Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Campus João Monlevade

Trabalho de Conclusão de Curso

Alocação ótima de chaves em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística VNS

Felício Siqueira Nunes

João Monlevade, MG

2018

Felício Siqueira Nunes

Alocação ótima de chaves em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística VNS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Profº. Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich

João Monlevade, MG

2018

N972a Nunes, Felício Siqueira.
Alocação ótima de chaves em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística VNS [manuscrito] / Felício Siqueira Nunes. - 2018.

ix, 79f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia Elétrica. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Energia elétrica - Consumidores. I. Zvietcovich, Wilingthon Guerra. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 621.31

Catalogação: ficha.sisbin@ufop.edu.br

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica

UFOP

ATA DE DEFESA

Aos 13 dias do mês de Dezembro de 2018, às 15 horas, no bloco B-302 deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) **FELÍCIO SIQUEIRA NUNES**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: THAIS DE FÁTIMA ARAÚJO SILVA, JUAN CARLOS GALVIS MANSO E WILINGTHON GUERRA ZVIETCOVICH. O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: **ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CHAVES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A METAHEURÍSTICA VNS**. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela APROVAÇÃO do (a) candidato(a), com a nota média 8,5, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	**Nota**
Thais de Fátima Araújo Silva	8,5
Juan Carlos Galvis Manso	8,2
Wilingthon Guerra Zvietcovich	8,8
Média	8,5

João Monlevade, 13 de Dezembro de 2018.

Wilingthon Guerra Zvietcovich
Professor(a) Orientador(a)

Professor(a) Coorientador(a)

FELÍCIO SIQUEIRA NUNES
Aluno(a)

Juan Carlos Galvis Manso
Professor(a) Convidado(a)

Thais de Fátima Araújo Silva
Professor(a) Convidado(a)

"Um espírito nobre engrandece o menor dos homens"

– The Simpsons

Resumo

A maioria das falhas que ocorrem em sistemas elétricos é de natureza aleatória nas redes de distribuição. As agências reguladoras definem índices de confiabilidade para quantificar e avaliar a qualidade da distribuição de energia. A violação dos limites estabelecidos pode resultar em multas altíssimas para a distribuidora de energia. Assim, o problema de alocação de chaves nos sistemas de distribuição visa a melhora da possibilidade de reenergizar a maior quantidade de consumidores num menor tempo possível, através da transferência de carga para sistemas que não tiveram seu funcionamento comprometido. O problema de alocação de chaves é um problema de planejamento da operação dos sistemas de energia elétrica, de natureza combinatória e sujeito a restrições técnicas e operacionais que derivam em modelos complexos, difíceis de representar matematicamente. Este trabalho apresenta uma metodologia baseada em duas metaheurísticas, a GRASP e a VNS, para promover a alocação ótima de chaves na rede de distribuição, de modo a otimizar os processos de Restauração e Reconfiguração da rede elétrica. Visa-se, também, melhorar alguns parâmetros de qualidade do sistema, como o nível de tensão nas barras, o DEC (Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora), o número de chaveamentos e as perdas nas linhas do sistema. Para demonstrar a eficácia e flexibilidade do algoritmo proposto, realizaram-se testes em dois sistemas IEEE, de 33 e 69 barras, respectivamente.

Palavras-chaves: GRASP, VNS, Alocação de chaves, Reconfiguração, Restauração.

Abstract

Most of the failures that occur in electrical systems are of a random nature in the distribution networks . Violation of the established limits can result in very high fines for the energy distributor. Thus, the key allocation problem in the distribution systems is aimed at improving the possibility of re-energizing the largest number of consumers in the shortest possible time, by transferring the load to systems that have not been compromised. The key allocation problem is a problem of planning the operation of electric power systems, of combinatorial nature and subject to technical and operational constraints that result in complex models, difficult to represent mathematically. This work presents a methodology based on two metaheuristics, GRASP and VNS, to promote the optimal allocation of keys in the distribution network, in order to optimize the Restoration and Reconfiguration processes of the electric network. It is also intended to improve some parameters of quality of the system, such as the voltage level in the bus, the DEC (equivalent interruption duration per consumer unit), the number of switches and losses in the system lines. To demonstrate the effectiveness and flexibility of the proposed algorithm, tests were performed on two IEEE systems, 33 and 69 bus, respectively.

Keywords: GRASP, VNS, Switch allocation, Reconfiguration, Restoration.

Agradecimentos

Primeiramente à Deus por me dar saúde e sabedoria e permitir que conseguisse trilhar todo o meu caminho, no decorrer do curso, sem grandes contratempos e com muitas conquistas.

Aos meus pais, Luiz e Benvinda e à minha irmã, Taynara, que sempre estiveram ao meu lado, dando-me apoio incondicional, muito amor e compreensão durante todos esses anos.

À minha namorada, Luana, por todos esses anos de companheirismo e compreensão, e por cada dia me mostrar o quão linda é a vida.

Ao meu orientador, Prof. Wilingthon Guerra Zvietcovich, pela valorosa orientação prestada no desenvolvimento deste trabalho, pela amizade e pela grande ajuda e paciência que teve no decorrer da realização deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do ICEA-UFOP que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Ouro Preto pelo apoio dispensado ao longo destes anos de graduação.

Aos grandes amigos que aqui fiz e que levarei por toda a vida, pela amizade e os momentos agradáveis que desfrutamos juntos durante esses anos.

Lista de Abreviaturas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
SDEE - Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
AOC - Alocação Ótima de Chaves
PAC - Problema da Alocação de Chaves
GRASP - Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
AG - Algoritmo Genético
BT - Busca Tabu
BTR - Busca Tabu Reativo
SEP - Sistema Elétrico de Potência
NA - Normalmente Abertas
NF - Normalmente Fechadas
QEE - Qualidade da Energia Elétrica
DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
VTLD - Variação de Tensão de Longa Duração
VNS - Variable Neighborhood Search

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Chaves abertas para a rede virar radial - Inicial 46
Tabela 2 - Perdas de cada ramo do sistema 47
Tabela 3 - Ramos selecionados a partir do critério guloso 47
Tabela 4 - Chaves abertas para a rede virar radial - 1ª iteração 48
Tabela 5 - Perdas de cada ramo do sistema (2ª iteração) 48
Tabela 6 - Ramos selecionados a partir do critério guloso (2ª iteração) 49
Tabela 7 - Chaves abertas para a rede virar radial - 2ª iteração 49
Tabela 8 - Perdas de cada ramo do sistema (3ª iteração) 50
Tabela 9 - Ramos selecionados a partir do critério guloso (3ª iteração) 50
Tabela 10 - Chaves abertas para a rede virar radial - 3ª iteração.....50
Tabela 11 - Chaves abertas para a rede virar radial - Final 53
Tabela 12 - Dados da rede de 33 barras.....56

Tabela 13 - Resultados antes da falta 56
Tabela 14 - Resultados depois do reestabelecimento da falta 57
Tabela 15 - Resultados da reconfiguração.....59
Tabela 16 - Melhores soluções encontradas - 33 Barras.....59
Tabela 17 - Comparação entre a solução inicial e a melhor solução encontrada - 33 barras.....60
Tabela 18 - Dados do sistema de 69 barras.....62
Tabela 19 - Melhores soluções encontradas - 69 barras.....63
Tabela 20 - Comparação entre a solução inicial e a melhor solução encontrada - 69 barras.....64
Tabela 21 – Resultados da configuração inicial (1-6-9-12-15-18-21-22-25-29-33-34-35-36-37).....71
Tabela 22 – Resultados da melhor configuração (1-2-3-7-8-19-20-27-28-31-33-34-35-36-37).....73
Tabela 23 – Resultados da configuração inicial (1-4-9-13-17-21-24-27-28-31-34-36-42-47-51-53-56-62-66-68-70-71-72-73-74).....74
Tabela 24 – Resultados da melhor configuração (1-4-6-9-12-31-34-39-41-42-43-44-46-50-53-56-58-60-62-65-70-71-72-73-74).....77

Lista de figuras

Figura 1 – Sistema elétrico de potência (Fonte: www.researchgate.net) 8
Figura 2 – Modelo de uma subestação (Fonte: Silva (2002)).....9
Figura 3 – Subestação de distribuição (Fonte: www.celesc.com.br).....10
Figura 4 – Modelo de uma linha curta.....10
Figura 5 – Linhas de distribuição (Fonte: www.juara.mt.leg.br) 11
Figura 6 – Carga residencial (Fonte: imoveis.mitula.com.br).....12
Figura 7 – Chave Seccionadora Tripolar Manual (Fonte: www.rehtom.com.br) 13
Figura 8 – Modelagem de um regulador de tensão (Fonte: Autoria própria).....14
Figura 9 – Reguladores de tensão na rede (Fonte: www.adolphoeletricista.com.br).....14
Figura 10 – Modelo do capacitor shunt (Fonte: Autoria Própria).....15
Figura 11 – Banco de capacitores na rede de distribuição (Fonte: pt.dreamstime.com).....15
Figura 12 – Transformadores de distribuição (Fonte: www.portaleletricista.com.br).....16
Figura 13 – Diagrama geral da metodologia (Fonte: Autoria própria) 17
Figura 14 - Restauração de uma rede com 3 alimentadores (Fonte: (PRADO, 2013)).....19

Figura 15 – Configuração inicial para o sistema de 16 barras (Fonte: (LORENZETI, 2004)) 22
Figura 16 – Configuração do sistema de 16 barras após a reconfiguração (Fonte: (LORENZETI, 2004)) 23
Figura 17 – Subsistema para cálculo de corrente de carga (Fonte: Zvietcovich (2006)) 27
Figura 18 – Sistema exemplo de 4 barras (Fonte: Zvietcovich (2006)) 28
Figura 19 – Subsistema para cálculo de tensão nas barras (Fonte: Zvietcovich (2006)) 29
Figura 20 – Fluxograma do método de varredura (Fonte: Autoria própria) 30
Figura 21 – Fluxograma para o método de Newton-Raphson (Fonte: Autoria Própria) 34
Figura 22 – Pseudocódigo da versão básica da metaheurística GRASP (Fonte: (OLIVEIRA, 2011)) 36
Figura 23 – Pseudocódigo da fase construtiva do GRASP (Fonte: (OLIVEIRA, 2011)) 37
Figura 24 – Pseudocódigo da busca local do GRASP (Fonte: (OLIVEIRA, 2011)) 38
Figura 25 – Algoritmo BVNS (Fonte: (MLADENOVIĆ; HANSEN, 1997)) 40
Figura 26 - Cidades percorridas pelo caixeiro (Fonte: Autoria Própria) 41
Figura 27 – Sistema de 14 barras malhado (Fonte: (OLIVEIRA, 2011)) 45
Figura 28 – Sistema de 14 barras malhado com 1 laço a menos (Fonte: (OLIVEIRA, 2011)) 47
Figura 29 – Sistema de 14 barras malhado com 2 laços a menos (Fonte: (OLIVEIRA, 2011)) 48
Figura 30 – Sistema de 14 barras radial (Fonte: (OLIVEIRA, 2011)) 50
Figura 31 – Sistema de 14 barras – Primeira iteração da fase de busca local do GRASP (Fonte: (OLIVEIRA, 2011)) 51
Figura 32 – Sistema de 14 barras radial com valor ótimo de perdas ativas (Fonte: (OLIVEIRA, 2011)) 51
Figura 33 – Sistema de 33 barras (Fonte: (ZVIETCOVICH, 2006)) 54
Figura 34 – Rede de 33 barras durante a falta (Fonte: Autoria Própria) 56
Figura 35 – Rede de 33 barras durante a restauração (Fonte: Autoria Própria) 56
Figura 36 - Rede de 33 barras após a reconfiguração (Fonte: Autoria própria) 57
Figura 37 - Gráfico com resultados do sistema de 33 barras (Fonte: Autoria própria) 60
Figura 38 – Sistema de 69 barras (Fonte: Autoria Própria) 61
Figura 39 - Gráfico com resultados do sistema de 69 barras (Fonte: Autoria própria) 64

Sumário

1. Introdução 1

1.1. Justificativa 2

1.2. Objetivos 3

1.2.1. Objetivo geral 3

1.2.2. Objetivos específicos 3

2. Revisão Bibliográfica 4

3. Descrição dos componentes do sistema de distribuição 8

3.1. Descrição dos Sistemas de Distribuição 8

3.1.1. Descrição da Subestação 9

3.1.2. Descrição das Linhas 10

3.1.3. Descrição das Cargas 11

3.1.4. Descrição das Chaves 13

3.1.5. Descrição dos reguladores de tensão 14

3.1.6. Descrição dos capacitores shunt 15

3.1.7. Descrição dos transformadores 16

4. Metodologia e formulação dos problemas 17

4.1. Restauração de sistemas de distribuição 17

4.1.1. O problema da restauração de redes elétricas 17

4.1.2. Indicadores de qualidade de continuidade – DEC e FEC 19

4.1.3. Variações de tensão de longa duração – VTLDs 20

4.2. Reconfiguração de sistemas de distribuição 22

4.3. Alocação de chaves em sistemas de distribuição 24

4.3.1. O problema de alocação de chaves 24

4.4. Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição 26

4.4.1. Método de Varredura 27

4.4.1.1. Processo *Backward* 27

4.4.1.2. Processo *Forward* 28

4.4.2. Método de Newton-Raphson 31

5. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP 35

5.1. VNS – *Variable Neighborhood Search* 38

5.1.1. Fundamentos da metaheurística VNS 39

5.1.2. VNS Básica (BVNS) 39

5.2. Aplicação da metaheurística GRASP ao problema do caixeiro viajante 41

5.3. Problema de reconfiguração de redes elétricas utilizando o GRASP 43

5.3.1. Exemplo da aplicação para reconfiguração de redes elétricas 45

5.4. Problema de alocação de chaves em redes de distribuição usando VNS 52

6. Resultados 54

6.1. Rede de 33 barras 54

6.2. Rede de 69 barras 61

7. Conclusões e trabalhos futuros 65

Referências Bibliográficas 67

Apêndice A – Tabelas utilizadas para a formulação dos gráficos de resultados .. 70

1. Introdução

A eletricidade é algo indispensável para a sociedade nos dias de hoje. Hospitais, escolas, universidades, indústrias, e várias outras instituições dependem daquela para o seu normal funcionamento, sendo necessário que haja uma infraestrutura eficiente e confiável do sistema de energia elétrica. Este é composto por três grandes componentes – Geração, Transmissão e Distribuição de energia elétrica. Neste estão conectados quase todos os consumidores e frequentemente ocorrem interrupções de energia (faltas). Sendo que, 70% do tempo total das interrupções em todo o sistema elétrico é associado às contingências no sistema de distribuição (BILLINTON; ALLAN, 1994). Isto mostra que a confiabilidade deste sistema é de total relevância para que os consumidores sejam reestabelecidos ante interrupções no fornecimento de energia, o mais rápido possível.

Uma vez reestabelecida uma parte dos consumidores (transferindo parte interrompida para outros alimentadores) é necessário observar os níveis de tensão. Este aspecto é regulamentado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

As concessionárias de energia elétrica utilizam um modelo de gestão no qual o foco principal é a produtividade e o lucro. Sendo assim, melhorar a confiabilidade e a performance dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) é o ideal para garantir um bom desempenho no que se diz respeito às receitas da empresa. Uma maneira eficaz de se obter melhorias nesses índices é através de obras que visem aprimorar a rede de distribuição, como: “instalação de novos equipamentos, realocação dos equipamentos presentes na rede para locais onde se produzirá maior impacto na confiabilidade e ações visando a automação do sistema de distribuição” (ASSIS, 2014).

Para isto, através de uma Alocação Ótima de Chaves (AOC), consegue-se aumentar a confiabilidade do sistema reduzindo gastos com perdas elétricas e evitando o investimento em novos equipamentos.

Para a resolução do Problema da Alocação de Chaves (PAC), primeiramente deve-se entender o funcionamento dos métodos de restauração e reconfiguração de SDEE, visto que, sem esses métodos, há uma inviabilização na execução do algoritmo responsável pela alocação dos dispositivos seccionadores na rede de distribuição de energia elétrica.

Sendo assim, neste trabalho também serão abordados esses dois métodos supracitados (restauração e reconfiguração de redes de distribuição), analisando-se as principais características de cada um, e procurando compreender e implementar, de forma mais ótima possível, o funcionamento destes métodos.

Os modelos de otimização utilizados neste trabalho são baseados no uso de metaheurísticas para promover a resolução dos problemas otimizatórios. Na resolução dos problemas de restauração e reconfiguração dos sistemas de distribuição usa-se da metaheurística GRASP. Enquanto que na resolução do problema de alocação de chaves nas redes de distribuição, usa-se da metaheurística VNS, que também é usada no processo de busca local do GRASP.

Assim sendo, este trabalho visa a implementação de uma metodologia otimizatória para promover a resolução do Problema de Alocação de Chaves (PAC), num sentido de se promover também uma melhora na resolução dos problemas de restauração e reconfiguração de redes elétricas.

1.1. Justificativa

A regulamentação sobre qualidade de energia é cada vez mais exigente. Cabe à ANEEL fiscalizar as empresas de distribuição de energia elétrica de forma que as mesmas cumpram com os parâmetros de qualidade de energia elétrica (DEC, FEC e VTLDs) durante sua operação na rede. Isto cria necessidades de empresas e pesquisadores em propor técnicas para aumento da confiabilidade do SDEE, que, segundo (BILLINTON; ALLAN, 1994), é a capacidade que o sistema tem de fornecer energia com um número mínimo de interrupções. Para se melhorar esta confiabilidade existem várias maneiras, tais como:

- Alocação de chaves de manobra;
- Procedimentos de operação do sistema;
- Alocação de equipamentos de proteção;
- Procedimentos de manutenção de rede.

A alocação de equipamentos de proteção e chaves de manobra no SDEE desempenham um papel muito importante na melhora da confiabilidade do sistema. Estas chaves podem ser usadas para a minimização das perdas por meio da reconfiguração da rede, isolamento e identificação das faltas, transferência de carga entre alimentadores, durante uma falta, por exemplo, diminuindo-se assim, o número de usuários sem energia durante tal período.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral a aplicação de uma metodologia heurística chamada Busca em Vizinhança Variável – VNS (do Inglês: Variable Neighborhood Search) para alocação ótima de chaves em um sistema de distribuição de energia elétrica, visando reduzir o número de chaveamentos, melhorar os níveis de tensões, reduzir as perdas e reduzir a potência não distribuída no tempo de permanência da falta. Desta forma, será melhorada a confiabilidade do sistema.

Neste contexto, o foco deste trabalho é promover uma alocação ótima de chaves em redes de distribuição de forma que seja possível uma melhor resolução dos problemas de restauração e reconfiguração destas redes. Visando reestabelecer, assim, a energia de uma parte dos consumidores que foram afetados por uma interrupção, transferindo-os para outros alimentadores, visando-se também reduzir as perdas elétricas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Fazer uma revisão bibliográfica dos trabalhos que tratam temas relacionados à alocação de chaves em sistemas de distribuição de energia elétrica, reconfiguração de redes de distribuição, restauração de sistemas de distribuição, metaheurísticas GRASP e VNS;
- Desenvolver e implementar um programa de fluxo de carga para sistemas de distribuição e sistemas malhados;
- Modelar o problema de restauração de redes de distribuição, considerando parâmetros de interesse das empresas concessionárias, das agências reguladoras e dos consumidores;
- Utilização das metaheurísticas GRASP ao problema de reconfiguração e VNS ao problema de alocação de chaves nas redes de distribuição de energia elétrica;

2. Revisão Bibliográfica

Encontram-se na literatura diversos trabalhos sobre o problema de Alocação de Chaves em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Assim como outros que tratam da restauração e reconfiguração do sistema de distribuição. Sendo estes temas relacionados com este trabalho de conclusão de curso, no qual a alocação ótima de chaves é o foco principal. A seguir são apresentados os trabalhos relevantes e que contribuíram nesta pesquisa.

Billinton e Jonnavithula (1996) apresentam uma formulação para a alocação de dispositivos seccionadores em sistemas de distribuição radiais, considerando os custos da manutenção e de investimentos. A solução metodológica do problema é baseada em determinar o número de chaves a serem alocadas e a localização das mesmas, com o objetivo de minimizar os custos da interrupção para os consumidores. Este problema é solucionado utilizando-se uma técnica de recozimento simulado.

Neto (2006) desenvolve uma metodologia para a alocação de chaves em SDEE utilizando ferramentas de otimização multicritério para atender a diferentes fatores de desempenho. A metodologia utilizada é dividida em três partes, como visto a seguir.

- A primeira parte é responsável pela reconfiguração do SDEE, que tem como função estabelecer os pontos candidatos à alocação das chaves automatizadas. (Módulo de Reconfiguração);
- A segunda parte calcula para estes pontos, encontrados na parte anterior, o impacto causado pela alocação de uma chave nos índices de confiabilidade do sistema. (Módulo de Confiabilidade);
- A terceira e última parte é responsável pelo cálculo da ordem de hierarquização das posições candidatas a receberem uma chave. (Módulo Multicritério).

Essa metodologia foi aplicada em um sistema de teste da literatura que possui três alimentadores e um sistema composto por dois alimentadores baseados em dados de consumidores reais. Os resultados mostraram a viabilidade desta metodologia e os ganhos introduzidos ao sistema após a execução da mesma.

Zvietcovich (2006) desenvolve uma metaheurística Busca de Vizinhança Variável para a reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica, com o objetivo principal de reduzir as perdas de potência ativa do sistema. No mesmo trabalho, verificou-se que o método utilizado apresentou grande eficiência na resolução do problema, fornecendo bons resultados nas redes

testadas. O problema de reconfiguração de SDEE é de extrema importância para a resolução do PAC.

Sperandio (2008) desenvolve uma metodologia para o planejamento da automação de sistemas de manobra em redes de distribuição de grande porte. A metodologia se baseia em definir prováveis posições para os dispositivos seccionadores na rede e então determinar a combinação destas posições de forma a minimizar a energia não suprida aos consumidores e o número de chaveamentos. A solução deste problema de otimização se dá através de dois métodos de otimização: o método de programação inteira Branch-and-Bound e uma metaheurística, o Algoritmo Genético (AG), a fim de comparar o desempenho entre os dois. Para sistemas de grande porte, o AG se mostrou mais eficaz na resolução do problema de alocação de chaves. Enquanto o algoritmo Branch-and-Bound foi eficiente apenas em sistemas menores.

Para a resolução do problema de restauração de redes de distribuição de energia elétrica, (ZVIETCOVICH; KAGAN, 2008) utilizam um algoritmo evolucionário chamado de Algoritmo Memético. Este método utiliza o AG como base, porém, com a diferença de que, o primeiro, utiliza o conceito de “evolução cultural”, onde, no decorrer da existência de um indivíduo numa dada população, sua adaptabilidade é modificada. Utilizou-se neste trabalho um sistema de 202 barras para os testes. O algoritmo usado na solução deste problema utiliza uma função que reflete através de ponderações o grau de importância de cada um dos objetivos.

