$$\text{Min } FO = \sum_{k=0}^K S_k^{ns} \times t_k \quad (3.21)$$

Onde:

- $K$  é o número total de operações de chaveamento.
- $S_k^{ns}$  é a PNS total após o  $k$ -ésimo chaveamento.

- $t_k$  é o intervalo de tempo necessário para realizar o chaveamento  $k+1$ .

Além disso, a função objetivo está sujeita às restrições operacionais e de radialidade do sistema (3.2 - 3.14).

Portanto, faz-se necessária a implementação de uma metodologia capaz de determinar planos de sequência de chaveamentos, onde as topologias intermediárias sejam factíveis em todo seu processo. Portanto, neste trabalho, a correta sequência de chaves implica na ordenação das transferências de cargas que ocorrerão tanto entre alimentadores quanto na transferência de carga das ilhas, o que pode influenciar no comportamento dinâmico das GDs.



---

## METODOLOGIA

---

Este capítulo tem por objetivo apresentar a aplicação do algoritmo VNS, em conjunto com o AG, aplicados ao problema de RSDEE discutido na seção 3.2. A eficiência das meta-heurísticas está, em grande parte, relacionada à estrutura de codificação utilizada para representar o problema e, em especial no VNS, às estruturas de vizinhança escolhidas para a exploração do espaço de busca do problema. Sendo assim, estes e outros aspectos importantes dos algoritmos serão apresentados neste capítulo. Neste capítulo apresenta-se, também, a metodologia utilizada para a validação dinâmica das soluções.

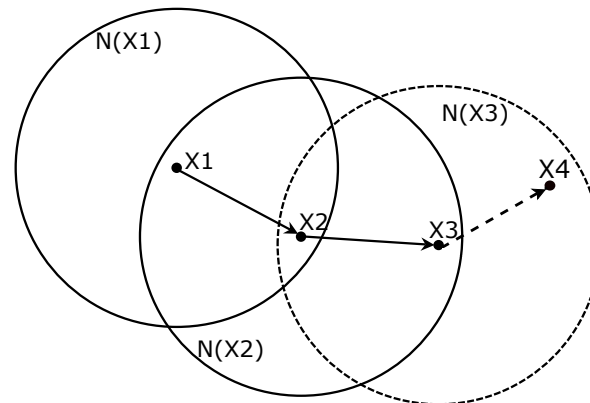
### 4.1 O Algoritmo VNS

Considerando a FO e o conjunto de restrições explicitados na seção 3.2, o algoritmo escolhido para este trabalho, responsável por **encontrar** soluções topológicas de boa qualidade para o problema de RSDEE, é o VNS, algoritmo que têm apresentado bons resultados ao resolver problemas da área de Pesquisa Operacional (POSSAGNOLO, 2015). O VNS possui fácil implementação, grande flexibilidade e apresenta uma técnica de busca muito semelhante a um algoritmo de Busca Local.

Um algoritmo de Busca Local realiza modificações sistêmicas na solução inicial de um problema combinatorial, a fim de melhorar o valor de sua FO. A partir de uma solução inicial  $X_1$ , o algoritmo inicia sua exploração pela vizinhança  $N(X_1)$  em busca de uma solução de melhor qualidade em um processo de minimização ou maximização, onde, neste exemplo, adota-se a minimização da FO. Ao encontrar a solução  $X_2$ , o algoritmo assume esta solução como a solução corrente e parte para o processo de busca na vizinhança  $N(X_2)$ , com o objetivo de encontrar soluções de melhor qualidade em relação a  $X_2$ . A solução  $X_3$  (melhor do que  $X_2$ ) é encontrada, tornando-se a nova solução corrente. Ao explorar a vizinhança de  $X_3$ , o algoritmo identifica a melhor solução daquela vizinhança ( $X_4$ ) e verifica que é uma solução de pior qualidade quando comparada com a solução corrente ( $X_3$ ), portanto, o algoritmo interrompe a sua execução e a

solução  $X_3$  torna-se a solução final do problema. Desse modo, para cada iteração do algoritmo, uma solução  $x'$  de melhor qualidade, pertencente a vizinhança  $N(x)$  é obtida a partir da solução corrente  $x$ . Este processo se repete até que o algoritmo encontre um ótimo local e não consiga mais obter melhorias na solução. A Figura 13 ilustra o processo de exploração de soluções por um algoritmo de Busca em Vizinhança.

Figura 13 – Processo de Busca Local



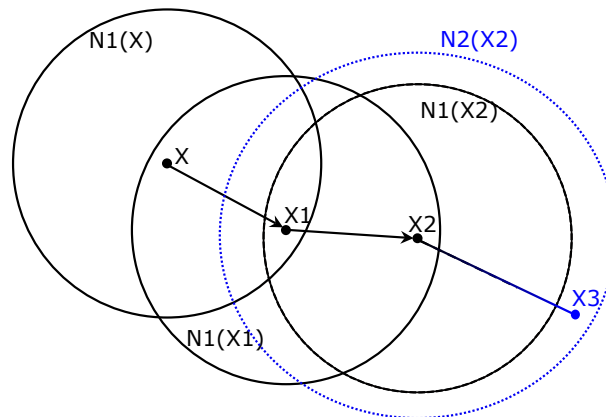
Fonte: Adaptado de (POSSAGNOLO, 2015)

Uma das grandes dificuldades que se tem em um algoritmo de busca em vizinhança é evitar que o processo fique preso em um ótimo local de baixa qualidade. Nesse sentido, várias metas-heurísticas que evitam esse tipo de situação já foram propostas. O algoritmo VNS, proposto por (MLADENOVIC; HANSEN, 1995), segue o mesmo princípio básico de uma Busca Local, porém, possui uma estratégia para tentar evitar a estagnação da busca em ótimos locais.

O VNS inicia o seu processo de busca partindo de uma solução  $X$  e executa uma busca na vizinhança  $N_1(X)$ , encontrando uma solução  $X_1$  melhor que a solução inicial. O processo de busca continua através da vizinhança de  $N_1(X_1)$  na expectativa de encontrar uma solução de melhor qualidade. Ao encontrar a solução  $X_2$  (melhor do que  $X_1$ ) o algoritmo assume  $X_2$  como a solução corrente e inicia-se o processo de busca pela vizinhança  $N_1(X_2)$ . Assume-se, então, que a vizinhança  $N_1(X_2)$  não possui uma solução melhor do que  $X_2$ . Neste caso, ao contrário de uma busca em vizinhança tradicional, em que o processo seria interrompido, o algoritmo expande a vizinhança de  $X_2$  e explora  $N_2(X_2)$ , onde encontra a solução  $X_3$ , de melhor qualidade. O processo se repete, percorrendo todas as vizinhanças possíveis para uma solução em análise ( $N_k(X_c)$ ), onde  $k$  é o número de vizinhança e  $c$  é o índice da solução corrente em análise. O algoritmo interrompe a sua execução quando se atinge o número máximo de iterações estabelecidas, onde uma iteração é definida como a exploração de todas as vizinhanças definidas sem que se encontre uma solução de melhor qualidade em relação a solução corrente. A Figura 14 demonstra a estratégia utilizada por um algoritmo VNS.

Desse modo, o algoritmo VNS explora sistematicamente a ideia de exploração e mudança de vizinhança na tentativa de encontrar soluções ótimas e evitar a estagnação da busca em ótimos locais. Nesse sentido, o VNS é significativamente diferente das demais metas-heurísticas

Figura 14 – Processo de Busca em Vizinhança Variável



Fonte: Elaborada pelo autor.

encontradas na literatura, pois a maioria aceitam a degradação da solução corrente como forma de evitar a estagnação em ótimos locais, abordagem esta não adotada pelo VNS. Assim, a solução corrente também é a incumbente, e em cada passo, a transição é realizada para uma nova solução incumbente (SOUZA, 2011). Na figura 15 é apresentado o pseudo-código do funcionamento do algoritmo VNS.