Um algoritmo GRASP também é apresentado em (BENAVIDES et al., 2009) para a solução do problema de alocação automática de chaves em redes elétricas, visando melhorar sua confiabilidade. Benavides et al. (2009) também combina a solução da alocação de dispositivos de seccionamento com o problema da reconfiguração ótima dos SDEE. Este trabalho realiza uma comparação entre a metaheurística GRASP e a metaheurística Busca Tabu (BT), aplicando-as em um conjunto de instâncias conhecidas da literatura e um conjunto de instâncias geradas sinteticamente. De acordo com Benavides et al. (2009), a metaheurística GRASP apresentou melhores resultados em comparação com a BT.

Oliveira et al. (2009) apresenta um algoritmo para a resolução do problema de reconfiguração ótima de SDEE, com o objetivo principal de reduzir as perdas totais de energia considerando-se diferentes níveis de carregamento da rede. A resolução deste problema se dá a partir de um algoritmo de passo a passo, no qual cada passo corresponde ao Método Primal-Dual de Pontos Interiores. Utiliza-se também, os multiplicadores de Lagrange para compor o índice de sensibilidade no processo de reconfiguração.

Romero (2009) propõe uma técnica para melhorar a confiabilidade de SDEEs, alocando-se chaves de manobra automáticas para a restauração desses sistemas. Esse problema de alocação é modelado como um problema de programação linear restrito, com uma função multiobjetivo. Para tal metodologia, utiliza-se um algoritmo de Busca Tabu Reativa (BTR) para resolver tanto o problema da alocação das chaves quanto o problema da restauração de redes de distribuição de energia elétrica. Para introduzir a metodologia utilizada, apresentam-se os aspectos teóricos dos problemas, o sistema de codificação que representa soluções potenciais para o problema, e permite que o mesmo seja resolvido através de metaheurísticas.

Uma metodologia de abordagem tanto para a resolução do problema de restauração quanto para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é desenvolvida em (BARBOSA, 2012). Barbosa (2012) afirma que

> na reconfiguração, a solução maximiza o compromisso entre a energia disponível e a demanda no sistema considerando as perdas técnicas, uniformiza a distribuição do carregamento, minimiza o desvio de tensão nas barras, dentre outros objetivos e, em consequência, promove melhores condições operativas da rede. Na restauração, prioriza-se a configuração de rede que possa ser realizada no menor tempo possível, com reenergização do maior número de cargas sem sobrecargas, similar à configuração pré-falta e orientada à disponibilidade de estruturas de redundância.

Assis et al. (2014) propõem uma metodologia otimizada para a alocação de chaves em redes de distribuição radiais. A alocação de chaves é vista como uma possível estratégia para melhorar a confiabilidade do sistema, permitindo que a reconfiguração e a restauração do sistema isolem as faltas e reforneça a energia às áreas afetadas. Este trabalho visa, também, a redução de custos com a rede na qual a metodologia é aplicada, em relação à alocação das chaves e à energia não entregue aos consumidores. A solução deste problema utiliza conceitos de algoritmo memético com uma população estruturada.

Assis (2014) traz como proposta a instalação das chaves seccionadoras em locais apropriados da rede com o objetivo de otimizar a confiabilidade do sistema, reduzindo-se o tempo da falta de energia para os consumidores. Este problema de otimização também é resolvido utilizando-se conceitos de Algoritmo Memético juntamente com uma população estruturada. Este trabalho usa com função objetivo a minimização do custo da energia não entregue aos consumidores, fluxo de carga nos componentes da rede e o custo com a alocação dos dispositivos.

Uma metodologia baseada na formulação de modelos matemáticos convexos e resolvida utilizando a metaheurística GRASP é apresentada em (AMÉZQUITA, 2014). Esta metodologia tem como objetivo solucionar o problema de alocação ótima de chaves de interconexão em SDEEs. Ao se alocar as chaves, o algoritmo fornece uma configuração da rede que gera um esquema de restauração eficiente que, em caso de uma falta permanente, possa isolar a zona afetada pela falta e restaurar o serviço elétrico da maior quantidade possível de consumidores. Além da alocação das chaves, o objetivo central do trabalho é também melhorar a confiabilidade do sistema e reduzir as perdas de potência ativa e melhorar probabilisticamente os índices de continuidade da duração e da frequência das interrupções quando o sistema opera em condições normais. Para teste deste algoritmo foram utilizados dois sistemas teste, um de 43 e outro de 136 barras. Feitos os testes, observou-se que o ponto de operação da rede é otimizado, além de se manter os índices de confiabilidade abaixo dos limites estabelecidos pelas agências reguladoras ainda no caso que os parâmetros sob incerteza atinjam seus máximos históricos, ou seja, o modelo aqui utilizado produz uma solução robusta desde o ponto de vista da confiabilidade.

Recentemente Franco et al. (2016) apresentam uma nova metodologia para o problema de alocação ótima de chaves em SDEEs. Utilizam um algoritmo GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) para definir a localização de um número de dispositivos seccionadores a fim de se melhorar os seguintes subproblemas:

- A reconfiguração ótima dos SDEE;
- A restauração ótima dos SDEE.

A função objetivo utilizada neste referido trabalho é a redução dos custos da energia elétrica total não suprida aos consumidores, computada após o serviço de restauração, além dos custos com as perdas de energia no ano e custos de investimento com o número de dispositivos instalados.

3. Descrição dos componentes do sistema de distribuição

3.1. Descrição dos Sistemas de Distribuição

As redes de distribuição têm como objetivo interligar o sistema de transmissão aos consumidores finais. Estes podem ser supridos ou pela rede de distribuição primária (média tensão), ou pela rede de distribuição secundária (baixa tensão).

A tensão vinda da rede de transmissão passa por uma redução na subestação de transmissão, passando para valores na faixa de 34 a 138kV. Já na subestação de distribuição, ocorre uma nova redução. Nesta, os valores das tensões passam para a faixa entre 4 e 34kV, e, mais comumente utilizada nos sistemas de distribuição do país, 13,8kV. As linhas com esses níveis de tensão são consideradas as linhas primárias. Já as linhas secundárias apresentam níveis de tensão entre 110 e 220V.

Um sistema de distribuição é composto basicamente por subestação de distribuição, linhas elétricas, chaves de seccionamento e proteção, reguladores de tensão, bancos de capacitores e transformadores.

À continuação serão apresentados os diferentes componentes de um sistema de distribuição, visando ser considerados na análise de fluxo de carga, quando o sistema está operando em condições normais (regime permanente).

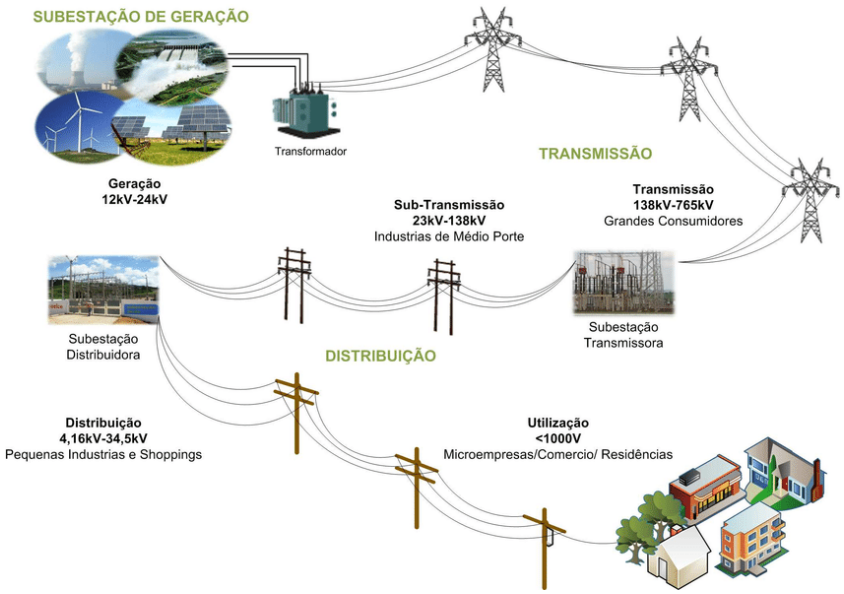

Figura 1 – Sistema elétrico de potência
(Fonte: www.researchgate.net)

3.1.1. Descrição da Subestação

Uma possível definição para a subestação é a interconexão de dispositivos de média e alta tensão que têm como objetivo promover a transformação, regulação, interconexão e proteção do sistema. Estes equipamentos, empregados em seu conjunto, funcionam de modo a controlar e monitorar o fluxo de energia em um SEP (Sistema Elétrico de Potência) e garantir a segurança de sua operação.

A subestação pode estar relacionada a uma usina geradora de energia elétrica ou à união entre os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. A principal função da subestação de distribuição é reduzir a tensão para um valor adequado ao fornecimento dos consumidores, além de possuir diferentes equipamentos para uma operação de proteção adequada.

De acordo com (SILVA, 2002), na modelagem da subestação, os dispositivos mais usados são os seguintes: barras singelas, disjuntores singelos, barra principal e de transferência, dupla principal e de transferência, disjuntor e meio, disjuntor 1 1/3, em anel ou alguma combinação destas anteriores. A Figura 2 mostra um exemplo de modelo de subestação e a Figura 3 mostra uma subestação de distribuição. Neste trabalho, a subestação é modelada como uma fonte infinita, localizada na barra de referência do sistema.

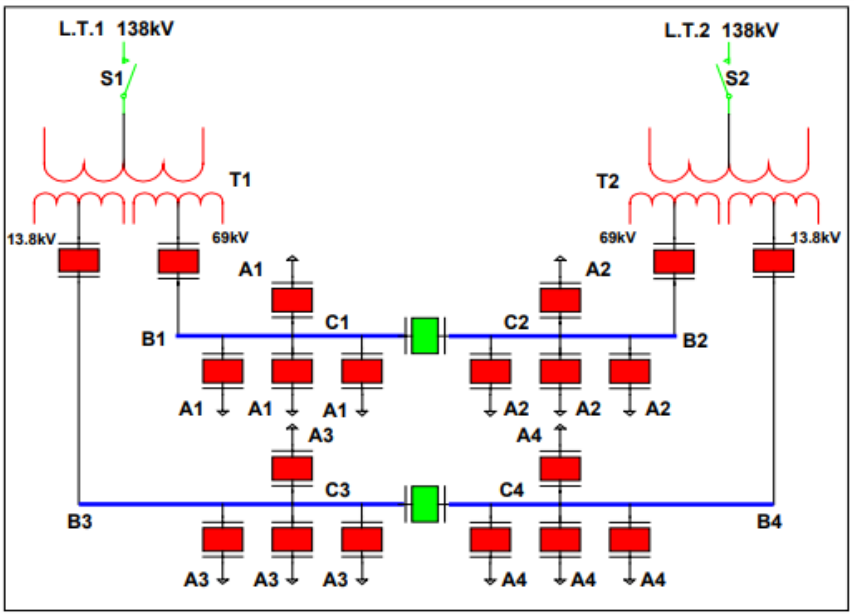

Figura 2 – Modelo de uma subestação
(Fonte: Silva (2002))

Figura 3 – Subestação de distribuição
(Fonte: www.celesc.com.br)

3.1.2. Descrição das Linhas

As linhas elétricas levam a energia desde a subestação até os consumidores, utilizando fios e postes. Elas atravessam avenidas, ruas, parques, estendendo-se por todas as cidades onde se concentram quase todos os consumidores.

O comprimento dos alimentadores de sistemas de distribuição de energia elétrica pode variar, aproximadamente, entre 5 e 40km (STEVENSON, 1986). Estes valores levam ao modelo de linhas curtas para representar as redes de distribuição. Neste modelo apenas a resistência R e a reatância indutiva em série X_L (wL) são consideradas como mostrado na Figura 4. Esses respectivos valores são fornecidos pelos fabricantes dos condutores, dados, respectivamente em Ω/km ou Ω/ft, em termos de resistência e reatância. A Figura 5 mostra algumas linhas de distribuição.

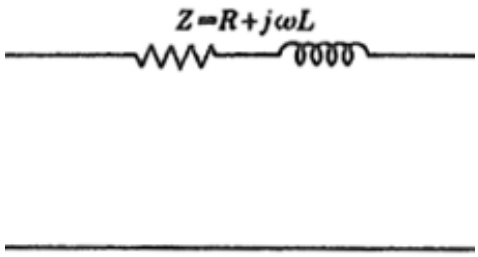

Figura 4 – Modelo de uma linha curta

(Fonte: Stevenson (1986))

Figura 5 – Linhas de distribuição
(Fonte: www.juara.mt.leg.br)

3.1.3. Descrição das Cargas

As cargas se referem aos consumidores ligados na média tensão, na qual se tem consumidores industriais, comerciais e prédios públicos, e na baixa tensão, na qual estão os consumidores de pequenas indústrias e comércios, e, principalmente, residenciais, como pode-se ver na Figura 6.

Quanto aos modelos utilizados para representar os consumidores, existem três diferentes tipos: Estático, Dinâmico e Híbrido (VISCONTI, 2010). Neste trabalho, tratar-se-á apenas do modelo Estático, visto que é o modelo mais comum e utilizado na literatura. Este modelo é subdivido em: Impedância constante, Corrente constante, Potência constante, Polinomial e Exponencial. Os dois últimos não são muito utilizados, portanto, descrever-se-á os três primeiros modelos supracitados.

- Modelo Impedância Constante (Z): este modelo expressa a variação da potência proporcionalmente ao quadrado de desvios da tensão V de seu ponto de operação pré-distúrbio V_O, como mostrado nas Equações (3.1) e (3.2).

$$P = P_O \left(\frac{V}{V_O}\right)^2 \tag{3.1}$$

$$Q = Q_O \left(\frac{V}{V_O}\right)^2 \tag{3.2}$$

Onde:

P é a potência ativa expressa em MW;

Q é a potência reativa expressa em MVar;

V é a tensão expressa em Volt (V);

P_O, Q_O e V_O são, respectivamente, os valores da potência ativa, reativa e tensão em regime permanente antes do distúrbio.

- Modelo de Corrente Constante (I): este modelo expressa variações na potência proporcionais à desvios de tensão, de acordo com as Equações (3.3) e (3.4), a seguir.

$$P = P_O\left(\frac{V}{V_O}\right) \tag{3.3}$$

$$Q = Q_O\left(\frac{V}{V_O}\right) \tag{3.4}$$

Onde os parâmetros são os mesmos que para o modelo de impedância constante.

- Modelo de Potência Constante (P): este modelo expressa o valor da potência independente de variações de tensão, de acordo com as Equações (3.5) e (3.6), para qualquer instante de tempo.

$$P = P_O \tag{3.5}$$

$$Q = Q_O \tag{3.6}$$

Os parâmetros também são os mesmos que para o modelo de impedância constante.

Figura 6 – Carga residencial
(Fonte: imoveis.mitula.com.br)

3.1.4. Descrição das Chaves

As chaves são elementos da rede de distribuição que impedem ou permitem a passagem de corrente na linha onde se encontram alocadas. São utilizadas para operação (proteção) e manutenção das redes elétricas e modeladas como elementos binários, ou seja, elementos que possuem apenas dois estados de funcionamento (aberta ou fechada). Elas podem ser dos seguintes tipos:

- Normalmente abertas (NA): chaves que se encontram no estado de funcionamento natural abertas, ou seja, impedem a passagem da corrente pela linha. Quando elas mudam o seu estado de funcionamento, ou seja, quando são fechadas, permitem a passagem de corrente pela linha e são usadas na conexão e transferência de cargas entre os alimentadores.
- Normalmente fechadas (NF): chaves que se encontram no estado de funcionamento natural fechadas, ou seja, permitem a passagem da corrente pela linha. Quando elas mudam o seu estado de funcionamento, ou seja, quando são abertas, impedem a passagem de corrente pela linha e são usadas no isolamento de faltas e proteção da rede.

A Figura 7 mostra uma chave seccionadora, que possui o estado NF e tem como função a isolação de faltas, sendo também usadas na transferência de cargas e na reconfiguração da rede.

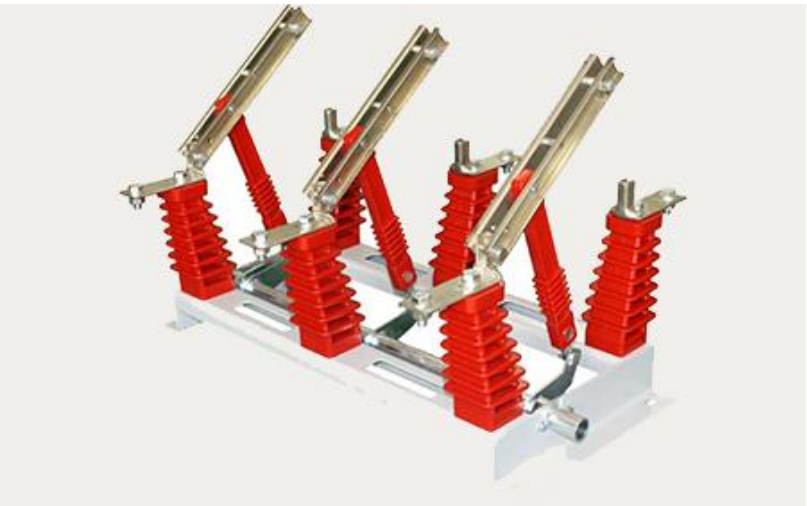

Figura 7 – Chave Seccionadora Tripolar Manual
(Fonte: www.rehtom.com.br)

3.1.5. Descrição dos reguladores de tensão

O nível de tensão ao longo dos alimentadores é um parâmetro importante para a operação da rede elétrica, pois deste dependerá a tensão de suprimento dos consumidores. Este parâmetro diz respeito à Qualidade da Energia Elétrica (QEE). De acordo com o instante do dia (hora de ponta e hora fora de ponta), pode ocorrer uma alteração da demanda pela energia, aumentando ou diminuindo o número de consumidores conectados à rede. Assim sendo, faz-se necessária a regulação de tensão através de equipamento próprio para esta finalidade.

Os reguladores de tensão podem ser capacitores shunt ou transformadores que agem na rede compensando a tensão automaticamente, para assim atender às especificações dos equipamentos dos consumidores ligados à mesma. Os reguladores ajustáveis são modelados como autotransformadores que contém um tap central regulável. Os mesmos são modelados como uma impedância em série com um transformador de tap regulável, ligado entre duas barras do sistema. A Figura 8 mostra como é esta modelagem. E a Figura 9 mostra esses reguladores na rede.

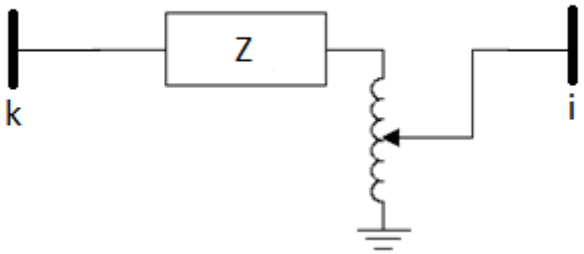

Figura 8 – Modelagem de um regulador de tensão
(Fonte: Autoria própria)

Figura 9 – Reguladores de tensão na rede
(Fonte: www.adolphoeletricista.com.br)

3.1.6. Descrição dos capacitores shunt

Como já mencionado, os níveis de tensão ao longo dos alimentadores são importantes na QEE. Além de reguladores para melhorar estes níveis, são utilizados os capacitores shunt, pois eles são de baixo custo e amplamente utilizados pelas empresas distribuidoras.

Os bancos de capacitores conectados às redes de distribuição alteram o fator de potência nas linhas da mesma, a partir da compensação de energia reativa das cargas. Gerando-se, assim, uma grande melhora no perfil de tensão da rede, e, consequentemente, uma melhora na qualidade de energia da mesma.

Outra importante função dos mesmos é a mudança de fase entre a tensão das barras e a corrente das linhas, pois os capacitores fazem com que este ângulo de fase sofra alterações, que dependem do valor da capacitância conectada à rede. Os capacitores shunt são modelados de acordo com a Figura 10, a seguir, onde b_k é a susceptância capacitiva. Já a Figura 11 mostra um banco de capacitores conectado à rede de distribuição.

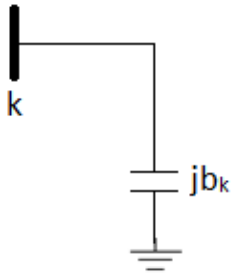

Figura 10 – Modelo do capacitor shunt
(Fonte: Autoria Própria)

Figura 11 – Banco de capacitores na rede de distribuição
(Fonte: pt.dreamstime.com)

3.1.7. Descrição dos transformadores

Os transformadores de distribuição, mostrados na Figura 12, são utilizados com o objetivo de reduzir a tensão primária de distribuição, que na maioria dos casos apresenta um valor de 13,8kV, para uma tensão secundária de distribuição, com valores de 220/127V ou 380/220V.

Os transformadores possuem proteção contra raios e sobrecorrentes através de para-raios e chaves fusíveis que exercem sua proteção em seu lado primário.

A potência comercial dos transformadores de distribuição é padronizada, e abrange os seguintes valores: 10, 15, 30, 45, 75, 112.5 e 150 kVA (KAGAN et al., 2005).

Figura 12 – Transformadores de distribuição
(Fonte: www.portaleletricista.com.br)

4. Metodologia e formulação dos problemas

O diagrama da figura a seguir apresenta o problema abordado neste trabalho de forma geral. Através do mesmo pode-se ver que, para a implementação do Problema de Alocação de Chaves, primeiramente tem-se que implementar os problemas de Restauração e Reconfiguração dos sistemas elétricos de Distribuição. Assim sendo, a seguir são apresentados todos os problemas abordados neste trabalho.

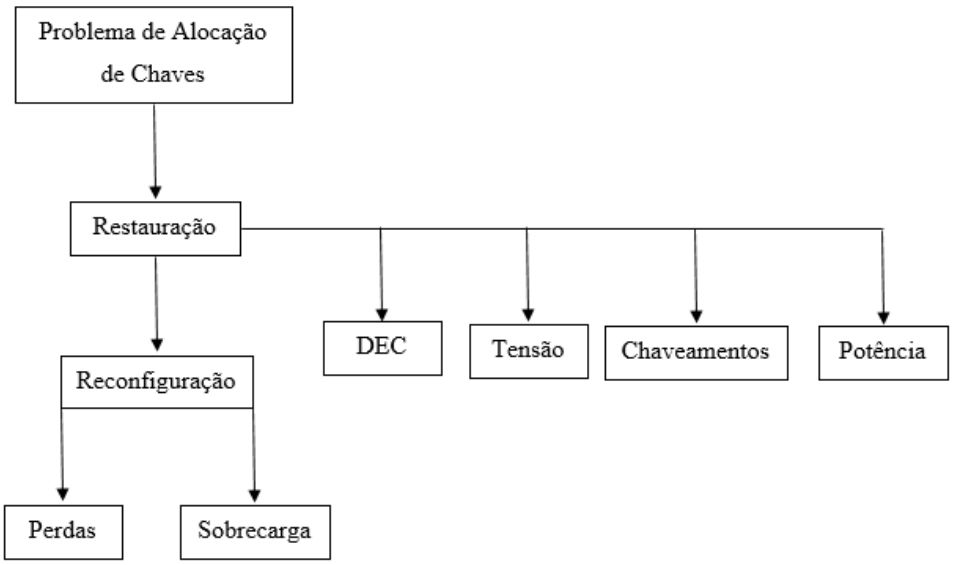

Figura 13 – Diagrama geral da metodologia
(Fonte: Autoria própria)

4.1. Restauração de sistemas de distribuição

4.1.1. O problema da restauração de redes elétricas

Quando ocorre uma falta ou curto-circuito em algum ponto do sistema de distribuição, cabe à distribuidora de energia elétrica identificar a região na qual ocorreu o problema, ou seja, identificar o conjunto de cargas que foram desenergizadas pela atuação dos dispositivos de proteção a montante do defeito.

A próxima etapa para a resolução deste defeito é a localização da seção ou bloco no qual ocorreu a falta, e isolá-lo do resto da região afetada. Para localizar este bloco pode-se utilizar de softwares interligados ao sistema central da distribuidora, ou realizar uma busca visual ao longo da rede.

A última etapa deste processo de restauração da rede consiste em apresentar uma ou mais propostas de reestabelecimento que restaure o maior número possível de consumidores afetados pela falta (NETO, 2011). Após ter-se estabelecido todo o planejamento das manobras a serem realizadas, o operador do sistema pode realizá-las de forma remota, caso a rede contenha dispositivos telecomandados, ou pode coordenar as manobras a serem executadas em campo. Para se obter este planejamento das manobras, as distribuidoras de energia elétrica contam com o auxílio de algum software que promova a restauração da rede, realizando todos os cálculos necessários para a resolução do problema.

Assim sendo, um software que funcione de forma eficaz, gerando os melhores resultados, com um tempo de processamento ótimo, para a resolução do problema de restauração de redes elétricas é desejável para sua implementação pelas distribuidoras de energia elétrica. Visto isso, a seguir é mostrado um algoritmo que apresenta a resolução desde problema.

De acordo com (ZVIETCOVICH; KAGAN, 2008), num contexto do mercado de energia elétrica, para a resolução do problema de restauração de redes, considera-se os sistemas de distribuição em casos de interrupção do fornecimento de energia, onde o principal objetivo é elaborar planos para reestabelecer o fornecimento da mesma nas áreas interrompidas.

Prado (2013) define que a restauração da rede elétrica consiste em, ao se localizar e isolar o setor no qual houve a falta, deve-se reconfigurar o sistema através de aberturas e fechamentos de chaves de interconexão, de modo a atender o maior número possível de consumidores que se encontram com fornecimento de energia interrompido.

Para melhor exemplificar a funcionalidade da restauração de redes, a Figura 14 traz uma pequena rede, constituída por três alimentadores, na qual os retângulos representam as fontes de energia, os círculos indicam os setores, que são conjuntos de barras conectadas por linhas sem a presença de chaves, as linhas sólidas indicam chaves NF e as linhas tracejadas, chaves NA.

Pela mesma figura, percebe-se que ocorre uma falta no setor 4. Assim sendo, este setor deve ser isolado do restante do sistema, portanto, as chaves A e B são abertas, isolando o mesmo. Porém, ao fazer isto, os setores 7 e 8 também ficarão isolados do sistema, pois são alimentados pelo alimentador 1, ligados através do setor 4, que sofreu a falta.

Uma possível configuração que permite que a energia seja restaurada para estes dois setores seria o fechamento da chave C, ligando estes dois setores ao alimentador 3.

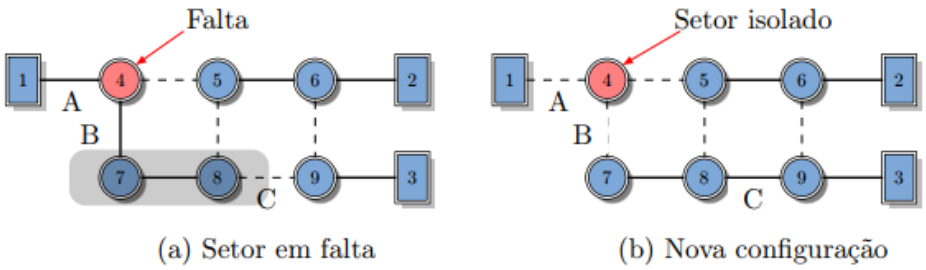

Figura 14 - Restauração de uma rede com 3 alimentadores
(Fonte: (PRADO, 2013))

Ainda segundo (PRADO, 2013), os principais objetivos da restauração de redes são:

- Reduzir o número de consumidores sem o fornecimento de energia, através da realocação dos mesmos para outros alimentadores;
- Reduzir o número de chaveamentos;
- Garantir que não haja sobrecarga em nenhuma parte da rede, além de reduzir as perdas totais e as quedas de tensão;
- Manter o formato radial do sistema.

4.1.2. Indicadores de qualidade de continuidade – DEC e FEC

Existem várias definições no que se diz respeito à qualidade da energia elétrica. Porém, a maioria, senão todas, as definições existentes dizem respeito às formas de onda da tensão e da corrente do sistema elétrico. Num contexto geral, quanto mais a onda, seja ela de tensão ou corrente, apresente uma forma próxima de uma onda senoidal pura, apresentando frequência e amplitude constantes, melhor é a qualidade da energia deste sistema.

Alguns dos principais indicadores de qualidade de continuidade são o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). Ambos os indicadores analisam a qualidade da continuidade do fornecimento de energia no que se diz respeito às interrupções que ocorrem na rede, sejam elas ocasionadas por defeitos na mesma, necessitando-se assim de manutenção corretiva, ou devido à manutenção preventiva. (KAGAN et al., 2009).

Ao observar um certo grupo de consumidores num dado intervalo de tempo especificado, o DEC pode ser definido pelo tempo médio de interrupção que afetou o cliente durante o período observado. Sua formulação matemática é dada pela Equação (4.1) (KAGAN et al., 2009).

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{N} C_a(i)t(i)}{C_c} \tag{4.1}$$

Onde:

C_a: número de consumidores que tiveram seu fornecimento interrompido devido à contingência;

t: duração da interrupção devido à contingência;

C_c: número total de consumidores que compõem o grupo de consumidores observado.

De forma análoga, para um mesmo grupo de consumidores, o FEC pode ser definido pelo número médio de interrupções sofridas por um dado consumidor durante o período pelo qual o grupo foi observado. Sua formulação matemática é dada pela seguinte equação (KAGAN et al., 2009).

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{N} C_a(i)}{C_c} \tag{4.2}$$

As variáveis utilizadas nesta equação são as mesmas utilizadas na equação para o cálculo do DEC. Para a análise da evolução da qualidade do fornecimento de energia, esses dois indicadores devem ser analisados em conjunto e fornecem informações bastante satisfatórias em relação à confiabilidade do SDEE. (KAGAN et al., 2009).

4.1.3. Variações de tensão de longa duração – VTLDs

As VTLDs são variações na tensão do sistema, sejam elas para valores maiores ou menores que a tensão nominal do mesmo, que ocorrem por um período superior a um minuto. Essas variações podem estar associadas a sobretensões, subtensões e a faltas na rede elétrica (PAULILO; TEIXEIRA, 2013).

Sobretensão pode ser definida como um aumento no valor eficaz da tensão CA maior que 1,1 pu, na mesma frequência do sistema, cuja duração é superior a 1 minuto (PAULILO; TEIXEIRA, 2013). Diversos fatores podem causar este fenômeno, alguns deles são: desligamento de grandes cargas, energização de um banco de capacitores e taps de transformadores incorretamente conectados.

Devido à essas sobretensões, podem ser identificadas várias consequências no sistema elétrico, como, por exemplo, falhas dos equipamentos conectados ao mesmo, danos aos

dispositivos eletrônicos conectados, redução da vida útil de equipamentos de maior capacidade como transformadores, motores elétricos, dentre outros. Uma possível solução para este problema seria a troca dos bancos de capacitores fixos por bancos automáticos. (PAULILO; TEIXEIRA, 2013)

A subtensão pode ser definida como uma redução do valor eficaz da tensão CA do sistema, menor a 0,9 pu (PAULILO; TEIXEIRA, 2013). Alguns fatores que causam este fenômeno são: carregamento excessivo dos circuitos alimentadores, conexão de cargas à rede e o desligamento de bancos de capacitores.

O fenômeno da subtensão causa diversos problemas para a rede elétrica, alguns deles são: redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores, possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos, elevação do tempo de partida das máquinas de indução, etc.

Num contexto geral, englobando-se tanto o problema de sobretensão quanto o de subtensão, para solucionar estes problemas e, consequentemente, melhorar a qualidade da energia do sistema, são apresentadas diversas opções, dentre as quais se destacam:

- Instalar reguladores de tensão para elevar o nível de tensão;
- Instalar capacitores shunt para reduzir a corrente do circuito;
- Instalar cabos com bitolas maiores para reduzir a impedância das linhas;
- Trocar o transformador em serviço para um de maior capacidade.

Porém, existe um fenômeno que acarreta numa tensão eficaz de 0 pu por um certo período de tempo, que, sendo superior a 1 minuto é considerado como uma interrupção sustentada. Estas interrupções podem ocorrer de forma planejada ou de forma inesperada. As interrupções planejadas tratam-se de manutenções que são realizadas na rede ou serviços de troca de alguns dos dispositivos da mesma. Já as interrupções inesperadas ocorrem devido às faltas no sistema, falhas de alguns dispositivos, queima de fusíveis, dentre outros. Algo comum entre esses dois tipos de interrupção é que, em ambos, é necessária intervenção humana para a solução do problema.

Quando ocorrem faltas de caráter permanente no sistema, o religador do alimentador principal tenta reestabelecer o sistema por algumas vezes, três ou quatro. Caso não tenha sucesso neste processo, ocorre um bloqueio definitivo do sistema. (PAULILO; TEIXEIRA, 2013)

Assim sendo, a solução para esse evento é tratada no problema de restauração de sistemas de distribuição, que visa reduzir o número de consumidores afetados pelas

interrupções, realocando-os para outros alimentadores, e também reconfigurar o sistema de modo a reduzir as interrupções do mesmo, além de compactuar para a melhora da confiabilidade do sistema elétrico de potência.

4.2. Reconfiguração de sistemas de distribuição

Os sistemas de distribuição de energia elétrica operam de forma radial, interligados por chaves, permitindo-se assim um maior controle sobre a topologia da rede. Essa característica radial faz com que exista apenas um caminho pelo qual o fluxo de energia elétrica vá do alimentador até a carga.

De acordo com (BARBOSA, 2012), “a reconfiguração refere-se ao procedimento de execução orientada de manobras em dispositivos chaveáveis, supervisionado ou realizado parcial ou integralmente pelo centro de controle e operação da distribuição de uma concessionária de energia. ”

Segundo (LORENZETI, 2004), a reconfiguração de sistemas de distribuição pode ser definida como uma alteração na estrutura topológica da rede através da mudança dos estados das chaves de interconexão, fazendo com que ocorra uma redistribuição das cargas entre os alimentadores do sistema, de modo a garantir a radialidade do mesmo.

A Figura 15 apresenta uma rede de 16 barras em suas condições iniciais de operação. As linhas pontilhadas representam chaves de interconexão entre os alimentadores, que apresentam estado NA. Já as linhas sólidas apresentam chaves no estado NF que interligam uma barra da rede a outra.

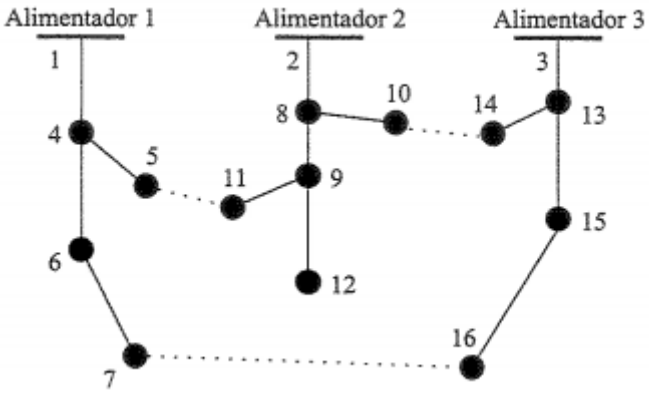

Figura 15 – Configuração inicial para o sistema de 16 barras
(Fonte: (LORENZETI, 2004))

Já a Figura 16 mostra esta mesma rede após passar pelo método de reconfiguração. Observa-se que, as cargas das barras 9, 11 e 12 podem ser transferidas para o alimentador 1 ao se fechar a chave entre as barras 5 e 11 e ao abrir a chave entre as barras 8 e 9.

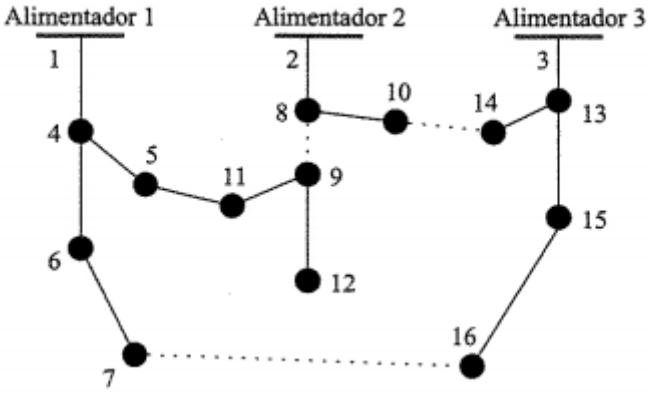

Figura 16 – Configuração do sistema de 16 barras após a reconfiguração
(Fonte: (LORENZETI, 2004))

A reconfiguração permite que se transfiram cargas de alimentadores mais carregados para alimentadores menos carregados, alterando-se, assim, o nível de carga entre os mesmos, além de melhorar o perfil de tensão nas barras e reduzir as perdas de energia elétrica no sistema.

Para se obter uma solução para o problema de reconfiguração que garanta a redução das perdas do sistema deve-se escolher, entre todas as configurações possíveis, uma que atinja os melhores resultados no que se diz respeito aos melhores níveis de perdas para o sistema em questão. Para o computo destas perdas, e, consequentemente, a comparação entre as mesmas, usa-se algum método de fluxo de potência para cada uma das configurações geradas.

Porém, devido ao tamanho dos sistemas, a utilização deste método torna-se ineficiente, computacionalmente falando, o que faz com que se necessite de algum método de otimização que garanta a solução do problema de forma mais eficaz. Para isso encontram-se na literatura alguns algoritmos heurísticos que auxiliam neste processo, sendo que neste trabalho utilizar-se-á da metaheurística GRASP para garantir uma melhor solução para o problema da reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica.

Neste trabalho, ao se realizar a reconfiguração das redes de distribuição de energia elétrica, objetiva-se a redução das perdas de potência ativa no sistema, além de melhorar os níveis de corrente nas linhas do sistema, evitando a sobrecarga das mesmas.

4.3. Alocação de chaves em sistemas de distribuição

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia para melhorar a confiabilidade de redes de distribuição de energia elétrica, no que se diz respeito à restauração e reconfiguração das mesmas, no decorrer de uma falta ou manutenção, através da solução do problema de alocação de chaves nestas redes.

As chaves têm a função de monitorar os estados dos sistemas e, na ocorrência de uma falta, seccionar a rede, interrompendo o fornecimento de energia elétrica aos consumidores à jusante da mesma. Estas chaves podem ser seccionadoras ou de manobra. As seccionadoras isolam setores da rede com defeitos, enquanto as de manobra servem para transferir cargas entre alimentadores, reenergizando, assim, os consumidores afetados pela falta. Visto isso, as concessionárias de energia elétrica adotam várias ações para se adequarem ao cenário regulamentado pela ANEEL. Dentre estas ações, pode-se citar a realocação e a automação das chaves contidas no sistema, visando a melhoria dos parâmetros de confiabilidade do sistema elétrico.

Se estas chaves forem posicionadas e acionadas de forma adequada, permitem reduzir o tempo de isolação dos defeitos na rede, além de permitir uma rápida restauração do serviço em áreas não atingidas diretamente pela falta.

4.3.1. O problema de alocação de chaves

O problema de alocação de chaves tem por objetivo determinar o número de chaves e seu local de instalação no sistema de distribuição de energia elétrica, visando melhorar alguns parâmetros de confiabilidade do sistema.

Segundo (Assis, 2014), no planejamento de sistemas de distribuição, as características do dispositivo de proteção (chaves) são de grande importância para a melhora da confiabilidade. Estes dispositivos apresentam um custo relativamente alto, assim sendo, o planejador do sistema deve buscar uma melhor solução para o problema, levando em conta os investimentos feitos e os benefícios a serem alcançados. Portanto, encontrar uma melhor solução para o PAC é um problema de otimização combinatória, que pode apresentar dificuldades no decorrer de sua solução.

Neste trabalho, a obtenção da solução é feita com o uso da metaheurística VNS, baseada na busca aleatória por melhores soluções na vizinhança de uma dada solução inicial. Além de

determinar a configuração das chaves, deve-se também determinar o efeito destas manobras no decorrer de uma falta no sistema de distribuição.

A formulação matemática genérica do problema de alocação de chaves em redes de distribuição de energia elétrica, de acordo com (ZVIETCOVICH; KAGAN, 2008), pode ser definida como:

$$MAX\ F(u), \text{ sujeito a } u \in U \tag{4.3}$$

Onde, u é uma configuração de rede fornecida por um determinado plano de restauração, num espaço de configurações factíveis U.

De acordo com (ZVIETCOVICH; KAGAN, 2008), “F é definida de acordo com os objetivos da solução, seja qual for a técnica de busca utilizada. ” A função F a ser maximizada é definida como:

$$F(u) = w_1 f_{chaveamento} + w_2 f_{tensões} + w_3 f_{perdas} + w_4 f_{potência} + w_5 f_{DEC} \tag{4.4}$$

Onde:

$$f_{chaveamento} = 1 - \frac{n_{operadas}}{n_{total}} \tag{4.5}$$

$$f_{tensões} = \frac{1}{n_g} \sqrt{\sum_{k=1}^{n_g} \left(\frac{V_{\min k}}{V_{base\ k}}\right)^2} \tag{4.6}$$

$$f_{perdas} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{n_h} R_k I_k^2} \tag{4.7}$$

$$f_{potência} = \frac{1}{n_g} \sqrt{\sum_{k=1}^{n_g} \left(\frac{P_{ON_k}}{P_{total_k}}\right)^2} \tag{4.8}$$

$$f_{DEC} = 1 - \frac{DEC}{T} \tag{4.9}$$

São funções que apresentam objetivos a serem maximizados de acordo com a relação de prioridades estabelecidas pelos valores w_1, w_2, w_3 e w_4. Nas quais:

$n_{operadas}$: chaves operadas na restauração;

n_{total}: total de chaves no sistema;

n_g: número de alimentadores;

n_h: número de ramos;

$V_{\min k}$: menor tensão do alimentador k;

V_{base_k}: tensão do alimentador k;

P_{ON_k}: carga nominal atendida dentro dos limites de tensão e sobrecarga no alimentador k;

P_{total_k}: carga nominal total do alimentador k.

DEC: duração equivalente de interrupção por unidade consumidora.

T: duração da interrupção devido à contingência.

A definição de F permite a realização de testes com diferentes ajustes, o que implica numa solução que depende dos pesos adotados.

4.4. Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição

Estimar o estado da rede elétrica em algum instante do dia é de estrema importância para as empresas distribuidoras. Pois, a partir dos resultados, os operadores poderão regular a operação a uma mais adequada e até mais eficiente. A estimação de estado é feita através de uma análise de fluxo de carga que consiste em determinar as tensões nas barras, fluxos de potência nas linhas e calcular as perdas elétricas.

Na literatura existem vários métodos para esta finalidade, sendo um grupo voltado para a análise de sistemas de transmissão, no qual o método de Newton-Raphson e os desacoplados são amplamente utilizados, pois mostraram ter uma boa eficiência. Já em sistemas de distribuição utilizam-se métodos que levam em consideração as características destas redes, como por exemplo, os valores de resistência e reatância que são parecidos entre si e principalmente uma operação em topologia radial do sistema. A seguir são mostrados alguns métodos que serão utilizados neste trabalho.

4.4.1. Método de Varredura

Este método tem grande eficácia quando utilizado no cálculo do fluxo de potência em sistemas radiais. Pois é um método algebricamente simples, de fácil programação e entendimento, além de possuir ótimas características de convergência. O método consiste na escolha de um certo valor para a tensão nas barras do sistema, sendo que este representa apenas o módulo da tensão na mesma. Escolhe-se tipicamente a mesma tensão da barra da subestação. Ou seja, para cada barra k, escolhe-se $V_k = V_{sub} + j0$, onde V_{sub} é o módulo de tensão da subestação (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

Este método consiste em dois processos: o processo *Backward*, que consiste em uma varredura iniciando nas barras extremas até a barra da subestação, e o processo *Forward*, que consiste em uma varredura a partir da barra da subestação até as barras extremas do sistema elétrico.

4.4.1.1. Processo *Backward*

Na Figura 17 vê-se duas barras, k e m, na qual há uma carga na barra k, representada pela equação $S_k = P_k + jQ_k$, enquanto a tensão nesta mesma barra é representada por $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$.

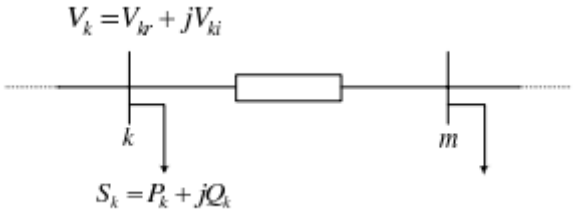

Figura 17 – Subsistema para cálculo de corrente de carga
(Fonte: Zvietcovich (2006))

A partir desta figura, obtêm-se as seguintes relações matemáticas:

$$S_k = V_k I_k^* \rightarrow I_k^* = \frac{S_k}{V_k} = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} \tag{4.10}$$

$$S_k = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} \cdot \frac{V_{kr} - jV_{ki}}{V_{kr} - jV_{ki}} = \frac{P_k V_{kr} + Q_K V_{ki}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} + j\,\frac{-P_k V_{ki} + Q_k V_{kr}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \tag{4.11}$$

Assim sendo, tem-se, em módulo,

$$I_{kr} = \frac{P_k V_{kr} + Q_K V_{ki}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \tag{4.12}$$

$$I_{ki} \frac{P_k V_{ki} + Q_k V_{kr}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \tag{4.13}$$

Para um sistema com 4 barras (Figura 18), deduz-se as seguintes equações para o processo *Backward*.

$$I_{34} = I_4 \tag{4.14}$$

$$I_{23} = I_{34} + I_3 \tag{4.15}$$

$$I_{12} = I_{23} + I_4 \tag{4.16}$$

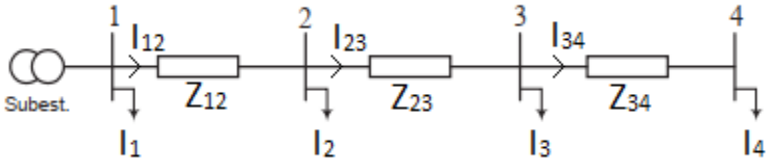

Figura 18 – Sistema exemplo de 4 barras
(Fonte: Zvietcovich (2006))

4.4.1.2. Processo *Forward*

Apresenta-se novamente um subsistema radial composto por duas barras, exibido na Figura 19. Já de início, sabe-se que as tensões nas barras são representadas por $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$ e as correntes nos ramos são representadas por $I_{km} = I_{kmr} + jI_{kmi}$.