Figura 15 – Pseudo-código VNS

```

Algoritmo VNS()
1  Início:
2   $x \leftarrow$  GeraSoluçãoInicial();
3   $N \leftarrow$  GeraVizinhançaInicial();
4  Enquanto critério de parada não satisfeito:
5   $x' \leftarrow$  BuscaMelhorSoluçãodaVizinhança(N);
6  Se  $f(x')$  melhor que  $f(x)$ , Então:
7   $x = x'$ ;
8   $N \leftarrow$  GeraVizinhançaInicial();
9  Senão:
10 Se  $N$  menor que  $N_{max}$ , Então:
11  $N \leftarrow$  GeraPróximaVizinhança();
12 Senão:
13  $N \leftarrow$  GeraVizinhançaInicial();
14 Critério + 1;
15 Fim Se;
16 Fim Se;
17 Fim Enquanto;
18 Fim;

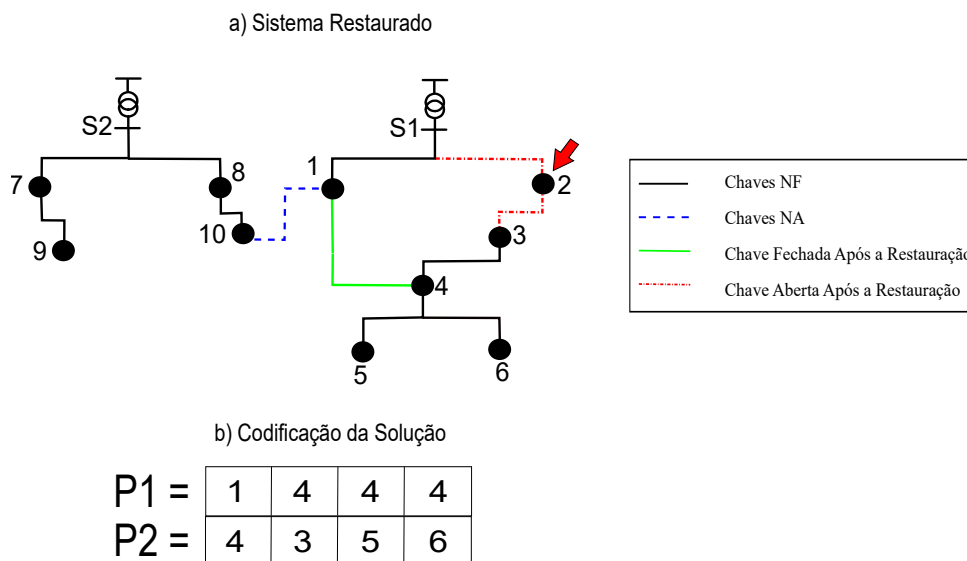
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.1.1 Codificação Utilizada

A codificação utilizada para este problema foi baseada no trabalho de (PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012), onde é apresentada no formato decimal inteira, representada por dois vetores (P1 e P2). Considerando que o sistema deve realizar o menor número de chaveamentos possível para restaurar as cargas afetadas pela falta, adotou-se, uma codificação para representar apenas as seções fora de serviço. Esta estrutura de codificação impacta diretamente o tempo do processamento do algoritmo. Além disso, a codificação em conjunto com a representação RNP, apresentada na seção 3.1.1, garante que apenas soluções que apresentem topologias radiais sejam exploradas. A dimensão dos vetores P1 e P2 são iguais ao número de seções desenergizadas, onde P1 representa a seção-fonte, ou seja, a seção utilizada para alimentar a seção fora de serviço, e o vetor P2 representa as seções desenergizadas propriamente ditas. Nesse sentido, cria-se a relação de pares entre seção-fonte/seção-afetada. A Figura 16 ilustra um exemplo da construção da codificação em um sistema onde uma seção é definida por uma única barra.

Figura 16 – Um exemplo da construção da codificação para uma determinada solução de restauração



Fonte: Elaborada pelo autor.

No exemplo apresentado na Figura 16-a, considera-se uma falta permanente na seção 2 do sistema. As seções 3, 4, 5 e 6 foram afetadas indiretamente pela falta e, portanto, desenergizadas. A solução para restaurar as seções afetadas é fechar a chave de manobra entre a seção 1 e a seção 4. Nesse sentido, a seção 1 se torna a seção-fonte da seção 4 e, conseqüentemente, a seção 4 se torna a seção-fonte das seções 3, 5 e 6. Os pares seção-fonte/seção-afetada são representados pelos vetores P1 e P2 da Figura 16-b). Uma consideração importante a se fazer com relação à codificação é que as seções que permanecerem desenergizadas apresentam seção-fonte representada pelo algarismo 0.

### 4.1.2 *Geração da Solução Inicial*

O algoritmo VNS, conforme ressaltado anteriormente, necessita de uma solução inicial para iniciar o processo de busca em vizinhança. Portanto, propõe-se uma heurística construtiva simples para formar a solução inicial do problema. A heurística baseia-se nos seguintes passos:

1. Verificar no sistema a existência de seções que foram desenergizadas indiretamente pela falta. Caso exista, vá para o passo seguinte, senão, finalizar processo de construção.
2. Encontrar possíveis seções energizadas para formar um par seção-fonte/seção-afetada. Religar estas barras e retornar para o primeiro passo. Caso exista mais de uma possibilidade para a reenergização da barra, escolher aleatoriamente uma delas.

Após a construção da solução inicial, avalia-se esta solução com base nos critérios definidos pelo problema descrito em 3.2 a fim de quantificar a qualidade da solução para efeito de comparação no método de busca.

### 4.1.3 *Construção das Vizinhanças*

Com o problema adequadamente codificado e com uma solução inicial construída a partir da Heurística Construtiva, deve-se definir as vizinhanças que o VNS explorará no espaço de busca. Para isso, foram definidas 4 vizinhanças distintas, que são descritas nos tópicos a seguir:

#### 4.1.3.1 *Primeira Vizinhança*

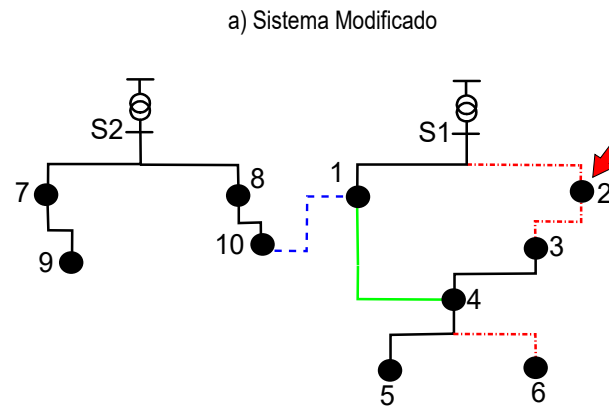
A primeira vizinhança da metodologia proposta é definida por uma única modificação no vetor P1 de seções-fonte. Ou seja, escolhe-se aleatoriamente uma posição da lista de pares seção-fonte/seção-afetada, analisam-se as outras possibilidades de barras que podem atuar como seção-fonte para a seção-afetada pertencente à posição escolhida da lista (consideram-se como potenciais candidatas as barras energizadas que não estejam conectadas com a seção-afetada analisada e que possuem possibilidade de conexão). Com isso, efetua-se a modificação no sistema e, conseqüentemente, na lista. Após obter a nova configuração, o sistema é avaliado com base nas equações apresentadas no capítulo 3.2 e quantifica-se a qualidade da solução encontrada. Realiza-se este processo para todas as possibilidades existentes para o índice definido, inclusive considerando a possibilidade de desconexão da seção.

Após avaliar todas as possibilidades de troca, classificam-se as soluções em ordem crescente usando como critério o valor da FO e, se a melhor solução do conjunto for melhor do que a solução corrente ( $x$ ), esta torna-se a nova solução corrente, caso contrário, a solução corrente permanece inalterada.

Tomando o sistema da Figura 16 como exemplo, gera-se um valor aleatório  $k_1$ , onde  $k_1$  representa a posição a ser avaliada na lista de seção-fonte/seção-afetada. Assumindo que  $k_1 = 3$ ,

a seção afetada pela falta que será analisada é a seção 6, pertencente ao vetor P2 da Figura 16-b. Identifica-se que a seção 6 não possui mais nenhuma possibilidade de seção-fonte a não ser a barra 4, já conectada. Neste caso, a única opção é desligar a seção do sistema. Assim, P1 na posição 3 se tornará 0 e a solução passará pela quantificação de sua qualidade. A figura 17 ilustra a topologia do sistema e sua codificação após o processo de alteração pela primeira vizinhança.

Figura 17 – Um exemplo da modificação do sistema pela Primeira Vizinhança



b) Codificação da Solução Modificada

Índices = 0 1 2 3

P1 =	1	4	4	0
P2 =	4	3	5	6

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.3.2 Segunda Vizinhança

A segunda vizinhança é executada quando as alterações realizadas na primeira vizinhança não geram nenhuma solução de melhor qualidade em comparação à solução corrente. A construção da segunda vizinhança é semelhante à primeira. A diferença está na quantidade de pares avaliados por operação. Enquanto na primeira vizinhança tem-se a geração de apenas um número aleatório  $k_1$  e, conseqüentemente, uma única avaliação de um par seção-fonte/seção-afetada, a segunda vizinhança apresenta a geração de dois números aleatórios,  $k_1$  e  $k_2$  (onde  $k_1$  é diferente de  $k_2$ ). Dessa forma, define-se a avaliação de dois pares seção-fonte/seção-afetada pelas operações. Esta abordagem permite gerar dois conjuntos de possibilidades de seção-fonte, o conjunto gerado pelas possibilidades de  $P2(k_1)$  e o conjunto gerado por  $P2(k_2)$ . Esta segunda vizinhança define um espaço de busca maior do que o espaço de busca formado pela primeira vizinhança, visto que, tem-se avaliações de soluções considerando uma combinação par a par entre os conjuntos formados. Desta forma, permite-se expandir o espaço de busca e também a possibilidade de se encontrar uma solução de melhor qualidade que a solução corrente.

#### 4.1.3.3 Terceira Vizinhança

O espaço de busca deve ser aumentado ainda mais após tentativas sem sucesso de busca através da segunda vizinhança. Para isso, definiu-se a terceira vizinhança. A essência da terceira vizinhança é fundamentalmente igual à das outras duas. A diferença se dá na geração de 3 valores aleatórios de índices ( $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ , diferentes entre si). Da mesma forma que acontece na segunda vizinhança, a terceira vizinhança apresenta 3 conjuntos distintos de possibilidades de modificações de seção-fonte, gerados por  $P_2(k_1)$ ,  $P_2(k_2)$ ,  $P_2(k_3)$ . Neste caso, uma nova solução a ser avaliada é definida a partir de modificações realizadas pelas combinações entre as possibilidades dos três conjuntos formados. Nesse sentido, o espaço de busca definido pela terceira vizinhança se torna ainda maior do que aquele definido pela segunda vizinhança.

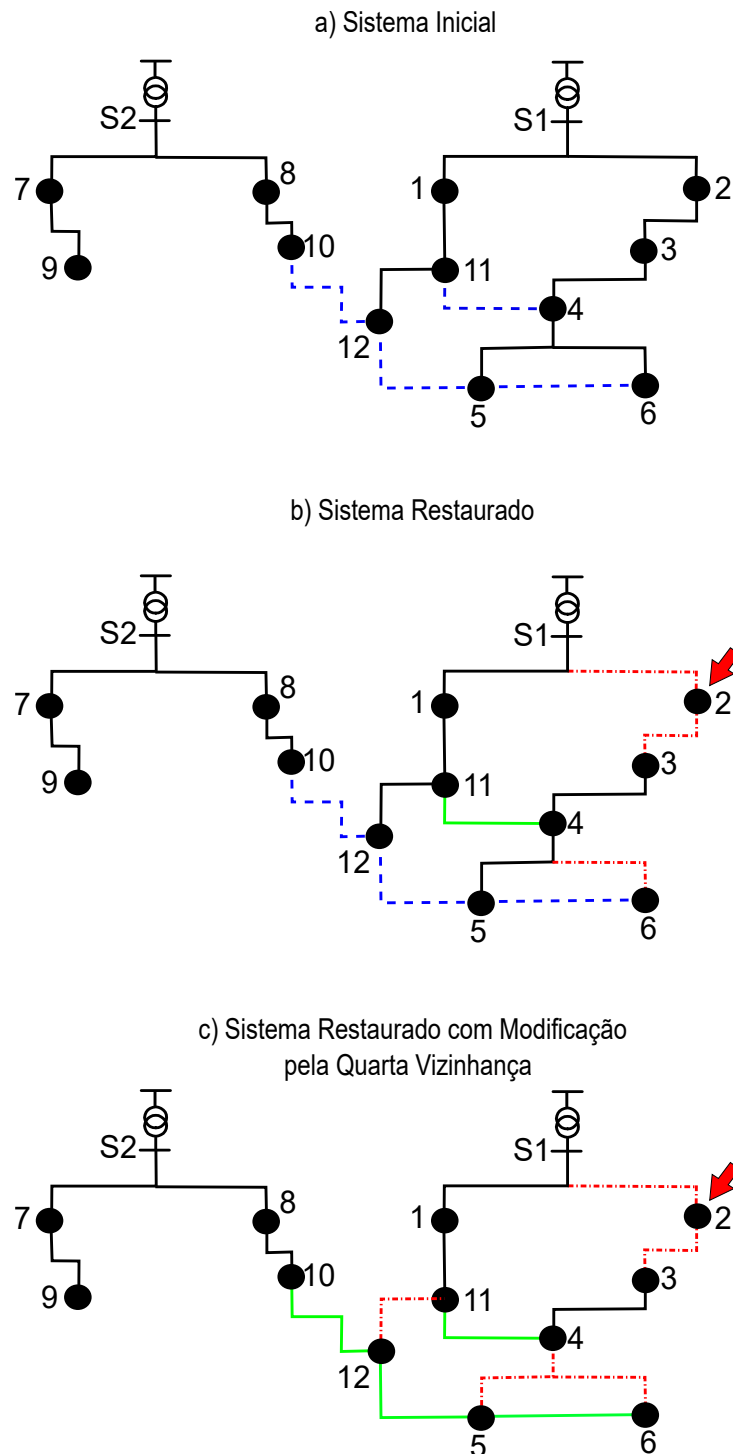
#### 4.1.3.4 Quarta Vizinhança

A codificação utilizada em (PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012) apresenta a representação apenas das seções afetadas indiretamente pela falta e suas respectivas seções-fontes. Esta abordagem a torna bastante eficiente do ponto de vista computacional e muito fácil de ser implementada. Porém, há uma limitação a ser considerada. Este tipo de codificação não permite a modificação de barras saudáveis do sistema (aquelas que não foram afetadas pela falta). Por essa característica, a utilização desta codificação juntamente com as três vizinhanças definidas anteriormente pode ocasionar a estagnação da busca em ótimos locais. Portanto, implementou-se a quarta vizinhança com o intuito de evitar este tipo de situação.

A quarta vizinhança foi construída visando alterar a conexão das seções saudáveis e que não foram desligadas do sistema, e seu funcionamento engloba a transferência destas entre os alimentadores e a execução conjunta das vizinhanças anteriores. Escolhe-se aleatoriamente uma seção saudável (e que não foi desligada) do sistema que possua uma chave NA, se a barra escolhida possuir mais de uma chave NA, a escolha para fechamento será definida de forma aleatória. Para evitar que o sistema perca a sua característica radial, a barra saudável em análise deve, obrigatoriamente, abrir uma de suas chaves NF, sempre priorizando aquela do ramo mais próximo ao alimentador. Após esta etapa, inicia-se um novo processo de busca considerando as três primeiras vizinhanças definidas. Se for encontrada uma solução de melhor qualidade quando comparada à solução corrente, esta se torna a nova solução corrente. Caso contrário, a modificação realizada na barra saudável é desfeita e o algoritmo inicia uma nova iteração. Um ponto importante a se destacar é que a quarta vizinhança não é codificada, ela é definida apenas como uma perturbação no sistema. Além disso, a modificação pela quarta vizinhança só é explorada quando não foi possível encontrar soluções melhores nas vizinhanças anteriores. Para demonstrar a importância desta vizinhança, considera-se a Figura 18.

Na Figura 18-a apresenta-se um exemplo de um sistema fictício a fim de exemplificar o funcionamento da Quarta Vizinhança. Considera-se que o sistema sofra uma falta permanente na seção 2. Nesse sentido, o sistema passa por uma restauração sob a ação apenas das 3 primeiras

Figura 18 – Exemplificação do efeito da modificação realizada pela Quarta Vizinhaça



Fonte: Elaborada pelo autor.

vizinhanças implementadas neste trabalho, demonstrado na Figura 18-b. Nota-se que há o isolamento da seção em falta e o fechamento da chave entre a seção 11 e a seção 4. Além disso, há a abertura da chave entre a seção 4 e a seção 6 e, então, a seção 6 permanece fora de serviço pela extrapolação da capacidade do alimentador. Por outro lado, demonstra-se na Figura 18-c



uma possível solução quando se considera o efeito da modificação pela Quarta Vizinhança. Há o fechamento das chaves 11-4, 10-12, e 5-6 e a abertura das chaves 12-11, 4-5, 4-6, além do isolamento da barra em falta. Nota-se, neste caso, que a solução apresenta uma recuperação maior de carga quando comparada à Figura 18-b. Este fato se deve à possibilidade da modificação de uma chave alocada entre duas seções saudáveis e que não foram afetadas pela falta (10-12), característica esta impossível considerando somente as 3 primeiras vizinhanças. Portanto, este atributo possibilita a expansão do espaço de busca e a exploração de locais onde antes havia uma limitação da codificação.

## 4.2 Definição da Sequência de Chaveamentos

As possíveis soluções topológicas apresentadas pelo algoritmo VNS implementado, são configurações topológicas que a rede de distribuição pode adotar no processo final de restauração. Nesse sentido, é importante a definição de uma sequência de chaveamentos factível para que o sistema possa atingir tal topologia. Portanto, o processo de definição de sequência de chaves a serem manobradas acontece através da execução do AG.

O AG recebe como parâmetros de entrada todas as chaves do sistema que foram modificadas, definidas pelo algoritmo VNS. Nesse sentido, estabelece-se um conjunto de  $N$  indivíduos, onde cada indivíduo representa uma possível sequência de chaveamento. Neste ponto, inicia-se o processo de busca pela melhor sequência de chaveamento através do processo de combinação e avaliação dos novos indivíduos formados. Este processo é realizado até que a condição de parada seja atingida que, neste caso, se dá pela quantidade de avaliações de aderência ao conjunto  $N$ .

Vale destacar que este algoritmo atua como um validador de soluções correntes do algoritmo VNS, ou seja, para cada nova solução corrente em potencial encontrada pelo VNS, o AG é executado a fim de buscar a melhor sequência de chaveamento possível. Caso não haja uma sequência de chaveamento factível, a solução corrente em potencial é penalizada e descartada e a busca do algoritmo VNS é reiniciada. Nesse sentido, o AG é executado durante o próprio processo de busca do algoritmo VNS.

### 4.2.1 O Algoritmo Genético para a Determinação do Plano de Sequenciamento de Chaves

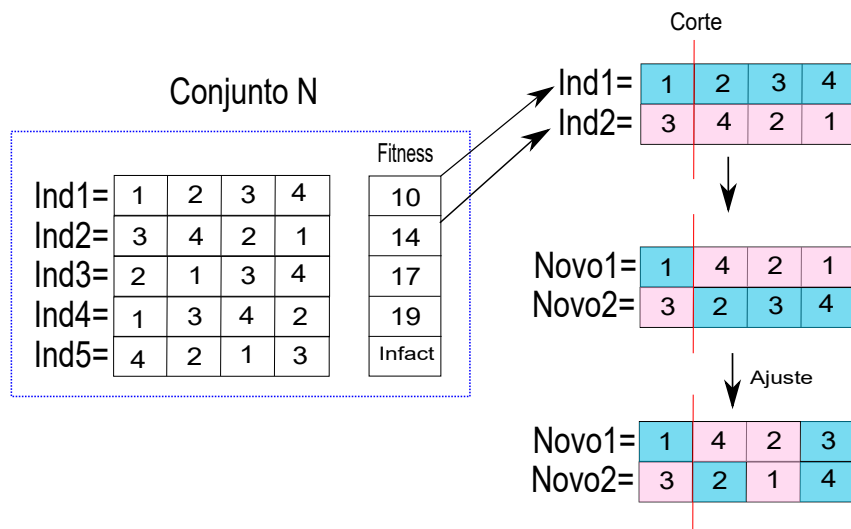
Diversas metodologias para se determinar planos de sequenciamento de chaves foram propostas nos últimos anos, metodologias baseadas em algoritmo *branch-and-bound* (PHAM; BESANGER; HADJSAID, 2009), programação dinâmica (PEREZ-GUERRERO *et al.*, 2008), programação linear inteira mista (DUKOVSKA; MORREN; SLOOTWEG, 2020), entre outras. Neste trabalho, propõe-se a utilização de um Algoritmo Genético (AG) baseado na variação proposta por (CHU; BEASLEY, 1997), onde cada indivíduo é composto por um vetor de números

inteiros que representam o conjunto de chaves a serem manobradas, portanto, cada gene do indivíduo representa uma destas chaves.

Inicialmente, define-se, aleatoriamente, um conjunto de N indivíduos denominado população. Cada indivíduo da população é considerado uma proposta de sequência de chaveamento e, cada indivíduo possui uma função *fitness* particular (definida, neste trabalho, por 3.21), além disso a factibilidade do indivíduo é avaliada segundo as restrições que a função *fitness* está sujeita.

A exploração das possíveis soluções se dá pela combinação dos indivíduos através dos operadores seleção, recombinação e mutação. A seleção define dois indivíduos aleatoriamente para participar dos operadores recombinação e mutação. Após os processos de recombinação e mutação, os novos indivíduos formados passam por um processo de ajuste. Este segundo passo tem como objetivo evitar a repetição de genes dentro de um mesmo indivíduo, portanto, identificam-se os genes repetidos e substitua-os pelos genes faltantes. Por fim, originam-se dois novos indivíduos e, conseqüentemente, duas propostas de solução. A Figura 19 ilustra o processo de combinação dos indivíduos proposto pelo AG

Figura 19 – Processo de Combinação dos Indivíduos do AG



Fonte: Elaborada pelo autor.

No final do processo de combinação, avalia-se a função *fitness* de cada novo indivíduo e, escolhe-se aquele que possuir a melhor *fitness* para a avaliação de aderência à população. Então, o novo indivíduo escolhido é comparado com o pior indivíduo da população, caso o novo indivíduo possua melhor *fitness* com relação ao pior indivíduo, este é substituído, caso contrário, os dois novos indivíduos são descartados e o processo é reiniciado. Este processo acontece até que a condição de parada do algoritmo seja atingida (neste trabalho se dá pelo número de verificações de aderência à população). Além disso, ao final da execução do algoritmo é escolhida como solução final aquele indivíduo que possuir a melhor *fitness* dentre os indivíduos

pertencentes à população. O pseudo-código ilustrado pela Figura 20 demonstra o funcionamento básico do AG.

Figura 20 – Pseudo-Código AG

```

GA()
1  Início:
2  N ← Gera os indivíduos do conjunto N;
3  Fitness(N) ← Avalia todos os indivíduos do conjunto N;
4  Enquanto critério de parada não satisfeito:
5    ind1, ind2 ← SeleccionaDoisIndivíduos(N);
6    Novo1, Novo2 ← Combinação(ind1, ind2);
7    Fitness(Novo1), Fitness(Novo2) ← Avalia a função fitness dos dois
8                                     novos indivíduos.
9    Se Fitness(Novo1) < Fitness(Novo2), Então:
10     Novo = Novo1;
11   Senão:
12     Novo = Novo2;
13   Fim Se;
14
15   Se Fitness(Novo) < Fitness(PiorInd(N)), Então:
16     N = N + Novo - PiorInd(N);
17   Fim Se;
18   Critério + 1;
19   Fim Enquanto;
20 Fim;

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4.3 Avaliação das soluções

As soluções apresentadas pelos algoritmos implementados são configurações topológicas e sequências de chaveamentos que a rede de distribuição pode adotar. A codificação utilizada fornece informações sobre as variáveis de decisão do problema,  $x_{ij}$ ,  $y_i$ . A variável  $y_i$  apresenta valor 1 caso a seção descrita no vetor P2 estiver energizada pela seção par descrita no vetor P1. O valor de  $x_{ij}$  é obtido através do estado das chaves descrito no vetor P1 e P2, como mostrado na figura 17-b. As restrições de igualdade apresentadas na seção 3.2 são avaliadas através da execução de um fluxo de potência, e as de desigualdades através de técnicas de penalidade.