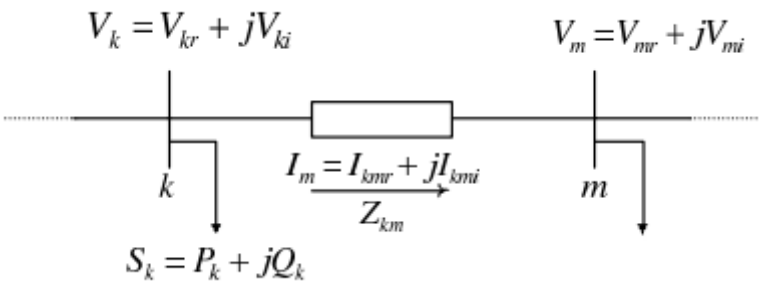

Figura 19 – Subsistema para cálculo de tensão nas barras
(Fonte: Zvietcovich (2006))

Assim sendo, obtêm-se as seguintes relações matemáticas:

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} = V_m + (R_{km} + jX_{km})(I_{kmr} + JI_{kmi}) \tag{4.17}$$

A partir da Equação (4.17), deduz-se então que:

$$V_{mr} = V_{kr} - R_{km}I_{kmr} + X_{km}I_{kmi} \tag{4.18}$$

$$V_{mi} = V_{ki} - R_{km}I_{kmi} + X_{km}I_{kmr} \tag{4.19}$$

Portanto, a partir da Figura 18, tem-se as equações do processo *Forward*.

$$V_2 = V_1 - I_{12}Z_{12} \tag{4.20}$$

$$V_3 = V_2 - I_{23}Z_{23} \tag{4.21}$$

$$V_4 = V_3 - I_{34}Z_{34} \tag{4.22}$$

Assim, visto que os novos valores de corrente nos ramos do sistema e de tensão nas barras do mesmo podem ser facilmente calculados, pode-se, agora, obter os valores das perdas ativas e reativas da rede, de acordo com as seguintes equações.

$$P_{km}^{perdas} = R_{km}I_{km}^2 \tag{4.23}$$

$$Q_{km}^{perdas} = X_{km} I_{km}^2 \tag{4.24}$$

E ainda, as perdas totais do sistema serão,

$$P_T = \sum_{(k,m)\in\Omega} R_{km} I_{km}^2 \tag{4.25}$$

$$Q_T = \sum_{(k,m)\in\Omega} X_{km} I_{km}^2 \tag{4.26}$$

Onde Ω representa o conjunto dos ramos pertencentes ao sistema elétrico.

A Figura20 apresenta o fluxograma do algoritmo que realiza o cálculo do fluxo de potência pelo método de Varredura.

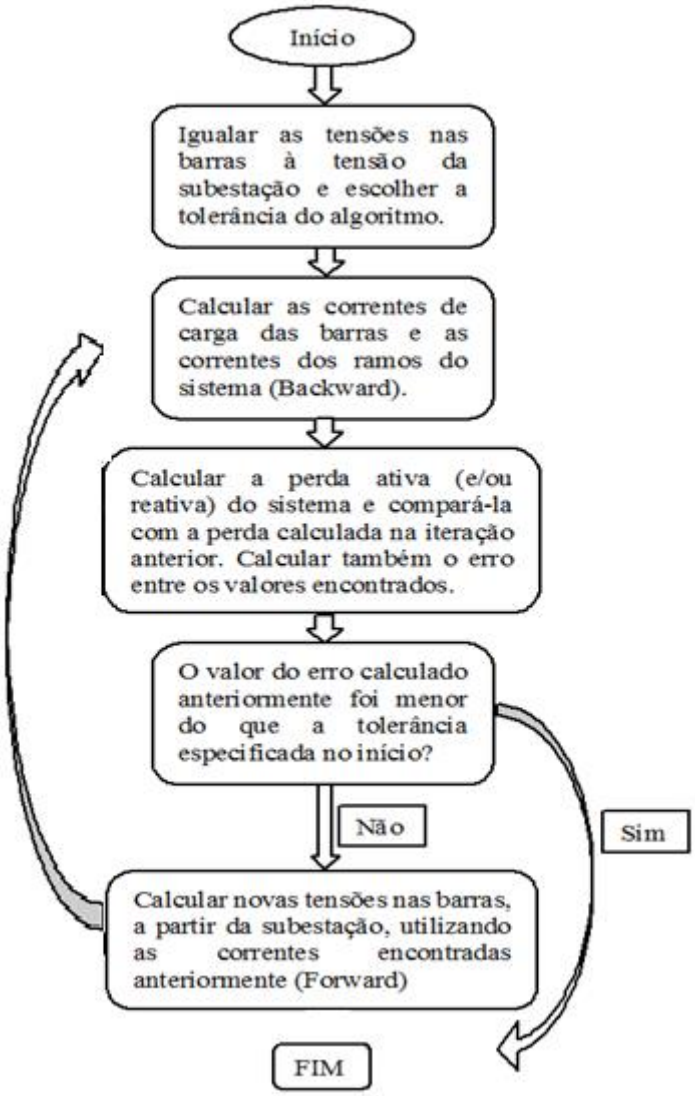

Figura 20 – Fluxograma do método de varredura

(Fonte: Autoria própria)

4.4.2. Método de Newton-Raphson

Como já indicado, o método de Newton-Raphson é um dos métodos numéricos mais utilizados para análise de fluxo de carga em sistemas de transmissão (STEVENSON, 1986). Se baseia no fato de que uma raiz aproximada x^r de uma equação não linear é conhecida, então uma aproximação linear pode ser obtida através de

$$x^{r+1} = x^r - \frac{f(x^r)}{f'(x^r)} \tag{4.27}$$

Ou

$$x^{r+1} = x^r + \Delta x \tag{4.28}$$

Onde

$$\Delta x = -\frac{f(x^r)}{f'(x^r)} \tag{4.29}$$

Para se solucionar um conjunto de equações simultâneas e não lineares, com o mesmo número de variáveis, pode-se estender esta aproximação linear da forma da Equação (4.30).

$$F = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \dots \quad \dots \quad \dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{bmatrix} \tag{4.30}$$

Dado que se conhece uma estimativa inicial $x^{(r)T} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, pode-se, então, obter uma nova estimativa que é dada pela Equação (4.28).

Onde, agora

$$\Delta x = -J^{-1} f(x^r) \tag{4.31}$$

Onde J é uma matriz quadrada, cuja ordem é igual ao número de equações. Esta matriz é chamada de Matriz Jacobiana. Os elementos desta matriz são definidos como derivadas parciais da forma $\partial f_i / \partial x_j$, onde i e j representam a posição do elemento na matriz.

Para a solução do problema de fluxo de potência, utilizando o método de Newton-Raphson, devem-se estabelecer as equações que definem o problema na forma $f(x) = 0$. Assim sendo, as equações do sistema elétrico de potência são modeladas da seguinte forma.

Para barras do tipo PQ:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i = P_i^{esp} - V_i \sum_{k \in \Omega_i} (G_{ik} \cos \delta_{\mathrm{ik}} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) V_k = 0 \tag{4.32}$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i = Q_i^{esp} - V_i \sum_{k \in \Omega_i} (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) V_k = 0 \tag{4.33}$$

Para barras do tipo PV:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i = P_i^{esp} - V_i \sum_{k \in \Omega_i} (G_{ik} \cos \delta_{\mathrm{ik}} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) V_k = 0 \tag{4.34}$$

Já para a barra de referência não há equações para modelar o fluxo de carga.

Portanto, o método de Newton-Raphson aplicado ao problema de fluxo de potência é expresso pela seguinte equação geral.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V / V \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

Onde: $H = \partial P_{(barras\ PV\ e\ PQ)} / \partial \delta_{(barras\ PV\ e\ PQ)}$,

$N = V(\partial P_{(barras\ PV\ e\ PQ)} / \partial V_{(barras\ PQ)}$,

$J = \partial Q_{(barras\ PQ)} / \partial \delta_{(barras\ PV\ e\ PQ)}$,

$L = V(\partial Q_{(barras\ PQ)} / \partial V_{(barras\ PQ)}$

Os elementos das submatrizes H, N, J e L são obtidos de acordo com as seguintes equações.

$$\begin{aligned} H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} &= -V_i^2 B_{ii} - V_i \sum_{k \in \Omega_i} (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) V_k \\ &= -Q_i^{calc} - V_i^2 B_{ii} \end{aligned} \tag{4.36}$$

$$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = V_i(G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik})V_k \tag{4.37}$$

$$\begin{aligned} J_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= -V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{k \in \Omega_i} (G_{ik} \cos \delta_{\mathrm{ik}} + B_{ik} \sin \delta_{ik})\, V_k \\ &= P_I^{calc} - V_i^2 G_{ii} \end{aligned} \tag{4.38}$$

$$J_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} = -V_i(G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik})V_k \tag{4.39}$$

$$N_{ii} = V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = P_i^{calc} + V_i^2 G_{ii} \tag{4.40}$$

$$N_{ik} = V_k \frac{\partial P_i}{\partial V_k} = -J_{ik} \tag{4.41}$$

$$L_{ii} = V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = Q_i^{calc} - V_i^2 B_{ii} \tag{4.42}$$

$$L_{ik} = V_k \frac{\partial Q_k}{\partial V_j} = H_{ik} \tag{4.43}$$

Assim sendo, a Figura 21 apresenta um fluxograma que representa o processo iterativo para a solução do problema de fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson.

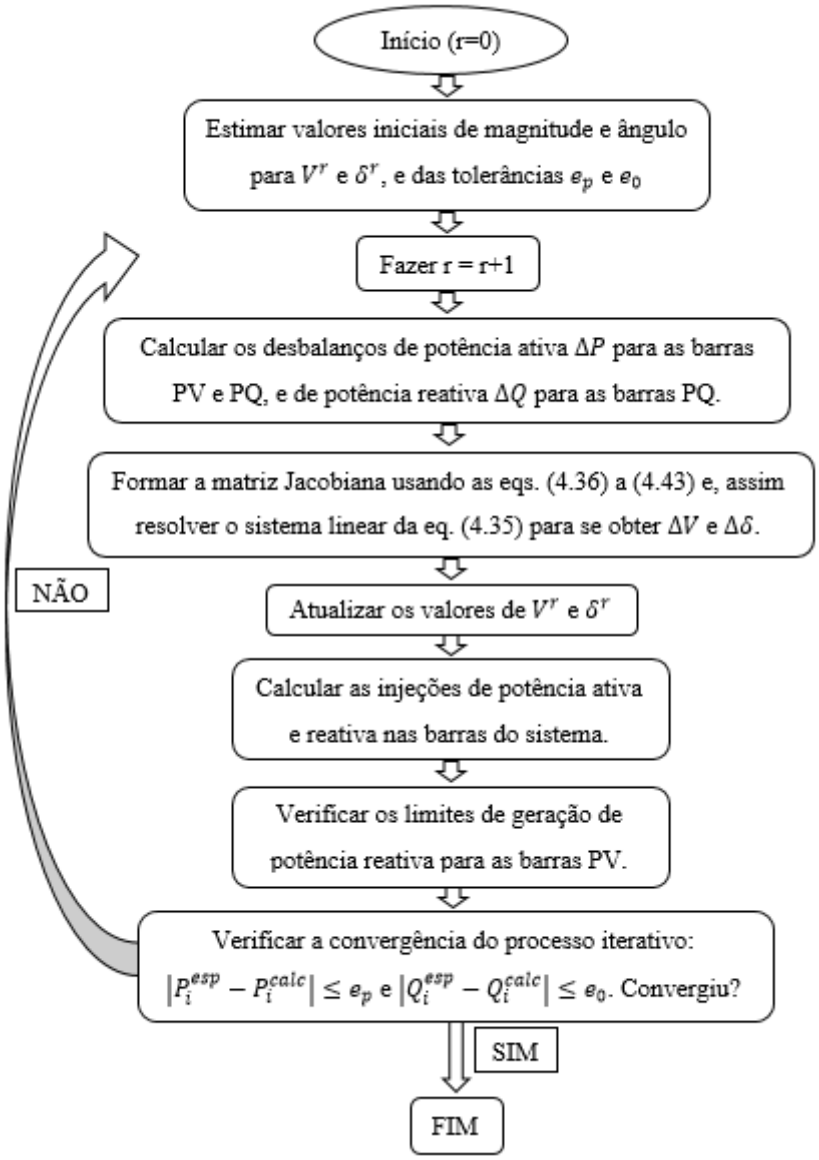

Figura 21 – Fluxograma para o método de Newton-Raphson
(Fonte: Autoria Própria)

5. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP

O procedimento de busca guloso, aleatório e adaptativo – GRASP (do inglês Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), é uma metaheurística iterativa que consiste em duas fases: a primeira é a fase de construção e a segunda é a fase de busca local. A fase de construção é caracterizada por um algoritmo do tipo guloso, mas que possui uma componente aleatória e adaptativa. Já a fase de busca local é realizada para encontrar melhores resultados na vizinhança da solução obtida na primeira fase.

De acordo com (OLIVEIRA, 2011),

> a metaheurística GRASP é basicamente uma evolução dos algoritmos heurísticos construtivos. Um algoritmo heurístico construtivo tem como finalidade construir uma solução factível passo a passo utilizando um indicador de sensibilidade para indicar qual a melhor componente a ser introduzida na solução. A principal diferença destas duas metodologias é a aleatoriedade que o algoritmo GRASP possui para escolher uma componente que será adicionada à solução. A escolha aleatória desta componente tem a finalidade de atender o caráter guloso do algoritmo heurístico construtivo e também a aplicação dessa metodologia permite encontrar muitas soluções factíveis e de boa qualidade.

A Figura 22 exemplifica a versão básica da metaheurística GRASP, mostrando as fases nas quais a mesma pode ser dividida:

Procedure GRASP;

1ª Fase: Realizar a leitura dos dados do problema e definir o conjunto de variáveis e a solução incumbente inicial do problema.

1. $f^* \leftarrow \infty$; $x^* \leftarrow \varnothing$;
2. Ler os dados do problema;
3. **Para** *k= 1, ..., MaxInter* **Faça;**

2ª Fase: Realizar a construção de uma solução utilizando componentes aleatórias.

4. Construir uma função aleatória x (fase de construção);

3ª Fase: Realizar uma melhoria da solução encontrada na fase construtiva.

5. Encontrar y aplicando busca local a x (fase de busca local);
6. **Se** $f(y) < f^*$ **Então**
7. $x^* \leftarrow y$; $f^* \leftarrow f(y)$;
8. **Fim_Se**

4ª Fase: Definir um número máximo de iterações realizadas pelo GRASP.

9. **Fim_Para**
10. Retorna x^*

Fim GRASP

Figura 22 – Pseudocódigo da versão básica da metaheurística GRASP
(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

Na primeira fase é realizada uma leitura de todos os dados do problema, a partir dos quais é gerada uma solução inicial do problema. A construção da solução é iniciada com a escolha de um indicador de sensibilidade. A escolha deste indicador pode ser realizada de várias maneiras, como por exemplo o cálculo da distância total percorrida, ou a partir da solução de um problema de fluxo de potência. Esse indicador permite que se inicie a fase construtiva do GRASP.

A escolha de um componente a ser introduzido na solução depende também de um parâmetro alfa que varia entre 0 e 1 (OLIVEIRA, 2011). Para alfa igual a 0 tem-se um indicador totalmente guloso, enquanto para um alfa igual a 1, tem-se um indicador totalmente aleatório.

Na segunda fase é feita a construção de uma solução a partir das características aleatórias e gulosas do GRASP.

Na terceira fase, a solução encontrada na fase anterior passa por uma melhoria através de uma busca local, que pode ser realizada por outro tipo de metaheurística. Ainda, nesta fase, ocorre a comparação entre a solução gerada e a solução incumbente. Caso a solução gerada apresente um valor de função objetivo *f(y)* melhor que o da solução inicial *f**, essa passa a ser a solução incumbente do problema, ou seja, *x*<-y e f*<-f(y).*

Por fim, a quarta fase define apenas o número máximo de iterações pelo qual o processo será realizado, até se encontrar uma solução ótima.

A Figura 23 apresenta o pseudocódigo da fase construtiva do GRASP. Este pseudocódigo pode ser descrito em cinco passos:

1) Escolhe-se a solução inicial, *x*, que pode ser vazia ou não. Esta é vista como a solução incumbente;
2) Os elementos, candidatos a entrarem para a solução do problema, são avaliados;
3) É elaborada uma lista com as *k* variáveis mais atraentes, utilizando um indicador de sensibilidade;
4) Escolhe-se aleatoriamente uma variável da lista construída no passo 3, e atualiza-se o conjunto solução adicionando a variável escolhida;
5) Verifica-se se o conjunto solução está completo; se isto ocorrer, tem-se então uma solução para o problema, terminando-se assim a fase construtiva. Se o conjunto solução ainda estiver incompleto, retorna-se para o passo 2.

```
Procedure construtivo;
1.  x ← ∅;
2.  Enquanto x não for uma solução completa Faça
3.      Avaliar os custos dos elementos candidatos;
4.      Construir a lista restrita de candidatos;
5.      Selecionar aleatoriamente um elemento s da lista restrita de candidatos;
6.      x ← x ∪ {s};
7.  Fim_Enquanto;
8.  Retorna x;
Fim construtivo
```

Figura 23 – Pseudocódigo da fase construtiva do GRASP
(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

Tendo realizado a fase construtiva do GRASP, realiza-se então a fase de busca local, onde busca-se melhorar a solução fornecida pela fase construtiva, utilizando-se para isso de um algoritmo de otimização local, com o objetivo de se obter uma solução de melhor qualidade que a solução encontrada anteriormente. A Figura 24 mostra o pseudocódigo desta última fase do algoritmo GRASP. Este algoritmo pode ser descrito pelos seguintes passos:

1) Os dados da solução incumbente, encontrada na fase construtiva do GRASP, são lidos;
2) Obtém-se uma solução corrente dentro da vizinhança que circunda a solução incumbente;

3) Se a solução corrente for melhor que a solução incumbente, a solução incumbente será alterada, recebendo a solução corrente;
4) Critério de parada. Se não for encontrada soluções vizinhas de melhor qualidade dentro da vizinhança que circunda a solução incumbente, a fase de busca local é finalizada. Caso contrário, retorna para o passo 2.

Procedure Busca_Local;
1. **Enquanto** *x não for solução localmente ótima* **Faça**
2. Obter $x' \in N(x)$ *tal que* $f(x') < f(x)$;
3. $x \leftarrow x'$;
4. **Fim_Enquanto**;
5. Retornar x;

Fim Busca_Local

Figura 24 – Pseudocódigo da busca local do GRASP
(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

Neste trabalho foi utilizada a técnica Variable Neighborhood Search (VNS) para realizar a busca local, sendo a mesma apresentada a seguir.

5.1. VNS – *Variable Neighborhood Search*

"Métodos de busca local para otimização combinatória realizam uma sequência de modificações locais em uma solução inicial, melhorando o valor da função objetivo, até que um ótimo local seja encontrado" (POSSAGNOLO, 2015). Ou seja, a cada iteração, uma solução melhorada da vizinhança da solução incumbente é obtida, até que nenhuma melhora possa ser obtida.

De acordo com Mladenović e Hansen (1997), uma metaheurística simples e eficiente pode ser obtida ao se realizar trocas sistemáticas de vizinhanças, agindo-se conjuntamente com um algoritmo de busca local. Esta técnica foi denominada de busca em vizinhança variável, e, apresentou-se então, um algoritmo VNS básico (*Basic Variable Neighborhood Search*). Esta metaheurística funciona de modo a percorrer vizinhanças cada vez mais distantes da solução incumbente, mudando desta para uma nova solução se, e somente se, obter uma melhoria na função objetivo. Assim, as características favoráveis de uma solução incumbente serão mantidas e usadas para se obter soluções vizinhas promissoras e/ou ainda melhores que essa (MLADENOVIĆ; HANSEN, 1997).

5.1.1. Fundamentos da metaheurística VNS

A metaheurística VNS, tratada nesta seção, explora algumas propriedades. São elas:

1. Um ótimo local com relação a uma estrutura de vizinhança não é necessariamente o mesmo ótimo local para outra estrutura de vizinhança;
2. Um ótimo global é um mínimo local em relação à todas as possíveis estruturas de vizinhança;
3. Para muitos problemas, ótimos locais com relação a uma ou várias estruturas de vizinhança são relativamente próximos uns dos outros. O que implica que um ótimo local geralmente fornece informação valiosa sobre o ótimo global.

Ao contrário de outras metaheurísticas, a VNS e suas extensões são simples e requerem poucos parâmetros para sua execução. Por conseguinte, além de fornecer boas soluções de forma simples, a metaheurística VNS fornece compreensão das razões de tal performance, o que pode levar a implementações mais simples e eficientes (POSSAGNOLO, 2015).

Na literatura existem várias formas de implementar esta técnica, sendo uma delas detalhada a seguir e implementada neste trabalho.

5.1.2. VNS Básica (BVNS)

Esta versão da metaheurística VNS foi proposta por Mladenović e Hansen (1997) para a resolução de um problema muito conhecido da literatura, que já até foi abordado neste trabalho, o problema do caixeiro viajante. Durante a resolução deste problema, verificou-se que esta metodologia foi capaz de encontrar soluções de ótima qualidade.

O funcionamento desta metaheurística é explicado na Figura 25 a seguir, que é apresentada em Mladenović e Hansen (1997).

Inicialização: Selecione o conjunto de estruturas de vizinhança $\mathcal{N}_k, k = 1, \cdots, k_{max}$, que será utilizado na busca; encontre uma solução inicial $\boldsymbol{x}$; defina um critério de parada;
Repita os passos seguintes até que o critério de parada esteja satisfeito:
(1) Faça $k \leftarrow 1$;
(2) Repita os passos a seguir até $k = k_{max}$:
(a) Agitação: Gere aleatoriamente uma solução $\boldsymbol{x}'$ da k-ésima vizinhança de $\boldsymbol{x}$ $(\boldsymbol{x}' \in \mathcal{N}_k(\boldsymbol{x}))$;
(b) Busca local: Aplique algum método de busca local com $\boldsymbol{x}'$ como solução inicial; denote por $\boldsymbol{x}''$ o ótimo local obtido por esta busca;
(c) Mover ou não: Se o ótimo local $\boldsymbol{x}''$ é melhor que a incumbente $\boldsymbol{x}$, mova para lá $(\boldsymbol{x} \leftarrow \boldsymbol{x}'')$ e continue a busca em $\mathcal{N}_1$ $(k \leftarrow 1)$; caso contrário faça $k \leftarrow k + 1$.

Figura 25 – Algoritmo BVNS
(Fonte: (MLADENOVIĆ; HANSEN, 1997))

De acordo com o algoritmo apresentado na Figura 25, seleciona-se, inicialmente, uma série de estrutura de vizinhança que definem vizinhanças em torno de um ponto **x ∈ X**. Feito isso, se encontra uma solução inicial **x**, com a opção de se aplicar uma busca local, visando melhorá-la. De forma aleatória, seleciona-se **x'** dentro da primeira estrutura de vizinhança N_1(**x**) de **x** e realiza-se uma descida a partir de **x'** utilizando-se a busca local, levando a um novo local **x".** Neste ponto são possíveis três diferentes resultados: (1) **x" = x**, isto é, **x** já era um ótimo local da vizinhança, visto isto, o procedimento continua na seguinte estrutura de vizinhança N_k(**x**), $k \geq 2$; (2) **x"** $\neq$ **x** e v(**x"**) $\geq$ v(**x**), neste caso encontrou-se outro ótimo local, que não é melhor que a solução incumbente, assim, o processo também muda para a próxima estrutura de vizinhança; (3) **x"** $\neq$ **x** e v(**x"**) $\leq$ v(**x**), neste caso encontrou-se outro ótimo local, que é melhor que a solução incumbente, assim, a busca é recentralizada em **x"** e se inicia novamente na primeira vizinhança utilizada. Caso se alcance a última vizinhança, sem que uma solução melhor que a incumbente tenha sido encontrada, a busca é reiniciada na primeira estrutura de vizinhança N_1(**x**), até que o critério de parada estipulado seja satisfeito (POSSAGNOLO, 2015).

Os critérios de parada do algoritmo BVNS podem ser o tempo de processamento máximo, o máximo número de iterações entre duas melhorias ou um número máximo de iterações estipulado para o algoritmo. No caso deste referido trabalho, utilizou-se este último como sendo o critério de parada.

Com a finalidade de ter um melhor entendimento da metaheurística GRASP, a seguir se ilustra a implementação desta a um problema muito conhecido na literatura, o problema do Caixeiro Viajante.

5.2. Aplicação da metaheurística GRASP ao problema do caixeiro viajante

O problema do Caixeiro Viajante é um problema clássico de otimização combinatória, sendo este análogo a muitos problemas de diferentes áreas do conhecimento. Este consiste em se encontrar a rota entre *n* cidades que devem ser percorridas pelo caixeiro, de modo a se obter a menor distância entre as mesmas, condicionado a visitar cada cidade somente uma vez, retornando para a cidade de partida. Por exemplo, supondo-se que o caixeiro deva percorrer cinco cidades A, B, C, D e E, como mostrado na Figura 26. Uma possível rota poderia ser A-B-C-D-E-A. Porém, ainda existem várias outras rotas entre essas cinco cidades e talvez esta não seja a melhor rota. Quanto maior o número de cidades, a combinação de configurações cresce exponencialmente, motivo pelo qual não seria possível utilizar métodos clássicos para a sua solução, pois os tempos computacionais seriam inviáveis. Surge então a necessidade de resolver este problema utilizando técnicas metaheurísticas.

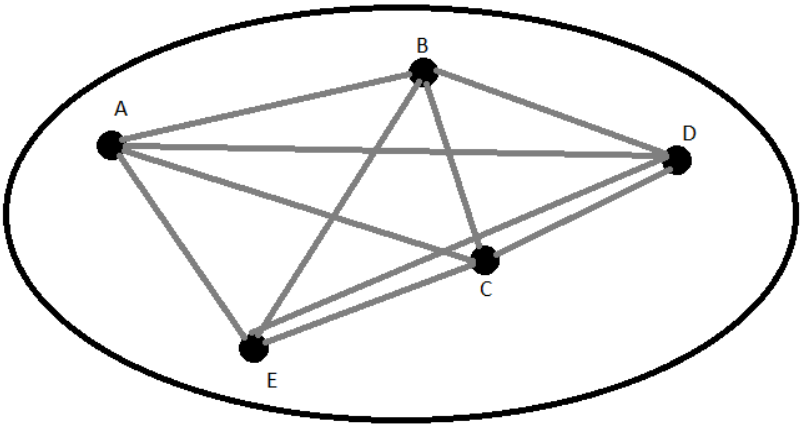

Figura 26 - Cidades percorridas pelo caixeiro
(Fonte: Autoria Própria)

Como visto anteriormente, o GRASP é constituído por uma fase de construção e uma de busca local. Assim sendo, para o problema do caixeiro viajante, a fase de construção do mesmo é descrita pelo pseudocódigo mostrado na Figura 23.

O algoritmo implementado por (FREDDO; BRITO, 2008), para a resolução deste problema, indo de acordo com o pseudocódigo da Figura 23, pode ser explicado seguindo os seguintes passos:

Fase construtiva:

1) A solução inicial é um conjunto vazio;
2) O caixeiro parte inicialmente da cidade A;

3) O parâmetro α influencia na diversidade da solução (mais gulosa que aleatória, ou vice versa), além de determinar o tamanho da lista de candidatos;
4) A lista de candidatos restritos, avaliando a distância entre a cidade A e a mesma, é gerada, e tem-se B, C e E (cidades mais próximas).
5) De forma aleatória, escolhe-se uma destas cidades. No caso, escolheu-se a cidade C. Solução parcial: A-C.
6) Retorna ao passo 2, gera-se uma nova lista de candidatos restritos, escolhe-se um aleatoriamente e, enfim, gera-se a solução final, de forma que o caixeiro retorne para a cidade inicial.
7) A solução final gerada é A-C-D-E-B-A.

Fase de busca local

Uma vez gerada uma solução para o problema do Caixeiro Viajante utilizando a metaheurística GRASP, esta pode ser melhorada utilizando-se a VNS para realizar uma busca local na vizinhança da mesma. Essa busca local é detalhada a seguir, de acordo com o que foi descrito na Figura 25.

Seleciona-se *Nk* estruturas de vizinhança. A configuração gerada na fase construtiva, pelo GRASP, é chamada de x (solução incumbente) = A-C-D-E-B-A.

1) Faz-se k=1;
2) Repetem-se os passos a seguir até $k=k_{max}=2$.
    (a) É gerada uma solução *x'* na *k*-ésima vizinhança de x. Para k=1, troca-se uma cidade de posição na lista com outra cidade, de forma aleatória *x'*= A-D-C-E-B-A. Para k=2, trocam-se duas cidades da lista com outras duas cidades também desta lista, novamente de forma aleatória.
    (b) Feito isto, realiza-se a busca local, troca-se uma cidade de posição na lista com outra cidade, de forma aleatória gerando-se a solução *x''*= A-D-E-C-B-A.
    (c) Se a distância obtida na solução *x''* for menor que a distância total da solução incumbente, esta passa a ser a solução do problema e k=1. Caso contrário, faz-se k=2 e aumenta-se o tamanho da vizinhança a ser percorrida.

Por fim, após algumas iterações promovidas pelo algoritmo implementado, encontra-se então que, para este problema do caixeiro viajante, a melhor solução seria A-D-C-B-E-A.

5.3. Problema de reconfiguração de redes elétricas utilizando o GRASP

A reconfiguração faz parte da restauração de redes elétricas tratada neste trabalho. Pois, uma vez isolados o bloco com defeito e os blocos atingidos pela falta de energia elétrica, a rede é reestabelecida gerando-se uma rede com operação radial, para em seguida reconfigurar, visando melhorar os parâmetros da função objetivo acima citados, atendendo o modelo matemático indicado na Equação (4.4) e suas formulações matemáticas nas Equações (4.5) – (4.9).

Modelo matemático do problema:

Para o problema de reconfiguração, foi objetivada a redução das perdas através da Equação (5.1). Durante este processo foram guardados os valores da função objetivo do problema de restauração de redes elétricas.

$$MIN\ F = \sum_{k=1}^{N} P_k \tag{5.1}$$

Onde,

N é o número de trechos do sistema;

P_k é o valor das perdas ativas no trecho k do sistema.

Sujeito a:

$V_{min} < V_k < V_{max;}$

Equações de fluxo de carga: Equações (4.25), (4.26) e (4.35);

Capacidade das linhas;

Capacidade dos transformadores.

Fase construtiva:

A rede inicia de forma totalmente malhada (com vários laços). Em seguida são determinadas as perdas ativas para esta rede malhada. Nesta fase construtiva, é aberta uma chave (trecho) que faz parte de algum laço, de modo a preencher um vetor de chaves abertas chamado *Vsol*. A seguir, a construção é detalhada de acordo com o pseudocódigo da Figura 21:

1) $X \leftarrow \Phi$: onde $X = Vsol$. Este vetor possui tamanho de número de chaves que devem ser abertas para a rede virar radial;
2) **Enquanto** *Vsol* não for uma solução completa (rede radial), **Faça:**
3) Avalia os custos (perdas ativas) dos elementos (chaves ou trechos candidatos).

4) Construir a lista restrita de candidatos (trechos) de tamanho *l* considerando as perdas destes trechos. Ordena-se a lista crescentemente.
5) Selecionar aleatoriamente um elemento *s* da lista de candidatos. Para isso é sorteado um número α entre 0 e 1. Caso $\alpha > 0{,}5$ escolhe-se um trecho s aleatoriamente do grupo de chaves (50% dos primeiros elementos da lista). Caso contrário, escolhe-se de forma aleatória um trecho da lista não ordenada.
6) $X \leftarrow x\ U\{s\}$. Insere-se a chave escolhida no vetor *Vsol*.
7) **Fim_enquanto**. Ir para o passo 2

Uma vez obtida uma solução *x* (rede radial), é calculada a função objetivo indicada na Equação (5.1), assim como as restrições da rede.

Fase de busca local:

A partir de uma solução *x* encontrada na fase construtiva, é realizada uma busca local visando encontrar soluções de melhor qualidade nas vizinhanças da solução encontrada pelo GRASP.

Esta fase de busca local é baseada na metaheurística Busca em Vizinhança Variável – VNS (do inglês *Variable Neighbourhood Search*), a qual procura soluções vizinhas utilizando estruturas de vizinhança.

O algoritmo detalha-se a seguir:

Repetir o processo até o **critério de parada** for atingido:

1) Fazer k=1;
2) Repetir os passos a seguir até $k=k_{max} = 2$:
   (a) **Agitação**: É gerada uma solução (configuração radial) x' na *k*-ésima vizinhança de *x*. Para *k*=1, fecha-se uma chave aleatoriamente (formando uma malha) e abre-se uma chave aleatoriamente (gerando uma rede radial). Para *k*=2, fecham-se duas chaves aleatoriamente (formando duas malhas) e abrem-se duas chaves aleatoriamente (gerando uma rede radial).
   (b) **Busca local**: é gerada uma solução *x*'' utilizando uma busca local, fechando uma chave aleatoriamente (gerando uma malha) e abrindo uma chave (gerando uma rede radial).
   (c) **Mover ou não**: Se as perdas obtidas na solução *x*'' (ótimo local) são menores que as perdas da solução *x* (solução incumbente), *x*=*x*'' e *k*=1. Caso contrário gera-se *Nvisitas* (x'').

Nvisitas Depende do tamanho da rede a ser avaliada.

A seguir é implementado um exemplo de problema de reconfiguração, utilizando o GRASP, sendo esta atividade parte do problema de restauração de redes elétricas tratado neste trabalho.

5.3.1. Exemplo da aplicação para reconfiguração de redes elétricas

Para exemplificar como se soluciona o problema de reconfiguração de redes de distribuição utilizando a metaheurística GRASP, utiliza-se o sistema elétrico de 14 barras da Figura 27, retirado de (OLIVEIRA, 2011), onde este utiliza também da metaheurística GRASP para a solução do problema de reconfiguração. Este sistema, no seu estado completamente malhado, apresenta 15 ramos e 3 laços. Ou seja, para promover a reconfiguração do mesmo, tornando-o um sistema radial, deverão ser retirados 3 ramos. Deve-se observar também que o ramo entre as barras 7 e 10 não pode ser retirado, pois, nesse caso, a barra 10 ficaria ilhada.

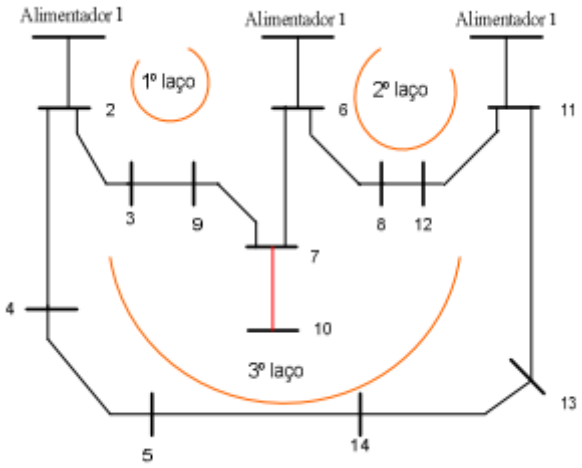

Figura 27 – Sistema de 14 barras malhado
(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

Fase construtiva:

1) X ← Φ: onde X= *Vsol*. Este vetor com tamanho de número de chaves abertas para a rede virar radial é representado na tabela a seguir.

Tabela 1 – Chaves abertas para a rede virar radial – Inicial

	Chave 1	Chave 2	Chave 3
Vsol =	VAZIO	VAZIO	VAZIO

(Fonte: Autoria própria)

2) **Enquanto** *Vsol* não for uma solução completa (rede radial) **Faça**
3) Avalia os custos (perdas ativas) dos elementos (chaves ou trechos candidatos).

Tabela 2 – Perdas de cada ramo do sistema

Número de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Perdas Ativas (W)
1	6	8	498,77
2	4	5	723,25
3	5	14	777,31
4	8	12	1.499,16
5	7	9	2.242,90
6	11	12	2.506,81
7	2	4	2.730,49
8	3	9	2.852,01
9	13	14	2.881,47
10	11	13	3.893,71
11	2	3	5.880,31
12	6	7	7.320,39
13	1	11	7.464,03
14	1	2	10.702,45
15	1	6	10.959,00

(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

4) Construir a lista restrita de candidatos (trechos) de tamanho *l* considerando as perdas destes trechos. Ordena-se a lista crescentemente.

Tabela 3 – Ramos selecionados a partir do critério guloso

Número de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Perdas Ativas (W)
1	6	8	498,77
2	4	5	723,25
3	5	14	777,31
4	8	12	1.499,16

(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

5) Selecionar aleatoriamente um elemento *s* da lista de candidatos. Para isso é sorteado um numero α entre 0 e 1. Caso α>0,5, escolhe-se um trecho *s* aleatoriamente do grupo de chaves (50% dos primeiros elementos da lista). Caso contrário, escolhe-se de forma aleatória um trecho da lista não ordenada.

Utilizando-se então, o critério aleatório, escolheu-se o ramo 1, entre as barras 6 e 8, para ser retirado do sistema. Portanto, feito isso, a Figura 28 mostra a nova rede (em construção).

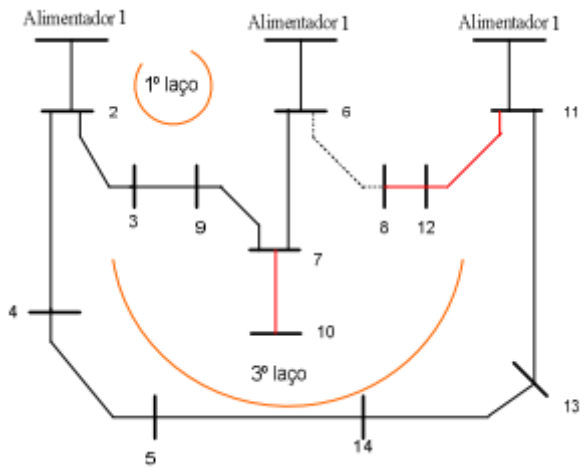

Figura 28 – Sistema de 14 barras malhado com 1 laço a menos
(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

6) $X \leftarrow x\ U\{s\}$. Insere-se a chave escolhida no vetor *Vsol*.

Tabela 4 – Chaves abertas para a rede virar radial – 1ª iteração

	Chave 1	Chave 2	Chave 3
Vsol =	6-8	VAZIO	VAZIO

(Fonte: Autoria própria)

Agora, na segunda iteração, além do ramo entre as barras 7 e 10, o ramo entre as barras 11 e 12 e o ramo entre as barras 12 e 8 não podem ser retirados, visto que, se isso acontecer, existirão cargas ilhadas no sistema. Mais uma vez, utilizando-se o método de Newton-Raphson, calcula-se os valores das perdas em cada um dos ramos do sistema, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Perdas de cada ramo do sistema (2ª iteração)

Números de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Perdas Ativas (W)
1	4	5	627,01
2	5	14	873,44
3	7	9	2.356,03
4	2	4	2.633,71
5	3	9	2.966,24
6	13	14	2.977,96
7	11	13	3.990,49
8	2	3	5.995,64
9	1	11	7.050,82
10	6	7	7.206,24
11	1	2	10.721,41
12	1	6	11.354,47

(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

Mais uma vez, utilizando-se o critério guloso do GRASP, seleciona-se os seguintes candidatos a serem retirados do sistema.

Tabela 6 – Ramos selecionados a partir do critério guloso (2ª iteração)

Números de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Perdas Ativas (W)
1	4	5	627,01
2	5	14	873,44

(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

Para esta situação, escolheu-se o ramo 2 aleatoriamente para ser retirado do sistema, desfazendo-se assim mais um laço do sistema, como pode-se observar na Figura 29.

Tabela 7 – Chaves abertas para a rede virar radial – 2ª iteração

	Chave 1	Chave 2	Chave 3
Vsol =	6-8	5-14	VAZIO

(Fonte: Autoria própria)

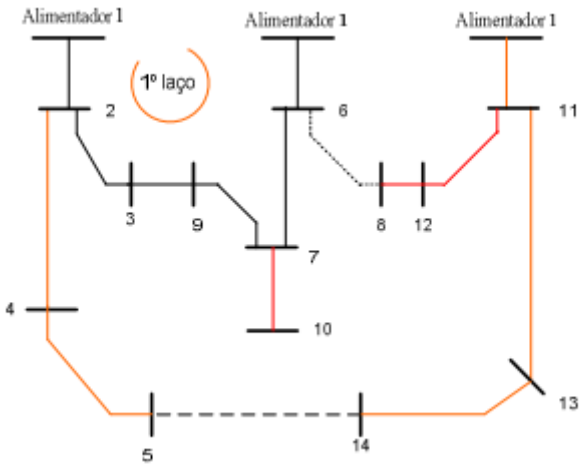

Figura 29 – Sistema de 14 barras malhado com 2 laços a menos
(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

Nesta terceira e última iteração, apenas os ramos 1 – 2, 1 – 6, 2 – 3, 3 – 9, 9 – 7, e 6 – 7 que podem ser retirados do sistema, visto que, caso se retire qualquer um dos outros ramos, haverá cargas ilhadas. Após o cálculo das perdas, por Newton-Raphson, formula-se então a Tabela 8, contendo os possíveis candidatos a serem retirados do sistema.

Tabela 8 – Perdas de cada ramo do sistema (3ª iteração)

Números de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Perdas Ativas (W)
1	7	9	2.210,06
2	3	9	2.819,12
3	2	3	5.847,19
4	6	7	7.354,13
5	1	2	11.464,28
6	1	6	11.506,88

(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

E, a partir do critério guloso, escolheu-se os seguintes ramos, mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Ramos selecionados a partir do critério guloso (3ª iteração)

Números de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Perdas Ativas (W)
1	7	9	2.210,06
2	3	9	2.819,12

(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

Assim sendo, ao utilizar pela última vez, o critério aleatório, escolhe-se o ramo 2 para ser retirado do sistema. Formando então, por fim, um sistema radial, mostrado na Figura 30, com a solução final mostrada na tabela a seguir.

Tabela 10 – Chaves abertas para a rede virar radial – 3ª iteração

	Chave 1	Chave 2	Chave 3
Vsol =	6-8	5-14	3-9

(Fonte: Autoria própria)

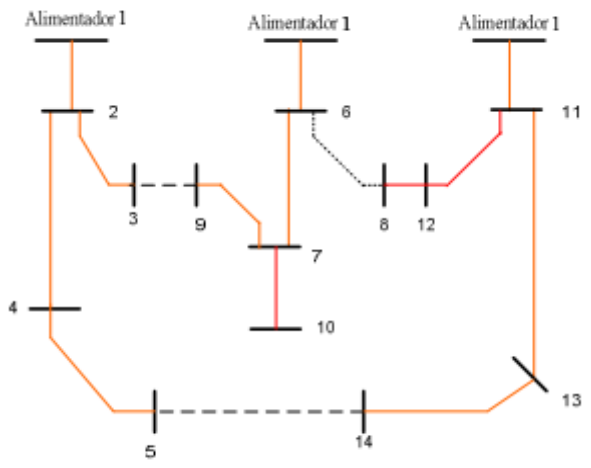

Figura 30 – Sistema de 14 barras radial
(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

Por fim, calculam-se as perdas ativas do sistema resultante. E vê-se que, as perdas ativas iniciais que eram de 51,143 kW, depois da fase construtiva, diminuíram para 48,386 kW. Ou seja, obteve-se uma solução de boa qualidade.

A fase de busca local, assim como o que ocorreu com a exemplificação do problema do Caixeiro Viajante, é explicitada a seguir.

Fase de Busca local:

Ao realizar a reconfiguração da rede de distribuição, após a fase construtiva realizada pelo GRASP, deve-se realizar a busca local, visando melhorar ainda mais o resultado. Assim, a partir da solução gerada na fase construtiva, Figura 30, implementa-se a busca local, utilizando-se a metaheurística VNS, que é detalhada a seguir, seguindo o que foi descrito na Figura 30:

1) Faz-se k=1;
2) Repetir os seguintes passos até $k=k_{max}=2$
   (a) Agitação: É gerada uma solução (configuração radial) *x'* na *k*-ésima vizinhança de *x*. Para k=1, fecha-se uma chave aleatoriamente (formando uma malha) e abre-se outra chave aleatoriamente (gerando uma rede radial).
   (b) Busca local: é gerada uma solução *x''* utilizando uma busca local, como pode-se ver na Figura 31 a seguir, fechou-se a chave do trecho entre as barras 3 e 9, e abriu-se a chave entre os trechos 2 e 3.

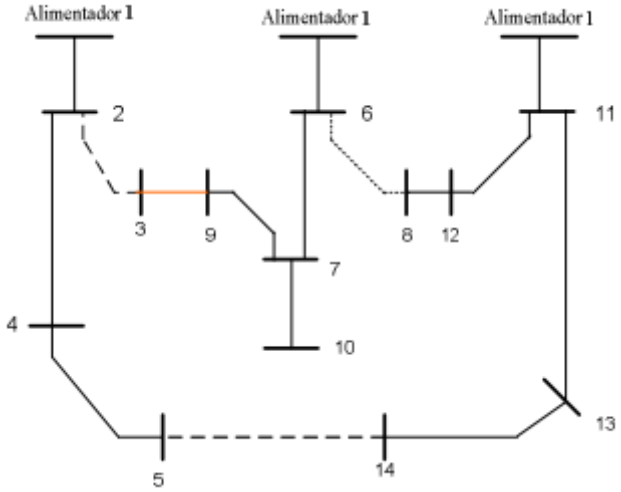

Figura 31 – Sistema de 14 barras – Primeira iteração da fase de busca local do GRASP
(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

(c) Mover ou não: Se as perdas na solução *x''* são menores que as perdas da solução *x* (solução incumbente), *x=x''* e *k*=1. Caso contrário gera-se *Nvisistas(x'').*

Esta nova configuração tem um total de 63,954kW de perdas ativas, portanto, a busca local será realizada do outro lado do ramo que formou este laço. Assim, o ramo 2-3 volta a fazer parte do sistema e o ramo 9-7 é retirado, como mostrado na Figura 32.