### 4.3.1 Fluxo de Potência

O fluxo de potência é uma ferramenta importante para a determinação das variáveis de estado de operação da rede, dado um determinado cenário de carregamento. De maneira geral, as variáveis obtidas a partir do fluxo de potência são: valores de tensão nas barras, correntes e os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos, bem como as perdas de energia do sistema.

Um dos métodos mais comuns presente na literatura para se executar o cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição é o método de varredura direta e inversa (SHIR-MOHAMMADI *et al.*, 1988). Este método é amplamente utilizado em sistemas de distribuição

com características radiais devido à sua rápida convergência e facilidade na implementação. O método utilizado neste trabalho foi inspirado em (CHENG; SHIRMOHAMMADI, 1995). Trata-se de um fluxo de de varredura direta e inversa trifásico que pode ser aplicado a sistemas desequilibrados, com malhas e com GDs modeladas como barras PV. Um ponto a se observar é que as barras de carga foram modeladas como barras PQs enquanto a GDs foram modeladas como barras PVs. Esta modelagem simplifica o cálculo do sistema frente às condições reais de operação e, obtém-se um ganho computacional considerável. Além disso, para explorar a rapidez de convergência do método implementado, deve-se realizar uma etapa prévia, na qual o sistema de distribuição deve ser organizado utilizando a codificação RNP (DELBEM *et al.*, 2004), apresentada na seção (3.1.1).

Detalhes da implementação do método de fluxo de potência utilizado neste trabalho pode ser encontrado no Anexo A.

### 4.3.2 Funções Objetivo com Penalidades

Com base nos resultados de fluxo de carga é possível avaliar as restrições de desigualdade. A violação das restrições de desigualdade são incorporadas ao processo de otimização através de técnicas de penalidade, representada pela variável binária  $rt$ , portanto, a solução que apresentar violação de alguma restrição receberá uma penalização de um valor  $M$ , muito grande, a fim de se tornar inviável frente a execução do algoritmo. Já a restrição de radialidade é assegurada pela codificação utilizada e pelo uso da estrutura de dados RNP, portanto apenas soluções radiais são exploradas. As funções objetivos com penalidades são dadas por:

$$\begin{aligned} \text{Min FO} = & \sum_{i \in \Omega_{bs}} w_1 \cdot (\sqrt{(P_i^D)^2 + (Q_i^D)^2}) \cdot (1 - y_i) \\ & + \sum_{i,j \in \Omega_{ch}} w_2 \cdot |x_{ij} - x_{ij}^0| + \sum_{i,j \in \Omega_{rm}} w_3 \cdot (R_{ij} \cdot I_{ij}^2) \cdot x_{ij} + M \times rt \end{aligned} \quad (4.1)$$

Onde a equação 4.1 demonstra a FO do algoritmo VNS com a penalidade inserida.

$$\text{Min FO} = \sum_{k=0}^K S_k^{ns} \times t_k + M \times rt \quad (4.2)$$

Da mesma forma, a FO considerada no AG para a determinação do plano de chaveamento também recebe a parcela referente às penalidades. Destaca-se que ambas as FOs, mesmo com a parcela de penalização, estão sujeitas às restrições apresentadas nos tópicos anteriores.

Nesse sentido, é possível classificar apenas as soluções factíveis encontradas, ou seja, apenas as soluções que cumprirem os requisitos impostos pelas restrições em sua totalidade serão consideradas no processo de busca, caso contrário, as soluções serão descartadas.

## 4.4 Comportamento do Algoritmo Frente ao Processo de Ilhamento

A ilha é caracterizada como uma parcela de cargas isoladas do sistema principal, alimentada por uma GD.

O isolamento da seção da GD pode acontecer pela atuação de um dispositivo de proteção, como por exemplo, um dispositivo de interconexão de ilha (PEREIRA *et al.*, 2018). Nesse sentido, o algoritmo VNS implementado, busca soluções que, além da restauração por transferência de cargas entre os alimentadores, também considera a restauração de cargas através da transferência de seções para a ilhas de operação formadas pelas GDs. O algoritmo inicia a construção da ilha considerando apenas os aspectos de regime permanente, como: atendimento às restrições de corrente e tensão das barras pertencentes à ilha e respeitando a capacidade de geração da GD. Portanto, a ilha é interpretada pela codificação RNP como um subsistema, onde há a criação de uma nova estrutura. Ou seja, a seção que contém a GD torna-se a seção da profundidade 0 da RNP do subsistema e a criação das profundidades subsequentes acontecem como apresentado em 3.1.1.

Portanto, as restrições em regime permanente devem ser respeitadas tanto pelos alimentadores quanto pela GD da ilha. Outro aspecto relevante é que o algoritmo AG, implementado para definir o plano de sequenciamento de chaves, também considera a GD isolada como um subsistema, no entanto, não há mudanças substanciais em seu processo de busca.

### 4.4.1 Avaliação dinâmica dos geradores durante o ilhamento

Uma das contribuições deste trabalho é o acréscimo de restrições ao modelo do problema de RSDEE que representem a análise da dinâmica dos geradores envolvidos no processo de formação e construção de ilhas. Nesse sentido, este tópico trata do processo para analisar a eficiência das restrições propostas no modelo.

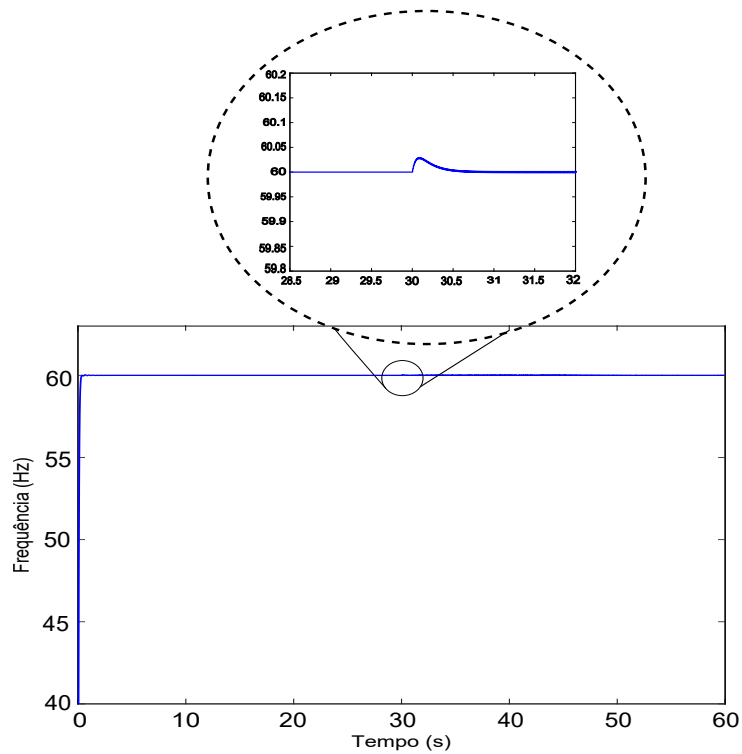
Para tal, utilizou-se o software *Alternative Transients Program* (ATP) para a análise dinâmica das GDs para cada solução obtida através dos algoritmos implementados. Nesse sentido, o sistema teste foi modelado no ATP, considerando as características de cada ramo, chave e seção, além da modelagem da GD como um gerador síncrono, sujeito à técnica de controle apresentada na seção 3.2.1. O processo de restauração ocorreu seguindo as soluções de topologia e sequenciamento de chaves fornecidos pelos algoritmos implementados. De modo geral, consideram-se dois casos de análises: 1- Soluções sem nenhuma restrição dinâmica; 2- Soluções que consideraram as restrições (3.17), (3.18), (3.19) e (3.20).

Em resumo, o objetivo desta análise foi verificar a variação de frequência crítica da GDs durante o processo de ilhamento. Ou seja, constatar se as frequências máximas e mínimas da GDs estariam de acordo com os procedimentos prescritos em (IEEE Standards Association, 2018) no

que diz respeito ao atendimento dos limites frequência e, conseqüentemente, da manutenção da ilha após sua criação.

As análises com simulações dinâmicas foram realizadas exclusivamente nas GDs instaladas no sistema, visto que as barras de SE não apresentaram oscilações de frequência consideráveis no processo de transferência de carga, como mostra a figura 21.

Figura 21 – Frequência da Barra de SE Frente ao Processo de Transferência de Carga



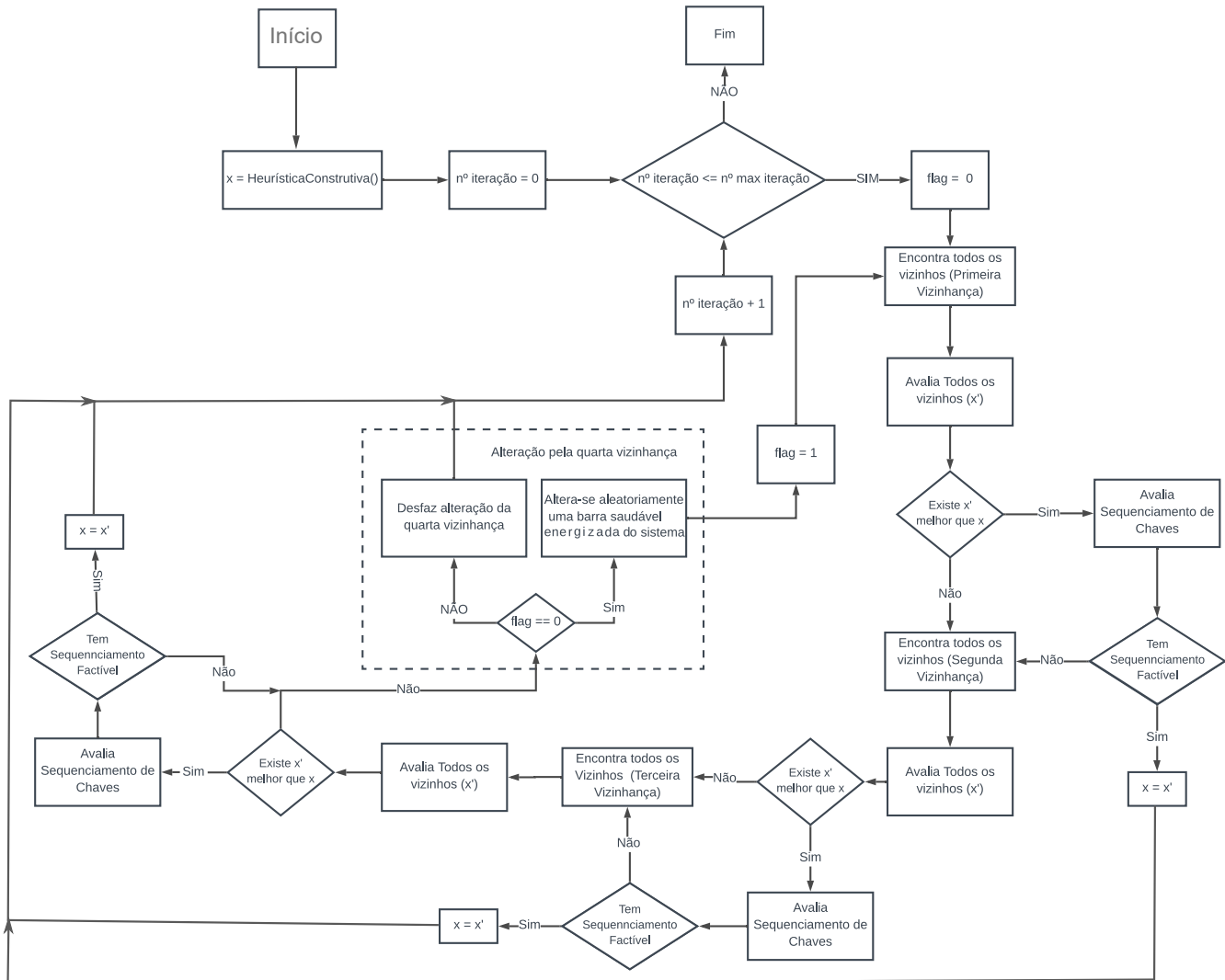
Fonte: Elaborada pelo autor.

Este comportamento é decorrente da forma como a barra de SE foi modelada. Neste caso, considerou-se a barra de SE como uma barra infinita. Portanto, a frequência da barra de SE é mantida dentro da faixa de frequência estabelecida mesmo com a incidência de uma falta no sistema.

## 4.5 Considerações Finais

O algoritmo VNS em conjunto com a codificação, a heurística construtiva, as vizinhanças implementadas e o AG, tornam-se uma ferramenta interessante para encontrar soluções de boa qualidade para o problema de RSDEE. O fluxograma da execução do algoritmo desenvolvido neste trabalho para a solução do problema RSDEE é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma do modo de execução do algoritmo de restauração implementado



Fonte: Elaborada pelo autor.





---

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

Neste capítulo são apresentados os resultados fornecidos pela implementação computacional da metodologia e formulação apresentada para o problema de RSDEE nas seções anteriores. Para as simulações, foram utilizados dois sistemas distintos: 1 - Um sistema de 53 barras (3 barras de SE e 50 barras de carga), disponível em (ROMERO *et al.*, 2016), onde cada seção é definida por uma única barra e cada ramo representa uma chave de manobra; 2 - Um sistema de 405 barras (uma variação do sistema de 135 barras, disponível em (PEREIRA, 2007)), contendo 3 subestações (SE) e 402 barras de cargas, divididas em 72 seções. Ambos os sistemas são trifásicos, equilibrados e simétricos, tal que a representação pôde ser simplificada por um sistema monofásico, onde cada ramo pode conter uma chave de manobra (NA ou NF).

Inicialmente, optou-se por realizar simulações com o sistema de 53 barras, sem a instalação de GDs para comprovar a eficácia do método, através da comparação dos resultados obtidos com os resultados encontrados na literatura. Em seguida, foram realizados testes no sistema de 405 barras, considerando a instalação de uma GD no mesmo alimentador da barra em falta afim de se analisar o processo de ilhamento.

Para ambos os casos, a implementação das ferramentas computacionais se deu em linguagem de programação C++, visto que esta é uma linguagem compilada e, conseqüentemente, apresenta um bom desempenho de performance com relação ao tempo de execução. Utilizou-se um computador com processador Intel® Core™ i7-7700 com 3.30GHz, 8GB de memória RAM e sistema operacional Windows® 10 Pro de 64 bits.

Em todos os testes foram considerados os valores das constantes de ponderação  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$ , apresentados no capítulo 3.2 como sendo 1, 1 e 0.01, respectivamente. Estes valores foram definidos empiricamente com o objetivo de se manter a hierarquia dos termos da FO, levando em consideração a dimensão das grandezas trabalhadas. Também foi adotado um número máximo de 500 iterações do VNS e 50 iterações para o AG, para cada simulação realizada, onde cada teste foi repetido 100 vezes. Além disso, o valor do PNS calculado em todos os testes considera

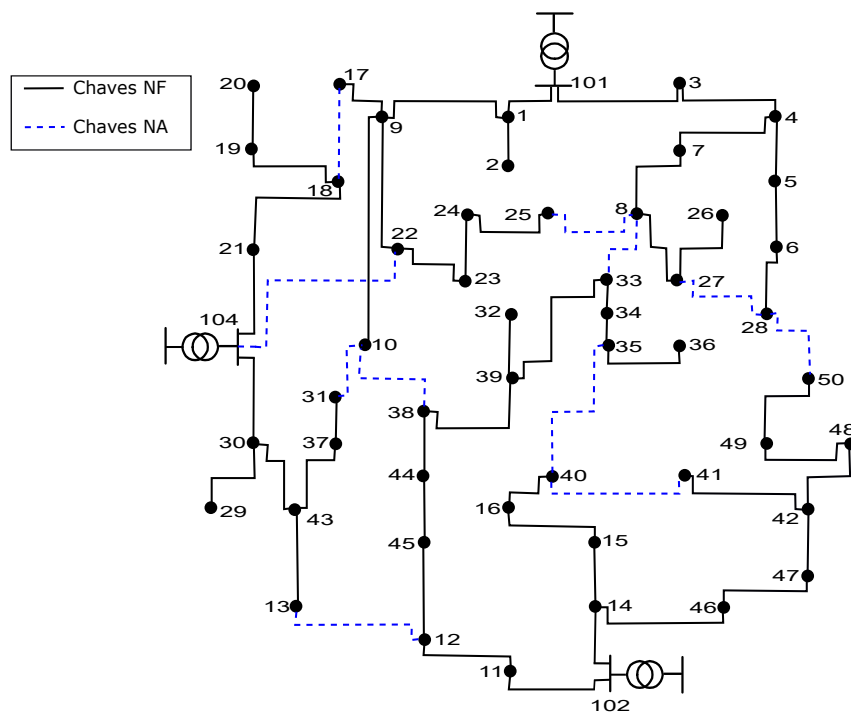
apenas as seções saudáveis que ficaram desenergizadas. Uma hipótese adotada, e que deve ser destacada, é que a quarta vizinhança, apresentada no tópico 4.1.3.4, não permite o desligamento de seções saudáveis energizadas, apenas a transferência de alimentador e/ou de seção-fonte entre elas. Além disso, foi considerado que podem ocorrer o fechamento de chaves de forma paralela, desde que ocorram em diferentes regiões do sistema (diferentes alimentadores) ou entre seções desconectadas.