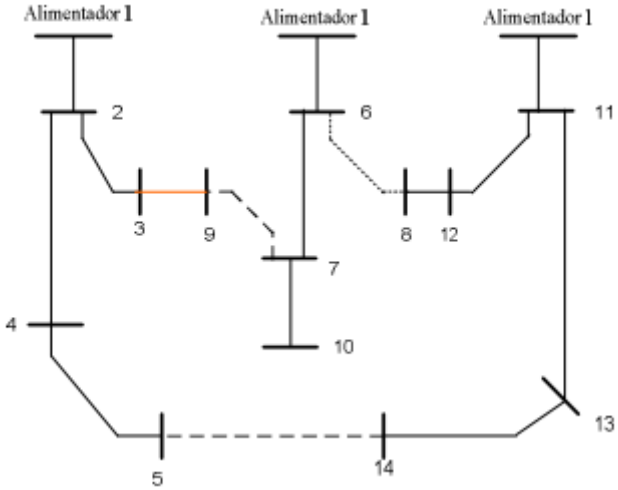

Figura 32 – Sistema de 14 barras radial com valor ótimo de perdas ativas
(Fonte: (OLIVEIRA, 2011))

As perdas ativas totais desta nova configuração são de apenas 46,610 kW, que é um valor bem menor que o das perdas da solução encontrada na fase construtiva do GRASP. Continuou-se a busca local por mais algumas iterações, porém o resultado ótimo para este sistema é o resultado mostrado na Figura 32 e na Tabela 11, a seguir.

Tabela 11 – Chaves abertas para a rede virar radial – Final

	Chave 1	Chave 2	Chave 3
Vsol =	6-8	5-14	3-9

(Fonte: Autoria própria)

5.4. Problema de alocação de chaves em redes de distribuição usando VNS

O problema de alocação de chaves consiste em alocar um determinado número de chaves na rede elétrica que atenda o modelo matemático descrito na Seção 4.3.1. Para o qual foi utilizado o VNS como técnica de otimização.

Avaliar a função objetivo para a restauração de uma rede elétrica dada uma configuração de chaves, significa desenvolver o seguinte procedimento:

- Simula-se uma falta em cada um dos trechos da rede avaliada;
- Para cada uma destas faltas, restaura-se a energia para aqueles blocos à jusante do bloco de defeito, conectando estes blocos a outros alimentadores;
- Uma vez restaurada a rede, é feita a reconfiguração e avalia-se a função objetivo descrita na Equação (4.4).
- Por fim, os valores da função objetivo para cada uma das faltas realizadas são somados, obtendo-se, portanto, a função objetivo total, descrita pela Equação (5.2) a seguir.

$$F(u)_{TOTAL} = \sum_{k=1}^{n} F(u)_k \tag{5.2}$$

Onde k representa cada uma das faltas realizadas no sistema, e n é o número total de faltas.

De acordo com o algoritmo VNS ilustrado na Figura 25, seleciona-se o conjunto de estruturas de vizinhança N_k, onde k=1, ..., $kmax$. Gera-se uma solução inicial (solução incumbente) de forma aleatória e se implementa os seguintes passos:

1) Avalia-se a função objetivo total para a solução inicial x (solução imcumbente), simulando-se uma falta em cada um dos trechos da rede, restaurando e reconfigurando a mesma;
2) Repetem-se os passos a seguir até que $k=k_{max}=2$:

(a) **Agitação:** é gerada uma solução *x'* na *k*-ésima vizinhança de *x*. Trocam-se *k* chaves de posição de forma aleatória;

(b) **Busca local:** aplica-se uma busca local em torno de *x'*, mudando uma chave de posição de forma aleatória e avalia-se a função objetivo, obtendo-se *x''*;

(c) **Mover ou não:** caso o valor da função objetivo total da solução *x''* seja maior que o valor da solução incumbente *x*, *x* passa a ser *x''* e volta-se a k=1. Caso contrário, continua-se a busca local (b) até visitar $Max_{visitas}$. Atingindo o $Max_{visitas}$ de visitas e não encontrada uma solução $x'' > x$, $k=k+1$ e retorna-se ao passo 2.

O valor de $Max_{visitas}$ depende do tamanho da rede.

Este processo foi aplicado em dois sistemas testes e os resultados obtidos para os mesmos são descritos na próxima seção deste referido trabalho.

6. Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para sistemas de pequeno porte, IEEE 33 barras, e, IEEE 69 barras, ambos amplamente utilizados na literatura (ZVIETCOVICH, 2006).

Esse algoritmo foi implementado no software MatLab, e os testes foram realizados em uma máquina CCE Ultra Thin U45W, com processador Intel de 1.10 GHz, memória RAM de 4.00 GB e sistema operacional Windows 8.1 Pro 64 bits.

6.1. Rede de 33 barras

A Figura 33 apresenta a topologia do sistema de 33 barras do IEEE utilizado como teste para o programa implementado neste trabalho, os círculos sólidos vermelhos são as chaves localizadas nesta rede, enquanto que os círculos azuis representam os blocos do sistema. As características desta rede são descritas na Tabela 12.

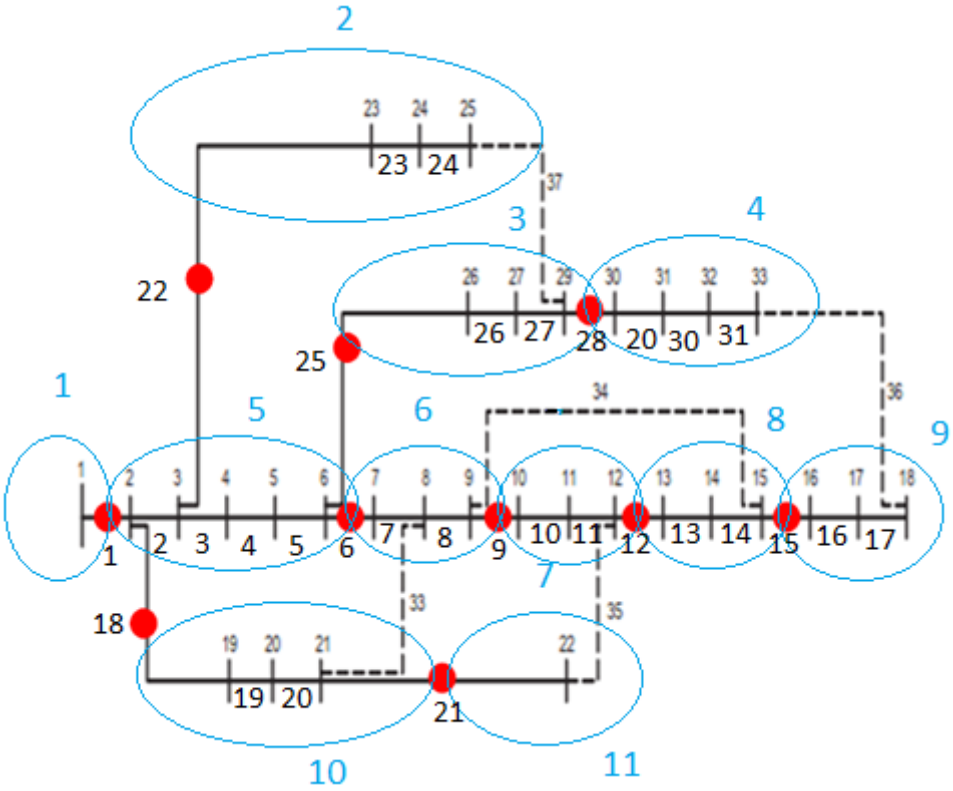

Figura 33 – Sistema de 33 barras
(Fonte: (ZVIETCOVICH, 2006))

Tabela 12 – Dados da rede de 33 barras

Item	Valores
N° de barras	33 barras
N° de trechos	37 trechos (5 inativos)
N° de chaves a serem alocadas	15 chaves
Faltas/trecho	2 falta/trecho (alimentador principal)
	1 falta/trecho (ramais)
Potência ativa total	3715 kW
Potência reativa total	2300 kVAR
N° de consumidores	1 consumidor/50 kW

(Fonte: Autoria própria)

A Figura 33 representa a solução inicial, onde as chaves dos trechos 33, 34, 35, 36 e 37 estão abertas. Na prática estas chaves ajudam nos trabalhos de manutenção preventiva ou corretiva, sendo este último caso para o problema de restauração de redes elétricas.

Com a finalidade de mostrar as informações e resultados desde antes da simulação de uma falta, passando pela restauração e finalmente a reconfiguração, é desenvolvido um exemplo que consiste em simular uma falta entre as barras 13 e 14 (no meio do trecho). A chave entre as barras 12 e 13 abrirá, deixando sem energia os blocos 8 e 9, (ver Figura 34). Resultados antes da falta são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados antes da falta

Trecho com maior carregamento (%)	N° de barras com tensões < 0.93 p.u.	Barra com menor tensão (p.u.)	Perdas elétricas em kW
1 -2 (90%)	10 barras	18 (0,93 p.u)	202,3

(Fonte: Autoria própria)

Aplicando-se, então, a falta ao sistema, são implementadas as seguintes etapas:

Etapa da restauração

O bloco que contém este trecho e o bloco a jusante do mesmo serão retirados do sistema através da abertura da chave de interconexão, ficando o sistema como mostrado na Figura 34.

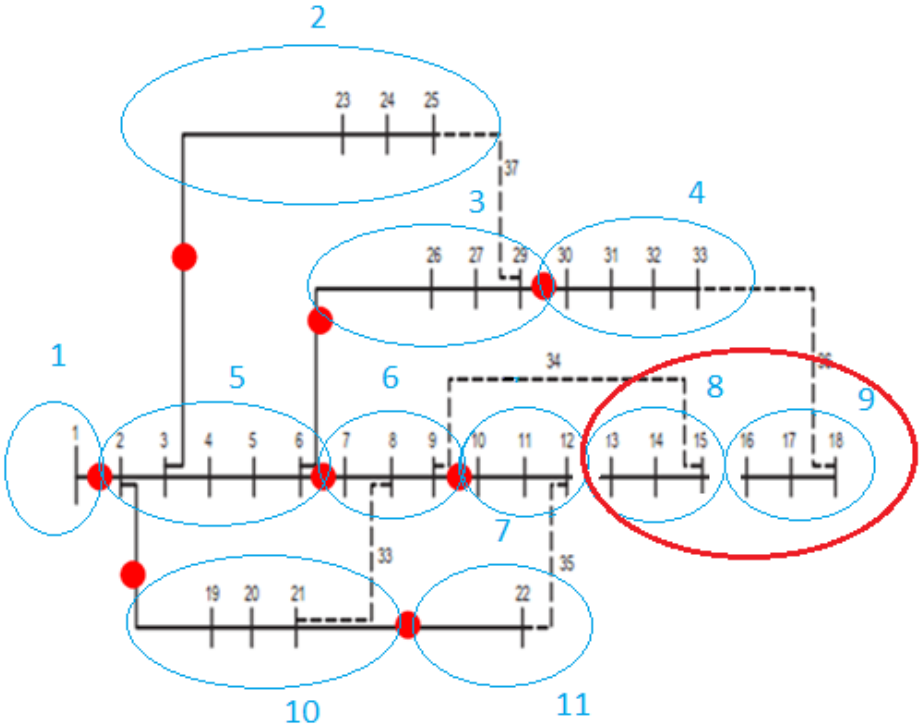

Figura 34 – Rede de 33 barras durante a falta
(Fonte: Autoria Própria)

Feito isso, para se realizar a restauração, o bloco 9 é identificado, a chave entre as barras 15 e 16 será aberta e a chave entre as barras 18 e 33 fechada. Desta forma será reestabelecida a energia elétrica ao bloco 9, como ilustrado na Figura 35.

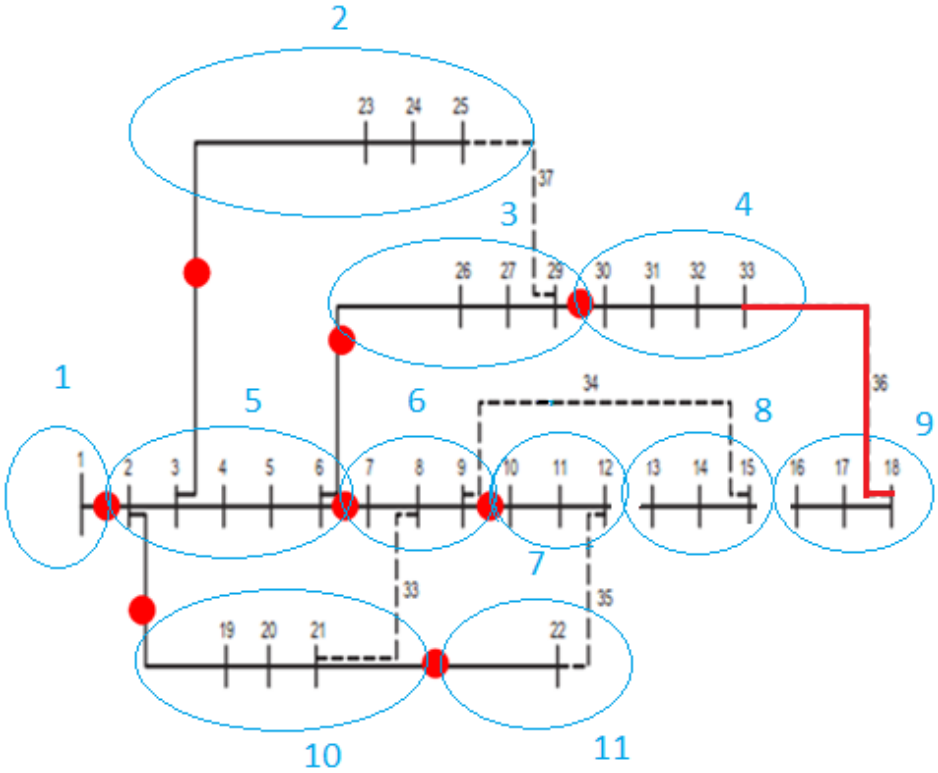

Figura 35 – Rede de 33 barras durante a restauração
(Fonte: Autoria Própria)

Visando acompanhar os resultados neste instante (depois do reestabelecimento da falta), é descrita a Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados depois do reestabelecimento da falta

Chaves abertas (trechos)	F.O.	Chaveamentos	Perdas (kW)	Menor nível de tensão (p.u.)	Potência não suprida* (kW)	Reconfiguração	Houve ilhamento de consumidores?
5-7-8-9	3,98	6	203	0,912	650,3	-	SIM

(Fonte: Autoria própria)

Observa-se nos resultados da Tabela 14 uma pequena elevação das perdas elétricas e degradação dos níveis de tensão. Em alguns casos (redes de grade porte) considerando o patamar de carga pesada (hora pico), a capacidade dos alimentadores será menor ao do fluxo de carga neste instante, necessitando ser feita a reconfiguração para não colapsar a rede elétrica (o sistema de proteção atuar).

Etapa da Reconfiguração

Uma vez restaurada a energia ao bloco 9, na etapa anterior, é observado que as chaves 33-34-35-37 estão abertas. Os passos para a reconfiguração foram ilustrados no item 4.3.1. A reconfiguração encontrou a rede elétrica ilustrada na Figura 36 e os resultados mostrados na Tabela 15.

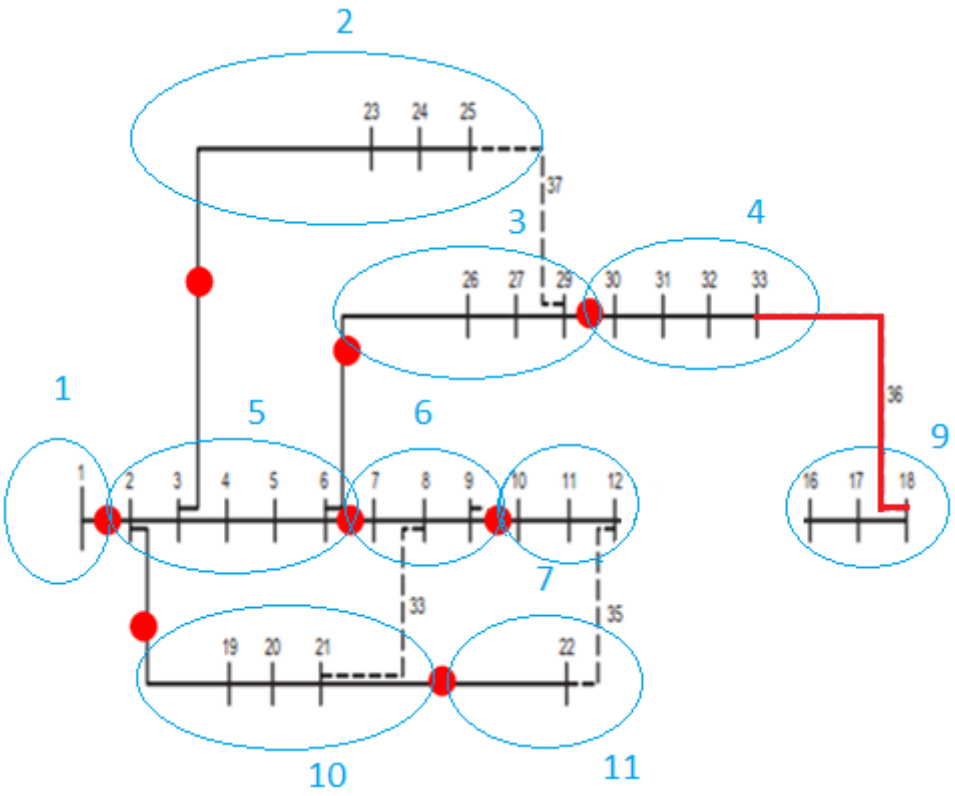

Figura 36 - Rede de 33 barras após a reconfiguração
(Fonte: Autoria própria)

Tabela 15 – Resultados da reconfiguração

Chaves abertas	F.O.	Chaveamentos	Perdas (kW)	Menor nível de tensão (p.u.)	Potência não suprida* (kW)	Reconfiguração	Houve ilhamento de consumidores?
5-7-8-9	4,16	6	140	0,933	509,91	24-30	NÃO

(Fonte: Autoria própria)

Para a configuração inicial de chaves, mostrada na Figura 31, é feita a simulação em todos os trechos da rede elétrica, sendo obtidos os resultados para as 5 melhores soluções, descritos na Tabela 16.

Tabela 16 – Melhores soluções encontradas – 33 barras

N° de solução	Alocação de chaves (obtida pelo VNS)	N° total de defeitos simulados	Media de valores							
			fchaveamento	ftensões	fperdas	fpotência	fDEC	N° de faltas onde blocos não foram reestabelecidos	F(u) Média	F(u) Total
Conf. Inicial	1-6-9-12-15-18-21-22-25-29-33-34-35-36-37	32	0,598	0,792	0,277	0,774	0,774	21	1,375	42,64
Melhor Conf. 1	1-2-3-7-8-19-20-27-28-31-33-34-35-36-37	32	0,523	0,887	0,643	0,836	0,836	10	3,051	94,58
Melhor Conf. 2	1-3-7-9-10-13-19-28-29-30-33-34-35-36-37	32	0,568	0,894	0,642	0,815	0,815	10	3,026	93,79
Melhor Conf. 3	1-2-3-8-19-20-21-27-30-31-33-34-35-36-37	32	0,409	0,802	0,643	0,738	0,738	11	2,940	91,15
Melhor Conf. 4	1-3-7-9-13-16-19-28-30-31-33-34-35-36-37	32	0,536	0,888	0,650	0,803	0,803	11	2,937	91,05
Melhor Conf. 5	1-3-9-12-13-16-19-28-30-31-33-34-35-36-37	32	0,508	0,778	0,556	0,750	0,750	12	2,721	84,34

(Fonte: Autoria própria)

Ao observar a Tabela 16, vê-se que a melhor solução gerou uma função objetivo total, descrita pela Equação (5.2), maior que o dobro da função objetivo total ao se utilizar a configuração inicial do sistema. Visto que, este foi o parâmetro central utilizado para se buscar

melhores soluções, já se pode ver que conseguiu-se alcançar este objetivo. Além disso, as outras soluções encontradas apresentam valores médios muito bons, mostrando assim que a metodologia utilizada gerou bons resultados. Assim como anteriormente, as chaves 33-34-35-36-37 são chaves inicialmente inativas, que auxiliam no processo de restauração e reconfiguração do sistema. No entanto, para poder explicitar ainda mais os resultados obtidos, a Tabela 17 a seguir realiza uma comparação entre alguns parâmetros do sistema, utilizando-se a configuração inicial de chaves e a configuração gerada como melhor solução pela metaheurística VNS.

Tabela 17 – Comparação entre a solução inicial e a melhor solução encontrada – 33 barras

Configuração de chaves	**Trecho c/ falta**	**F.O.**	**Chaveamentos**	**Perdas (MW)**	**Menor nível de tensão (p.u.)**	**Potência não suprida* (kW)**	**Chaves abertas após a reconfiguração**	**Houve ilhamento de consumidores?**
Configuração inicial (aleatória) do sistema	6	4,16	6	0,140	0,933	509,91	24-30	NÃO
	15	4,37	5	0,136	0,946	224,70	7-10-14-23	NÃO
	20	-	5**	-	0,927	295,50	-	SIM
	25	-	6**	-	0,840	331,10	-	SIM
Melhor configuração encontrada no programa	6	3,80	11	0,127	0,930	620,10	4-9-24	NÃO
	15	4,31	3	0,117	0,938	742,80	6-24	NÃO
	20	4,39	4	0,172	0,923	196,98	14-24-32	NÃO
	25	3,78	11	0,127	0,931	626,09	4-9-24	NÃO

(Fonte: Autoria própria)

Na tabela acima, o valor da potência não suprida não leva em conta as cargas que ficaram ilhadas devido ao processo de restauração do sistema. Já, o número de chaveamentos para as faltas simuladas nos trechos 20 e 25 levou em conta somente os chaveamentos gastos para se retirar os blocos com falta e realocar um dos blocos a jusante do mesmo, ficando um ou mais blocos ilhados (sem ter sido realocados ao sistema).

Pela Tabela 17, observa-se para as faltas nos trechos 6 e 15 que os valores de menor nível de tensão e da quantidade de potência não suprida são melhores para a configuração de chaves inicial. Já os valores das perdas de potência ativa são melhores para a configuração de chaves encontrada pela metodologia deste trabalho.

No caso das faltas nos trechos 20 e 25, houve ilhamento de consumidores para a configuração de chaves inicial, o que não ocorreu para a configuração de chaves encontrada

pela metodologia, sendo que todos os blocos a jusante dos blocos de defeitos foram reestabelecidos.

Para ilustrar ainda mais a comparação entre a melhor solução encontrada e a solução inicial do sistema, o gráfico da figura a seguir compara alguns parâmetros de ambas as soluções.

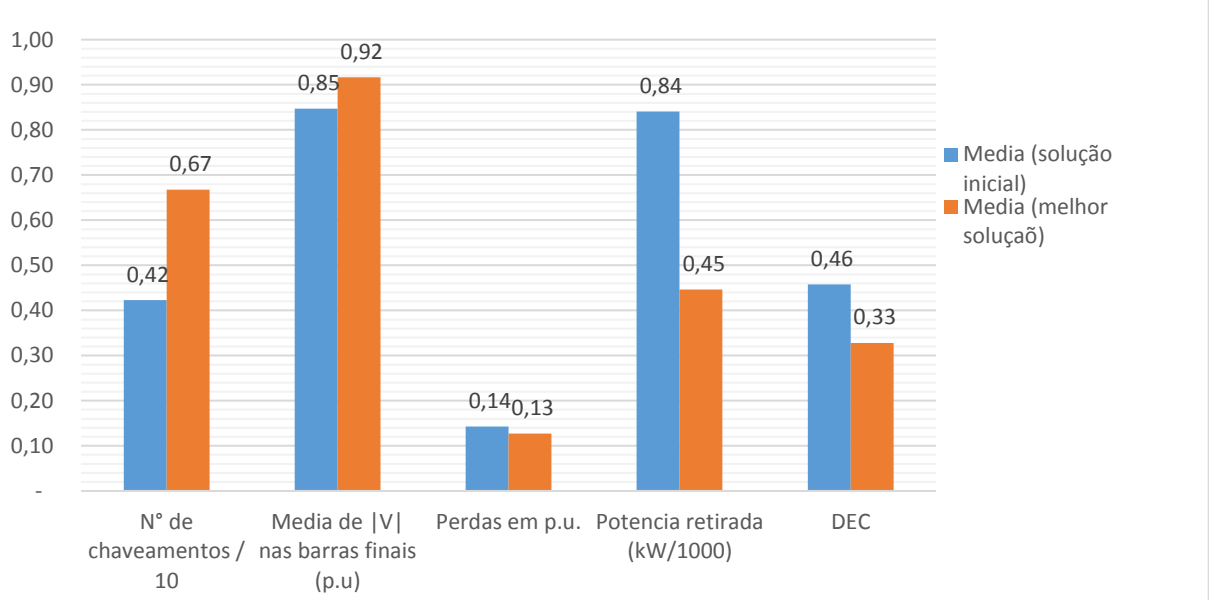

Figura 37 - Gráfico com resultados do sistema de 33 barras
(Fonte: Autoria própria)

Ao observar a Figura 37, vê-se que a melhor solução encontrada pela metodologia aqui proposta apresentou baixos níveis de perdas, potência retirada e do DEC em relação à solução inicial, além de também se obter valores maiores dos níveis de tensão, que são os resultados que eram esperados ao se propor essa metodologia.

Assim sendo, pode-se ver então que, embora para alguns trechos com falta, a solução encontrada não forneça valores muito ótimos, ela permite que haja uma maior confiabilidade do sistema no que se diz respeito à entrega da energia elétrica aos consumidores na ocorrência de faltas em trechos nos quais a solução inicial não garante o mesmo.

6.2. Rede de 69 barras

A Figura 38 apresenta a topologia do sistema de 69 barras, amplamente utilizado na literatura, e que foi utilizado em (ROGATTO, 2012). Já a Tabela 18 apresenta alguns dados sobre esse sistema em questão.

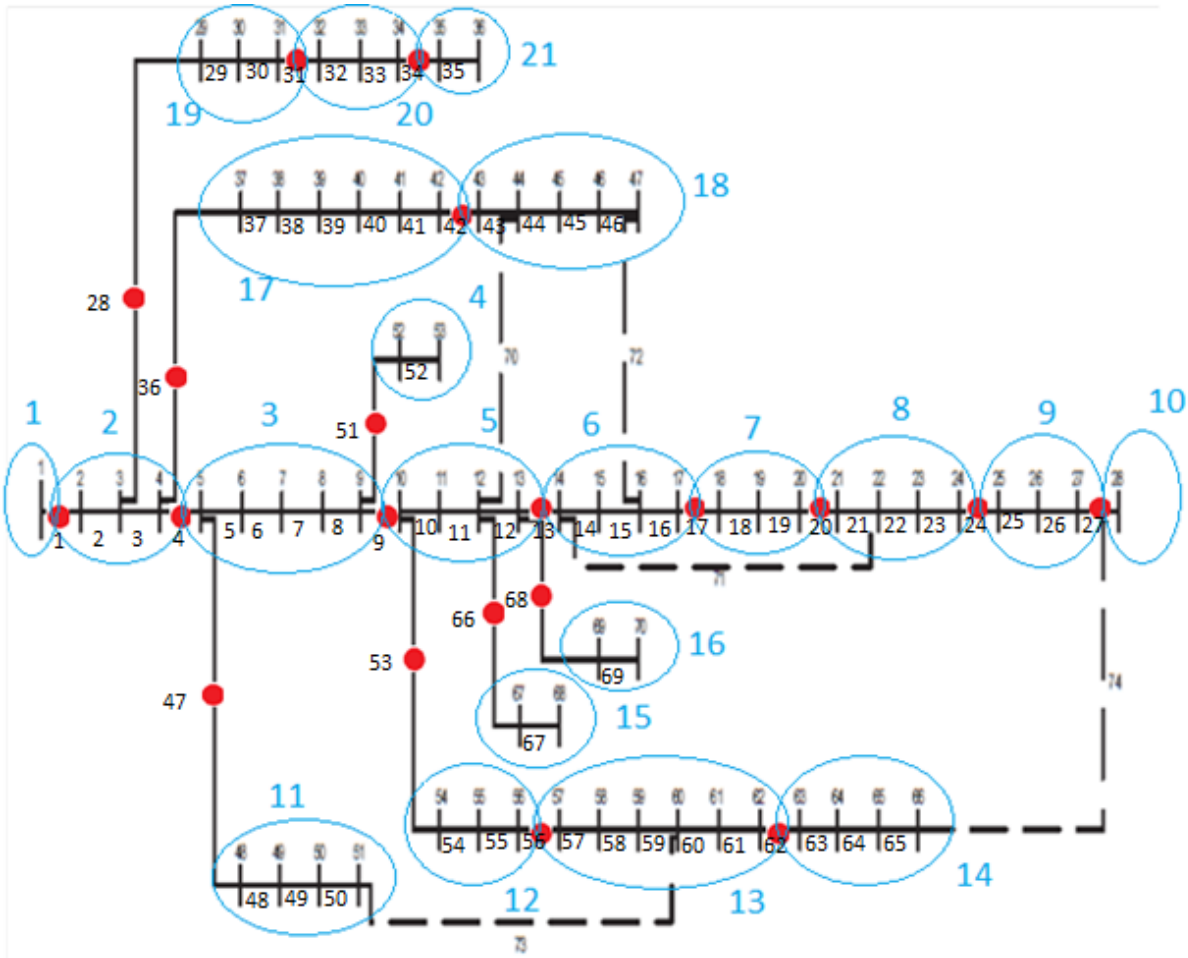

Figura 38 – Sistema de 69 barras
(Fonte: Autoria Própria)

Tabela 18 – Dados do sistema de 69 barras

Item	Valores
N° de barras	69 barras
N° de trechos	73 trechos (5 inativos)
N° de chaves a serem alocadas	25 chaves
Faltas/trecho	2 falta/trecho (alimentador principal)
	1 falta/trecho (ramais)
Potência ativa total	1097,77 kW
Potência reativa total	881,79 kVar
N° de consumidores	1 consumidor/50 kW

(Fonte: Autoria própria)

Para cada configuração gerada pelo algoritmo VNS foram simuladas 68 faltas, obtendo-se os 5 melhores resultados, mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Melhores soluções encontradas – 69 barras

N° de solução	**Alocação de chaves (obtida pelo VNS)**	**N° total de defeitos simulados**	**Media de valores**							
			fchaveamento	**ftensões**	**fperdas**	**fpotência**	**fDEC**	**N° total de blocos não reestabelecidos**	**F(u) Média**	**F(u) Total**
Conf. Inicial	*	68	0,5618	0,7310	0,4644	0,6900	0,6894	36	2,09	142,62
Melhor Conf. 1	**	68	0,6529	0,8107	0,6065	0,7663	0,7656	26	2,76	187,61
Melhor Conf. 2	***	68	0,5635	0,7419	0,5360	0,7030	0,7024	31	2,42	164,67
Melhor Conf. 3	****	68	0,5171	0,7141	0,5360	0,6755	0,6751	31	2,40	163,34
Melhor Conf. 4	*****	68	0,5571	0,7288	0,5217	0,6890	0,6883	32	2,36	160,41
Melhor Conf. 5	******	68	0,5312	0,7249	0,5068	0,7029	0,7023	33	2,31	157,31

(Fonte: Autoria própria)

Onde:

*: 1-4-9-13-17-21-24-27-28-31-34-36-42-47-51-53-56-62-66-68-70-71-72-73-74

**: 1-4-6-9-12-31-34-39-41-42-43-44-46-50-53-56-58-60-62-65-70-71-72-73-74

***: 1-6-9-15-17-21-23-24-27-28-31-34-36-42-47-54-56-62-66-68-70-71-72-73-74

****: 1-6-9-15-17-21-23-24-27-28-31-34-36-42-47-53-56-62-66-68-70-71-72-73-74

*****: 1-7-9-15-17-21-23-24-27-28-31-34-36-42-47-53-56-62-66-68-70-71-72-73-74

******:1-6-9-15-17-21-23-24-27-29-31-34-36-42-47-53-56-62-66-68-70-71-72-73-74

Observando-se a Tabela 19, assim como na Tabela 16, vê-se que a melhor solução gerou uma função objetivo total bem maior que a função objetivo total ao se utilizar a configuração inicial do sistema. Visto que, este foi o parâmetro central utilizado para se buscar melhores soluções, já se pode ver que conseguiu-se alcançar este objetivo. Além disso, as outras soluções encontradas apresentam valores médios muito bons, mostrando, assim, que a metodologia utilizada gerou ótimos resultados. Assim como anteriormente, as chaves 70-71-

72-73-74 são chaves inicialmente inativas, que auxiliam no processo de restauração e reconfiguração do sistema. No entanto, para poder explicitar ainda mais os resultados obtidos, a Tabela 20 a seguir realiza uma comparação entre alguns parâmetros do sistema utilizando-se a configuração inicial de chaves e a configuração gerada como melhor solução pela metaheurística VNS.

Tabela 20 – Comparação entre a solução inicial e a melhor solução encontrada – 69 barras

Configuração de chaves	**Trecho c/ falta**	**F.O.**	**Chaveamentos**	**Perdas (MW)**	**Menor nível de tensão (p.u.)**	**Potência não suprida (kW)**	**Reconfiguração**	**Houve ilhamento de consumidores?**
Configuração inicial (aleatória) do sistema	6	-	-	-	-	-	-	SIM
	9	-	-	-	-	-	-	SIM
	23	4,61	8	0,016	0,969	17,25	9-14-21-49	NÃO
	26	4,75	5	0,016	0,973	5,73	5-11-13-20	NÃO
Melhor configuração encontrada no programa	6	4,44	10	0,026	0,953	61,52	40-65-18-7	NÃO
	9	4,31	12	0,012	0,930	85,18	12-40-54	NÃO
	23	4,69	4	0,015	0,970	72,15	5-11-13	NÃO
	26	4,68	4	0,015	0,961	72,15	11-13-45	NÃO

(Fonte: Autoria própria)

Observando-se a Tabela 20, percebe-se que, ao utilizar a configuração inicial do sistema, para faltas nos trechos 6 e 9, não foi possível a restauração de nenhum dos blocos atingidos pela contingência, devido a este fato, não houve restauração nem reconfiguração do sistema, de modo que não foi possível obter os parâmetros da rede, visto que, estes são fornecidos pelos métodos de restauração e reconfiguração. Enquanto isso, para a melhor configuração das chaves encontrada pela metodologia que utiliza a VNS, ao se realizar faltas nos mesmos trechos, os consumidores dos blocos à jusante destes foram realocados, de forma a possibilitar a reconfiguração do sistema, obtendo valores aceitáveis para os parâmetros de restrição do sistema, como o nível de tensão e as perdas ativas nos trechos, como pode-se observar na tabela.

Já para as faltas realizadas nos trechos 23 e 26, observa-se que os parâmetros obtidos, tanto utilizando a configuração inicial, quanto a melhor solução encontrada pelo VNS, são muito próximos entre si. No entanto, assim como para o sistema de 33 barras, leva-se mais em consideração a capacidade de restauração dos consumidores atingidos por uma falta, permitida pela configuração de chaves vigente. Assim sendo, numa conjuntura maior, onde tanto os parâmetros de rede quanto a sua capacidade de restauração é analisada, e observando tanto a

Tabela 19 quanto a Tabela 20, pode-se concluir que a solução designada como a melhor solução para o sistema, realmente apresenta parâmetros muito melhores que os da configuração inicial, assim como o esperado, mostrando que esta implementação funcionou de maneira correta e objetiva.

Para melhor ilustrar isso, fez-se também um gráfico comparando os resultados obtidos pela melhor solução encontrada com os obtidos pela solução inicial.

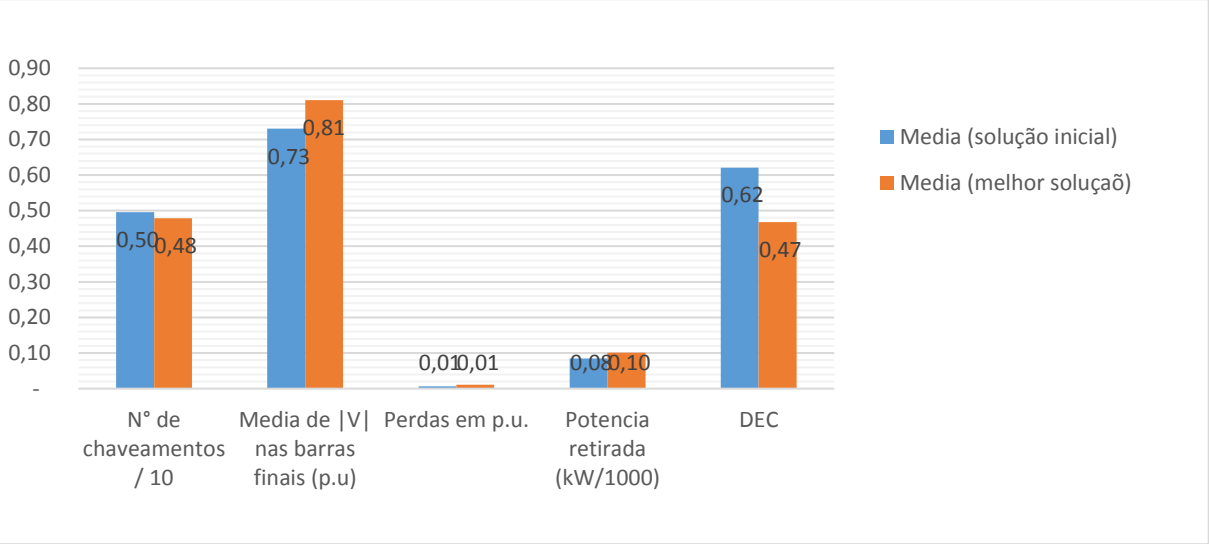

Figura 39 - Gráfico com resultados do sistema de 69 barras
(Fonte: Autoria própria)

Observando-se o gráfico da Figura 39, vê-se que a melhor solução encontrada gerou valores de número de chaveamento médio, perdas e DEC menores aos gerados pela solução inicial, além de promover um maior nível médio de tensão nas barras do sistema. Apenas a potência média retirada que foi um pouco maior, mas isso não tira o fato de esta solução ter apresentado parâmetros melhores que o da solução inicial.

7. Conclusões e trabalhos futuros

Este Trabalho de Conclusão de Curso consistiu na alocação de um número de chaves na rede elétrica de distribuição visando reduzir os seguintes parâmetros: perdas elétricas, número de chaveamentos, potência não suprida, carregamento das linhas, além de aumentar o nível de tensão nas barras do sistema e melhorar o DEC do mesmo.

Para o problema de Alocação de Chaves foi utilizado a técnica *Variable Neighborhood Search* – VNS. Já para o problema de Reconfiguração foi utilizado o *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* – GRASP, sendo que na etapa de busca local deste, utilizou-se também do VNS.

As técnicas implementadas neste trabalho, que foram o uso do VNS para promover a alocação de chaves e a observação de vários parâmetros da rede, citados anteriormente, além do uso do GRASP para a reconfiguração da rede, constituem uma ferramenta nova quando comparada na literatura, acrescentando novas aplicações na literatura procurada.

Pelos resultados obtidos na seção anterior, as metodologias propostas cumpriram o seu propósito, de melhorar as grandezas que representam a função objetivo e satisfazer as suas restrições. Em alguns casos (simulações de falta), observou-se que a metodologia aumentou a confiabilidade do sistema, pois reestabeleceu a energia elétrica em todos os blocos à jusante do bloco de defeito, não fazendo o mesmo na configuração inicial de chaves.

A utilização do VNS na etapa de busca local do GRASP foi de grande importância, pois encontrou melhores resultados comparados à etapa de construção.

Nos resultados observados para a rede de 33 barras não foi necessário isolar algum bloco além do bloco de defeito. Já na rede de 69 barras foi necessária essa isolação.

Quanto aos tempos computacionais, para a rede de 33 barras utilizou-se 48 horas para encontrar os resultados. Aumentando este tempo para a rede de 69 barras, chegando a uma média de 90 horas. Este fato mostra que, quanto ao tempo computacional, a implementação não conseguiu ocorrer de forma tão ótima quanto o esperado, no entanto, em vista aos seus resultados obtidos, pode-se concluir que, embora demorado, o seu funcionamento foi correto no que se refere aos parâmetros aqui abordados.

Como trabalhos futuros, considera-se que o modelo matemático deverá encontrar um número mínimo de chaves, além de considerar novos parâmetros de qualidade de energia elétrica e testar redes reais de grande porte, objetivando, também, diminuir o tempo computacional gasto para a análise dos dados e processamento dos resultados. Além disto, sugere-se avaliar melhor a Função objetivo F(u) média, colocando o desvio padrão neste

modelo, visando encontrar resultados uniformes para as faltas simuladas. Assim como inserir outros equipamentos na rede elétrica, seja de controle, banco de capacitores, reguladores de tensão ou de novas fontes de geração distribuída.

Referências Bibliográficas

AMÉZQUITA, J. C. L. **Alocação Ótima de Chaves de Interconexão nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2014.

ASSIS, L. S. DE. **Otimização de alocação de chaves em redes de distribuição de energia elétrica**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2014.

ASSIS, L. S. DE et al. Switch Allocation Problems in Power Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, p. 1–8, 2014.

BARBOSA, C. H. N. DE R. **Reconfiguração e Restauração Ótima de Sistemas de Distribuição Primária de Energia Elétrica**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

BENAVIDES, A. et al. A comparison of Tabu search and GRASP for the switch allocation problem. **Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2009.

BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. **Reliability Evaluation of Power Systems**. 2. ed. [s.l.] Plenum Press, 1994.

BILLINTON, R.; JONNAVITHULA, S. Optimal switching device placement in radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 3, p. 1646–1651, 1996.

FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; LÓPEZ, J. C. Optimisation-based switch allocation to improve energy losses and service restoration in radial electrical distribution systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 10, n. 11, p. 2792–2801, 2016.

FREDDO, A. R.; BRITO, R. C. **Implementação da Metaheurística GRASP para o Problema do Caixeiro Viajante Simétrico**, 2008. Disponível em: <http://www.inf.ufpr.br/aurora/disciplinas/topicosia2/downloads/trabalhos/>. Acesso em: 5 jun. 2018.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.; ROBBA, E. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 1ª Edição. São Paulo, Brasil: Editora Blucher, 2005. 328 p.

KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. **Estimação de indicadores de qualidade de energia elétrica**. São Paulo: Blucher, 2009.

LORENZETI, J. F. C. **Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para a Melhoria das Condições de Operação com Relação à Estabilidade de Tensão**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2004.

MLADENOVIĆ, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. **Computers and Operations Research**, Oxford, v. 11, n. 24, p. 1097-1100, 1997.

NETO, E. A. C. A. **Alocação de Chaves Automatizadas em Redes de Distribuição Utilizando Multiplos Critérios**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

NETO, W. P. M. **Restauração Automática de Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Grande Porte com Geração Distribuída.** [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2011.

OLIVEIRA, L. W. et al. Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição para minimização de perdas de energia. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 20, n. 2, p. 233–246, 2009.

OLIVEIRA, M. B. C. D. **Reconfiguração de Alimentadores em Sistemas de Distribuição Usando a Metaheurística GRASP**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2011.

PAULILO, G.; TEIXEIRA, M. D. **Capítulo IV Variações de tensão de longa duração**. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/05/Ed87_fasc_qualidade_cap4.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2018.

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.** Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2015.

PRADO, R. S. **Restauração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Evolução Diferencial com Árvore de Ancestralidade.** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

ROGATTO, G. **Reconfiguração ótima de redes de distribuição.** Universidade de São Paulo, 2012.

ROMERO, M. E. V. **Alocação de Chaves para Transferências Automáticas de Cargas entre Subestações Utilizando Algoritmo Busca Tabu Reativa**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2009.

SALGADO, R. DE S. **Fluxo de Potência - Método de Newton**. Disponível em: <http://www.labspot.ufsc.br/~katia/FPNR-Slg.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2018.

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, vol. 3, no. 2, pp. 753-762, May 1988.

SILVA, M. S. **MODELAGEM DAS FUNÇÕES DE UMA SUBESTAÇÃO AUTOMATIZADA EMPREGANDO MODELOS ORIENTADOS A OBJETO**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

SPERANDIO, M. **Planejamento da automação de sistemas de manobra em redes de distribuição**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

STEVENSON, W. D. **ELEMENTOS DE ANÁLISE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

VISCONTI, I. F. **Modelos de Cargas Baseados em Medições para Simulações Dinâmicas em Sistemas Elétricos**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica, 2010.

ZVIETCOVICH, W. G. **Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando a Metaheuristica Busca de Vizinhança Variável**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2006.

ZVIETCOVICH, W. G.; KAGAN, N. Restauração de Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição Elétrica Utilizando Algoritmos Meméticos. **Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**, p. 1–10, 2008.