Nesse sentido, os resultados serão divididos em dois grupos. O primeiro grupo considera o sistema teste de 53 barras, sem a alocação de GD e, posteriormente, os testes do segundo grupo foram realizados no sistema de 405 barras, onde apresenta a inserção de uma GD em uma das seções do sistema.

## 5.1 Testes Com o Sistema de 53 Barras Sem a Instalação de GD

Como o sistema de 53 barras não possui GDs instaladas, ressalta-se que as restrições referentes às GDs e ao limite de transferência de cargas, apresentadas na seção 3.2, não foram consideradas para este caso. A topologia pré-falta do sistema teste de 53 barras é apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Topologia pré-falta do sistema teste de 53 barras utilizado

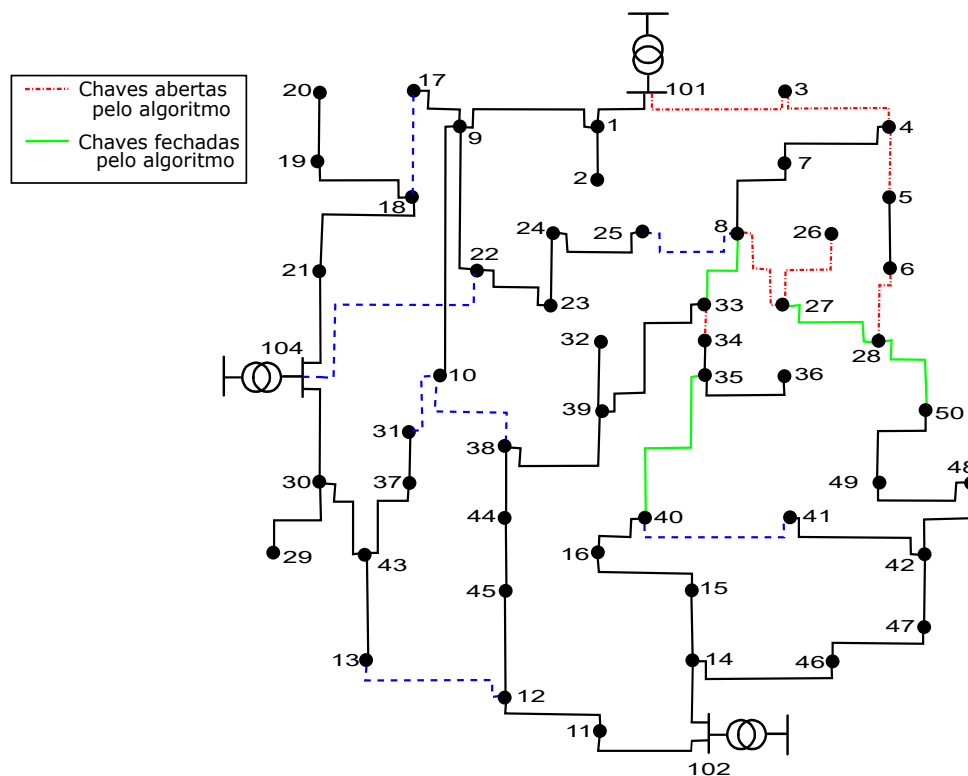


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.1.1 Falta Permanente na Barra 3

Para o primeiro teste, considerou-se uma falta permanente na barra três do sistema da Figura 23. A figura 24 ilustra o melhor e mais frequente resultado de restauração encontrado no decorrer das 100 simulações.

Figura 24 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 3



Fonte: Elaborada pelo autor.

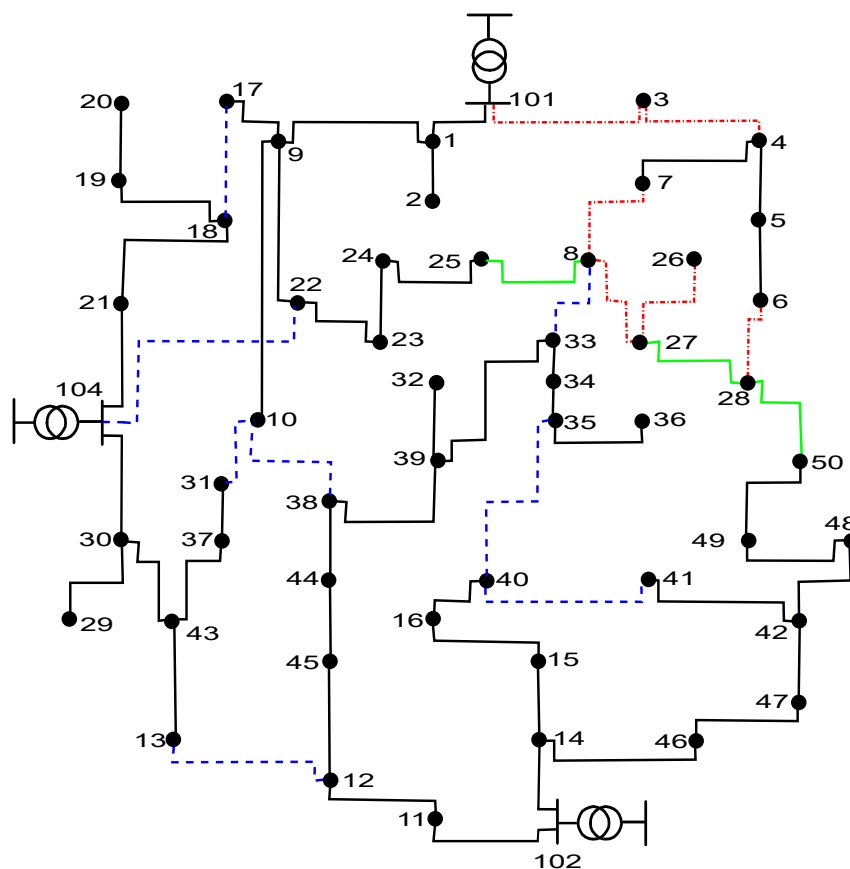
O algoritmo encontrou a solução apresentada na Figura 24 em 76% das simulações realizadas, com um tempo médio de execução de 1,82 segundos. A solução apresenta a abertura das chaves 101-3, 3-4, 4-5, 6-28, 27-26, 8-26, 33-34, e o fechamento das chaves 8-33, 35-40, 27-28, 28-50, com um total de 11 chaveamentos. Assim, obteve-se um total de PNS de 3465kVA (somatório das potências das barras 5, 6 e 26), além da carga da barra em falta. Esta configuração apresenta uma perda resistiva total de 189KW. A topologia é o resultado ótimo para este caso, garantido pela resolução do problema através do modelo matemático descrito em (ROMERO *et al.*, 2016), onde o problema foi modelado considerando os mesmos termos da FO e restrições do sistema. O plano de sequência de chaveamento para este resultado é ilustrado na Tabela 13, juntamente com a PNS de cada operação.

Tabela 3 – Sequenciamento de chaves para a restauração do sistema de 53 barras considerando falta permanente na barra 3

Falta	Tempo	Abrir	Fechar	PNS (kVA)
Barra 3	$t_0$	101-3	-	8239
	$t_1$	3-4, 4-5, 8-27, 33-34	-	10087
	$t_2$	-	33-8	7007
	$t_3$	-	40-35	5159
	$t_4$	27-26, 6-28	27-28	5159
	$t_5$	-	50-28	3465

Este resultado só foi possível considerando a quarta vizinhança proposta neste trabalho quando comparado com (PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012). A Figura 25 ilustra a solução encontrada quando a quarta vizinhança é desconsiderada. A solução apresenta a abertura das chaves 101-3, 3-4, 6-28, 26-27, 8-27, 8-7, e o fechamento das chaves 28-50 e 25-8, 27-28, obtendo um total de 9 chaveamentos. Com um total de carga não suprida de 5082kVA, valor consideravelmente maior quando comparado com a solução apresentado na Figura 24. Portanto, considera-se a quarta vizinhança um fator importante para a eficiência da metodologia aplicada ao problema de RSDEE.

Figura 25 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 3 sem a ação da Quarta Vizinhança

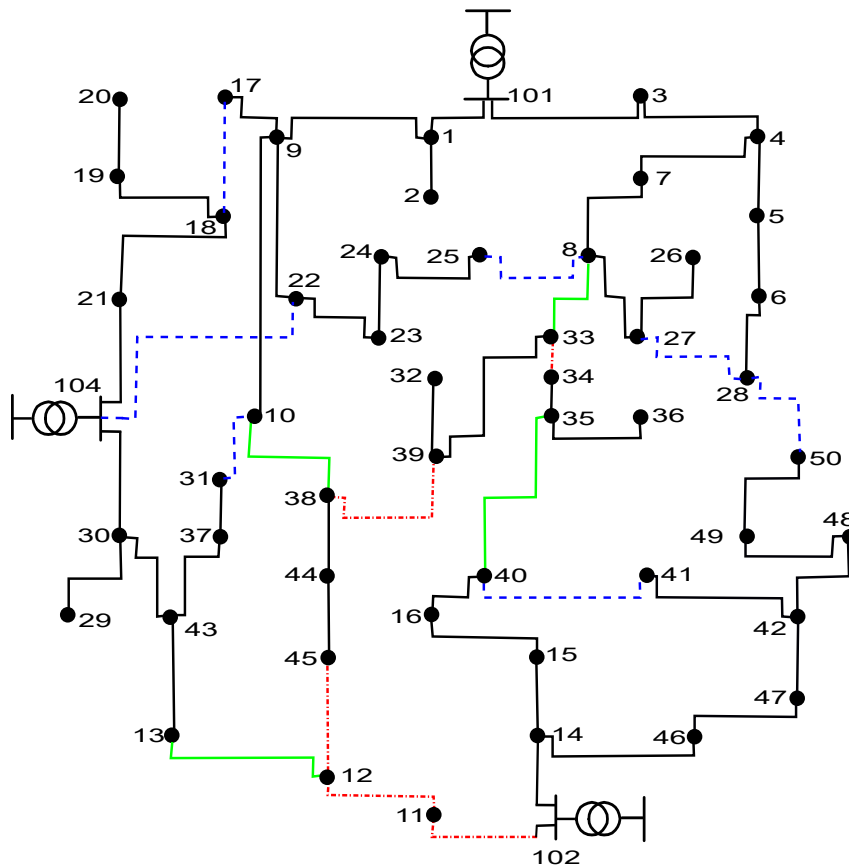


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.1.2 Falta Permanente na Barra 11

Considerou-se uma falta permanente na barra 11, originalmente conectada à barra de SE 102 do sistema teste. Para este caso, o melhor e mais frequente resultado encontrado é ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 11



Fonte: Elaborada pelo autor.

O algoritmo implementado encontrou a solução apresentada na Figura 26 em 99% das simulações realizadas, com um tempo médio de execução de 0,57 segundos. Percebe-se que para este caso, todas as barras afetadas pela falta foram restauradas (com exceção da barra em falta). Houve abertura das chaves 102-11, 11-12, 12-45, 38-39, 33-34 e fechamento das chaves 13-12, 10-38, 33-8 e 35-40, um total de 9 chaveamentos e perda resistiva total de 183KW. Esta solução encontrada também é a solução ótima para este caso, conforme apresentado em (ROMERO *et al.*, 2016). A Tabela 4 ilustra o resultado do plano de chaveamento encontrado para a solução da restauração considerando a falta permanente na barra 11.

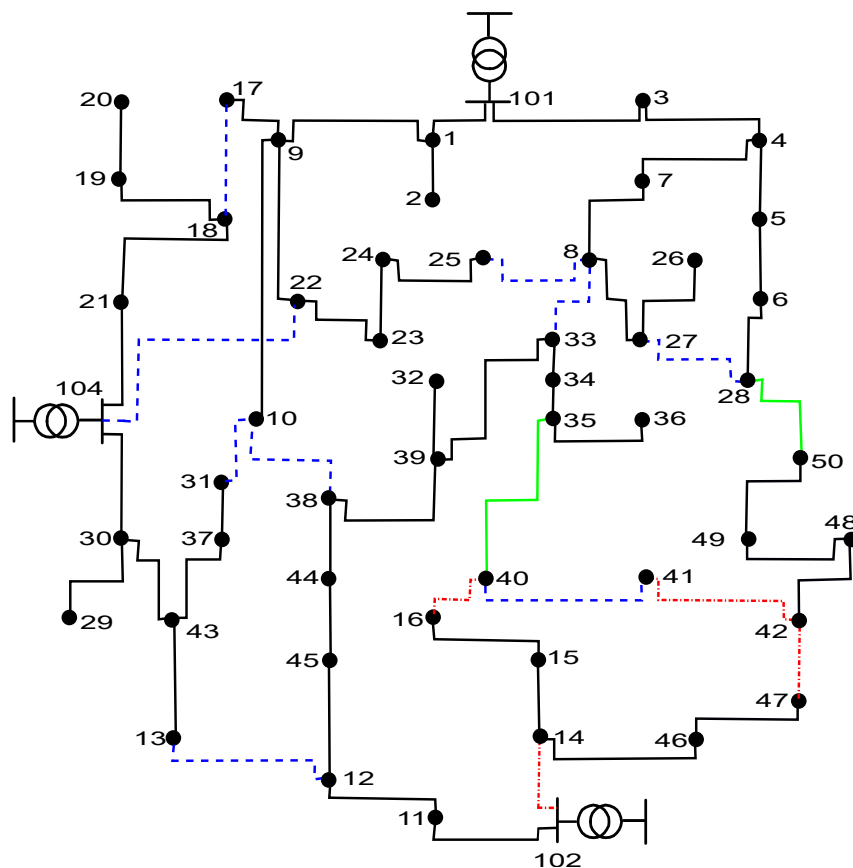
Tabela 4 – Sequenciamento de chaves para a restauração do sistema de 53 barras considerando falta permanente na barra 11

Falta	Tempo	Abrir	Fechar	PNS (kVA)
Barra 11	t0	102-11	-	10087
	t1	11-12, 12-45, 38-39, 33-34	-	10087
	t2	-	13-12, 10-38, 35-40	4312
	t3	-	8-33	0

### 5.1.3 Falta Permanente na Barra 14

Para este teste, foi considerada uma falta na barra 14, originalmente conectada à barra de SE 102 do sistema teste utilizado. A Figura 27 apresenta o resultado encontrado.

Figura 27 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 14



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para este caso, (ROMERO *et al.*, 2016) alcança o resultado ótimo do problema através do modelo matemático dado suas condições de simplificações. Porém, este resultado ótimo implica no desligamento de barras saudáveis do sistema, hipótese não considerada neste trabalho. Nesse sentido, a melhor e mais frequente solução encontrada foi a ilustrada na Figura 27, a qual foi encontrada em 99% das simulações realizadas, com um tempo médio de 0,21 segundos de execução. Houve abertura nas chaves 102-14, 16-40, 47-42 e 41-42 e fechamento das chaves 28-50 e 40-35, totalizando 6 chaveamentos, com perda resistiva total de 123KW e PNS total

de 5390kVA (soma das potências aparentes das barras 46, 47, 15, 16 e 41). Vale destacar que esta solução foi a mesma encontrada em (PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012). A Tabela 5 ilustra o resultado do plano de chaveamento encontrado para a solução da restauração considerando a falta permanente na barra 14.

Tabela 5 – Sequenciamento de chaves para a restauração do sistema de 53 barras considerando falta permanente na barra 14

Falta	Tempo	Abrir	Fechar	PNS (kVA)
Barra 14	t0	102-14	-	9009
	t1	16-40, 41-42, 47-42,	-	9009
	t2	-	50-28, 40-35	5390

#### 5.1.4 Análise dos Resultados Obtidos para o Sistema de 53 Barras

Por se tratar de uma meta-heurística, o algoritmo desenvolvido não possui respostas determinísticas, estando sujeito à possíveis convergência para ótimos locais. Porém, uma meta-heurística bem desenvolvida consegue escapar dos ponto de ótimos locais, alcançando soluções de muito boa qualidade na maioria das simulações realizadas.

Os testes realizados utilizando o sistema de 53 barras puderam ser comparados com os resultados obtidos em (ROMERO *et al.*, 2016) e (PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012). A metodologia utilizada em (ROMERO *et al.*, 2016) garante a otimalidade das soluções apresentadas por se tratar de um problema modelado de forma linear e convexa, e resolvido através de uma técnica de otimização clássica. Nesse sentido,(ROMERO *et al.*, 2016) serviu como um ótimo meio de comparação dos resultados obtidos neste trabalho. Em (PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012) é proposto uma metodologia baseada no algoritmo de BT para a resolução do problema de RSDEE e, por se tratar de uma meta-heurística, a solução ótima não é garantida.

A Tabela 6 apresenta uma análise comparativa dos resultados obtidos pelas simulações com o sistema de 53 barras com relação aos resultados apresentados pelos trabalhos que serviram como base.

Tabela 6 – Comparação dos Resultados Obtidos no Sistema Teste de 53 Barras

Barras em Falta	Trabalhos	Carga não suprida (kVA)	Tempo (s)
3	Metodologia Proposta	3465,00	1,82
	(ROMERO <i>et al.</i> , 2016)	3465,00	38,6
	(PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012)	5621,00	0,312
11	Metodologia Proposta	0	0,57
	(ROMERO <i>et al.</i> , 2016)	0	8,1
	(PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012)	0	0,343
14	Metodologia Proposta	5390,00	0,21
	(ROMERO <i>et al.</i> , 2016)	4928,00	27,8
	(PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012)	5390,00	0,358

Os resultados mostram uma considerável diminuição do tempo de execução com relação ao trabalho de (ROMERO *et al.*, 2016) e uma equiparação da quantidade das cargas não supridas, com exceção da simulação da falta na barra 14, onde (ROMERO *et al.*, 2016) assume a possibilidade de desligamento de carga saudável. O trabalho de (PEREIRA; COSSI; MANTOVANI, 2012) apresenta um tempo de execução, em geral, menor do que a metodologia proposta neste trabalho, entretanto, o trabalho apresentado por PEREIRA, COSSI e MANTOVANI (2012) não considera a sequencia de chaveamento e as hipóteses adotadas neste trabalho, como a quarta vizinhança, permitem a mitigação da quantidade de PNS.

## 5.2 Testes Realizados no Sistema de 405 Barras Considerando a Instalação de GD no Sistema

Para este caso de teste, optou-se pela utilização de um sistema de 405 barras, divididas em 72 seções, onde uma GD de 1,5MVA de capacidade foi instalada no mesmo alimentador da barra em falta. Além disso, neste sistema, nem todos os ramos possuem chaves seccionadoras. Por fim, considerou-se dois cenários para os testes:

1. Considerou-se o modelo padrão do problema de RSDEE, ou seja, sujeito às restrições apresentadas na seção 3.2, porém, sem a inclusão das restrições que consideram a dinâmica do sistema, propostas neste trabalho (3.18, 3.17, 3.19 e 3.20);
2. Considerou-se o modelo completo, com todas as restrições apresentadas na seção 3.2.

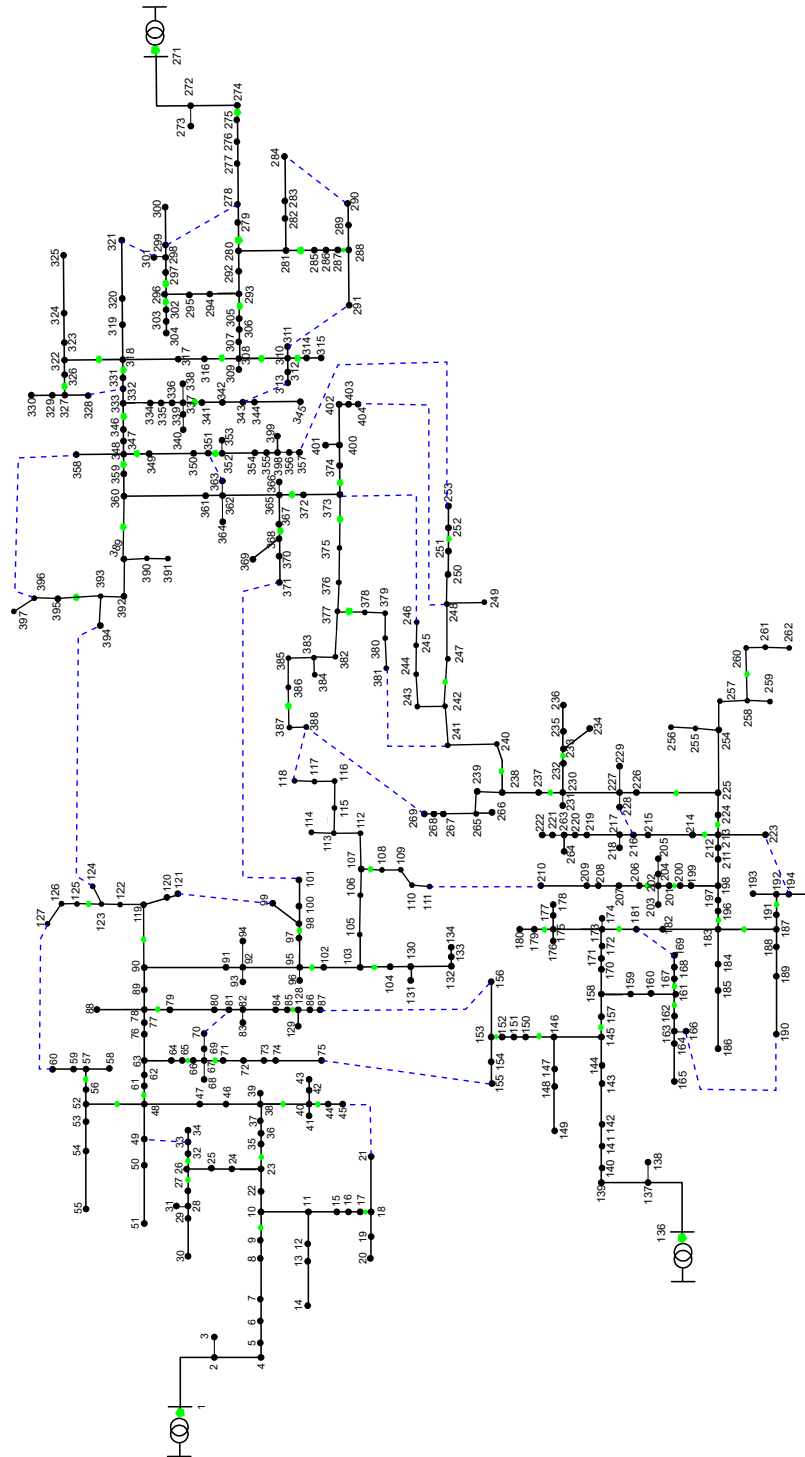
Em ambos os cenários, os resultados encontrados foram analisados considerando a dinâmica do sistema. As análises foram realizadas através de simulações no software ATP, conforme apresentado na seção 4.4.1. Este processo se deu pela verificação do comportamento dinâmico da frequência da GD durante a formação da ilha.

Os pesos  $W_1$ ,  $W_2$  e  $W_3$ , atribuídos à cada parcela da FO (eq. 3.1), foram os mesmos utilizados com relação aos testes anteriores. Os parâmetros empregados nos controladores dos GDs são os mesmos utilizados em (FARIA *et al.*, 2021) e estão descritos na Tabela 7.

Por fim, a topologia inicial do sistema de 405 barras está ilustrada na figura 28.



Figura 28 – Topologia Inicial do Sistema de 405 Barras



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 – Parâmetros Utilizados no Controle das GDs

Controlador	Variável	Valor	Controlador	Variável	Valor
Controle de Velocidade	R	0.05	Excitatriz	$T_c$	0
	K	0		$T_e$	0
	$K_p$ (PID)	1		$K_b$	120
	$K_i$ (PID)	0.1		$T_b$	0.02
	$K_d$ (PID)	0.3		$K_f$	1
	$K_a$	1		$T_f$	0.8
	$T_a$	0.1		$K_g$	0.008
	$K_t$	1		$T_g$	0.5
	$T_t$	1			

### 5.2.1 Falta Permanente na Barra 77

Neste primeiro caso, considerou-se a alocação de uma GD na barra 134 (pertencente à seção 21) e uma falta permanente na barra 77 (pertencente à seção 11). A solução de melhor qualidade encontrada é ilustrada na Figura 29.

A topologia final, ilustrada na Figura 29, apresenta regiões sombreadas, divididas em 4 grupos: a região vermelha identifica a região em falta que foi isolada do sistema; a região azul identifica aquelas barras que foram restauradas através da transferência de cargas para outros alimentadores; a região verde identifica as barras que foram restauradas através do processo de ilhamento, alimentadas pela GD alocada na barra 134 e, por último, a região amarela identifica as barras que ficaram fora de serviço, ou seja, barras atingidas indiretamente pela falta que permaneceram desenergizadas após o processo de restauração, devido a violação de restrição de capacidade do alimentador e da restrição de corrente. Mesmo com a possível abertura da chave NF existente na região amarela, a parcela a jusante não poderia ser restaurada devido a violações destas mesmas restrições.

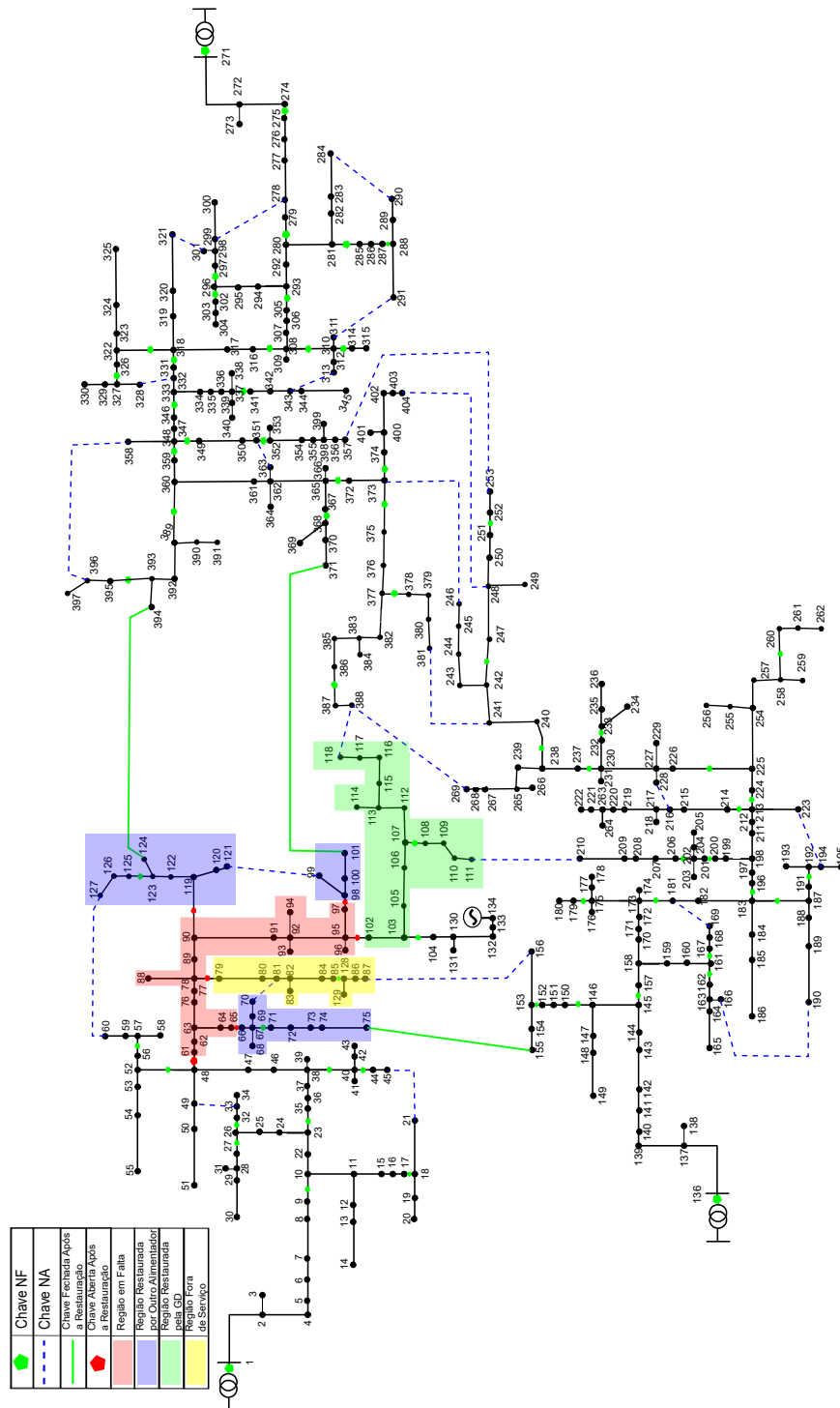
Esta configuração topológica foi o resultado mais recorrente considerando os casos com e sem as restrições que consideram a dinâmica, sendo que, a maior diferença observada apresenta-se no plano de chaveamento encontrado. A Tabela 8 apresenta um resumo dos resultados encontrados para os dois casos de testes e a Tabela 9 apresenta o plano de chaveamento para ambos os casos.

Tabela 8 – Resumo dos Resultados Encontrados para os Dois Cenários de Análise para Falta na Barra 77

Cenário	1	2
<b>Barra em Falta</b>	77	77
<b>Barra com GD</b>	134	134
<b>Total de Carga Não Suprida (kVA)</b>	735,5	735,5
<b>Tempo (s)</b>	5,14	5,47
<b>Recorrência (%)</b>	84	81

As tabelas demonstram que, para ambos os cenários, os resultados encontrados foram

Figura 29 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 77 e a instalação de uma GD na barra 134



Fonte: Elaborada pelo autor.

bastante próximos do ponto de vista de tempo de processamento, PNS e recorrência de solução. A principal diferença se encontra no plano de chaveamento definido para o caso em que se consideram as restrições dinâmicas, onde apresenta um chaveamento a mais com relação ao caso sem estas restrições. Este chaveamento é definido pela manipulação da chave 107-108,

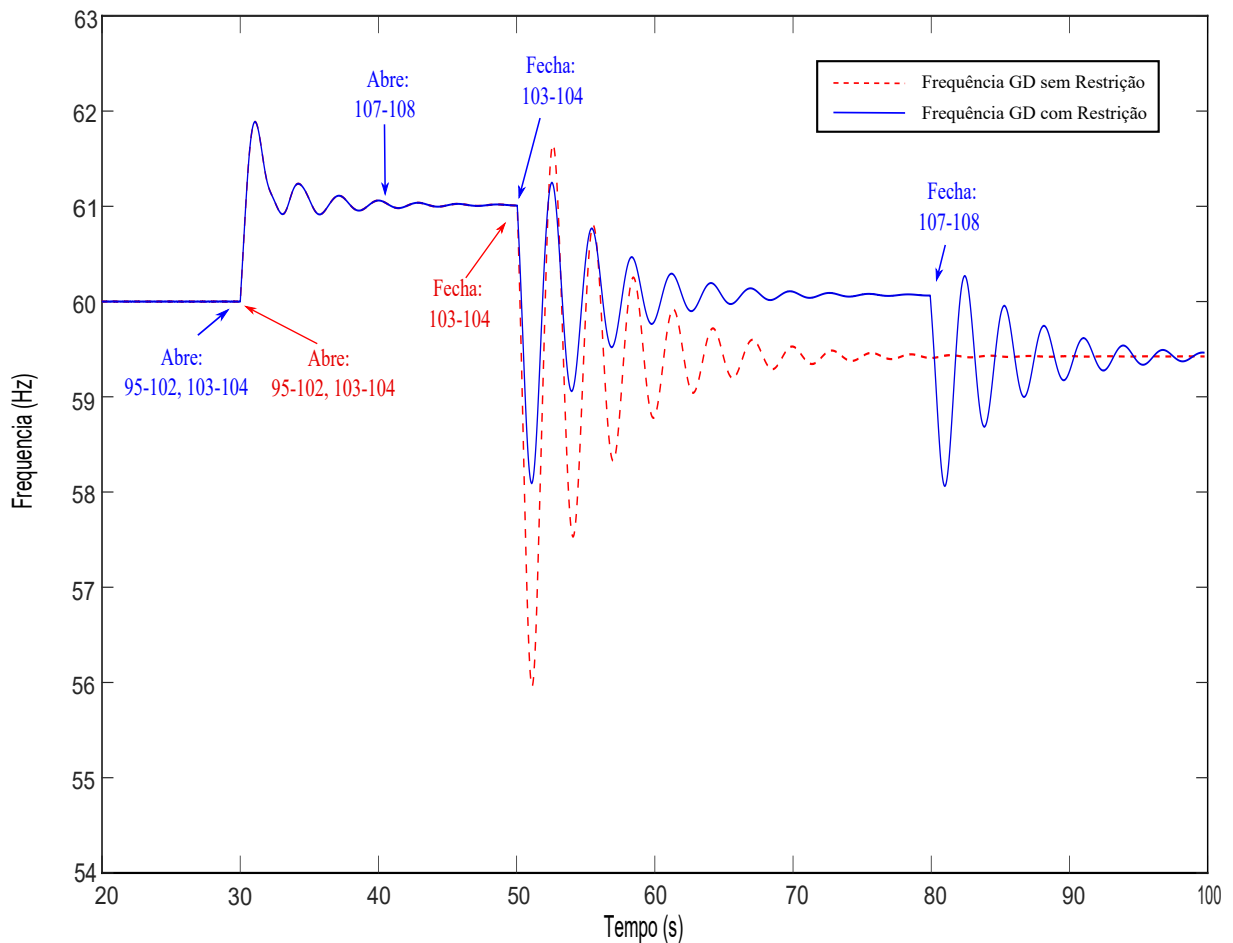
Tabela 9 – Planos de Chaveamentos para o Caso de Falta na Barra 77

Cenário	Tempo	Abrir	Fechar	PNS (kVA)
1	$t_0$	48-61, 65-66, 78-79, 90-119, 95-102, 97-98, 104-103	-	2507,9
	$t_1$	-	124-394, 75-155, 104-103	864
	$t_2$	-	101-371	735,5
2	$t_0$	48-61, 65-66, 78-79, 90-119, 95-102, 97-98, 104-103	-	2507,9
	$t_1$	<b>107-108</b>	124-394, 75-155	1688,5
	$t_2$	-	104-103	1197,5
	$t_3$	-	<b>107-108,</b> 101-371	735,5

que é aberta logo após o isolamento da seção que contém a GD do alimentador principal. Nesse sentido, o bloco de carga que forma a ilha (definido pela região verde na Figura 29) é dividido, diferentemente do primeiro caso onde a formação da ilha acontece com o bloco de carga transferido como um todo. Portanto, o processo de transferência de carga para a ilha acontece em duas etapas e este fato tem impacto direto na oscilação da frequência da GD, como pode ser observado na Figura 30.

Analisando a Figura 30, para o caso do cenário sem restrição de transferência de carga, tem-se: a abertura das chaves 95-102 e 103-104 no tempo  $t=30s$ , posteriormente, acontece o fechamento da chave 103-104 no tempo  $t=50$ , observa-se que há claramente a violação do limite de frequência inferior para este cenário (56,5Hz), portanto, a ilha não se manteria devido a atuação da proteção. Por outro lado, para o caso da formação de ilha de operação considerando as restrições dinâmicas, tem-se: abertura das chaves 95-102 e 103-104 em  $t=30$ , abertura da chave 107-108 no tempo aproximado de 40s, o fechamento da chave 103-104 em  $t=50$  (porém agora com menos carga a ser transferida para a ilha nesta manobra) e, por último, o fechamento da chave 107-108 em  $t=80$ , completando a carga total da ilha. Para este caso, observa-se que a oscilação de frequência permaneceu dentro da faixa permitida (62 - 56,5 Hz). Portanto, a ilha é formada e, conseqüentemente, sua manutenção é garantida.

Figura 30 – Comparação da Frequência Dinâmica da GD entre Ambos os Casos de Teste para Falta na Barra 77



Fonte: Elaborada pelo autor.

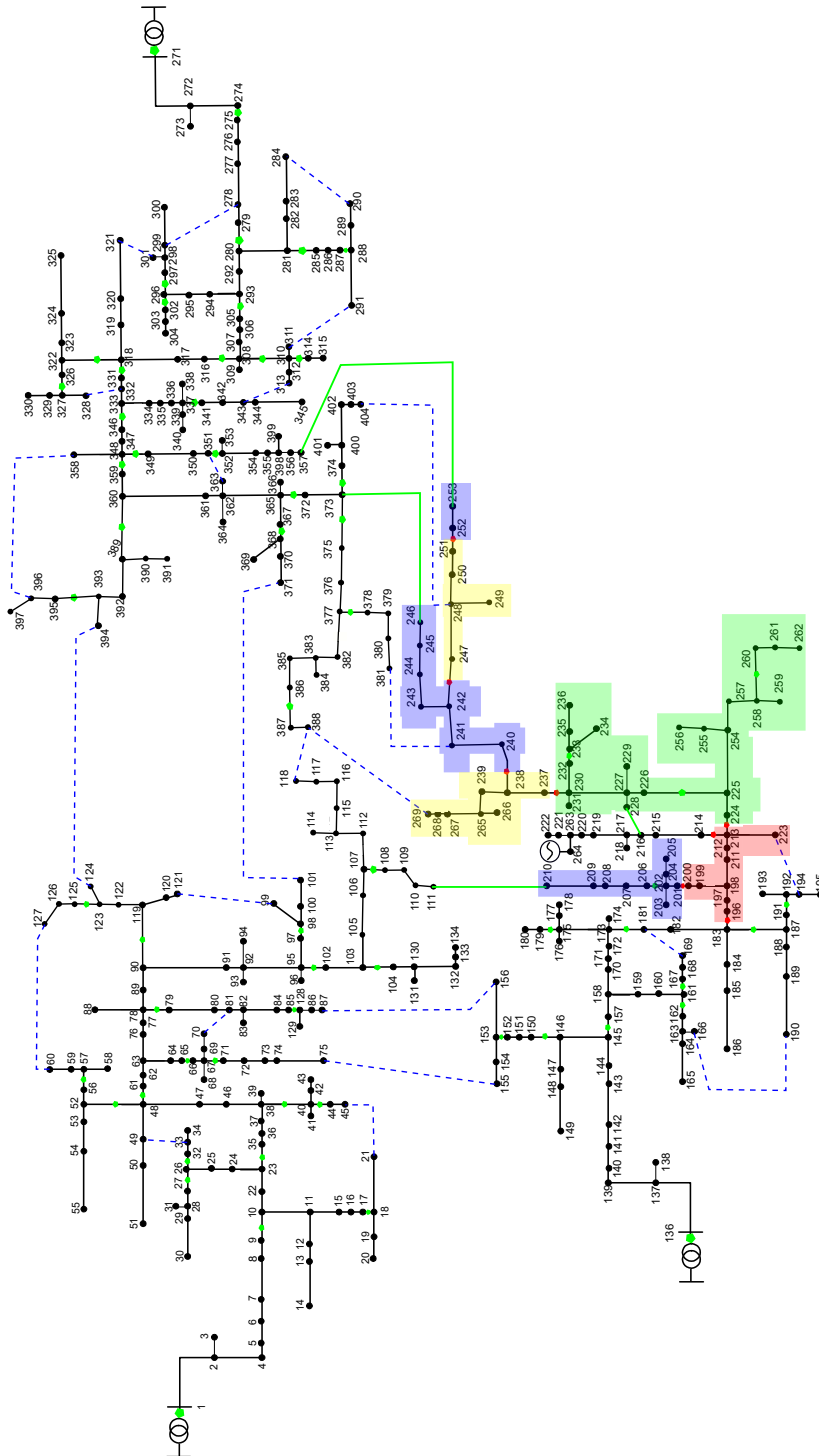
### 5.2.2 Falta Permanente na Barra 198

Neste segundo caso, considerou-se a alocação de uma GD na barra 264 (pertencente à seção 36) e uma falta permanente na barra 198 (pertencente à seção 33). A solução de melhor qualidade encontrada é ilustrada na Figura 31.

A Figura 31 apresenta regiões sombreadas que definem as características de restauração seguindo o mesmo padrão adotado no teste anterior. Esta configuração topológica foi o resultado mais recorrente considerando o caso com as restrições de dinâmicas quanto sem estas restrições. A Tabela 10 apresenta um resumo dos resultados encontrados para os dois casos de testes e a Tabela 11 apresenta o plano de chaveamento para ambos os casos.

Este caso de falta também demonstrou resultados bastante próximos quanto ao tempo de processamento, PNS e recorrência de solução quando comparados os casos de inserção das restrições de cargas e sem estas restrições. Novamente o plano de chaveamento definido para o caso em que se consideram as restrições dinâmicas, apresenta um chaveamento a mais com relação ao caso sem estas restrições. Este chaveamento é definido pela manipulação da chave 225-226, que é aberta logo após o isolamento da seção que contém a GD do alimentador principal.

Figura 31 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 198 e a instalação de uma GD na barra 264



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse sentido, o bloco de carga que forma a ilha (definido pela região verde na Figura 31) é dividido, diferentemente do primeiro caso onde a formação da ilha acontece com o bloco de carga como um todo. Portanto, o processo de transferência de carga para a ilha acontece em duas etapas e este processo tem impacto direto na frequência da GD, como pode ser observado na

Tabela 10 – Resumo dos Resultados Encontrados para os Dois Cenários de Análise para a Falta na Barra 198

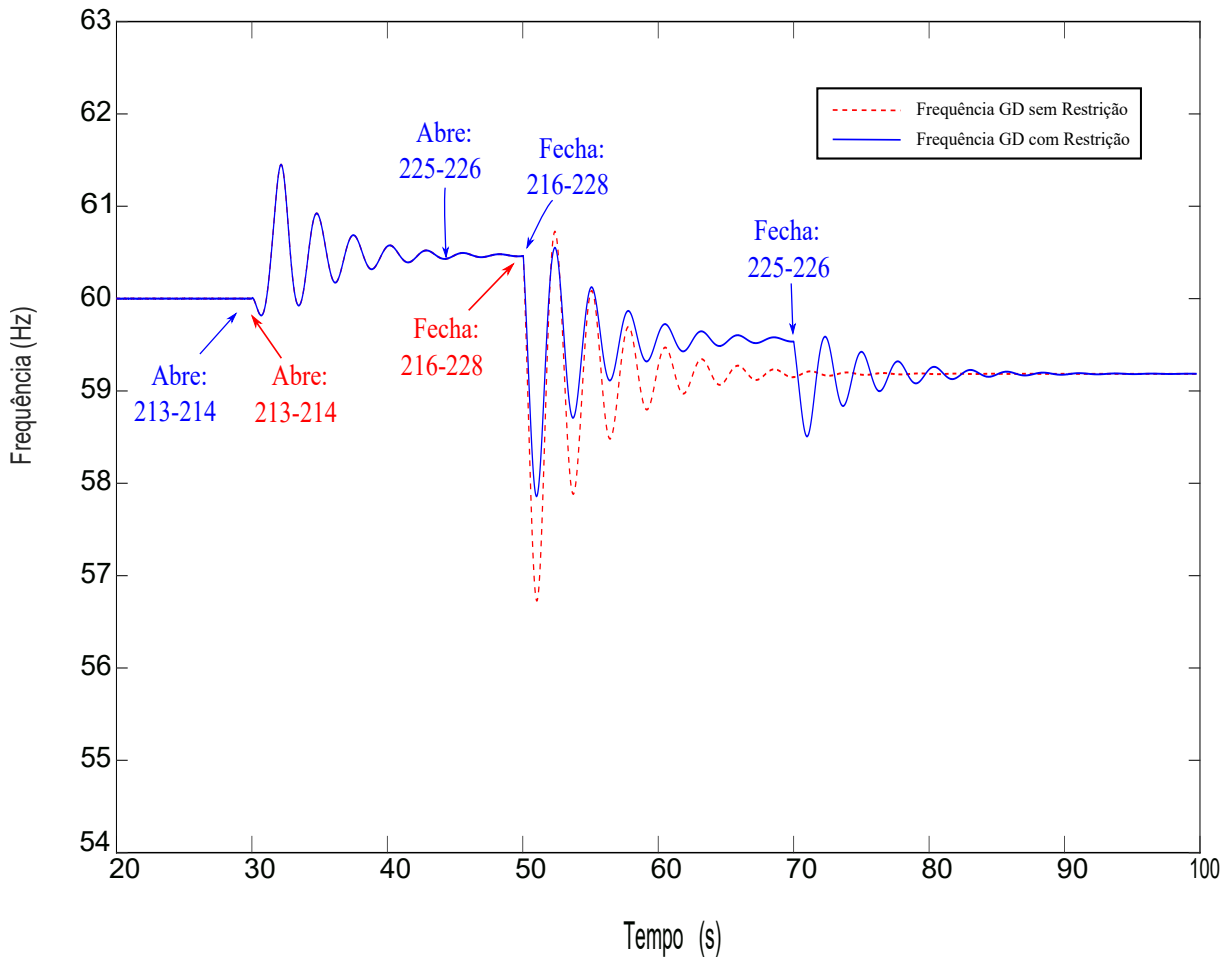
<b>Cenário</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Barra em Falta</b>	198	198
<b>Barra com GD</b>	264	264
<b>Total de Carga Não Suprida (kVA)</b>	780	780
<b>Tempo (s)</b>	4,9	4,67
<b>Recorrência (%)</b>	95	91

Tabela 11 – Planos de Chaveamentos para o Caso de Falta na Barra 198

<b>Cenário</b>	<b>Tempo</b>	<b>Abrir</b>	<b>Fechar</b>	<b>PNS (kVA)</b>
1	$t_0$	183-196, 200-201, 212-214, 213-224	-	2604,4
	$t_1$	230-237, 238-240 242-247, 251-252	210-111	2058,5
	$t_2$	-	246-373, 253-357, 216-228	780
2	$t_0$	183-196, 200-201, 212-214, 213-224	-	2604,04
	$t_1$	230-237, 238-240 242-247, 251-252, <b>225-226</b>	210-111	2058,5
	$t_2$	-	246-373, 253-357, 216-228	1008,5
	$t_3$	-	<b>225-226</b>	780

Figura 32.

Figura 32 – Comparação da Frequência Dinâmica da GD entre Ambos os Casos de Teste para Falta na Barra 198



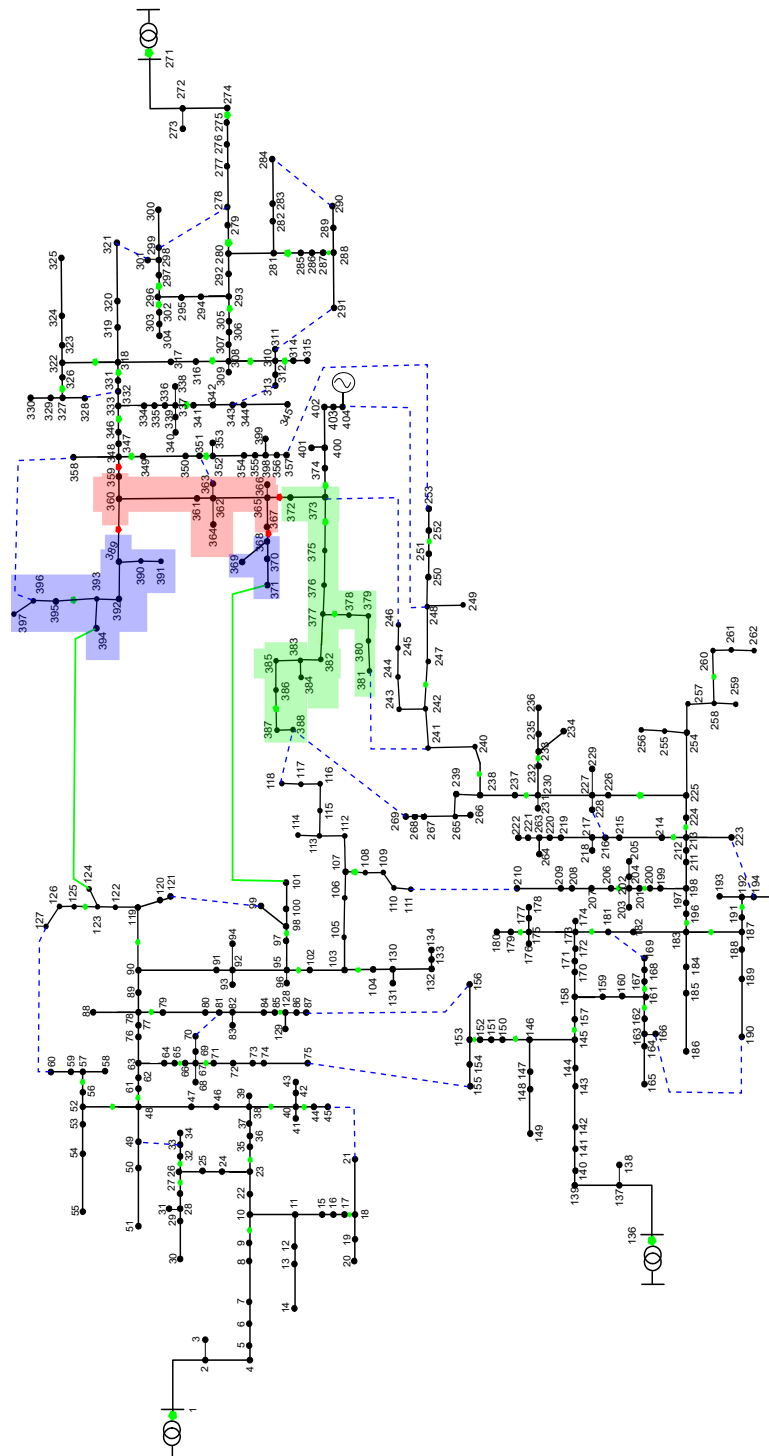
Analisando a Figura 32, para o caso do cenário sem restrição de transferência de carga, tem-se: a abertura das chaves 213-214 no tempo  $t=30s$ , posteriormente, acontece o fechamento da chave 216-228 no tempo  $t=50$ , observa-se que, para este cenário, a frequência do gerador quase alcança o limite de frequência inferior de 56,6 Hz. Por outro lado, para o caso da formação de ilha de operação considerando restrição de transferência de carga, tem-se: abertura das chaves 213-214 em  $t=30$ , abertura da chave 225-226 no tempo aproximado de 45s, o fechamento da chave 216-228 em  $t=50$  (porém agora com menos carga a ser transferida para a ilha nesta manobra) e, por último, o fechamento da chave 225-226 em  $t=70$ , completando a carga total da ilha. Para este caso, observa-se que a oscilação de frequência permaneceu dentro da faixa permitida, portanto, a ilha é formada e, conseqüentemente, sua manutenção é garantida.



### 5.2.3 Falta Permanente na Barra 360

Neste terceiro caso, considerou-se a alocação de uma GD na barra 404 (pertencente à seção 66) e uma falta permanente na barra 360 (pertencente à seção 63). A solução de melhor qualidade encontrada é ilustrada na Figura 33.

Figura 33 – Topologia restaurada considerando uma falta permanente na barra 360 e a instalação de uma GD na barra 404



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 33 apresenta regiões sombreadas que definem as características de restauração seguindo o mesmo padrão adotado nos testes anteriores. Esta configuração topológica foi o resultado mais recorrente considerando o caso com a restrição de transferência de carga quanto sem esta restrição. A Tabela 12 apresenta um resumo dos resultados encontrados para os dois casos de testes e a Tabela 13 apresenta o plano de chaveamento para ambos os casos.

Tabela 12 – Resumo dos Resultados Encontrados para os Dois Cenários de Análise para a Falta na Barra 360

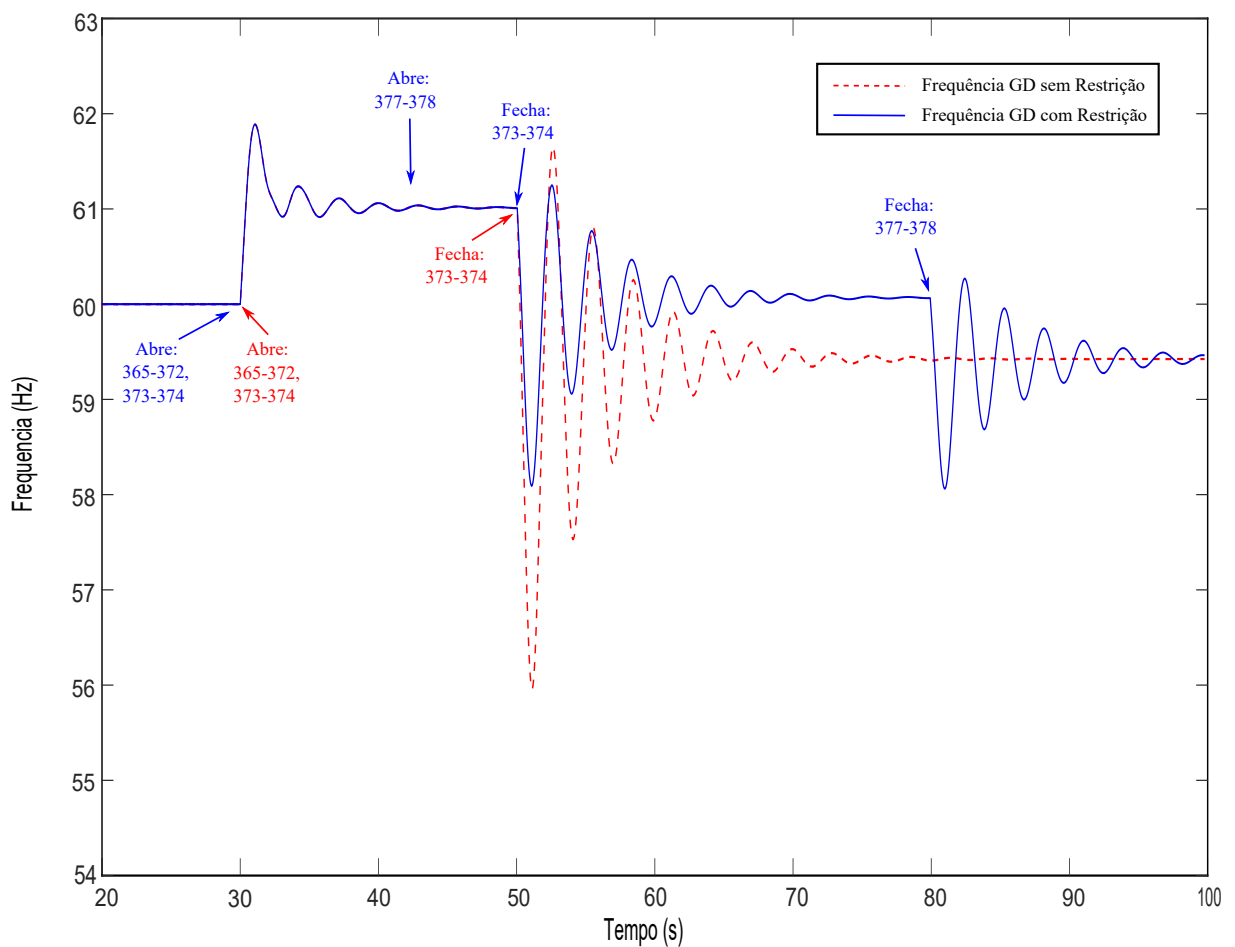
<b>Cenário</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Barra em Falta</b>	360	360
<b>Barra com GD</b>	404	404
<b>Total de Carga Não Suprida (kVA)</b>	0	0
<b>Tempo (s)</b>	4,1	4,24
<b>Recorrência (%)</b>	97	94

Tabela 13 – Planos de Chaveamentos para o Caso de Falta na Barra 360

<b>Cenário</b>	<b>Tempo</b>	<b>Abrir</b>	<b>Fechar</b>	<b>PNS (kVA)</b>
1	$t_0$	348-359, 360-389, 367-368, 365-372, 373-374	-	1309
	$t_1$	-	394-124, 371-101, 373-374	0
2	$t_0$	348-359, 360-389, 367-368, 365-372, 373-374	-	1309
	$t_1$	<b>377-378</b>	394-124, 371-101,	824,5
	$t_2$	-	373-374	333,5
	$t_3$	-	<b>377-378</b>	0

Assim como os anteriores, este caso de falta também demonstrou resultados bastante próximos quanto ao tempo de processamento, PNS e recorrência de solução quando comparados os casos de inserção da restrição de carga e sem esta restrição. Novamente o plano de chaveamento definido para o caso em que se consideram as restrições dinâmicas, apresenta um chaveamento a mais com relação ao caso sem estas restrições. Este chaveamento é definido pela manipulação da chave 377-378, que é aberta logo após o isolamento da seção que contém a GD do alimentador principal. Nesse sentido, o bloco de carga que forma a ilha (definido pela região verde na Figura 33) é dividido. O processo de transferência de carga para a ilha acontece em duas etapas, da mesma forma que os testes anteriores, como pode ser observado na Figura 34.

Figura 34 – Comparação da Frequência Dinâmica da GD entre Ambos os Casos de Teste para Falta na Barra 360



Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 34, para o caso do cenário sem restrição de transferência de carga, tem-se: a abertura das chaves 365-372, 373-374 no tempo  $t=30s$ , posteriormente, acontece o fechamento da chave 373-374 no tempo  $t=50$ , observa-se que a frequência do gerador ultrapassa o limite de frequência estabelecido para este cenário. Por outro lado, para o caso da formação de ilha de operação considerando restrição de transferência de carga, tem-se: abertura das chaves 365-372, 373-374 em  $t=30$ , abertura da chave 377-378 no tempo aproximado de 45s, o fechamento da chave 373-374 em  $t=50$  (porém agora com menos carga a ser transferida para a ilha nesta manobra) e, por último, o fechamento da chave 377-378 em  $t=80$ , completando a carga total da ilha. Para este caso, observa-se que a oscilação de frequência permaneceu dentro da faixa permitida de 56,5 e 62Hz, portanto, a ilha é formada e, conseqüentemente, sua manutenção é garantida.

### 5.3 Considerações Finais

Por se tratar de uma meta-heurística, o algoritmo desenvolvido não possui respostas determinísticas, estando sujeito à convergência para ótimos locais. Porém, uma meta-heurística bem desenvolvida consegue escapar dos pontos de Ótimos Locais, alcançando soluções de muito boa qualidade para os problemas na maioria das simulações realizadas.

As simulações realizadas foram divididas em três grupos:

- Primeiro grupo - Simulações realizadas no sistema teste de 53 barras não considerando a presença de GDs no sistema e sem corte de carga de barra saudável.
- Segundo grupo - Simulações realizadas no sistema teste de 405 barras, considerando a instalação de uma GDs no mesmo alimentador da barra em falta, sem a inserção de restrições dinâmicas e sem corte de carga de barras saudáveis.
- Terceiro grupo - Simulações realizadas no sistema teste de 405 barras, considerando a instalação de uma GDs no mesmo alimentador da barra em falta, com a inserção de restrições dinâmicas e sem corte de carga de barras saudáveis.

Os testes realizados no primeiro grupo tiveram como objetivo a comprovação da eficácia do método em comparação aos resultados presentes em [ROMERO \*et al.\* \(2016\)](#) e [PEREIRA, COSSI e MANTOVANI \(2012\)](#). Nesse sentido, observou-se que a metodologia encontrou resultados de boa qualidade, bem próximos aos mostrados em [ROMERO \*et al.\* \(2016\)](#) e [PEREIRA, COSSI e MANTOVANI \(2012\)](#), com tempos de processamento aceitáveis.

Os testes do segundo grupo foram realizados a fim de se analisar a dinâmica envolvida no processo de ilhamento, seguindo o plano de chaveamento estabelecido. Para este caso, adotou-se o modelo clássico do problema de RSDEE, sem a aplicação das restrições dinâmicas propostas. Verificou-se que o limite de frequência transitória foi rompido para a maioria dos casos e, quando

não, ficaram próximo aos limites estabelecidos. Portanto, na prática, a maioria das soluções encontradas seguindo o modelo clássico, seriam infactíveis em cenários onde há GDs instaladas no sistema operando de forma ilhada. Este fato se dá devido ao não cumprimento dos limites estabelecidos para a frequência transitória durante a construção da ilha. Sendo assim, devido ao acionamento do dispositivo de proteção da máquina, a ilha não se manteria.

Os testes realizados no terceiro grupo adotaram uma variação do modelo clássico do problema de RSDEE, considerando as restrições dinâmicas propostas. O objetivo deste cenário foi analisar o efeito destas restrições na redução da frequência crítica transitória envolvida no processo de ilhamento. Para todos os casos analisados, observou-se que houve reduções significativas nas frequências críticas, mantendo a frequência da ilha dentro dos limites estabelecidos e, portanto, garantindo a manutenção da ilha após sua formação.

Ademais, com o acréscimo das restrições dinâmicas no modelo, não houveram mudanças significativas nas topologias finais definidas no processo de restauração para os testes realizados no segundo e terceiro grupo. A grande mudança se deu pela alteração do plano de chaveamento, onde se obteve um acréscimo no número de chaves envolvidas no plano de chaveamento.

Por fim, os montantes de cargas que permaneceram deserneizadas nos testes realizados (para ambos os cenários) foram decorrentes dos aspectos de regime permanente do problema. As principais restrições que controlaram a restauração das cargas foram a restrição de limite de capacidade dos alimentadores e das GDs e restrição de corrente nos ramos, condições delimitadas pelas características operacionais do sistema.



---

## CONCLUSÕES

---

A proposta deste trabalho é a implementação de uma ferramenta computacional de otimização para o restabelecimento de cargas em cenários pós-falta e que garanta a criação e a manutenção de ilhas de operação no contexto de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. A metodologia utilizada é baseada no algoritmo *Variable Neighborhood Search* (Busca em Vizinhança Variável) (VNS) em conjunto com o Algoritmo Genético (AG) para a determinação de topologias finais para o plano de restauração e seus respectivos planos de chaveamentos.

Primeiramente, foram realizados testes em um sistema de 53 barras sem a inserção de GDs. Os resultados mostraram que a metodologia é eficiente e consegue obter resultados similares aos presentes na literatura específica, comprovando sua eficácia do ponto de vista de restauração de cargas.

Em um segundo momento, realizou-se testes em um sistema mais robusto, contendo 405 barras, 3 alimentadores e com GDs instalada, modeladas como máquinas síncronas. Para este caso, foram considerados dois cenários distintos: 1 - A resolução do problema de RSDEE considerando o modelo clássico do problema; 2 - A resolução do problema de RSDEE considerando o modelo clássico acrescido das restrições dinâmicas propostas.

A comparação entre estes dois cenários mostrou que as soluções obtidas considerando o modelo clássico do problema, podem não ser factíveis no contexto real, visto que o modelo clássico propõe somente restrições visando o regime permanente do sistema. Porém, quando há GDs instaladas no sistema, principalmente quando estas podem atuar de forma ilhada, o modelo clássico não é suficiente para garantir que a frequência transitória da GD respeitará os limites estabelecidos, podendo haver um acionamento do dispositivo de proteção da máquina e, conseqüentemente, a não manutenção da ilha. As simulações em ATP confirmaram a diferença entre os dois cenários. As soluções obtidas nos testes realizados no segundo cenário foram suficientes para se garantir a manutenção da ilha, visto que as frequências das máquinas se mantiveram dentro dos limites aceitáveis durante o processo de ilhamento em todos os testes

realizados, enquanto que o contrário foi observado para o primeiro cenário. Nesse sentido, houve sucesso ao inserir as restrições dinâmicas no modelo clássico visando a redução das frequências críticas transientes. Portanto, a metodologia proposta é capaz de gerar soluções factíveis e de boa qualidade, sob a ótica do regime permanente e transitório.

O acréscimo das restrições dinâmicas propostas não surtiram efeito direto no resultado final da topologia de restauração. A diferença significativa se deu pela diminuição do tamanho das cargas transferidas para a ilha em um único chaveamento. Este comportamento tem relação direta com a alteração do plano de chaveamento, onde foram acrescentados algumas manobras nos planos de chaveamentos definidos no segundo cenário em comparação ao primeiro. Portanto, esta consequência pode alterar o tempo final de restauração do sistema.

Por fim, destaca-se que os objetivos propostos por estes trabalho foram cumpridos.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Para desenvolvimentos futuros deste trabalho, dentre outros aspectos, propõe-se que devem ser pesquisados e abordados os seguintes itens:

1. Adotar uma abordagem multiprocessada e de processos assíncronos na metodologia proposta, com o objetivo de tornar os algoritmos mais eficientes do ponto de vista de tempo de processamento;
2. Adotar cenários de múltiplas faltas e múltiplas GDs instaladas nos sistemas;
3. Validar as restrições dinâmicas para outros tipos de GDs;
4. Analisar o grau de correlação entre o método de controle com as restrições dinâmicas;
5. Elaborar metodologia generalista para a determinação dos parâmetros de restrição de transferência de carga;
6. Considerar a hipótese da reconexão da ilha ao alimentador principal e analisar o comportamento do sistema.



## REFERÊNCIAS

---

---

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos para distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST, Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição**. [S.l.], 2016. 27 p. Citado na página 24.

AMARAL, L. F. **Comparação entre métodos de fluxo de carga para redes de distribuição ativas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, Brasil, 2018. Citado na página 24.

ANGELO, C.; SELEJAN, P. Technologies of the self healing grid. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION- CIRED**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–4. Citado na página 24.

BARBOSA, C. H. N. de R. **Reconfiguração e Restauração Ótima de Sistemas de Distribuição Primária de Energia Elétrica**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2012. Citado na página 26.

CAMILO, M. H. M. **Avaliação de uma Metodologia para Restabelecimento de Energia Baseada em Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivos no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica da COPEL na Cidade de Londrina**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Brasil, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 32, 37 e 38.

CHEN, X.; WU, W.; ZHANG, B. Robust restoration method for active distribution networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 31, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 33, 37 e 38.

CHENG, C. S.; SHIRMOHAMMADI, D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 2, p. 671–679, May 1995. ISSN 0885-8950. Citado na página 66.

CHU, P. C.; BEASLEY, J. E. A genetic algorithm for the generalised assignment problem. **Computers Operations Research**, v. 24, n. 1, p. 17–23, 1997. Citado na página 63.

CONCEIÇÃO, K. P. da. **Uma nova metodologia para o desenvolvimento de projetos de proteção de redes ativas de distribuição de energia elétrica**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, Brasil, 2018. Citado na página 39.

DELBEM, A. C. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F. D.; POLICASTRO, C. A.; PINTO, A. K.; HONDA, K.; GARCIA, A. C. Node-death encoding for evolutionary algorithms applied to network design. In: **The Genetic and Evolutionary Computation Conference - CECCO**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 678–687. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 66.

DIETMANNBERGER, M.; WANG, X.; BLAABJERG, F.; SCHULZ, D. Restoration of low-voltage distribution systems with inverter-interfaced dg units. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 54, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 34, 37 e 38.

- DUKOVSKA, I.; MORREN, J.; SLOOTWEG, H. J. G. Switching sequence optimization for service restoration in distribution networks. In: **2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 6–10. Citado na página 63.
- ELMITWALLY, A.; ELSESAID, M.; ELGAMAL, M.; CHEN, Z. A fuzzy-multiagent service restoration scheme for distribution system with distributed generation. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 6, n. 3, p. 810–821, 2015. Citado na página 23.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. Brasília, 2019. 303 p. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- FARIA, W. R.; CARVALHO, E. O. P.; DANTAS, L. B.; MACIEL, C. D.; ALBERTO, L. F. C.; LONDON, J. B. A.; PEREIRA, B. R. Service restoration in modern distribution systems addressing grid-connected and islanded operations. **Electric Power Systems Research**, v. 196, 2021. Citado 5 vezes nas páginas 25, 27, 48, 49 e 78.
- FARIAS, W. R.; OLESKOVICS, M.; COURRY, D. V.; OTTO, R. B.; PEREIRA, B. R. Intentional island and dynamic analysis of a microgrid. In: **2019 IEEE Milan PowerTech**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1 – 6. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 35.
- FILHO, M. B. C.; RODRIGUES, M. A. P.; SOUZA, J. C. S. Localização de defeitos em sistemas de energia elétrica utilizando sistemas inteligentes. In: **XV SNPTEE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. [S.l.: s.n.], 1999. p. 1–7. Citado na página 44.
- FORTES, E. de V.; MACEDO, L. H.; ARAUJO, P. B. de; ROMERO, R. A vns algorithm for the design of supplementary damping controllers for small-signal stability analysis. **Electrical Power Energy Systems**, v. 94, p. 41–56, Jan 2018. Citado na página 30.
- GARCÍA-LÓPEZ, F.; MELIÁN-BATISTA, B.; MORENO-PÉREZ, J. A.; MORENO-VEGA, J. M. The parallel variable neighborhood search for the p-median problem. **Journal of Heuristics**, v. 8, p. 375–388, 2002. Citado na página 29.
- GOMEZ, J. C.; MORCOS, M. M. In: **2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America**. [S.l.: s.n.], 2008. Citado na página 24.
- GUEDES, L. D. M. **Alocação de unidades de geração distribuída considerando perdas e aspectos econômicos**. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, Brasil, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 48.
- HAFEZ, A. A.; OMRAN, W. A.; HEGAZY, Y. G. A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, v. 09, May 2018. Citado 3 vezes nas páginas 33, 37 e 38.
- HANSEN, P.; MLADENOVIC, N.; PEREZ-BRITOS, D. Variable neighborhood decomposition search. **Journal of Heuristics**, v. 7, p. 335–350, 07 2001. Citado na página 29.
- HSIAO, Y. T.; CHIEN, Y. C. Y. Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-ga method. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 4, p. 1394–1400, nov 2000. Citado na página 31.
- IEEE Standards Association. Ieee recommended practice for excitation system models for power system stability studies. **IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)**, p. 1–207, 2016. Citado na página 48.

\_\_\_\_\_. Ieee standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. **IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)**, p. 1–138, April 2018. Citado 3 vezes nas páginas 48, 51 e 67.

KHEDERZADEH, M.; ZANDI, S. Enhancement of distribution system restoration capability in single/multiple faults by using microgrids as a resiliency resource. **IEEE SYSTEMS JOURNAL**, v. 13, Jun 2019. Citado 3 vezes nas páginas 34, 37 e 38.

LACOMMARE, K. H.; ETO, J. H.; DUNN, L. N.; SOHN, M. D. Improving the estimated cost of sustained power interruptions to electricity customers. In: . [S.l.: s.n.], 2018. Citado na página 26.

LAVORATO, M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 27, n. 1, p. 172–180, 2011. Citado na página 47.

LI, W.; LI, Y.; CHEN, C.; TAN, Y.; CAO, Y.; ZHANG, M.; PENG, Y.; CHEN, S. A full decentralized multi-agent service restoration for distribution network with dgs. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, v. 11, Mar 2020. Citado 4 vezes nas páginas 27, 35, 37 e 38.

LI, Y.; XIAO, J.; CHEN, C.; TAN, Y.; YIJIA. Review of service restoration for distribution networks. **JOURNAL OF MODERN POWER SYSTEMS AND CLEAN ENERGY**, v. 10, Jul 2019. Citado 4 vezes nas páginas 27, 34, 37 e 38.

MANSOUR, M. R. **Algoritmo para obtenção de planos de restabelecimento para sistemas de distribuição de grande porte**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Brasil, 2009. Citado na página 43.

MARQUES, L. T. **Restabelecimento de Energia por Reconfiguração de Redes em Sistemas de Distribuição de Grande Porte com Priorização de Chaves, Consumidores e Definição de Sequência de Chaveamento**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, Aug. 2013. Citado 4 vezes nas páginas 26, 31, 42 e 43.

MARQUES, L. T. **Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando aspectos práticos**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 24, 25, 32, 37 e 38.

MELLO, A. P. C. de. **Reconfiguração de sistemas de distribuição considerando multivariáveis e geração distribuída**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, May. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 48.

MENDOZA, J.; LOPEZ, R.; MORALES, D.; LOPEZ, E.; DESSANTE, P.; MORAGA, R. Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: real application. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 2, p. 948–954, 2006. Citado na página 32.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for minimal-loss operating spanning tree configuration in a urban power distribution system. In: **Proc - 5th Power System Computation Conference**. [S.l.: s.n.], 1975. p. 1–8. Citado na página 31.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. **Computers and Operations Research**, v. 31, n. 2, p. 1259–1268, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 56.

NETO, W. P. M. **Restauração Automática de Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Grande Porte com Geração Distribuída**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, Brasil, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

PERALTA, R. A. V. **Sistema Inteligente de Apoio ao Restabelecimento de Sistema Elétrico na Fase Fluente**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, Brasil, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 43.

PERALTA, R. A. V. **Restauração automática de sistemas de distribuição de energia elétrica**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, Brasil, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

PERALTA, R. A. V.; LEITE, J. B.; MANTOVANI, J. R. S. Automatic restoration of large-scale distribution networks with distributed generators, voltage control devices and heating loads. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 34, p. 37–38, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 34, 37 e 38.

PEREIRA, B. R.; COSSI, A. M.; MANTOVANI, J. R. S. Proposta de uma metodologia baseada em busca tabu para restauração automática de sistemas de distribuição de energia elétrica. In: **XIX Congresso Brasileiro de Automática - CBA**. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 9 vezes nas páginas 32, 37, 38, 58, 61, 74, 77, 78 e 90.

PEREIRA, K.; JUNIOR, B. R. P.; CONTRERAS, J.; MANTOVANI, J. R. S. A multi-objective optimization technique to develop protection systems of distribution networks with distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, p. 1–1, 2018. ISSN 0885-8950. Citado na página 67.

PEREIRA, R. A. F. **Localização de Faltas em Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica Usando Medições Esparsas de Tensões**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, Brasil, 2007. Citado na página 71.

PEREZ-GUERRERO, R.; HEYDT, G. T.; JACK, N. J.; KEEL, B. K.; CASTELHANO, A. R. Optimal restoration of distribution systems using dynamic programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 3, p. 1589–1596, 2008. Citado na página 63.

PHAM, T. T. H.; BESANGER, Y.; HADJSAID, N. New challenges in power system restoration with large scale of dispersed generation insertion. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 24, n. 1, p. 398–406, 2009. Citado na página 63.

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) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, Brasil, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 30, 43, 55 e 56.

POURBEIK, P.; CHOWN, G.; FELTES, J.; F; MODAU; STERPU, S.; CHAN, R. B. K.; HAN-NETT, L.; LEONARD, D.; LIMA, L.; HOFBAUER, W.; GERIN-LAJOIE, L.; PATTERSON, S.; UNDRILL, J.; LANGENBACHER, F. **Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies**. [S.l.]: IEEE, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.

RAMLI, M. A. M.; BOUCHEKARA, H. R. E. H. Solving the problem of large-scale optimal scheduling of distributed energy resources in smart grids using an improved variable neighborhood search. *IEEE Access*, v. 8, p. 77321–77335, 2020. Citado na página 30.

ROMERO, R.; FRANCO, J. F.; LEAO, F. B.; RIDER, M. J.; SOUZA, E. S. A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 31, n. 2, p. 1259–1268, 2016. Citado 11 vezes nas páginas 32, 37, 38, 48, 71, 73, 75, 76, 77, 78 e 90.

RUPOLO, D.; Pereira Junior, B. R.; CONTRERAS, J.; MANTOVANI, J. R. S. A new parallel and decomposition approach to solve the medium- and low-voltage planning of large-scale power distribution systems. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 132, p. 107191, 2021. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521004300>>. Citado na página 30.

SANTOS, A. C.; DELBEM, A. C. B.; LONDON, J.; BRETAS, N. G. Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 25, n. 5, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

SEKHAVATMANESH, H.; CHERKAoui, R. Service restoration model with mixed-integer second-order cone programming for distribution network with distributed generations. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, v. 11, Oct 2020. Citado na página 27.

SHEN, F.; WU, Q.; XUE, Y. Review of service restoration for distribution networks. **JOURNAL OF MODERN POWER SYSTEMS AND CLEAN ENERGY**, v. 08, Jan 2020. Citado na página 27.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 753–762, May 1988. ISSN 0885-8950. Citado na página 65.

SONG, Z.; DEMAREE, K.; JING, L. Restoration of a smart distribution system. In: **International Conference on Power System Technology - POWERCON**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado na página 39.

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**, v. 08, Dec 2020. Citado 3 vezes nas páginas 33, 37 e 38.

SOUZA, R. F. F. **Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição Usando a Metaheurística de Busca em Vizinhança Variável**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, Brasil, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 57.

TENG, J. Unsymmetrical short-circuit fault analysis for weakly meshed distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 1, p. 96 – 105, 2010. ISSN 0885-8950. Citado na página 23.

TOUNE, S.; FUDO, H.; GENJI, T.; FUKUYAMA, Y.; NAKANISHI, Y. Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, n. 1, p. 173–181, 2002. Citado na página 31.

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**, v. 9, n. 3, p. 426 – 437, 2018. ISSN 0378-7796. Citado 4 vezes nas páginas 25, 35, 37 e 38.

ZORZI, A. **Coloração Total em Grafos Potência de Ciclo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Fev. 2019. Citado na página 41.

---

## FLUXO DE POTÊNCIA

---

Este apêndice consiste no passo a passo utilizado neste trabalho para o cálculo de fluxo de potência através do método de varredura direta - inversa, a fim de se determinar as variáveis de estado de operação da rede, dado um determinado cenário de demanda:

Com o sistema devidamente organizado em uma RNP, inicia-se as etapas referentes à aplicação do método de varredura:

1. Estabelece-se uma tensão inicial para todas as barras do sistema, geralmente utiliza-se o valor de  $V = 1$  p.u.
2. Calcula-se a corrente nodal em cada uma das barras do sistema, segundo a seguinte expressão:

$$I_i^{(k)} = (S_i/V_i^{(k-1)})^* - Y_i \cdot V_i^{k-1} \quad (\text{A.1})$$

Em que:

- $I_i$ : injeção de corrente no nó  $i$ .
- $S_i$ : injeção de potência no nó  $i$ .
- $V_i$ : tensão no nó  $i$ .
- $Y_i$ : soma dos elementos shunt presentes no nó  $i$ .
- $k$ : iteração atual.
- $i$ : nós sob análise.

3. Após calculada todas as correntes das barras, inicia-se a etapa de varredura inversa. Soma-se de correntes pelos ramos, desde os nós extremos do alimentador até o nó raiz. Utiliza-se a equação (15) para esta etapa

$$J_L^{(k)} = -I_j^{(k)} + \sum_{a=1}^n J_{j-a}^{(k)} \quad (\text{A.2})$$

Em que:

- $J_L$ : fluxo de corrente através do ramo L.
  - L: ramo entre as barras i e j.
4. Inicia-se a etapa de varredura direta. Atualizam-se os valores de tensões nas barras desde o nó raiz até os nós mais afastados.

$$V_j^{(k)} = V_i^{(k)} - Z_L \cdot J_L^{(k)} \quad (\text{A.3})$$

Em que:

- $Z_L$ : Impedância do ramo L.
5. Retorna-se para o passo 1.

O processo iterativo pausa quando se têm a convergência do sistema. Isto é, quando  $|V^{(k)} - V^{(k-1)}| < \gamma$ , onde  $\gamma$  é um valor estipulado para o critério de convergência.