Apêndice A – Tabelas utilizadas para a formulação dos gráficos de resultados

Para o sistema de 33 barras:

- Resultados da configuração inicial:

Tabela 21 – Resultados da configuração inicial (1-6-9-12-15-18-21-22-25-29-33-34-35-36-37)

Chaves abertas – configuração inicial Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potência retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
1											> 1		
2	1	0	0	0		0	2831,234	0	2	0	> 1	0	NÃO
3	1	0	0	0		0	2831,234	0	2	0	> 1	0	NÃO
4	1	0	0	0		0	2831,234	0	2	0	> 1	0	NÃO
5	1	0	0	0		0	2831,234	0	2	0	> 1	0	NÃO
6	6	0,6	0,9302	0,9302	0,1399	0,8601	509,902	0,8833	0,233	0,883	0	4,1569	NÃO
7	6	0,6	0,9384	0,9384	0,1399	0,8601	509,902	0,8833	0,233	0,883	0	4,1651	NÃO
8	6	0,6	0,9244	0,9244	0,1399	0,8601	509,902	0,8833	0,233	0,883	0	4,1511	NÃO
9	7	0,5333	0,9312	0,9312	0,1467	0,8533	185,607	0,9575	0,085	0,957	0	4,2328	NÃO
10	7	0,5333	0,9204	0,9204	0,1467	0,8533	185,607	0,9575	0,085	0,957	0	4,2219	NÃO
11	7	0,5333	0,9204	0,9204	0,1467	0,8533	185,607	0,9575	0,085	0,957	0	4,2219	NÃO
12	5	0,6667	0,92	0,92		0	270,601	0,9381	0,124	0,938	> 1	0	SIM
13	5	0,6667	0,9208	0,9208		0	270,601	0,9381	0,124	0,938	> 1	0	SIM
14	5	0,6667	0,918	0,918		0	270,602	0,9381	0,124	0,938	> 1	0	SIM
15	5	0,6667	0,9366	0,9366	0,1357	0,8643	224,722	0,9486	0,103	0,948	0	4,3644	NÃO

Chaves abertas – configuração inicial Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potência retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
16	5	0,6667	0,9357	0,9357	0,1357	0,8643	224,722	0,9486	0,103	0,948	0	4,3636	NÃO
17	5	0,6667	0,9366	0,9366	0,1357	0,8643	224,722	0,9486	0,103	0,948	0	4,3644	NÃO
18	5	0,6667	0,9166	0,9166		0	295,466	0,9324	0,135	0,932	> 1	0	SIM
19	5	0,6667	0,9206	0,9206		0	295,466	0,9324	0,135	0,932	> 1	0	SIM
20	5	0,6667	0,9253	0,9253		0	295,466	0,9324	0,135	0,932	> 1	0	SIM
21	5	0,6667	0,9269	0,9269	0,159	0,841	98,489	0,9775	0,046	0,977	0	4,3891	NÃO
22	2	0,8667	0,9259	0,9259		0	1033,2	0,7635	0,473	0,763	> 1	0	SIM
23	2	0,8667	0,916	0,916		0	1033,2	0,7635	0,473	0,763	> 1	0	SIM
24	2	0,8667	0,8867	0,8867		0	1033,2	0,7635	0,473	0,763	> 1	0	SIM
25	6	0,6	0,8399	0,8399		0	331,059	0,9242	0,152	0,924	> 1	0	SIM
26	6	0,6	0,8159	0,8159		0	331,059	0,9242	0,152	0,924	> 1	0	SIM
27	6	0,6	0,8399	0,8399		0	331,0589	0,9242	0,152	0,924	> 1	0	SIM
28	6	0,6	0,8345	0,8345		0	331,059	0,9242	0,152	0,924	> 1	0	SIM
29	2	0,8667	0,9239	0,9239		0	1020	0,7665	0,518	0,766	> 1	0	SIM
30	2	0,8667	0,9178	0,9178		0	1020	0,7665	0,518	0,766	> 1	0	SIM
31	2	0,8667	0,9256	0,9256		0	1020	0,7665	0,518	0,766	> 1	0	SIM
32	2	0,8667	0,9178	0,9178		0	1020	0,7665	0,518	0,766	> 1	0	SIM

- Resultados da melhor configuração:

Tabela 22 – Resultados da melhor configuração (1-2-3-7-8-19-20-27-28-31-33-34-35-36-37)

Chaves abertas - melhor configuração Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Media de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potência retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
1													
2	7	0,5333	0,8437	0,8437		0		0,741	0,518	0,741	> 1	0	SIM
3	12	0,2	0,9387	0,9387	0,1217	0,8783	699,767	0,8424	0,3158	0,8421	0	3,7015	NÃO
4	12	0,2	0,9283	0,9283	0,1217	0,8783	699,767	0,8424	0,3158	0,8421	0	3,6911	NÃO
5	12	0,2	0,9283	0,9283	0,1217	0,8783	699,767	0,8424	0,3158	0,8421	0	3,6911	NÃO
6	12	0,2	0,9306	0,9306	0,1217	0,8783	699,767	0,8424	0,3158	0,8421	0	3,6933	NÃO
7	7	0,5333	0,9313	0,9313	0,1327	0,8673	402,648	0,9078	0,1848	0,9076	0	4,1473	NÃO
8	7	0,5333	0,9312	0,9312	0,1327	0,8673	402,648	0,9078	0,1848	0,9076	0	4,1473	NÃO
9	7	0,5333	0,9293	0,9293	0,1327	0,8673	402,648	0,9078	0,1848	0,9076	0	4,1453	NÃO
10	7	0,5333	0,9358	0,9358	0,1327	0,8673	402,648	0,9078	0,1848	0,9076	0	4,1519	NÃO
11	5	0,6667	0,9243	0,9243	0,1581	0,8419	69,462	0,9841	0,032	0,984	0	4,4009	NÃO
12	4	0,7333	0,9359	0,9359	0,124	0,876	494,495	0,8868	0,227	0,8865	0	4,3185	NÃO
13	4	0,7333	0,9379	0,9379	0,124	0,876	494,495	0,8868	0,227	0,8865	0	4,3205	NÃO
14	4	0,7333	0,9359	0,9359	0,124	0,876	494,495	0,8868	0,227	0,8865	0	4,3185	NÃO
15	4	0,7333	0,9359	0,9359	0,124	0,876	494,495	0,8868	0,227	0,8865	0	4,3185	NÃO
16	4	0,7333	0,9368	0,9368	0,124	0,876	494,495	0,8868	0,227	0,8865	0	4,3194	NÃO
17	4	0,7333	0,946	0,946	0,124	0,876	494,495	0,8868	0,227	0,8865	0	4,3286	NÃO
18	0		0						2	0	> 1	0	NÃO
19	4	0,7333	0,9319	0,9319	0,1715	0,8285	295,466	0,9324	0,1354	0,9323	0	4,3583	NÃO
20	4	0,7333	0,9277	0,9277	0,1715	0,8285	295,466	0,9324	0,1354	0,9323	0	4,3541	NÃO
21	4	0,7333	0,9257	0,9257	0,1715	0,8285	295,466	0,9324	0,1354	0,9323	0	4,3522	NÃO
22	7	0,5333	0,8524	0,8524		0		0,741	0,518	0,741	> 1	0	SIM

Chaves abertas - melhor configuração Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potência retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
23	7	0,5333	0,8524	0,8524		0		0,741	0,518	0,741	> 1	0	SIM
24	7	0,5333	0,843	0,843		0		0,741	0,518	0,741	> 1	0	SIM
25	12	0,2	0,9365	0,9365	0,1217	0,8783	688,767	0,8424	0,3158	0,8421	0	3,6992	NÃO
26	12	0,2	0,9387	0,9387	0,1217	0,8783	688,767	0,8424	0,3158	0,8421	0	3,7015	NÃO
27	12	0,2	0,9365	0,9365	0,1217	0,8783	688,767	0,8424	0,3158	0,8421	0	3,6992	NÃO
28	5	0,6667	0,8779	0,8779		0		0,7994	0,4018	0,7991	> 1	0	SIM
29	5	0,6667	0,8862	0,8862		0		0,7994	0,4018	0,7991	> 1	0	SIM
30	5	0,6667	0,8779	0,8779		0		0,7994	0,4018	0,7991	> 1	0	SIM
31	6	0,6	0,9154	0,9154	0,1166	0,8834	232,594	0,9468	0,107	0,9465	0	4,292	NÃO
32	5	0,6667	0,936	0,936	0,1413	0,8587	72,111	0,9835	0,0338	0,9831	0	4,428	NÃO

Para o sistema de 69 barras:

- Resultados da configuração inicial:

Tabela 23 – Resultados da configuração inicial (1-4-9-13-17-21-24-27-28-31-34-36-42-47-51-53-56-62-66-68-70-71-72-73-74)

Chaves abertas - configuração inicial Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potencia retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
2	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
3	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
4	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
5	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
6	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO

Chaves abertas - configuração inicial Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potencia retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
7	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
8	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
9	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
10	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
11	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
12	6	0,76	0,967702	0,967702	0	0	24,6503	0,982492	0,036932	0,981534	0	0	SIM
13	6	0,76	0,968653	0,968653	0	0	24,6503	0,982492	0,036932	0,981534	0	0	SIM
14	6	0,76	0,956512	0,956512	0	0	24,6503	0,982492	0,036932	0,981534	0	0	SIM
15	6	0,76	0,96872	0,96872	0	0	24,6503	0,982492	0,036932	0,981534	0	0	SIM
16	9	0,64	0,977912	0,977912	0,012161	0,987839	40,92174	0,970936	0,059659	0,97017	0	4,546857	NÃO
17	9	0,64	0,97418	0,97418	0,012142	0,987858	40,92174	0,970936	0,059659	0,97017	0	4,543145	NÃO
18	9	0,64	0,975814	0,975814	0,012161	0,987839	40,92174	0,970936	0,059659	0,97017	0	4,54476	NÃO
19	9	0,64	0,975565	0,975565	0,012161	0,987839	40,92174	0,970936	0,059659	0,97017	0	4,54451	NÃO
20	5	0,8	0,957097	0,957097	0	0	48,78165	0,965354	0,071023	0,964489	0	0	SIM
21	5	0,8	0,974238	0,974238	0	0	48,78165	0,965354	0,071023	0,964489	0	0	SIM
22	5	0,8	0,972724	0,972724	0	0	48,78165	0,965354	0,071023	0,964489	0	0	SIM
23	8	0,68	0,96947	0,96947	0,016051	0,983949	17,25107	0,987748	0,025568	0,987216	0	4,608383	NÃO
24	8	0,68	0,972868	0,972868	0,016051	0,983949	17,25107	0,987748	0,025568	0,987216	0	4,61178	NÃO
25	8	0,68	0,96947	0,96947	0,016051	0,983949	17,25107	0,987748	0,025568	0,987216	0	4,608383	NÃO
26	5	0,8	0,973094	0,973094	0,016034	0,983966	5,733218	0,995928	0,008523	0,995739	0	4,748726	NÃO
27	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
28	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
29	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
30	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
31	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO

Chaves abertas - configuração inicial Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potencia retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
32	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
33	2	0,92	0,954475	0,954475	0	0	10,84828	0,992295	0,017045	0,991477	0	0	SIM
34	2	0,92	0,974173	0,974173	0	0	10,84828	0,992295	0,017045	0,991477	0	0	SIM
35	8	0,68	0,973015	0,973015	0	0	41,47101	0,970546	0,059659	0,97017	0	0	SIM
36	8	0,68	0,975382	0,975382	0	0	41,47101	0,970546	0,059659	0,97017	0	0	SIM
37	8	0,68	0,975382	0,975382	0	0	41,47101	0,970546	0,059659	0,97017	0	0	SIM
38	8	0,68	0,975383	0,975383	0	0	41,47101	0,970546	0,059659	0,97017	0	0	SIM
39	8	0,68	0,972633	0,972633	0	0	41,47101	0,970546	0,059659	0,97017	0	0	SIM
40	8	0,68	0,975382	0,975382	0	0	41,47101	0,970546	0,059659	0,97017	0	0	SIM
41	4	0,84	0,978399	0,978399	0,012581	0,987419	20,67591	0,985315	0,03125	0,984375	0	4,775508	NÃO
42	4	0,84	0,972648	0,972648	0,012581	0,987419	20,67591	0,985315	0,03125	0,984375	0	4,769757	NÃO
43	4	0,84	0,977897	0,977897	0,012579	0,987421	20,67591	0,985315	0,03125	0,984375	0	4,775009	NÃO
44	4	0,84	0,977897	0,977897	0,012579	0,987421	20,67591	0,985315	0,03125	0,984375	0	4,775009	NÃO
45	4	0,84	0,975397	0,975397	0,012579	0,987421	20,67591	0,985315	0,03125	0,984375	0	4,772508	NÃO
46	5	0,8	0,977304	0,977304	0,027257	0,972743	272,2744	0,806621	0,389205	0,805398	0	4,362066	NÃO
47	5	0,8	0,982677	0,982677	0,027265	0,972735	272,2744	0,806621	0,389205	0,805398	0	4,36743	NÃO
48	5	0,8	0,977123	0,977123	0,027257	0,972743	272,2744	0,806621	0,389205	0,805398	0	4,361885	NÃO
49	5	0,8	0,977304	0,977304	0,027257	0,972743	272,2744	0,806621	0,389205	0,805398	0	4,362067	NÃO
50	6	0,76	0,978408	0,978408	0,012858	0,987142	17,98151	0,987229	0,025568	0,987216	0	4,699995	NÃO
51	6	0,76	0,977906	0,977906	0,012455	0,987545	17,98151	0,987229	0,025568	0,987216	0	4,699896	NÃO
52	8	0,68	0,978574	0,978574	0,01254	0,98746	21,11219	0,985005	0,03125	0,984375	0	4,615415	NÃO
53	8	0,68	0,971701	0,971701	0,01254	0,98746	21,11219	0,985005	0,03125	0,984375	0	4,608542	NÃO
54	8	0,68	0,971701	0,971701	0,01254	0,98746	21,11219	0,985005	0,03125	0,984375	0	4,608542	NÃO
55	10	0,6	0,988012	0,988012	0,005345	0,994655	524,2716	0,627644	0,747159	0,62642	0	3,836731	NÃO
56	10	0,6	0,988347	0,988347	0,005345	0,994655	524,2716	0,627644	0,747159	0,62642	0	3,837066	NÃO

Chaves abertas - configuração inicial Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potencia retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
57	10	0,6	0,98833	0,98833	0,005345	0,994655	524,2716	0,627644	0,747159	0,62642	0	3,837049	NÃO
58	10	0,6	0,988434	0,988434	0,005345	0,994655	524,2716	0,627644	0,747159	0,62642	0	3,837153	NÃO
59	10	0,6	0,98833	0,98833	0,005345	0,994655	524,2716	0,627644	0,747159	0,62642	0	3,837049	NÃO
60	10	0,6	0,98833	0,98833	0,005345	0,994655	524,2716	0,627644	0,747159	0,62642	0	3,837049	NÃO
61	5	0,8	0,978434	0,978434	0,010476	0,989524	130,0853	0,907609	0,1875	0,90625	0	4,581817	NÃO
62	5	0,8	0,958101	0,958101	0,010288	0,989712	130,0853	0,907609	0,1875	0,90625	0	4,561672	NÃO
63	5	0,8	0,976364	0,976364	0,010317	0,989683	130,0853	0,907609	0,1875	0,90625	0	4,579905	NÃO
64	5	0,8	0,957533	0,957533	0,010473	0,989527	130,0853	0,907609	0,1875	0,90625	0	4,560919	NÃO
65	2	0,92	0,975652	0,975652	0	0	14,74253	0,989529	0,022727	0,988636	0	0	SIM
66	2	0,92	0,977905	0,977905	0	0	14,74253	0,989529	0,022727	0,988636	0	0	SIM
67	2	0,92	0,972635	0,972635	0	0	11,58025	0,991775	0,017045	0,991477	0	0	SIM
68	2	0,92	0,975201	0,975201	0	0	11,58025	0,991775	0,017045	0,991477	0	0	SIM

- Resultados da melhor configuração:

Tabela 24 – Resultados da melhor configuração (1-4-6-9-12-31-34-39-41-42-43-44-46-50-53-56-58-60-62-65-70-71-72-73-74)

Chaves abertas – melhor configuração Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potencia retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
2	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
3	10	0,6	0,94944	0,94944	0,038988	0,961012	123,0563	0,912601	0,176136	0,911932	0	4,334985	NÃO
4	10	0,6	0,949465	0,949465	0,038988	0,961012	123,0563	0,912601	0,176136	0,911932	0	4,33501	NÃO
5	10	0,6	0,948718	0,948718	0,02571	0,97429	61,51591	0,956309	0,088068	0,955966	0	4,435283	NÃO

Chaves abertas – melhor configuração Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potencia retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
6	10	0,6	0,95279	0,95279	0,02571	0,97429	61,51591	0,956309	0,088068	0,955966	0	4,439355	NÃO
7	10	0,6	0,957506	0,957506	0,026067	0,973933	61,51591	0,956309	0,088068	0,955966	0	4,443714	NÃO
8	9	0,64	0,957298	0,957298	0,01201	0,98799	98,1194	0,930312	0,142045	0,928977	0	4,444578	NÃO
9	9	0,64	0,955477	0,955477	0,01201	0,98799	98,1194	0,930312	0,142045	0,928977	0	4,442756	NÃO
10	9	0,64	0,977938	0,977938	0,01201	0,98799	98,1194	0,930312	0,142045	0,928977	0	4,465217	NÃO
11	3	0,88	0,964255	0,964255	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,532626	NÃO
12	3	0,88	0,966577	0,966577	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,534948	NÃO
13	3	0,88	0,966577	0,966577	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,534948	NÃO
14	3	0,88	0,974335	0,974335	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,542706	NÃO
15	3	0,88	0,974153	0,974153	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,542524	NÃO
16	3	0,88	0,974153	0,974153	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,542524	NÃO
17	3	0,88	0,969859	0,969859	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,538229	NÃO
18	3	0,88	0,966577	0,966577	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,534948	NÃO
19	3	0,88	0,974856	0,974856	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,543227	NÃO
20	3	0,88	0,969859	0,969859	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,538229	NÃO
21	3	0,88	0,974856	0,974856	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,543227	NÃO
22	3	0,88	0,964255	0,964255	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,532626	NÃO
23	3	0,88	0,969859	0,969859	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,538229	NÃO
24	3	0,88	0,974335	0,974335	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,542706	NÃO
25	3	0,88	0,969859	0,969859	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,538229	NÃO
26	3	0,88	0,974153	0,974153	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,542524	NÃO
27	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
28	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
29	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
30	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO

Chaves abertas – melhor configuração Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potencia retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
31	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
32	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
33	2	0,92	0,975319	0,975319	0	0	10,84828	0,992295	0,017045	0,991477	0	0	SIM
34	2	0,92	0,978404	0,978404	0	0	10,84828	0,992295	0,017045	0,991477	0	0	SIM
35	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
36	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
37	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	> 1	0	NÃO
38	4	0,84	0,975375	0,975375	0	0	19,65632	0,986039	0,028409	0,985795	0	0	SIM
39	4	0,84	0,975375	0,975375	0	0	19,65632	0,986039	0,028409	0,985795	0	0	SIM
40	3	0,88	0,975374	0,975374	0	0	0,509204	0,999638	0,002841	0,99858	0	0	SIM
41	3	0,88	0,954774	0,954774	0	0	0	1	0	1	> 1	0	NÃO
42	3	0,88	0,95493	0,95493	0	0	2,456894	0,998255	0,005682	0,997159	0	0	SIM
43	4	0,84	0,954324	0,954324	0	0	9,309841	0,993388	0,014205	0,992898	0	0	SIM
44	4	0,84	0,977899	0,977899	0	0	9,309841	0,993388	0,014205	0,992898	0	0	SIM
45	2	0,92	0,975384	0,975384	0	0	9,309841	0,993388	0,014205	0,992898	0	0	SIM
46	10	0,6	0,949465	0,949465	0,038988	0,961012	123,0563	0,912601	0,176136	0,911932	0	4,33501	NÃO
47	10	0,6	0,954708	0,954708	0,038988	0,961012	123,0563	0,912601	0,176136	0,911932	0	4,340253	NÃO
48	10	0,6	0,950616	0,950616	0,038988	0,961012	123,0563	0,912601	0,176136	0,911932	0	4,336161	NÃO
49	5	0,8	0,977148	0,977148	0,031671	0,968329	157,5205	0,888123	0,224432	0,887784	0	4,521385	NÃO
50	10	0,6	0,948782	0,948782	0,025989	0,974011	61,51591	0,956309	0,088068	0,955966	0	4,435068	NÃO
51	10	0,6	0,947722	0,947722	0,025939	0,974061	61,51591	0,956309	0,088068	0,955966	0	4,434058	NÃO
52	8	0,68	0,978574	0,978574	0,01254	0,98746	21,11219	0,985005	0,03125	0,984375	0	4,615415	NÃO
53	8	0,68	0,971701	0,971701	0,012239	0,987761	21,11219	0,985005	0,03125	0,984375	0	4,608843	NÃO
54	8	0,68	0,971701	0,971701	0,01254	0,98746	21,11219	0,985005	0,03125	0,984375	0	4,608542	NÃO
55	4	0,84	0,978569	0,978569	0	0	0	1	0	1	> 1	0	NÃO

Chaves abertas – melhor configuração Trechos	N° de chaveamentos	fchaveamento	Média de |V| nas barras finais	ftensões	Perdas em p.u.	fperdas	Potencia retirada (kW)	fpotência	DEC	fDEC	N° total de blocos não reestabelecidos	F.O.	Houve sobrecarga das linhas?
56	4	0,84	0,971695	0,971695	0	0	0	1	0	1	> 1	0	NÃO
57	4	0,84	0,958544	0,958544	0	0	24,03426	0,98293	0,036932	0,981534	0	0	SIM
58	4	0,84	0,958882	0,958882	0	0	24,03426	0,98293	0,036932	0,981534	0	0	SIM
59	7	0,72	0,988025	0,988025	0,005397	0,994603	509,4227	0,63819	0,724432	0,637784	0	3,978603	NÃO
60	7	0,72	0,988025	0,988025	0,005397	0,994603	509,4227	0,63819	0,724432	0,637784	0	3,978603	NÃO
61	8	0,68	0,976215	0,976215	0,010324	0,989676	105,9928	0,92472	0,150568	0,924716	0	4,495328	NÃO
62	8	0,68	0,976215	0,976215	0,010324	0,989676	105,9928	0,92472	0,150568	0,924716	0	4,495328	NÃO
63	8	0,68	0,97843	0,97843	0,010566	0,989434	105,9928	0,92472	0,150568	0,924716	0	4,497299	NÃO
64	2	0,92	0,973676	0,973676	0	0	24,09258	0,982889	0,036932	0,981534	0	0	SIM
65	9	0,64	0,971054	0,971054	0,01201	0,98799	98,1194	0,930312	0,142045	0,928977	0	4,458333	SIM
66	9	0,64	0,955477	0,955477	0,01201	0,98799	98,1194	0,930312	0,142045	0,928977	0	4,442756	SIM
67	3	0,88	0,964255	0,964255	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,532626	SIM
68	3	0,88	0,964255	0,964255	0,014412	0,985588	208,4796	0,851931	0,298295	0,850852	0	4,532626	SIM

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica

UFOP

TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "**Alocação Ótima de Chaves em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando a Metaheurística VNS**" é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, **13** de **Dezembro** de **2018**.

Felício Siqueira Nunes

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica

UFOP

DECLARAÇÃO DE CONFERÊNCIA DA VERSÃO FINAL

Declaro que conferi a versão final a ser entregue pelo aluno **Felício Siqueira Nunes**, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado **Alocação ótima de chaves em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística VNS** quanto à conformidade nos seguintes itens:

1. A monografia corresponde a versão final, estando de acordo com as sugestões e correções sugeridas pela banca e seguindo as normas ABNT;
2. A versão final da monografia inclui a ata de defesa (Anexo IV - apenas verso), a ficha catalográfica e o termo de responsabilidade (ANEXO X -) devidamente assinado.

João Monlevade, 19 de Dezembro de 2018.

Prof. Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich