

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**RECONFIGURAÇÃO DINÂMICA DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTES UTILIZANDO A
METAHEURÍSTICA GVNS**

Isternândia Araújo França

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Eduardo Gontijo Carrano

Belo Horizonte - MG

Julho de 2019

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1131

**RECONFIGURAÇÃO DINÂMICA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
INTELIGENTES UTILIZANDO A METAHEURÍSTICA GVNS**

Isternândia Araújo França

DATA DA DEFESA: 25/07/2019

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me abençoar em cada fase da vida, dando-me forças para superar os obstáculos e concedendo-me a graça de concretizar mais um sonho.

Ao meu orientador, Eduardo Carrano, muita gratidão pela confiança e excepcional orientação.

Aos professores Lucas Batista, Felipe Campelo, João Vasconcelos, Rodney Saldanha e Alberto De Conti, pelos ensinamentos.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG.

A minha família, especialmente aos meus pais Maristela e Florisvaldo, e aos meus irmãos Samira e Estervaldo, pelo incentivo, cuidado e amor de sempre.

Ao Paulo Ferreira, pelo apoio e companheirismo em todos os momentos de realização deste trabalho.

Às minhas amigas, Natália Antunes e Lívia Maria, pela brilhante amizade.

Aos colegas de trabalho da Concert Technologies, em especial, Guilherme Campos, João Assunção, João Klock e Daniel Ramos, pela excelente convivência.

Ao CNPQ pelo suporte financeiro.

Resumo

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia baseada na metaheurística Busca em Vizinhança Variável Generalizada para a Reconfiguração Dinâmica de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. O objetivo é a minimização das perdas técnicas totais do sistema ao longo do dia, considerando diferentes patamares de carga. Para representação de soluções do espaço de busca um esquema eficiente de decodificação de soluções específico para este problema é elaborado. Tal esquema gera somente soluções factíveis em relação a todas restrições técnicas e operacionais. Isto significa que, na estratégia implementada, as restrições de limite de tensão nas barras, limite de corrente nas linhas, suprimento das demandas de carga, configuração topológica radial e balanço de potência ativa e reativa são atendidas durante todo processo de otimização. Além do mais, estruturas de vizinhança e mecanismos eficientes de redução dos tamanhos da vizinhança foram implementados. Para validação e avaliação da metodologia proposta foram realizados testes em dois sistemas *benchmarks* disponíveis na literatura especializada e também em dois sistemas reais de médio porte, adaptados para uma rede inteligente. Os resultados obtidos para os sistemas *benchmarks* foram iguais aos melhores resultados publicados na literatura, evidenciando que a metodologia desenvolvida é promissora. Para os sistemas reais, reduções significativas de perdas técnicas foram alcançadas, o que comprova a eficiência do método, uma vez que soluções de boa qualidade foram alcançadas com baixo tempo computacional, tendo em vista o contexto de planejamento da operação a curto prazo.

Palavras-chaves: Reconfiguração Dinâmica. Sistemas de Distribuição. Otimização. Metaheurística. GVNS.

Abstract

The present work consists in the proposal of a methodology based on the metaheuristic Generalized Variable Neighborhood Search for Dynamic Reconfiguration of Power Distribution Systems. The objective is to minimize the total technical losses of the system throughout the day, considering different load levels. For the representation of solutions an efficient scheme of coding and decoding of solutions to the problem of reconfiguration is elaborated. This scheme generates only feasible solutions in relation to all technical and operational constraints of the problem. It means that in the strategy implemented, the constraints of voltage limits in the buses, current limit in the lines, supply of load demands, radial topological configuration and active and reactive power balance are all complied during optimization process. In addition, neighborhood structures and efficient neighborhood size reduction mechanisms have been implemented. For validation and evaluation of the proposed methodology, tests were carried out on two benchmarking systems available in the specialized literature and also in two medium-sized real systems, adapted for intelligent networks. The results obtained for the benchmark systems were the same as the best results published in the literature, evidencing that the methodology developed is promising. For the real systems, significant reductions of technical losses were achieved, which proves the efficiency of the method, since good quality solutions were achieved with low computational time, considering the context of short term operation planning.

Key-words: Dynamic Reconfiguration. Distribution Systems. Optimization. Metaheuristics. GVNS.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Principais componentes de um Sistema de Distribuição primário (BAR-BOSA, 2012).	17
Figura 2 – Fluxograma do algoritmo proposto.	36
Figura 3 – Exemplo de um sistema de distribuição radial	37
Figura 4 – Exemplo de um sistema com uma chave neutra	39
Figura 5 – Exemplo de um sistema após o pré-processamento da rede	39
Figura 6 – Exemplo de uma solução inicial	40
Figura 7 – Fluxograma do esquema de decodificação	41
Figura 8 – Exemplo de uma solução codificada como uma permutação aleatória . .	43
Figura 9 – Exemplo de uma solução decodificada para o Sistema de 16 barras . . .	44
Figura 10 – Exemplo de movimento de <i>swap</i>	45
Figura 11 – Fluxograma do esquema de perturbação	47
Figura 12 – Chaves NF de um sistema arbitrário	49
Figura 13 – Sistema de 16 barras	51
Figura 14 – Sistema de 84 barras	51
Figura 15 – Sistema Real A	52
Figura 16 – Sistema Real B	53
Figura 17 – Exemplo de curva de carga para um consumidor comercial	55

Lista de tabelas

Tabela 1 – Sequência de manobras para o Sistema de 16 barras	43
Tabela 2 – Resultados para o sistema de 16 barras	53
Tabela 3 – Solução ótima para o sistema de 16 Barras: sequência de manobras . .	54
Tabela 4 – Resultados para o sistema de 84 barras	54
Tabela 5 – Solução ótima para o sistema de 84 barras: sequência de manobras . .	54
Tabela 6 – Definição de Patamares de Carga	56
Tabela 7 – Sistema Real A - Redução percentual de perdas ativas por patamar de carga	56
Tabela 8 – Sistema Real A - Chaves NA por patamar de carga	57
Tabela 9 – Sistema Real A - Avaliação da redução percentual de perdas de cada configuração para cada patamar	57
Tabela 10 – Sistema Real B - Redução percentual de perdas ativas por patamar de carga	58
Tabela 11 – Sistema Real B - Avaliação da redução percentual de perdas de cada configuração para cada patamar	58

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
GVNS	<i>General Variable Neighborhood Search</i>
IED	<i>Intelligent Eletronic Device</i>
MT	Média Tensão
NA	Normalmente aberta
NF	Normalmente Fechada
PNLIM	Programação Não-Linear Inteira Mista
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PT	Perda Técnica
REIs	Redes Elétricas Inteligentes
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
RSDEE	Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
VND	<i>Variable Neighborhood Descent</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>

Lista de símbolos

$\mathcal{E}$	Conjunto de arestas de um grafo
$\mathcal{V}$	Conjunto de vértices de um grafo
Ω_l	Conjunto de ramos do sistema
X	Vetor de estado binário
x_{ij}	Variável de decisão binária
g	Condutância da linha
Y_{barra}	Matriz de admitância nodal
θ_{ij}	Diferença entre os ângulos de tensão da barra i e j
P_{Si}	Potência ativa fornecida à barra i
P_{Di}	Demanda de potência ativa na barra i
Ω_{bi}	Conjunto de barras conectadas à barra i
P_{ij}	Potência dissipada por efeito Joule
Q_{Si}	Potência reativa fornecida pela subestação da barra i
Q_{Di}	Demanda de potência reativa na barra i
V_i	Módulo da tensão da barra i
V_i^{max}	Limite máximo de tensão na barra i
V_i^{min}	Limite mínimo de tensão na barra i
I_{ij}	Fluxo máximo de corrente no ramo ij
I_{rij}	Componente real do fluxo de corrente no ramo ij
I_{mij}	Componente imaginária do fluxo de corrente no ramo ij
x_0	Solução inicial
r	Quantidade de estruturas de vizinhança
$N_k(x)$	Vizinhança de uma solução x
k_{max}	Número máximo de estruturas de vizinhança

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Contextualização	10
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo Geral	12
1.2.2	Objetivos Específicos	12
1.3	Contribuições	13
1.4	Estrutura do Trabalho	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Introdução	15
2.2	Visão Geral do Sistema Elétrico de Potência	15
2.2.1	Características Gerais de Sistemas de Distribuição Primários	16
2.2.2	Operação do Sistema de Distribuição	17
2.2.3	Representação dos Sistemas de Distribuição	18
2.2.4	Perdas Técnicas	19
2.3	O problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição	20
2.3.1	Visão geral do problema	20
2.3.2	Formulação Matemática	20
2.4	Metaheurística de Busca em Vizinhaça Variável Generalizada	23
2.4.1	Técnicas de Otimização aplicadas ao problema de RSDEE	23
2.4.2	Metaheurísticas	24
2.4.3	Busca em Vizinhaça Variável Generalizada	25
2.4.3.1	Busca em Vizinhaça Variável	25
2.4.3.2	Descida em Vizinhaça Variável	26
2.4.3.3	GVNS	28
2.5	Conclusões	30
3	REVISÃO DE LITERATURA	31
3.1	Introdução	31
3.2	Revisão Bibliográfica	31
4	ABORDAGEM PROPOSTA	35
4.1	Introdução	35
4.2	Premissas Consideradas	35
4.3	Arquitetura da Ferramenta Proposta	35
4.4	Representação dos Elementos do Sistema	35

4.5	Classificação dos Blocos de Cargas e das Chaves	36
4.6	Pré-Processamento da Rede	38
4.7	Esquema de Codificação	40
4.8	Esquema de Decodificação	40
4.9	Algoritmo de Otimização	45
4.9.1	Etapa de Perturbação	45
4.9.2	Etapa de Busca Local - VND	47
4.9.3	Mecanismos de Redução de Estruturas de Vizinhaça	48
4.9.3.1	Evitar trocas entre chaves não usadas	48
4.9.3.2	Realizar trocas com chaves ignoradas para abertura	49
4.10	Conclusão	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1	Introdução	50
5.2	Instâncias de Teste	50
5.2.1	Sistema de 16 Barras	50
5.2.2	Sistema de 84 Barras	51
5.2.3	Sistema Real A	51
5.2.4	Sistema Real B	52
5.3	Resultados Considerando Demanda de Carga Fixa	53
5.3.1	Sistema de 16 Barras	53
5.3.2	Sistema de 84 Barras	54
5.4	Resultados Considerando Patamares de Carga	55
5.4.1	Avaliação de Demanda: Análise por Patamares de Carga	55
5.4.2	Sistema Real A	56
5.4.3	Sistema Real B	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
7	TRABALHOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS	62

1 Introdução

1.1 Contextualização

Uma das variáveis para definir um país como desenvolvido é a facilidade de acesso da população aos serviços de infra-estrutura, como saneamento básico, transportes, telecomunicações e energia. O primeiro está diretamente relacionado à saúde pública. Os dois seguintes, à integração nacional. Já a energia é o fator determinante para o desenvolvimento econômico e social ao fornecer apoio mecânico, térmico e elétrico às ações humanas. De todos os segmentos da infra-estrutura, a energia elétrica é o serviço mais universalizado ([ANEEL, 2008](#)).

No Brasil, a conexão e atendimento ao consumidor de energia elétrica são, majoritariamente, realizados pelas empresas distribuidoras de energia elétrica. O foco principal destas empresas é atender aos seus consumidores satisfazendo todos parâmetros de qualidade estabelecidos pelos órgãos reguladores. Logo, devido ao crescente aumento da demanda de energia elétrica, é fundamental que os Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEEs) operem sempre de forma eficiente, econômica e confiável.

As Redes Elétricas Inteligentes (REIs) (do inglês, *Smart Grids*) surgiram como um dos principais agentes dentro da reestruturação que o sistema elétrico de potência vem sofrendo há alguns anos. Especificamente, essa evolução é mais intensa no sistema de distribuição ([TIMOSSI, 2016](#)). De acordo com a *International Energy Agency* ([HEFFNER, 2011](#)) *Smart Grid* é uma rede de energia que usa tecnologia digital para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade a partir de todas as fontes de geração encontrando uma variedade de demandas e usuários. Assim, de maneira geral, elas podem ser definidas como um sistema que se utiliza de novas ferramentas tecnológicas para controlar, monitorar e gerenciar todo o sistema de potência de forma eficiente ([AMIN; WOLLENBERG, 2005](#)). Neste cenário, o desenvolvimento de conceitos relacionados às REIs contribuem substancialmente para o crescimento de estudos relacionados a análise dos sistemas de distribuição, que terão cada vez mais uma alta interação com sistemas de telecomunicações.

Atualmente, o setor elétrico brasileiro opera em um modelo no qual é primordial que as distribuidoras de energia elétrica invistam em estratégias para aprimorar as características operacionais de suas redes de modo a melhorar a qualidade da energia elétrica fornecida para os consumidores. Assim, as principais estratégias que podem ser adotadas pelas concessionárias para operação otimizada dos SDEEs são: compensação de reativos por meio da instalação de bancos de capacitores, recondutoramento ¹, substituição de

¹ Também conhecido como reforço da rede de média tensão (MT).

transformadores de BT obsoletos, com alto índices de perdas e 100% depreciados e reconfiguração. Dentre tais estratégias, a reconfiguração tem se tornado economicamente mais atraente devido a progressiva incorporação de equipamentos com tecnologias modernas, conhecidos como IEDs (do inglês, *Intelligent Electronic Devices*), que possibilitam realizar a supervisão e o controle do sistema de distribuição remotamente. Dessa forma, a principal vantagem da reconfiguração em relação às demais estratégias é a possibilidade de utilização de recursos já existentes no sistema. Isto faz com o que o seu custo de implantação seja pequeno e evita novos investimentos em infra-estrutura.

A reconfiguração pode ser definida como o processo de alteração da topologia do sistema por meio da operação de abertura/fechamento de chaves manobráveis. Esta estratégia pode ser utilizada basicamente para minimização das perdas técnicas (PT), melhoria do perfil de tensão, balanceamento de cargas e aumento dos níveis de confiabilidade. Como na prática existe uma interdependência entre as variáveis elétricas, decidiu-se abordar neste trabalho somente a minimização das perdas técnicas.

A Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE) é considerada como um problema de otimização de programação não-linear inteiro-misto ² (PNLIM). O objetivo deste problema é determinar o estado operacional das chaves manobráveis presentes no sistema de tal forma a obter uma nova topologia que otimize um ou mais critérios. Esta nova topologia deve satisfazer todas restrições técnicas e operacionais do sistema: limite de tensão nas barras, limite de corrente nas linhas, balanço de potência ativa e reativa, topologia radial e suprimento de todas as cargas.

A partir da definição anterior fica evidente que para obter a configuração topológica ótima de um sistema de distribuição é necessário determinar o estado operacional de todas as chaves manobráveis. Como estes sistemas são, geralmente, de grande porte, o principal desafio para resolução desse problema é o elevado número de combinações de chaveamento possíveis a serem analisadas como candidatas a configurações ótimas. Diante deste quadro, surge a necessidade de desenvolver metodologias computacionais eficientes para sua resolução.

O presente trabalho propõe uma nova metodologia para lidar com o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. Tal metodologia insere-se no contexto de planejamento da operação de redes inteligentes a curto prazo, no qual considera-se a operação em regime permanente. Devido ao comportamento dinâmico das demandas de carga, a reconfiguração de tempos em tempos, também conhecida como reconfiguração dinâmica, é relevante para que os sistemas de distribuição possam ser utilizados de forma otimizada, melhorando a eficiência e a confiabilidade destes sistemas. Assim, no presente trabalho é desenvolvido uma ferramenta computacional para reconfiguração dinâmica de redes de

² As variáveis inteiras representam o estado das chaves e as variáveis contínuas representam o fluxo de carga nas barras e corrente nas linhas.

distribuição radiais por meio do uso de equipamentos telecomandados, sob o enfoque das REIS. Desta forma, a abordagem proposta considera um sistema auto-reconfigurável, com foco na redução das perdas técnicas durante um período pré-determinado. Com o intuito de considerar as variações de demanda ao longo de um dia estipulou-se cinco patamares de carga, nos quais realiza-se o cálculo das perdas.

O algoritmo de otimização implementado baseia-se na metaheurística Busca em Vizinhança Variável Generalizada. Um esquema de decodificação, específico para o problema de reconfiguração, é elaborado. Este esquema gera apenas topologias acíclicas e conexas, o que impede a construção de redes inviáveis durante o processo de otimização. Além do mais, o esquema proposto fornece o plano de manobras necessário para que a reconfiguração seja executada. Na etapa de perturbação e busca local, estruturas de vizinhança eficientes foram implementadas. Para as estruturas de vizinhança utilizadas durante a etapa de busca local, mecanismos de redução do tamanho das vizinhanças foram propostos, de tal forma a diminuir significativamente a quantidade de soluções que precisam ser avaliadas, o que torna o processo de reconfiguração mais eficiente.

A metodologia implementada para resolução do problema de RSDEE foi testada e validada em dois sistemas amplamente utilizadas na literatura, 16 barras ([CIVANLAR et al., 1988](#)) e 84 barras ([SU; LEE, 2003](#)) e em dois sistemas de distribuição reais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral a elaboração de uma nova metodologia de otimização baseada na metaheurística Busca em Vizinhança Variável Generalizada para resolução do problema de Reconfiguração Dinâmica de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo geral, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um esquema de decodificação para o problema de RSDEE;
- Implementar um algoritmo baseado no esquema geral da metaheurística Busca em Vizinhança Variável Generalizada;
- Definir estruturas de vizinhança eficientes para serem utilizadas na metaheurística;
- Propor esquemas de redução de vizinhança para obtenção de um espaço de busca reduzido;

- Realizar simulações considerando demandas de carga fixas e por patamares de carga a fim de verificar a viabilidade da reconfiguração dinâmica;
- Avaliar o desempenho do algoritmo proposto em instâncias da literatura especializada e em instâncias reais.

1.3 Contribuições

O presente trabalho contribui com a proposição de uma nova metodologia baseada no esquema geral da metaheurística Busca em Vizinhança Variável Generalizada para resolução do problema de Reconfiguração Dinâmica de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Inteligentes com foco na minimização das perdas técnicas. Nesta metodologia, um esquema de codificação/decodificação específico para o problema de reconfiguração de redes é proposto. Tal esquema fornece o plano viável de manobras necessário para que a reconfiguração do sistema seja realizada, o que não é comum em abordagens desse tipo.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente capítulo apresentou uma breve contextualização do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentado um referencial teórico sobre tópicos que são fundamentais para compreensão da metodologia desenvolvida. Neste capítulo são abordados conceitos referentes ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, ao problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica e, por fim, é abordada a teoria de metaheurísticas, com ênfase na metaheurística GVNS, utilizada neste trabalho para resolver o problema de reconfiguração.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica de contribuições da literatura especializada na área de RSDEE.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia proposta para solução do problema de reconfiguração de redes. Assim, são abordados aspectos relacionados ao algoritmo de otimização Busca em Vizinhança Variável Generalizada implementado, tais como o esquema de codificação e decodificação das variáveis de decisão, estruturas de vizinhança e mecanismos de redução das estruturas de vizinhança.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia proposta. Para tanto, são utilizadas dois sistemas de distribuição de energia vastamente utilizadas na literatura (16 e 84 barras), bem como dois sistemas de distribuição reais. Os resultados obtidos por meio das instâncias da literatura são comparados com os reportados em diferentes trabalhos.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 Referencial Teórico

2.1 Introdução

Este capítulo está dividido em três seções. A primeira, apresenta uma visão geral do Sistema Elétrico de Potência, com ênfase no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. A segunda, apresenta as características gerais do problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, além de apresentar a formulação matemática do problema. A terceira, introduz conceitos relevantes sobre as metaheurísticas, com ênfase na Busca em Vizinhança Variável Generalizada.

2.2 Visão Geral do Sistema Elétrico de Potência

Denomina-se por Sistema Elétrico de Potência (SEP) a estrutura responsável por realizar a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em escala nacional e regional, apresentando importância fundamental no desenvolvimento de um país (FUCHS, 1997). O propósito geral de um SEP é satisfazer os requisitos de carga, provendo um suprimento adequado de energia elétrica aos consumidores. Classicamente, o SEP é dividido em quatro subsistemas: geração, transmissão, subtransmissão e distribuição. Uma breve descrição de cada um deles é apresentada a seguir.

- Geração: O sistema de geração é composto por elementos que realizam a conversão de uma fonte primária de energia presente na natureza em energia elétrica. Exemplos de fontes primárias são a luz solar, carvão vegetal, energia cinética do vento e a energia potencial da água. Sendo assim, fazem parte da matriz energética as usinas hidrelétricas, termoeletricas, nucleares, parques eólicos e solares.
- Transmissão: O sistema de transmissão é responsável por transmitir energia elétrica entre os centros geradores e os pontos de consumo. Isso se faz necessário uma vez que as condições naturais propícias à geração de energia de maneira economicamente viável ocorrem frequentemente distantes dos centros consumidores. Nas redes de transmissão, após deixar a usina, a energia elétrica trafega em tensão que varia de 88 kV a 750 kV (ANEEL, 2008). Esse sistema apresenta o maior nível de tensão dentre toda a estrutura do SEP e é, normalmente, conectado às centrais geradoras por meio de transformadores elevadores. Para garantir confiabilidade ao sistema, é comum a existência de linhas de transmissão que interconectam regiões distintas de um país, possibilitando, assim, a troca de energia em caso de condições adversas em determinadas áreas.

- Subtransmissão: A conexão entre o sistema de transmissão e o de subtransmissão é realizada por meio de subestações regionais. Normalmente, esse sistema opera com tensões inferiores às da transmissão. Sua função é a de transportar energia entre subestações regionais e subestações locais, onde a interconexão com os sistemas de distribuição é realizada.
- Distribuição: O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) é responsável por transportar a energia entre uma subestação local e o consumidor final. Desse modo, esse sistema está presente em toda a extensão dos centros urbanos e em regiões rurais. Deve-se destacar que o SDEE não é o único que alimenta diretamente os consumidores, pois unidades industriais que operam com tensões mais elevadas em suas linhas de produção podem ser conectadas diretamente aos sistemas de subtransmissão ou, em alguns casos, ao sistema de transmissão. As empresas responsáveis por este sistema são normalmente denominadas por concessionárias de energia ou distribuidoras de energia. Em geral, estas são empresas de grande porte que funcionam como elo entre o setor de energia elétrica e a sociedade, visto que suas instalações recebem das companhias de transmissão todo o suprimento destinado ao abastecimento no país (ANEEL, 2008). No SDEE brasileiro, geralmente, dois níveis de alimentação podem ser identificados: primária (rede de média tensão - MT) ou secundária (rede de baixa tensão - BT).

Este trabalho restringe-se ao escopo do SDEE primário. As características relevantes deste sistema inerentes ao trabalho em questão serão apresentadas a seguir.

2.2.1 Características Gerais de Sistemas de Distribuição Primários

Conforme citado anteriormente, o SDEE, geralmente, é classificado quanto ao nível de alimentação em sistema primário ou secundário. O sistema de distribuição primário opera, normalmente, com tensão nominal de 13,8 kV. Entretanto, esse valor pode variar entre diferentes concessionárias de energia e regiões do país. Essa estrutura é conectada ao sistema de distribuição secundário por meio de transformadores abaixadores, cuja tensão nominal no lado de baixa é, normalmente, de 220 V. Da mesma forma que no sistema primário, esses valores podem variar entre diferentes regiões.

O tipo de consumidor alimentado pelo SDEE é bastante diversificado, como exemplo de tais consumidores citam-se indústrias, residências e estabelecimentos comerciais. Em geral, os consumidores industriais e comerciais de médio porte são alimentados pelo sistema de distribuição primário e consumidores residenciais e comerciais de pequeno porte são alimentados pelo sistema de distribuição secundário.

O sistema de distribuição primário pode ser tanto aéreo como subterrâneo, sendo que o primeiro é de uso mais difundido, pelo seu menor custo, e o segundo, é normalmente

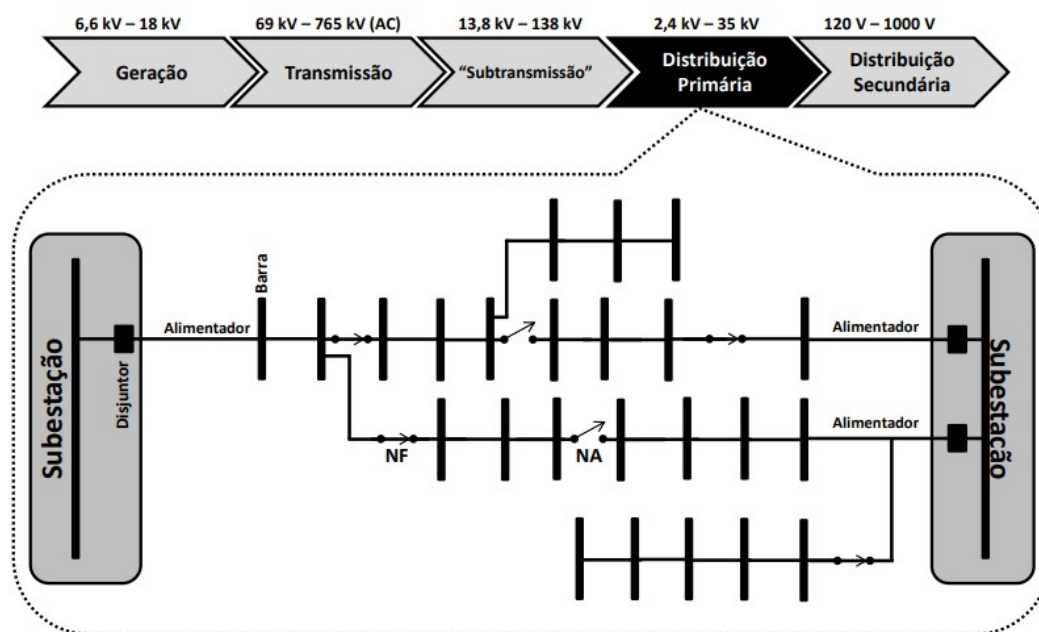


Figura 1 – Principais componentes de um Sistema de Distribuição primário (BARBOSA, 2012).

encontrado em áreas de maior densidade de carga ou onde há restrições paisagísticas. Este sistema é composto basicamente por subestações, linhas de distribuição, equipamentos de interconexão e barras de carga. As subestações estão, geralmente, conectadas ao sistema de subtransmissão a partir da qual elas recebem energia elétrica. Conforme pode ser visto na Figura 1, uma subestação pode ter vários alimentadores. Os equipamentos de interconexão são, geralmente, os religadores a vácuo, as chaves SF6 e as chaves facas, podendo ser telecomandados ou não. De acordo com (PEREIRA, 2014), atualmente, os religadores a vácuo têm sido utilizados extensamente nas redes de distribuição devido ao seu menor custo comparado a outros IEDs de diferentes tecnologias, tais como as chaves SF6. No contexto de reconfiguração, tais equipamentos de interconexão são comumente referidos na literatura especializada como chaves de interconexão e são, basicamente, definidos como chaves seccionalizadoras (normalmente fechadas - NF) e chaves de ligação (normalmente abertas - NA).

2.2.2 Operação do Sistema de Distribuição

Por questões fundamentais ligadas a custo de investimento e operação, os sistemas de distribuição primários aéreos são planejados e construídos com uma topologia malhada, contudo, operam, majoritariamente, com uma topologia radial. Isto significa que, na operação normal do sistema, não existem ciclos ¹ e, conseqüentemente, existe apenas um caminho

¹ Um ciclo (ou laço) em um SDEE consiste de dois alimentadores conectados por uma chave de interconexão fechada. Na operação do SDEE radial, esta situação é conhecida também como paralelismo de alimentadores, ou mais comumente, como configuração em anel e é, em geral, utilizada somente

para o fluxo de corrente entre a subestação e cada barra de carga.

A operação radial possibilita a limitação das correntes de curto-circuito, o que tende a reduzir o custo operacional da rede, uma vez que diminui a quantidade de dispositivos de proteção e de manobras, além de simplificar a coordenação da proteção e do isolamento do sistema elétrico. Em contrapartida, sistemas operados com topologia radial possuem grau de confiabilidade reduzido, uma vez que caso ocorra uma falta em um trecho do alimentador todos os pontos de carga a jusante deste trecho serão interrompidos.

Com o propósito de atenuar esta desvantagem, as chaves NA do sistema viabilizam alternativas para fornecimento de energia na ocasião de uma falta, pois elas possibilitam a conexão entre diferentes alimentadores ou entre trechos distintos de um mesmo alimentador. Além do mais, estas chaves, juntamente com as chaves NF, podem ser utilizados para redistribuição do fluxo de carga nos alimentadores a fim de melhorar os níveis de tensão e reduzir as perdas técnicas. Desta forma, aumentos significativos da confiabilidade total podem ser obtidos por meio o uso de equipamentos de interconexão telecomandados. Em sistemas de distribuição radiais, o fechamento de uma chave NA implica na formação de um ciclo. A radialidade poderá ser restaurada a partir da abertura de qualquer chave NF pertencente ao ciclo formado.

2.2.3 Representação dos Sistemas de Distribuição

Um SDEE pode ser representado por meio de grafos, que são estruturas comumente utilizadas para determinar relações específicas entre objetos. Um grafo $\mathcal{G}(\mathcal{V}; \mathcal{E})$ representa simultaneamente dois conjuntos. O primeiro deles, denominado de conjunto de vértices ou nós, é representado por $\mathcal{V}$. O outro, representado por $\mathcal{E}$, denomina-se conjunto de arestas. Esse último contém pares dos elementos de $\mathcal{V}$. É muito comum utilizar a definição matemática de grafo e sua figura geométrica de forma indistinta. Em tal representação, cada vértice é ilustrado por um ponto no plano e cada aresta por uma linha que conecta pares de vértices.

Dentre todas as possíveis configurações de grafo, as árvores apresentam importância especial para a análise de sistemas de distribuição de energia elétrica, pois tais estruturas são caracterizadas por serem acíclicas e conexas. Desta forma, a topologia ativa de cada alimentador pode ser representada como um grafo do tipo árvore. Na teoria dos grafos, um conjunto de árvores é definido como uma floresta. Assim, em um grafo representativo do SDEE, as barras de carga serão representadas por vértices ($\mathcal{V}$) e as linhas de distribuição pelas arestas ($\mathcal{E}$).

em situações de contingência, durante curto período de tempo.

2.2.4 Perdas Técnicas

No SDEE a perda é definida como a diferença entre a energia injetada nas subestações e a energia efetivamente fornecida pela distribuidora. Neste sistema ocorre a maior quantidade de perdas do SEP, o que representa custos adicionais para as empresas de distribuição. Segundo o Módulo 7 - Cálculo de Perdas Técnicas no Sistema de Distribuição do PRODIST ([ANEEL, 2018](#)) essas perdas podem ser classificadas em duas categorias: perdas técnicas e não técnicas, conforme descrição a seguir.

- Perdas técnicas: São inerentes ao transporte de energia elétrica na rede, são relacionadas principalmente à transformação de energia elétrica em energia térmica, o que ocasiona o chamado efeito Joule em condutores das linhas de alta tensão e redes de média e baixa tensão, nos núcleos dos transformadores de alta e média tensão, equipamentos, ramais de ligação, medidores e conexões. Existem perdas associadas a outros efeitos, tais como efeito corona em conexões e fugas de corrente em cadeias de isoladores e para-raios. Estes efeitos, no entanto, têm uma contribuição minoritária para o valor total das perdas apuradas e na impossibilidade de calculá-los, é considerado um percentual de 5% sobre o valor das perdas causadas por efeito Joule ([PEREIRA, 2014](#)).
- Perdas não técnicas: Correspondem à diferença entre as perdas totais na distribuição e as perdas técnicas, considerando, portanto, todas as demais perdas associadas à distribuição de energia elétrica, tais como furtos de energia, erros no processo de faturamento e erros de medição ([PEREIRA, 2014](#)).

No sistema de distribuição brasileiro, no ano de 2016, as perdas técnicas estavam na ordem de 7% ([ENERGIA, 2017](#)). Uma vez que o desempenho dos SDEEs decresce com o aumento das perdas, assim como a lucratividade do negócio, as concessionárias distribuidoras devem adotar medidas eficientes para minimizá-las.

De acordo com o Módulo 7 - Cálculo de Perdas Técnicas no Sistema de Distribuição do PRODIST ([ANEEL, 2018](#)), que estabelece a metodologia e os procedimentos para apuração das perdas dos sistemas de distribuição de energia elétrica, as perdas devem ser apuradas por meio de metodologia apropriada que leva em conta dados topológicos georeferenciados e de medições. No caso do sistema primário, devido à ausência de medições em massa, as perdas são geralmente estimadas por meio de programas de estudos de fluxo de potência. Segundo ([PEREIRA, 2014](#)) entre os aplicativos de fluxo de carga mais populares, aplicados especificamente na distribuição de energia elétrica, pode-se citar o PSS Sincal da Siemens ([SIEMENS, s.d.](#)), o CYME International Inc. ([CYME, s.d.](#)) e o OpenDSS ([EPRI, s.d.](#)).

2.3 O problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição

2.3.1 Visão geral do problema

Uma alternativa para a minimização das perdas técnicas é a alteração da topologia dos SDEEs, comumente chamada de reconfiguração. Assim, a reconfiguração é de suma importância para as concessionárias de energia, uma vez que proporciona melhor aproveitamento dos ativos da empresa, possibilitando a postergação de novos investimentos.

A Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica pode ser obtida por meio de manobras em equipamentos que permitem a interconexão entre alimentadores ou entre trechos de um mesmo alimentador. O objetivo da reconfiguração é encontrar uma configuração topológica otimizada ao mesmo tempo em que satisfaz todas as restrições técnicas e operacionais do sistema. Neste sentido, pode-se resumir o problema de reconfiguração como sendo o processo de se determinar um conjunto de manobras que devem ser realizadas sobre o sistema de modo a se satisfazer todas as restrições operativas com a finalidade de se obter uma nova estrutura operacional que seja melhor que a anterior. Neste contexto, esta técnica tem a tendência natural de melhorar as condições operacionais do sistema.

RSDEE é um problema de natureza combinatória ², não-diferenciável e não-linear. Além do mais, é classificado pela literatura especializada como um problema de otimização NP-difícil (LIU; CHEN, 2012). A dimensão do espaço de busca ³, incluindo configurações factíveis e não factíveis, é dependente do número de chaves manobráveis. Portanto, considerando que as chaves podem assumir apenas dois estados, abertas ou fechadas, em um sistema com n equipamentos de manobra temos 2^n possibilidades de reconfiguração. Vale ressaltar que algumas destas configurações não são permitidas por serem topologicamente infactíveis ou por violarem as restrições operacionais do problema.

2.3.2 Formulação Matemática

A minimização das perdas técnicas por meio da reconfiguração dos SDEEs é um problema de otimização mono-objetivo restrito. Em Lavorato et al. (2012), foi apresentado uma formulação matemática de PNLIM para resolver este problema. Nesta formulação, as perdas de energia na operação do sistema de distribuição são representadas pela função objetivo e são tratadas as seguintes restrições: limite da magnitude de tensão, limite de fluxo de corrente, as leis de Kirchhoff apresentadas na forma de equações de fluxo de carga generalizadas e, de forma explícita, a restrição de radialidade. Tal modelo é transcrito a

² É um problema que possui um conjunto finito de soluções viáveis, porém tal conjunto pode ser extremamente grande.

³ O espaço de soluções são todas as combinações de valores das variáveis que podem ser otimizadas.

seguir.

$$PT(X) = \sum_{ij \in \Omega_1} [g_{ij}x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j \cos(\theta_{ij}))] \quad (2.1)$$

A função objetivo de minimização das perdas é apresentada na equação (2.1). Essa equação fornece o somatório das perdas ativas para todos os ramos do SDEE. Em que Ω_1 é o conjunto de ramos do sistema, X é um vetor de estados binário composto pelas variáveis de decisão do problema (x_{ij}), tal variável determina se o ramo entre a barra i e j está fechado ou aberto, g_{ij} é a condutância do elemento referente a i -ésima linha da j -ésima coluna da matriz de admitância nodal Y_{barra} , θ_{ij} é a diferença entre os ângulos de tensão das barras i e j .

O problema tratado em (2.1) está sujeito a lei de Kirchhoff da tensão, expressa na forma de potência na Equação (2.2). Em que P_{Si} é a potência ativa fornecida pela subestação à barra i , P_{Di} é a demanda de potência ativa na barra i , Ω_{bi} é o conjunto das barras conectadas na barra i e P_{ij} é a potência dissipada por efeito Joule.

$$P_{Si} - P_{Di} - \sum_{j \in \Omega_{bi}} x_{ij} \cdot P_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2.2)$$

O problema também está sujeito à lei de Kirchhoff da corrente, expressa na forma de potência reativa, dada pela Equação (2.3). Em que Q_{Si} é a potência reativa fornecida pela subestação da barra i e Q_{Di} é a demanda de potência reativa na barra i .

$$Q_{Si} - Q_{Di} - \sum_{j \in \Omega_{bi}} x_{ij} \cdot Q_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2.3)$$

Nas restrições (2.2) e (2.3) P_{ij} e Q_{ij} são determinados pelas equações apresentadas em (2.4) e (2.5).

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.4)$$

$$Q_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.5)$$

A equação (2.6) representa a restrição dos limites de tensão do sistema, sendo estes limites regidos e padronizados pelas normas reguladoras. Assim, V_i é o módulo da tensão da barra i , que tem a ela associado um valor máximo V_i^{max} e um valor mínimo V_i^{min} .

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2.6)$$

Em (2.7) é definido o tipo das variáveis de decisão do problema (binárias): quando a variável assume valor 1 significa que a chave está fechada e quando assume valor 0 significa que a chave está aberta.

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (ij) \in \Omega_l \quad (2.7)$$

A restrição (2.8) representa o limite para atendimento do fluxo de corrente na linha (ij) . Em que I_{ij} representa o fluxo máximo de corrente no ramo ij . Sendo I_{rij} e I_{mij} as componentes real e imaginária do fluxo de corrente no ramo ij .

$$x_{ij} (I_{rij}^2 + I_{mij}^2) \leq I_{ij}^2 \quad \forall (ij) \in \Omega_l \quad (2.8)$$

A restrição (2.7) representa uma das condições necessárias, porém não suficiente, para garantir a radialidade do sistema. É necessário garantir também que todas as cargas estejam energizadas.

$$\sum_{ij \in \Omega_l} x_{ij} = n_b - 1 \quad (2.9)$$

Para cálculo das tensões nas barras, corrente nas linhas e, conseqüentemente, das perdas técnicas, é necessário o uso de um algoritmo para simulação do fluxo de carga. O cálculo do fluxo de carga é uma rotina utilizada pelo algoritmo de otimização para avaliação das configurações radiais geradas. Durante a execução do algoritmo de otimização, esta análise deve ser realizada diversas vezes, acarretando um elevado esforço computacional ao método. Assim, uma alternativa para tornar o processo de otimização mais eficiente, em questão de esforço computacional, é utilizar um algoritmo eficiente e rápido.

De uma forma geral, os métodos de cálculo do fluxo de carga tradicionais, tais como Gauss-Seidel, Newton Raphson e Desacoplado Rápido, possuem convergência lenta quando aplicados em sistemas de distribuição radiais, pois estes sistemas apresentam características muito particulares, como por exemplo: (i) operação em forma radial e, (ii) relação entre a reatância e a resistência (R/X) elevada ⁴. A primeira característica é uma vantagem porque simplifica consideravelmente a complexidade do problema, entretanto, a segunda característica é uma desvantagem porque pode produzir divergência quando utilizam-se métodos tradicionais. Em razão disso, encontra-se na literatura especializada diversas abordagens para cálculo de fluxo de carga em sistemas de distribuição radiais. No presente trabalho, utiliza-se a implementação do algoritmo de varredura direta proposto por (LISBOA et al., 2014).

⁴ Comparados com os valores típicos encontrados em sistemas de sub-transmissão e transmissão.

2.4 Metaheurística de Busca em Vizinhança Variável Generalizada

2.4.1 Técnicas de Otimização aplicadas ao problema de RSDEE

Conforme visto anteriormente, sistemas de distribuição com muitos equipamentos de manobra resultam inevitavelmente em uma quantidade enorme de combinações possíveis para a sua reconfiguração e, desta forma, se torna remota a possibilidade de que um engenheiro, ainda que experiente, possa encontrar uma configuração de boa qualidade de maneira não assistida.

Neste cenário, através do uso de técnicas de Otimização ⁵ é possível que os sistemas de distribuição operem em regime de perdas mínimas, tornando-os mais econômicos. Nas últimas décadas foram propostas na literatura diversas abordagens para resolução desse problema. Tais abordagens podem ser classificadas em duas principais classes: algoritmos exatos e algoritmos aproximados.

Os algoritmos exatos são fundamentados em formulações matemáticas rigorosas e apresentam a característica de encontrarem a solução ótima do problema. Contudo, o processo de busca ótima implica em analisar implícita ou explicitamente todas as configurações possíveis. Isto atribui alta complexidade e constitui verdadeiros desafios ao desempenho computacional destes algoritmos. Estes tipos de algoritmos, como os algoritmos de *branch and bound*, são aplicados normalmente em modelos simplificados do SDEE. Os algoritmos aproximados, diferentemente dos algoritmos exatos, não dependem de uma formulação matemática rigorosa, no entanto, não garantem a otimalidade da solução. Tais algoritmos possuem complexidade de tempo linear e garantem que, no pior caso, a solução retornada está a um raio α do ótimo. Porém este α pode ser grande, ou seja, pode retornar uma solução ainda ruim.

Os algoritmos aproximados podem ser divididos, basicamente, em duas técnicas: técnicas heurísticas e técnicas metaheurísticas. Formalmente, podemos definir uma heurística como uma técnica específica para um problema de otimização, ou classe de problemas de otimização, utilizada no projeto de algoritmos, para os quais não é possível garantir, ou não é conhecida nenhuma garantia, da qualidade das soluções geradas por esses algoritmos (CARVALHO, 2017). Já as técnicas metaheurísticas constituem-se de métodos de busca, guiados por estratégias que tentam evitar os mínimos locais e abrem mão da garantia de otimalidade. Estas técnicas têm sido amplamente utilizadas para resolução do problema de RSDEE. Detalhes desta metodologia são apresentados na próxima seção.

⁵ A Otimização baseia-se na utilização de técnicas que tem por escopo a otimização de um ou mais critérios sujeitos a um conjunto de restrições.

2.4.2 Metaheurísticas

O termo metaheurística foi formalmente apresentado por (GLOVER, 1986) e desde então tem sido amplamente aplicado na literatura. De forma geral, as metaheurísticas podem ser definidas como estratégias que realizam buscas no espaço de soluções de um problema, sendo que a diferença principal entre as diversas metaheurísticas é o tipo de estratégia utilizada para realizar as transições neste espaço. Desta forma, com base na exploração do espaço de soluções, as metaheurísticas podem ser classificadas essencialmente em duas classes: busca populacional e busca local.

Metaheurísticas baseadas em busca populacional armazenam um conjunto de soluções e as combinam de formas diversas, de tal forma a reunir os seus bons atributos e gerar novas soluções. Já as metaheurísticas baseadas em busca local geralmente realizam movimentos sobre a solução corrente, a fim de encontrar uma solução de melhor qualidade em sua vizinhança. O principal inconveniente das buscas locais é a possibilidade de estagnação em mínimos locais. Para atenuar esta desvantagem, algoritmos baseados em busca local, utilizam basicamente até três tipos de estratégias: (i) reinício da busca a partir de uma solução aleatória, (ii) permissão de movimentos de deterioração da solução corrente e/ou (iii) modificação da estrutura de vizinhança.

Na utilização das metaheurísticas é necessário especificar um conjunto de características relacionadas com a sua aplicação na solução de um problema. No geral, as principais características que devem ser especificadas são:

- Uma forma de codificação de uma proposta de solução, que deve identificar de maneira adequada um elemento do espaço de busca;
- Uma maneira adequada de avaliar a qualidade de uma solução;
- Uma maneira de identificar a viabilidade ou inviabilidade de uma proposta;
- Uma estratégia para encontrar a primeira proposta de solução (solução incumbente);
- Uma forma de caracterização da vizinhança;
- Uma estratégia para escolher o melhor vizinho que vai se transformar na nova solução incumbente.

Entre os métodos metaheurísticos mais aplicados a problemas de otimização destacam-se os Algoritmos Evolucionários (AE), o *Simulated Annealing* (Recozimento Simulado), Busca Tabu, Otimização por Colônias de Formigas (ACO), Otimização por Nuvens de Partículas (PSO), GRASP, Sistemas Imunes Artificiais (AIS) e Busca em Vizinhança Variável (VNS), incluindo as suas extensões.

Neste trabalho, a metodologia desenvolvida baseia-se na versão geral da metaheurística VNS, denominada Busca em Vizinhança Variável Generalizada. A seguir são apresentadas características intrínsecas desta metaheurística.

2.4.3 Busca em Vizinhança Variável Generalizada

O algoritmo Busca em Vizinhança Variável Generalizada (em inglês, *General Variable Neighborhood Search* - GVNS) é uma metaheurística baseada em busca local apresentada por (MLADENović et al., 2008). Este algoritmo é uma versão generalizada da metaheurística VNS, proposta pelos mesmos autores, na qual o método de busca local é o VND. A seguir, para melhor entendimento do algoritmo GVNS, são apresentados em detalhes os algoritmos VNS e VND.

2.4.3.1 Busca em Vizinhança Variável

A Busca em Vizinhança Variável (em inglês, *Variable Neighborhood Search* - VNS), proposta por (MLADENović; HANSEN, 1997), é uma metaheurística que explora o espaço de soluções realizando uma sequência de buscas locais, por meio de trocas sistemáticas entre as estruturas de vizinhança pré-ordenadas. O objetivo é examinar diferentes vizinhanças para encontrar diferentes mínimos locais. Quando o processo não encontra uma solução melhor que a solução atual existem duas possibilidades: o mínimo global foi encontrado ou o algoritmo está preso a um mínimo local. O pseudocódigo do VNS é apresentado no Algoritmo 1.

Os parâmetros de entrada do algoritmo são a solução inicial do problema indicada por x_0 e a quantidade de estruturas de vizinhança r . A variável k indica o tipo de estrutura de vizinhança. Como essas estruturas foram ordenadas previamente, o algoritmo inicia pela primeira delas (linha 4). O VNS parte da solução inicial, que será a base inicial para a busca no espaço de soluções e, enquanto não atingir o critério de parada, segue os seguintes passos: iniciando pela primeira estrutura de vizinhança, seleciona-se aleatoriamente um vizinho x' de x pertencente a vizinhança $N_k(x)$ (linha 6) corrente; uma busca local (linha 7) é aplicada neste vizinho e realiza-se o critério de aceitação para verificar se a nova solução é melhor que a solução incumbente (linha 8). Se a solução resultante da busca local, x'' , for melhor que a solução atual x , atualiza-se a solução incumbente (linhas 9 e 10). Quando o processo de busca local fica preso em um mínimo local, ou seja, não produz uma solução melhor, o algoritmo altera a estrutura de vizinhança por outra que ainda não tenha sido usada (linha 12). Então, o processo de realizar uma nova busca local na solução atual, considerando a nova vizinhança, é repetido até que o critério de parada seja satisfeito.

Conforme explicitado, no algoritmo VNS, a estratégia utilizada para sair de ótimos locais é a mudança de vizinhança. Assim, se for encontrado um ótimo local na região

Algoritmo 1: PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL (VNS)

Entrada: x_0, r **Saída:** Uma solução x refinada.

```

1  inicio
2     $x \leftarrow x_0$ ;
3    enquanto Critério de parada não for satisfeito faça
4       $k \leftarrow 1$ ;
5      enquanto  $k \leq r$  faça
6        Gere um vizinho qualquer  $x' \in N_k(x)$ ;
7         $x'' \leftarrow \text{BuscaLocal}(x')$ ;
8        se  $f(x'') < f(x)$  então
9           $x \leftarrow x''$ ;
10          $k \leftarrow 1$ ;
11        senão
12           $k \leftarrow k + 1$ ;
13      fim
14    fim
15  fim
16  retorna  $x$ 
17 fin

```

em que se encontra o ótimo global então há grandes chances de encontrar esse ótimo global. Consequentemente, se o algoritmo VNS encontra o ótimo global então a busca fica estagnada nesse ponto. No entanto, se o ótimo global se encontra em outra região do espaço de busca então a única possibilidade de tentar encontrá-lo é implementar um processo de diversificação.

A metaheurística VNS explora sistematicamente as seguintes observações:

- Um mínimo local com relação a uma estrutura de vizinhança não é necessariamente um mínimo local em relação a outra;
- Um mínimo global é um mínimo local em relação a todas as estruturas possíveis de vizinhança;
- Em geral, os mínimos locais para várias estruturas de vizinhança compartilham características comuns, sendo possível passar de um mínimo local de uma estrutura de vizinhança para o mínimo local de outra estrutura de vizinhança.

2.4.3.2 Descida em Vizinhança Variável

O algoritmo Descida em Vizinhança Variável (em inglês, *Variable Neighborhood Search* - VND), proposto por (HANSEN; MLADENOVIĆ, 2001), é um método de busca local que consiste em explorar o espaço de soluções através de trocas sistemáticas de estruturas

de vizinhanças, sendo aceitas somente as soluções que apresentam melhoria em relação à solução corrente. Este método sempre retorna para a primeira estrutura de vizinhança quando uma solução melhor é encontrada. O pseudocódigo do VND é apresentado no Algoritmo 2.

Algoritmo 2: PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO DESCIDA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL (VND)

Entrada: x_0, r
Saída: Uma solução x refinada.

```

1 inicio
2    $x \leftarrow x_0$ ;
3    $k \leftarrow 1$ ;
4   enquanto  $k \leq r$  faça
5     Encontre o melhor vizinho  $x' \in N_k(x)$ ;
6     se  $f(x') < f(x)$  então
7        $x \leftarrow x'$ ;
8        $k \leftarrow 1$ ;
9     senão
10       $k \leftarrow k + 1$ ;
11    fim
12  fim
13  retorna  $x$ 
14 fin

```

O VND parte de uma solução inicial x_0 e realiza a exploração de cada vizinhança para encontrar a melhor solução vizinha. O algoritmo inicia a busca a partir da primeira estrutura de vizinhança (linha 3). Em seguida, é feita uma comparação para verificar se o vizinho x' encontrado é melhor que a solução incumbente x (linha 6). Neste caso, três situações distintas podem ocorrer: (i) se x' for igual a x , significa que x já era ótimo local da vizinhança e, portanto, deve-se mudar para o próximo nível de vizinhança; (ii) se x' é de pior qualidade que x então foi encontrado um ótimo local de pior qualidade que a incumbente x e também deve-se mudar a vizinhança e (iii) se x' é de melhor qualidade que x , deve-se reiniciar a busca a partir da primeira estrutura de vizinhança. Portanto, se a última vizinhança for alcançada sem que seja encontrada uma solução melhor que a incumbente o VND para. Este ciclo se repete até que o critério de parada seja atendido. Portanto, se x' for melhor que x , a solução incumbente é atualizada (linhas 7 e 8) e a busca é reiniciada na primeira estrutura de vizinhança, caso contrário, a busca continua na próxima estrutura de vizinhança (linha 10). Estes passos são executados até que todas as k_{max} vizinhanças sejam exploradas sem êxito, ou seja, sem que uma solução melhor que x tenha sido encontrada. A solução final obtida por esse algoritmo é um mínimo local em relação a todas as k_{max} estruturas de vizinhança, e portanto, a probabilidade de se alcançar um mínimo global é maior do que quando se usa somente uma estrutura de vizinhança.

A busca pelo melhor vizinho (linha 5) pode ser feita utilizando outras heurísticas de refinamento. As heurísticas mais utilizadas são o método *best improvement*, *first improvement* ou o método de descida/subida randômica. Como esta busca, dependendo do problema e do tamanho de cada vizinhança, pode ser cara computacionalmente, é comum que boa parte dos trabalhos utilizem o *first improvement* como heurística de refinamento. A justificativa desta escolha é que, neste método, a busca é interrompida assim que é encontrada a primeira solução de melhora, ou seja, ao invés de explorar toda a vizinhança o algoritmo para de realizar a busca assim que o primeiro vizinho que melhora a solução atual é encontrado. Neste trabalho, será usada a heurística *first improvement*.

Para uma implementação eficiente do algoritmo VND, os principais pontos que devem ser consideradas são:

- Complexidade dos movimentos das estruturas de vizinhança;
- Ordem das estruturas de vizinhança;
- Verificação se as estruturas de vizinhança consideradas são suficientes para garantir uma exploração eficiente do espaço de soluções.

O primeiro ponto refere-se à seleção e classificação dos movimentos: se eles envolvem muitas mudanças elementares, o algoritmo resultante pode ser muito lento e pode levar mais tempo que um algoritmo exato em problemas de tamanhos pequenos e médios. O segundo ponto tem influência direta no esforço computacional necessário para alcançar soluções de boa qualidade. Uma prática frequente consiste em ordenar as estruturas de vizinhança de acordo com a ordem crescente de cardinalidade. Por fim, o último ponto é fundamental, pois para alguns problemas, movimentos elementares não são suficientes para sair de um ótimo local, e algoritmos que só os utilizam podem obter resultados insatisfatórios.

2.4.3.3 GVNS

Conforme definido anteriormente, o algoritmo GVNS é obtido por meio da generalização do algoritmo VNS. Neste algoritmo, considera-se o algoritmo VND na etapa de busca local. A metaheurística GVNS pode ser dividida em duas fases: perturbação e busca local. Na fase de perturbação, o algoritmo gera uma solução aleatória em uma dada vizinhança (exploração estocástica das estruturas de vizinhança). Nesta estratégia, a escolha aleatória do vizinho x evita ciclagem e permite encontrar ótimos locais distante da solução incumbente. A fase de busca local, consiste na aplicação do método VND (exploração de-

terminísticas das estruturas de vizinhança). O pseudocódigo do GVNS é apresentado no Algoritmo 3.

Algoritmo 3: PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL GENERALIZADA (GVNS)

Entrada: Um conjunto de estrutura de vizinhança N_k , para $k = 1, \dots, k_{max}$ a serem utilizadas na busca local; um conjunto de estrutura de vizinhança N_l , para $l = 1, \dots, l_{max}$ a serem utilizadas na fase de perturbação; solução inicial x_0 .

Saída: Uma solução x refinada.

```

1  inicio
2       $x \leftarrow x_0$ ;
3      repita
4           $l \leftarrow 1$ ;
5          repita
6              Perturbação : Selecionar  $x'$  aleatoriamente, tal que  $x' \in N_l(x)$ ;
7              Busca Local : Utilizar VND;
8               $k \leftarrow 1$ ;
9              repita
10                  $x'' \leftarrow BuscaLocal(x')$ 
11                 se  $f(x'') < f(x')$  então
12                      $x' \leftarrow x''$ ;
13                      $k \leftarrow 1$ ;
14                 senão
15                      $k \leftarrow k + 1$ ;
16             fim
17         até  $k \leq k_{max}$ ;
18         se  $f(x') < f(x)$  então
19              $x \leftarrow x'$ ;
20              $l \leftarrow 1$ ;
21         senão
22              $l \leftarrow l + 1$ ;
23     fim
24     até  $l = l_{max}$ ;
25     até Critério de Parada;
26     retorna  $x$ 
27 fim

```

Inicialmente, gera-se uma solução inicial factível. Em seguida, realiza-se uma perturbação nesta solução e procura-se melhorá-la através de um algoritmo de busca local,

o qual consiste em fazer uma busca sistemática na solução a partir de estruturas de vizinhança pré-determinadas. Um equilíbrio entre intensificação e diversificação é altamente relevante para um bom desempenho desta metaheurística. Segundo (HANSEN; MLADENOVIC, 2001), tal equilíbrio é balanceado na etapa de perturbação.

O número máximo de estruturas de vizinhança (k_{max}) frequentemente utilizado é igual a 2. E como critério de parada, geralmente, utiliza-se o tempo máximo de processamento desde a última melhoria, o número máximo de avaliações de função e/ou o número máximo de iterações.

Em (HANSEN; MLADENOVIC, 2001), os autores propuseram várias extensões do VNS para resolver problemas de grandes instâncias. Em (HANSEN; MLADENOVIC, 2003), é apresentado um tutorial sobre o VNS, o qual é constituído por extensões, exemplos ilustrativos e questões relevantes acerca da implementação.

Por ser uma metaheurística simples, fácil de implementar, robusta e altamente eficaz, o algoritmo GVNS apresenta-se como boa alternativa para aplicação em problemas de reconfiguração de redes reais de distribuição.

2.5 Conclusões

Este capítulo abordou os principais conceitos necessários para entendimento da metodologia desenvolvida nesta dissertação. Desta forma, inicialmente, uma visão geral das características do sistema de distribuição foi apresentada, tais como aspectos relacionados à operação e questões relevantes sobre as perdas técnicas. Em seguida, o problema de reconfiguração de redes foi formalmente apresentado, definições relevantes do problema e também a modelagem matemática foi apresentada. Na última seção, uma visão geral das metaheurísticas foi apresentada, com ênfase na metaheurística GVNS.

3 Revisão de Literatura

3.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma revisão bibliográfica de algumas metodologias propostas na literatura especializada para reconfiguração de sistemas de distribuição.

3.2 Revisão Bibliográfica

Atribui-se aos pesquisadores franceses [Merlin e Back \(1975\)](#) o primeiro trabalho publicado na literatura para resolução do problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Neste trabalho, um algoritmo heurístico construtivo foi desenvolvido. Este algoritmo é iniciado a partir do fechamento de todas as chaves do sistema radial, tornando-o malhado. Depois deste procedimento, resolve-se um problema de fluxo de carga linearizado para calcular os valores de potência aparente nas linhas do sistema. A linha que possui o menor valor de potência aparente tem sua chave de interconexão aberta. Esses passos são repetidos até que se encontre um sistema cuja topologia seja radial.

Depois deste trabalho pioneiro, inúmeras metodologias para resolução do problema de reconfiguração foram apresentadas na literatura especializada. Em ([CIVANLAR et al., 1988](#)), foi proposto uma técnica heurística conhecida como troca de ramos (do inglês, *branch exchange*). Ao contrário do algoritmo elaborado por [Merlin e Back \(1975\)](#), estes autores definem como solução inicial um sistema radial, no qual a partir desta solução pesquisa-se todas as soluções radiais que podem ser geradas a partir da abertura/fechamento de chaves manobráveis. Para evitar a análise de um número excessivo de chaveamentos, os autores sugerem o uso de uma expressão matemática que estima a redução das perdas ativas após manobras de transferência de cargas. Assim, este mecanismo fornece qual é a melhor chave a ser fechada e qual será aberta a fim de diminuir as perdas ativas do sistema. Segundo os autores, o método apresenta complexidade computacional suficientemente reduzida para ser utilizado em aplicações de tempo real. Entretanto, a técnica apresentada realiza simplificações que podem levar a metodologia a localizar uma solução sub-ótima.

Em ([BARAN; WU, 1989](#)), os autores apresentam uma metodologia heurística que realiza uma avaliação das perdas após a alteração do estado operativo de um par de chaves. Nesta metodologia, para redução do custo computacional, foram formulados dois métodos aproximados específicos para o cálculo de fluxo de carga em sistemas radiais. Esta abordagem acelera a busca pela solução ótima com diferentes graus de precisão.

Em (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989), os autores apresentam uma solução heurística que parte de um sistema completamente malhado e, iterativamente, selecionam-se as chaves do sistema para serem abertas, levando, ao fim do processo, a uma estrutura radial. Para tanto, utiliza-se um fluxo de carga para sistemas fracamente malhados a fim de determinar qual linha do sistema contém o menor valor de corrente e, consequentemente, representa uma boa candidata para a abertura. Esse método apresenta pequeno custo computacional, sendo possível aplicá-lo tanto no processo de planejamento quanto na operação dos sistemas. Entretanto, o procedimento pode eventualmente realizar a abertura de chaves que resultem na perda de conectividade da rede e, portanto, deve-se realizar um processo de validação da topologia gerada a cada iteração para garantir a factibilidade da mesma. Nesta abordagem, o algoritmo calcula o fluxo de carga de um sistema com laços, o que não corresponde à condição normal de operação o sistema. Contudo, apesar das simplificações adotadas, a metodologia proposta normalmente conduz a uma boa solução.

Na referência (GOSWAMI; BASU, 1992), os autores introduziram o conceito de otimização de malha única, no qual ao invés de fechar todas as chaves de interconexão do sistema, apenas uma chave é fechada por vez, de modo a formar uma única malha. Desta maneira, após fechar uma chave de ligação, o que, naturalmente, introduz uma malha no sistema, calcula-se o fluxo de carga para determinar qual chave pertencente a malha formada deve ser aberta. Este procedimento se repete até o algoritmo percorrer todas as malhas, ou seja, até que a configuração radial seja obtida.

Em (CHEN; CHO, 1993), foi publicado o primeiro trabalho sobre reconfiguração de sistemas de distribuição com o objetivo de reduzir perdas em um período especificado de tempo. Para tanto, as cargas foram caracterizadas por uma curva de carga diária discretizada em 24 pontos com intervalos de integração de 1 hora. A referência (SARFI; SALAMA; CHIKHANI, 1994) realiza um importante levantamento sobre trabalhos que abordaram o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição entre 1975 até 1993. Em (LÓPEZ et al., 2004) apresenta-se resultados e conclusões sobre a reconfiguração *online* de sistemas em operação num centro de controle. O objetivo é avaliar os benefícios da reconfiguração *online* em termos de redução das perdas, tais estudos são realizados utilizando-se um modelo que inclui aspectos da demanda, tais como modelo de carga, classe da carga e a variação horária. Os resultados mostram que reduções significativas de perdas ocorrem quando a rede é reconfigurada a cada hora. Além do mais, os autores concluem que a reconfiguração *online* deve ser cuidadosamente avaliada, considerando a variabilidade de carga e ainda recomendam que um estudo específico deve certamente ser realizado para qualquer rede.

Diferentemente da maioria das abordagens heurísticas que partem de uma estrutura totalmente malhada ou radial e realizam operações de abertura ou troca de chaves, em (MCDERMOTT; DREZGA; BROADWATER, 1999), os autores propõem um método

que parte de um sistema completamente aberto e realiza o fechamento da chave que resulta no menor aumento das perdas. Um fluxo de potência aproximado é utilizado para realizar tal análise. Todavia, um fluxo exato é executado ao final de cada iteração para manter a precisão do método. Para evitar a atração para mínimos locais, os autores utilizam uma estratégia de *backtracking* que realiza uma operação de comparação entre as diferentes alternativas topológicas ao final de cada iteração do algoritmo. Comparado a outros métodos heurísticos, o número de cálculos de fluxo de potência é bastante elevado.

Em (NARA et al., 1992), apresenta-se a primeira aplicação de algoritmos evolucionários para a solução do problema de reconfiguração de SDEEs por meio da utilização de um algoritmo genético. Neste trabalho, utiliza-se uma codificação binária que indica o estado de operação das chaves do sistema. As operações de cruzamento e mutação são realizadas como em um algoritmo genético convencional. Uma desvantagem desta abordagem é o grande número de indivíduos ineficazes que são produzidos pelos operadores genéticos. Contudo, esse trabalho foi utilizado como base por diversos outros que desenvolveram algoritmos cada vez mais eficientes. Em (ZHU, 2002), os autores também utilizam algoritmo genético. Um esquema de mutação adaptativa foi implementado para evitar a convergência prematura. Em (ZVIETCOVICH, 2016) um algoritmo genético modificado foi proposto, cuja contribuição foi uma nova maneira de realizar a recombinação, permitindo que configurações não radiais fossem evitadas. Em (MENDOZA et al., 2006) apresenta-se outra metodologia baseada no algoritmo genético, no qual a principal ideia do trabalho é diminuir o espaço de busca do algoritmo.

A referência (CHANG; KUO, 1994) utiliza a metaheurística *Simulated Annealing* na resolução do problema de reconfiguração. Neste trabalho foi utilizado um cálculo aproximado das perdas do sistema, além de um esquema eficiente de perturbação. Esses fatores, segundo o autor, fazem com que o tempo computacional do método seja reduzido.

Em (GLAMOCANIN, 1990), resolve-se o problema de reconfiguração, como sendo um problema de transporte com custos quadráticos. A partir da configuração inicial obtida através da linearização das perdas, é utilizado o método Simplex para problemas quadráticos, a fim de melhorar a solução. Na referência (ABUR, 1996), que também utiliza o método Simplex, o problema de reconfiguração é formulado como um problema de fluxo de custo mínimo. Nesta proposta, para atender os limites da capacidade das linhas, o algoritmo Simplex foi modificado.

Em (KIM; KO; JUNG, 1993), os pesquisadores propuseram a resolução do problema de reconfiguração através do uso de uma Rede Neural Artificial (RNA) do tipo Perceptron Multicamadas. Esta metodologia tem a capacidade de realizar a reconfiguração do sistema de distribuição em tempo real. Isto foi possível devido ao fato da RNA ter sido treinada utilizando um conjunto de boas configurações para diferentes valores de carregamento. Para diminuir o esforço computacional, o sistema de distribuição foi dividido

em três tipos, residencial, comercial e industrial, facilitando o treinamento da RNA. Em (SALAZAR; GALLEGOS; ROMERO, 2006), os autores também apresentaram uma metodologia baseada na RNA do tipo Perceptron Multicamadas. Técnicas de agrupamento foram aplicadas, associadas a técnicas de validação para identificar as melhores topologias utilizadas no treinamento da rede neural. Isto possibilitou determinar boas topologias com baixo custo computacional, além de utilizar apenas uma rede neural durante a resolução do problema.

Em (DUAN et al., 2015), os autores propõem um algoritmo genético aprimorado para a reconfiguração automática de uma rede de distribuição. Os índices de redução de perdas e melhoria da confiabilidade são considerados. A metodologia proposta lida corretamente com a restrição de radialidade e gera apenas soluções viáveis durante o processo de otimização. Em (SOUZA et al., 2016), os autores utilizam um algoritmo baseado em Sistemas Imunológicos Artificiais para minimizar o custo das perdas de energia em um determinado período de operação, ou seja, considerando demanda variável. Nos testes considerou-se um período de 24 h, e para cada período horário, um nível de demanda foi especificado. Em (AMELI et al., 2017), os autores utilizam o algoritmo de otimização de Colônia de Formigas para reduzir o custo total e as perdas de energia da rede durante um período específico, realizando-se um agendamento dinâmico da reconfiguração.

A grande diversidade de técnicas atesta a complexidade do problema em questão. Nas últimas décadas, foram identificados diversos outros trabalhos baseados em inteligência artificial, tais como Sistemas Especialistas, Recozimento Simulado, Algoritmos Genéticos, Redes Neurais Artificiais, Busca Tabu, Lógica Fuzzy, Otimização por Colônia de Formigas, PSO e Sistemas Multi-Agentes. Neste trabalho, a metodologia desenvolvida para resolução do problema de RSDEE baseia-se na metaheurística Busca em Vizinhança Variável Generalizada.

4 Abordagem Proposta

4.1 Introdução

A ferramenta proposta tem como objetivo tratar o problema de reconfiguração de SDEEs da forma com que ele é enfrentado pelo operador, sem simplificações. O objetivo deste capítulo é apresentar a metodologia desenvolvida para resolução deste problema. Desta forma, são abordados aspectos referentes as premissas consideradas, representação dos elementos do sistema, pré-processamento da rede e implementação do algoritmo de otimização.

4.2 Premissas Consideradas

Na metodologia desenvolvida, assumiu-se que todas as chaves manobráveis do sistema de distribuição são controladas remotamente. Isso pode parecer uma premissa não razoável em primeira análise, se sistemas reais forem considerados. Entretanto, no contexto de *Smart Grids*, este cenário é perfeitamente plausível. Vale ressaltar que esta premissa aumenta a cardinalidade do problema, uma vez que leva a um número maior de chaves e, conseqüentemente, um número maior de possibilidades de configurações topológicas. Além do mais, considera-se apenas o sistema de distribuição em regime permanente, ou seja, fenômenos transitórios causados pelas mudanças na topologia da rede não são analisados.

4.3 Arquitetura da Ferramenta Proposta

Na ferramenta proposta, inicialmente, processa-se os dados de topologia do sistema. Após o processamento, são efetuadas reduções. O processo de redução tem como objetivo remover informações que não serão consideradas pelo algoritmo de otimização, tais como linhas não manobráveis e linhas sem rota para transferência de cargas. Isso reduz o espaço de busca do algoritmo, permitindo a obtenção de respostas de forma mais rápida. O fluxograma do algoritmo proposto é apresentado na Figura 2. A seguir são detalhadas cada uma das etapas do algoritmo proposto.

4.4 Representação dos Elementos do Sistema

Visto que para resolução do problema de reconfiguração, alguns elementos do sistema de distribuição precisam ser representados computacionalmente, a seguir são apresentadas as principais considerações realizadas neste trabalho acerca destes elementos.

- Subestação: considera-se hipoteticamente que as barras da subestação, ou seja, as barras por onde se iniciam os alimentadores, se comportam como geradores cujos limites de geração representam a capacidade de fornecimento de potência ativa e reativa do alimentador. Assume-se que cada alimentador do sistema é representada por um vértice, sendo assim, caso uma mesma subestação apresente diferentes alimentadores, esses devem ser agrupados em pontos elétricos diferentes;
- Cargas: são representadas como cargas equivalentes de potência constante conectadas às barras do sistema primário de distribuição;
- Linhas: são representadas por uma impedância série (resistência e reatância indutiva). Ainda que seja possível trabalhar com valores de admitância *shunt* das linhas, esta foi negligenciada, uma vez que suas perdas são pequenas comparadas às perdas dos condutores por efeito Joule. Cada linha do sistema é classificada como manobrável, se houver uma chave manobrável, e não manobrável, caso contrário;
- Demais equipamentos: os transformadores de conexão da rede primária com a secundária foram modelados como barras de carga, ou seja, o consumo total da rede secundária foi modelado como uma carga.

4.5 Classificação dos Blocos de Cargas e das Chaves

Para reduzir o sistema, com o objetivo de retirar informações desnecessárias do problema de reconfiguração, após a leitura dos dados de topologia, o sistema é dividido em blocos de cargas e chaves. As cargas são agrupadas em blocos, em que um bloco é definido como um conjunto de barras conectadas por linhas de distribuição não manobráveis (linhas sem chaves). Desta forma, os blocos são conectados uns aos outros por meio de chaves manobráveis, que podem ser normalmente abertas (NA) ou normalmente fechadas (NF).

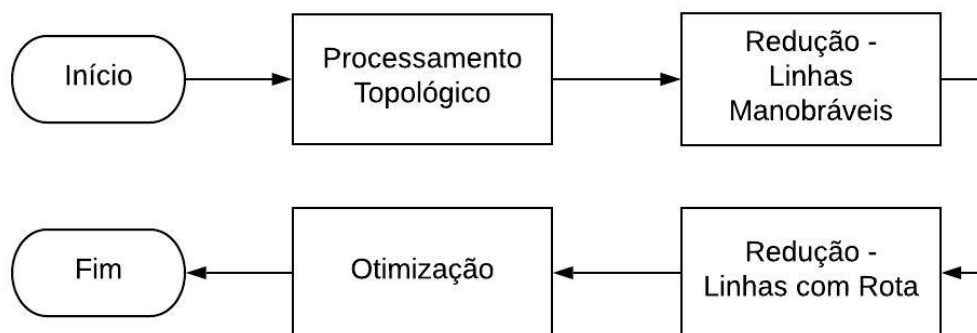


Figura 2 – Fluxograma do algoritmo proposto.

Um exemplo de sistema de distribuição é apresentado na Figura 3. Neste sistema, há três alimentadores (1, 2 e 3), 13 blocos de carga (4, 5, ..., 16) e 16 chaves. Destas chaves, 13 são NF (linhas contínuas) e 3 são NA (linhas pontilhadas). É possível notar que as chaves NF compõem três alimentadores radiais.

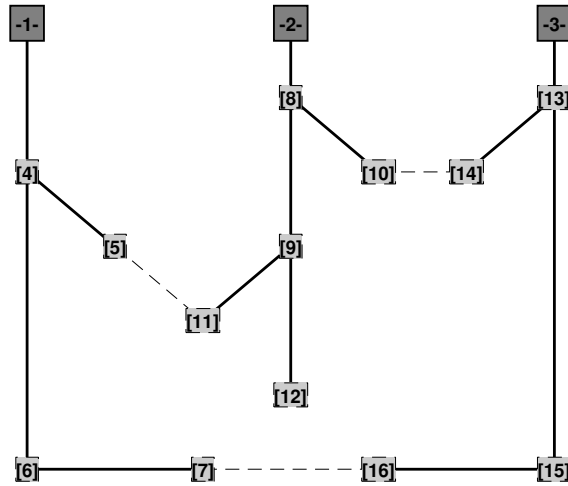


Figura 3 – Exemplo de um sistema de distribuição radial

Nesta estrutura radial, todo bloco de carga possui um caminho único de conexão com a origem do alimentador. Assim, toda chave NA que for fechada cria uma malha, o que obrigaria que alguma chave NF desta malha seja aberta para que a estrutura radial seja mantida. Deste modo, as chaves NF definem a topologia ativa do sistema e as chaves NA podem ser usadas para alterar esta topologia. Um bloco de carga pode ser movido de um alimentador para outro abrindo sua conexão do alimentador original (uma chave NF) e fechando uma conexão dele com outro alimentador (uma chave NA). Vale ressaltar que um bloco é a unidade mínima do problema de reconfiguração, uma vez que não é possível desconectar ou reconectar apenas parte dele.

Inicialmente, cada bloco é associado a um grupo correspondente ao alimentador a que está conectado. Na Figura 3, os grupos dos blocos são facilmente identificáveis, como segue:

- Grupo 1: 1, 4, 5, 6, 7;
- Grupo 2: 2, 8, 9, 10, 11, 12;
- Grupo 3: 3, 13, 14, 15, 16.

No esquema de decodificação implementado (a ser detalhado na seção 4.8), caso uma manobra de fechar uma chave NA e abrir uma chave NF resulte em uma rede infactível, é possível efetuar manobras de corte de cargas para tentar atender os limites

técnicos de tensão e corrente no sistema. Essas cargas desconectadas serão eventualmente religadas em um estágio seguinte do algoritmo. Se as cargas desconectadas forem religadas, uma sequência viável de manobras é decodificada. No cenário pós-corte de cargas os grupos dos blocos são modificados seguindo as regras apresentadas a seguir.

- Blocos que foram desconectados do alimentador j são associados ao grupo $-j$ (blocos não-operacionais);
- Blocos que não foram desconectados, chamados de blocos operacionais, mantêm seu grupo original.

Quanto às chaves, fica evidente a partir das definições anteriores que elas são classificadas de acordo com o tipo de operação que exercem na reconfiguração, como segue:

- NF (normalmente fechada): indica a chave que conecta dois blocos de mesmo grupo; são abertas quando um laço é formado ou quando realiza-se operação de corte de cargas no sistema;
- NA (normalmente aberta): indica a chave que conecta dois blocos de grupos operacionais distintos.

4.6 Pré-Processamento da Rede

Após a classificação do sistema em blocos de cargas e chaves manobráveis, realiza-se o pré-processamento da rede. O sistema de distribuição pode apresentar em sua estrutura uma ou mais chaves que não pertencem a nenhuma malha. Portanto, ao abrir alguma destas chaves geram-se blocos de cargas sem alimentação, ou seja, blocos ilhados. No contexto de reconfiguração, uma vez que o sistema deve ser conexo, estes tipos de chaves não podem ser consideradas para abertura, pois, caso sejam abertas tornariam o sistema topologicamente infactível. Tais chaves são denominadas neste trabalho como chaves neutras.

Neste contexto, uma nova redução do sistema é efetuada. Nessa nova representação, todas as chaves neutras são desconsideradas para abertura pelo algoritmo de otimização. A Figura 4 apresenta um exemplo de um sistema com uma chave neutra (chave 9-12). Observe que esta chave não pode ser aberta, pois causaria problemas de ilhamento, deixando o bloco de carga da barra 12 sem alimentação. E, portanto, como não há rotas para uma possível conexão, esta chave não pode, em hipótese alguma, ser manobrada.

A partir das definições anteriores, fica evidente que para realizar manobras de transferência de carga em um sistema de distribuição radial é necessário que exista pelo menos uma chave NA entre o trecho desconectado e uma fonte de alimentação. Desta

forma, para identificar as chaves neutras, realiza-se uma busca em largura, que se inicia na raiz de cada alimentador e para cada chave NF verifica-se existe rota para transferência de carga. As chaves que não possuem rota (chaves neutras), após serem identificadas, são eliminadas do conjunto de chaves manobráveis. Vale ressaltar que todas as chaves são consideradas para a avaliação do estado atual da rede, uma vez que para o cálculo do fluxo de carga é necessária a modelagem do sistema completo. A Figura 5 apresenta o sistema após aplicação dessa metodologia.

Nesta etapa de pré-processamento da rede elimina-se chaves cuja abertura proporcionaria o isolamento de algum bloco de carga do sistema que não pudesse ser atendido pelo mesmo alimentador ou por outro alimentador. O objetivo desta estratégia é limitar as opções de movimentos considerados pelo algoritmo de otimização, a fim de diminuir a dimensão do espaço de busca do problema de RSDEE.

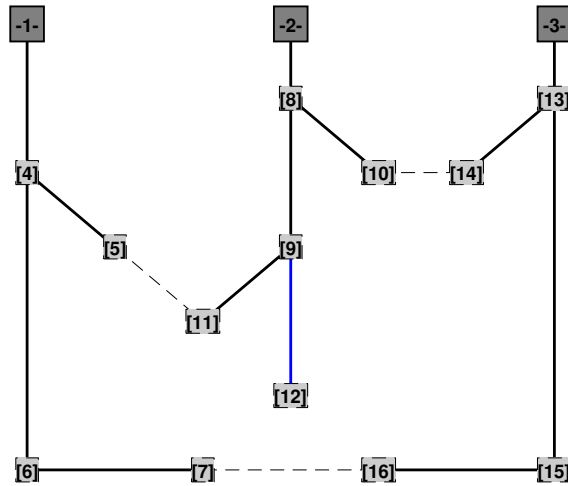


Figura 4 – Exemplo de um sistema com uma chave neutra

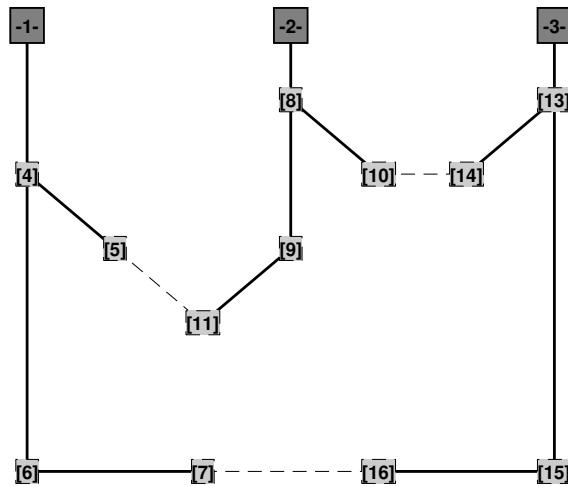


Figura 5 – Exemplo de um sistema após o pré-processamento da rede

4.7 Esquema de Codificação

Na formulação do problema de reconfiguração, considera-se factíveis apenas as configurações que além de atenderem limites técnicos, atendam aos requisitos de radialidade e conectividade. Neste sentido, o esquema de codificação e decodificação empregado para a representação das soluções candidatas deve, preferencialmente, garantir tal propriedade.

Neste trabalho, a codificação de uma solução é baseada na proposta de [Carrano et al. \(2016\)](#), no qual uma solução é codificada como uma permutação de números inteiros, cuja dimensão do vetor é igual ao número total de chaves manobráveis do sistema após a etapa de pré-processamento da rede. A ordem em que as chaves aparecem na permutação corresponde a ordem em que elas serão testadas pelo esquema de decodificação, que é responsável por decodificar a proposta de solução em uma sequência viável de manobras. Um exemplo de solução inicial para o sistema apresentado na Figura 4 é mostrado na Figura 6.

6	3	11	7	14	8	5	15	1	2	4	13	9	10	1
---	---	----	---	----	---	---	----	---	---	---	----	---	----	---

Figura 6 – Exemplo de uma solução inicial

4.8 Esquema de Decodificação

O esquema de decodificação proposto neste trabalho é inspirado no esquema proposto por [Carrano et al. \(2016\)](#) para o problema de restauração de redes. Tal esquema descarta automaticamente as soluções não factíveis, gerando apenas soluções que são viáveis respeitando todas as restrições do problema e reduzindo drasticamente a dimensão do espaço de busca. Logicamente, diversas adaptações foram necessárias para aplicação ao problema de reconfiguração. No esquema proposto, diferentemente da abordagem de [Carrano et al. \(2016\)](#), nenhuma carga pode ficar desconectada do sistema. Além do mais, os tipos de chaves adotados são específicos para o problema de reconfiguração de redes. Portanto, apesar da filosofia ser similar, o esquema implementado é totalmente diferente e pode ser considerado como uma contribuição inédita para a resolução do problema de reconfiguração.

Neste esquema, uma solução é decodificada em manobras sequenciais, seguindo a permutação das chaves. Vale ressaltar que para cada operação de chaveamento, o estado operativo do sistema é alterado e, conseqüentemente, é alterado também o valor das perdas ativas totais do sistema. O fluxograma deste esquema é apresentado na Figura 7:

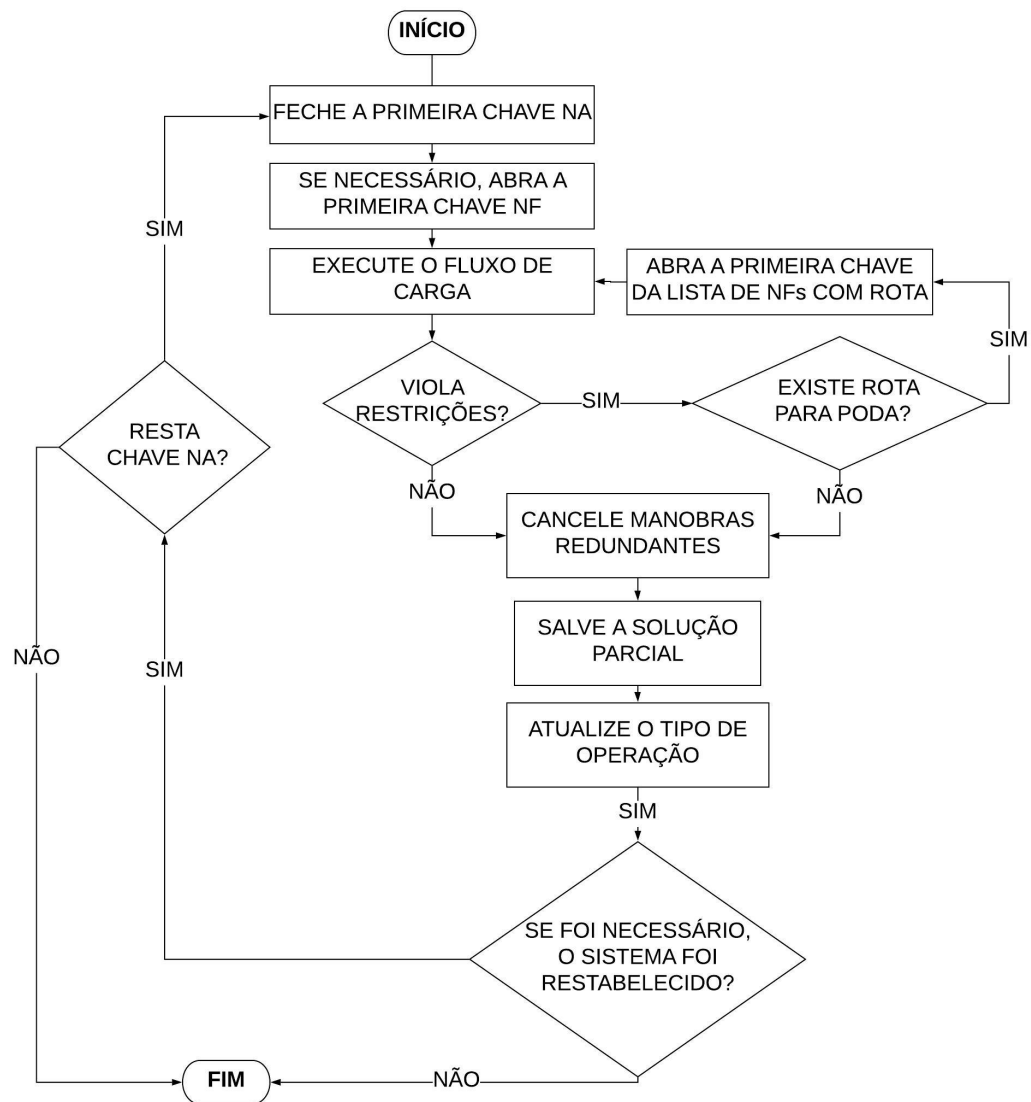


Figura 7 – Fluxograma do esquema de decodificação

Inicialmente, no esquema implementado, a primeira chave manobrável do tipo NA que aparece na solução codificada é fechada ¹. Como a priori a rede de distribuição possui uma topologia radial, esta manobra fará com que uma malha seja formada. Assim, cria-se uma lista com as chaves NF que pertencem a esta malha e a primeira chave desta lista, seguindo a ordem da permutação, é aberta, recuperando a radialidade do sistema. Em seguida, o algoritmo de fluxo de carga é executado. Caso as restrições sejam atendidas, as manobras anteriores são salvas. Caso contrário, se existir rota para transferência de carga, será construída uma lista com todas as chaves NF que podem ser abertas. Desta forma, as chaves desta lista são abertas na ordem em que aparecem na permutação até que as restrições técnicas sejam atendidas. Tal ação visa efetuar corte de cargas a serem restabelecidas nos próximos estágios. É importante destacar que nesta etapa, o algoritmo permite que um ou mais trechos sejam desconectados. Isso se torna interessante pois, algumas

¹ Sob o ponto de vista prático deve-se abrir primeiro e depois fechar.

vezes, não será possível realimentar todos os trechos desconectados de um alimentador fechando somente uma chave NA. Neste caso, estes trechos deverão ser reconectados ao sistema através do fechamento de mais de uma chave, a fim de garantir a factibilidade da solução. No entanto, vale ressaltar que a realimentação dos blocos desconectados nem sempre é possível, pois ainda que haja garantia de haver rota entre a parte ativa do sistema e uma carga potencialmente restaurável, alguma restrição do sistema pode não ser atendida.

Caso o sistema após as manobras de corte de cargas atenda restrições de limite de tensão nas barras e correntes nas linhas, as manobras redundantes são canceladas, o tipo de operação das chaves e os grupos são atualizados. Em seguida, verifica-se qual é a próxima chave NA habilitada na permutação. Se a próxima chave não restaura nenhum bloco de carga, ela é realocada para uma posição à frente na permutação e a chave NA a ser operada no estágio seguinte será a próxima chave NA que realimenta algum trecho desconectado (na ordem em que aparece na permutação). Caso as restrições não sejam atendidas, todas as operações da iteração atual são canceladas e um novo processo será realizado utilizando a próxima chave NA.

Vale ressaltar que se um estágio realiza manobras de corte de cargas, a solução decodificada não constitui uma solução viável para o problema de reconfiguração. No entanto, se em estágios seguintes estes blocos forem eventualmente reconectados, uma sequência viável de manobras será obtida. Se alguma manobra de restabelecimento não originar uma rede factível do ponto de vista de restrições técnicas, nenhuma manobra adicional poderá ser realizada pelo esquema de decodificação. Portanto, este esquema repetirá o processo enquanto existirem chaves NA ou até que um insucesso em uma manobra de restabelecimento seja identificado.

Após a decodificação da permutação em suas subsequências, calcula-se o valor das perdas técnicas para cada configuração conexa. A configuração escolhida é a que possui o menor valor de função objetivo. Nesta abordagem, todas as configurações geradas são topologicamente factíveis (radiais e conexas), dispensando portanto a necessidade de verificação da radialidade, o que incrementaria o custo computacional do método. Assim, quando aparecerem soluções infactíveis, estas serão do tipo operacional, por limite de tensão ou de corrente no sistema. Além do mais, este esquema de decodificação fornece a sequência em que as manobras deverão ser executadas, sendo esta uma informação valiosa para o operador do sistema.

Para melhor entendimento do esquema de decodificação proposto é apresentado na sequência um exemplo. Inicialmente, imaginemos que para o sistema exemplo da Figura 9(a) uma solução aleatória é codificada conforme apresentado na Figura 8. A primeira chave NA que aparece na permutação é habilitada para ser fechada (chave 6) (ver Figura 9(b)). É possível observar que esta manobra, do ponto de vista da reconfiguração, cria um

11	4	9	10	1	14	7	6	5	15	13	3	2	8	12
----	---	---	----	---	----	---	---	---	----	----	---	---	---	----

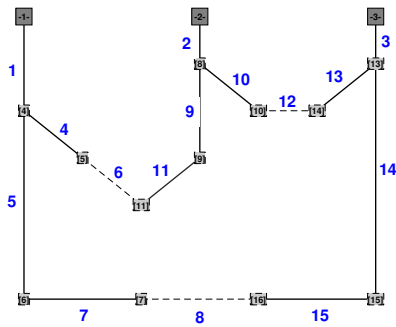
Figura 8 – Exemplo de uma solução codificada como uma permutação aleatória

laço na rede. Assim, o esquema de decodificação abrirá a primeira chave pertencente ao laço formado (chave 11) (ver Figura 9(c)). Depois dessa manobra, o algoritmo de fluxo de carga é executado a fim de verificar a factibilidade da nova topologia. Neste caso, todas as restrições são atendidas e as manobras são salvas. Uma nova iteração inicia-se com a próxima chave NA na ordem em que aparece na permutação aleatória (chave 8) (ver Figura 9(d)). Novamente, tal manobra ocasiona um laço no sistema e a primeira chave deste laço é aberta (chave 1) (ver Figura 9(e)). O algoritmo de carga é executada e verifica-se que as restrições técnicas não são atendidas. O esquema cria a lista com as chaves que possuem rota para transferência de cargas (chaves 3 e 13) (ver Figura 9(f)). O algoritmo abre essas chaves na sequência em que aparecem na solução codificada. No entanto, para este caso, as restrições técnicas não são atendidas, portanto, todas as manobras da iteração corrente são cancelas. A seguir, o algoritmo fecha a próxima (e última) chave NA (chave 12) (ver Figura 9(g)) e abre a primeira chave do alço formado (chave 10) (ver Figura 9(h)).

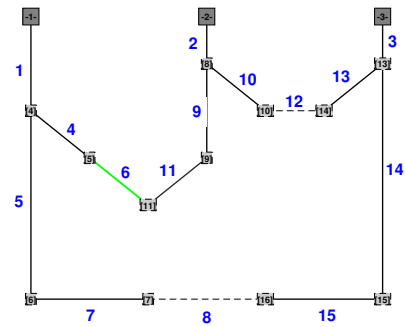
Assim, para este exemplo, uma solução é decodificada conforme a sequência de manobras apresentada na Tabela 1. Vale ressaltar que o esquema sempre escolhe a configuração com menor valor de perdas técnicas (configuração 2).

Tabela 1 – Sequência de manobras para o Sistema de 16 barras

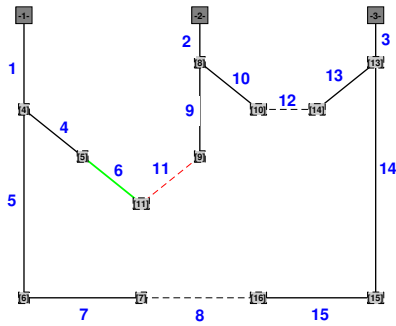
Configuração	Manobra NA	Manobra NF	Perdas Técnicas (kW)
1	Fechar 6	Abrir 11	493,1542
2	Fechar 12	Abrir 10	466,1267



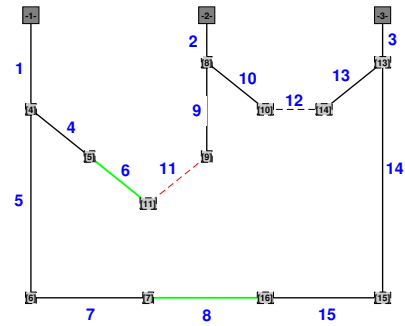
(a) Exemplo para o Sistema de 16 barras



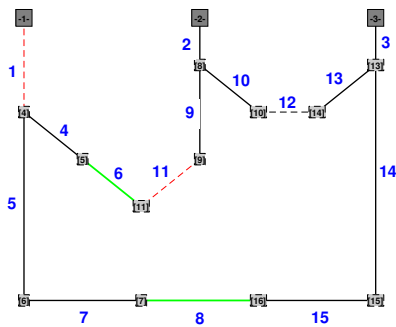
(b) Exemplo: Fechar chave 6



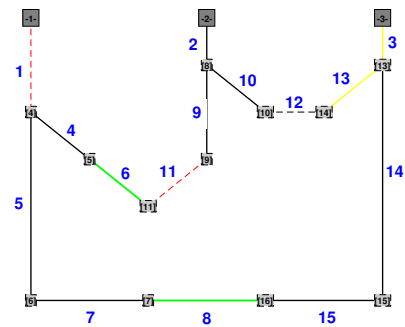
(c) Exemplo: Abrir chave 11



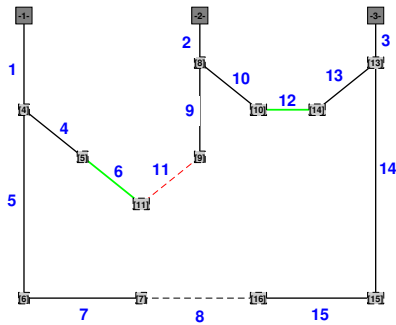
(d) Exemplo: Fechar chave 8



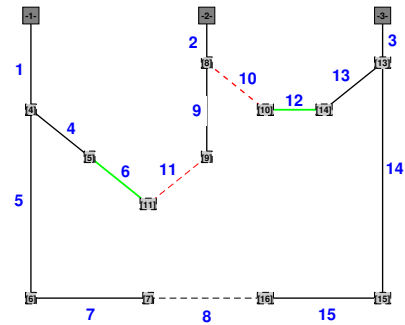
(e) Exemplo: Abrir chave 1



(f) Exemplo: Chaves com rota



(g) Exemplo: Fechar chave 12



(h) Exemplo: Abrir chave 10

Figura 9 – Exemplo de uma solução decodificada para o Sistema de 16 barras

4.9 Algoritmo de Otimização

O algoritmo de otimização proposto para solucionar o problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica é baseado na metaheurística Busca em Vizinhança Variável Generalizada, a qual é de fácil implementação e muito aplicada em problemas complexos. Seu pseudocódigo foi apresentado anteriormente no Algoritmo 3. Como critério de parada foi utilizado o número máximo de avaliações de função.

Na estratégia implementada, a solução inicial é codificada como uma permutação aleatória de N_c chaves, em que N_c corresponde ao número de chaves manobráveis após a etapa de pré-processamento do sistema. Em seguida, esta solução é então decodificada em uma solução factível por meio do esquema de decodificação.

Conforme pode ser observado por meio do pseudocódigo do Algoritmo 4, além da geração da solução inicial, os componentes necessários para implementação dessa metaheurística são: perturbação e busca local. As seções seguintes destinam-se a explicar de maneira detalhada a implementação de cada um desses componentes.

4.9.1 Etapa de Perturbação

O processo de perturbação na solução incumbente é efetuado através da seleção de duas estruturas de vizinhança. Tais estruturas são baseadas no esquema de mutação proposto por (CARRANO et al., 2016), promovendo movimentos clássicos de *swap* sobre sub-permutações da solução original. Essa divisão da solução reduz significativamente o conjunto de possíveis soluções de saída.

Neste trabalho, o movimento clássico de *swap* também é utilizado para determinar as estruturas de vizinhança de uma solução x . Assim, duas sub-permutações são consideradas: chaves NA e chaves NF. Este movimento pode ser definido como a troca de ordem entre duas posições quaisquer de uma solução. A quantidade de vizinhos gerados a partir este tipo de movimento é igual a $n(n - 1)/2$.

Imaginemos um sistema que tenha n chaves NA. Para $n = 5$, por exemplo, as chaves NA podem ser representadas pela sequência $x = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. A vizinhança dessa solução é dada pelo conjunto de soluções $N(x) \in \mathcal{X}$, onde $\mathcal{X}$ é todo o espaço de busca. Cada solução vizinha de x , representada por $x' \in N(x)$, é obtida a partir de um movimento realizado nesta solução. No exemplo da Figura 10, a solução x_1 é obtida fazendo a troca entre os elementos 2 e 5.

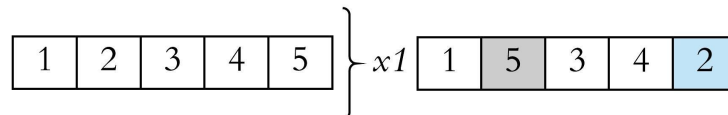


Figura 10 – Exemplo de movimento de *swap*

No esquema de perturbação, o número total de mutações sequenciais realizada é escolhido aleatoriamente entre um e três. A primeira operação de mutação é sempre realizada nas chaves NA, porque este é o grupo que leva a mais mudanças topológicas. Os movimentos são realizados entre duas posições escolhidas aleatoriamente no argumento de entrada. Esse conjunto de operações é executado k vezes, sendo k o número inteiro (arredondado para cima) resultante do produto entre o raio de permutação (definido pelo usuário) e o número de chaves disponíveis para manobra. O fluxograma deste esquema é apresentado na 11.

Algoritmo 4: PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL GENERALIZADA IMPLEMENTADO (GVNS)

Entrada: Um conjunto de estrutura de vizinhança N_k , para $k = 1, \dots, k_{max}$ a serem utilizadas na busca local; um conjunto de estrutura de vizinhança N_l , para $l = 1, \dots, l_{max}$ a serem utilizadas na fase de perturbação; solução inicial x_0 ; escolher critério de parada.

Saída: Uma solução x refinada.

```

1  inicio
2       $x \leftarrow x_0$ ;
3      repita
4           $l \leftarrow 1$ ;
5          repita
6              Perturbação : Selecionar  $x'$  aleatoriamente, tal que  $x' \in N_l(x)$ ;
7              Decodificação : Usar Esquema de Decodificação;
8              Busca Local : Utilizar VND com Esquema de Decodificação;
9               $k \leftarrow 1$ ;
10             repita
11                  $x'' \leftarrow N_k(x')$ 
12                 se  $f(x'') < f(x')$  então
13                      $x' \leftarrow x''$ ;
14                      $k \leftarrow 1$ ;
15                 senão
16                      $k \leftarrow k + 1$ ;
17             fim
18             até  $k = k_{max}$ ;
19             se  $f(x') < f(x)$  então
20                  $x \leftarrow x'$ ;
21                  $l \leftarrow 1$ ;
22             senão
23                  $l \leftarrow l + 1$ ;
24             fim
25         até  $l = l_{max}$ ;
26     até Critério de Parada;
27     retorna  $x$ 
28 fim

```

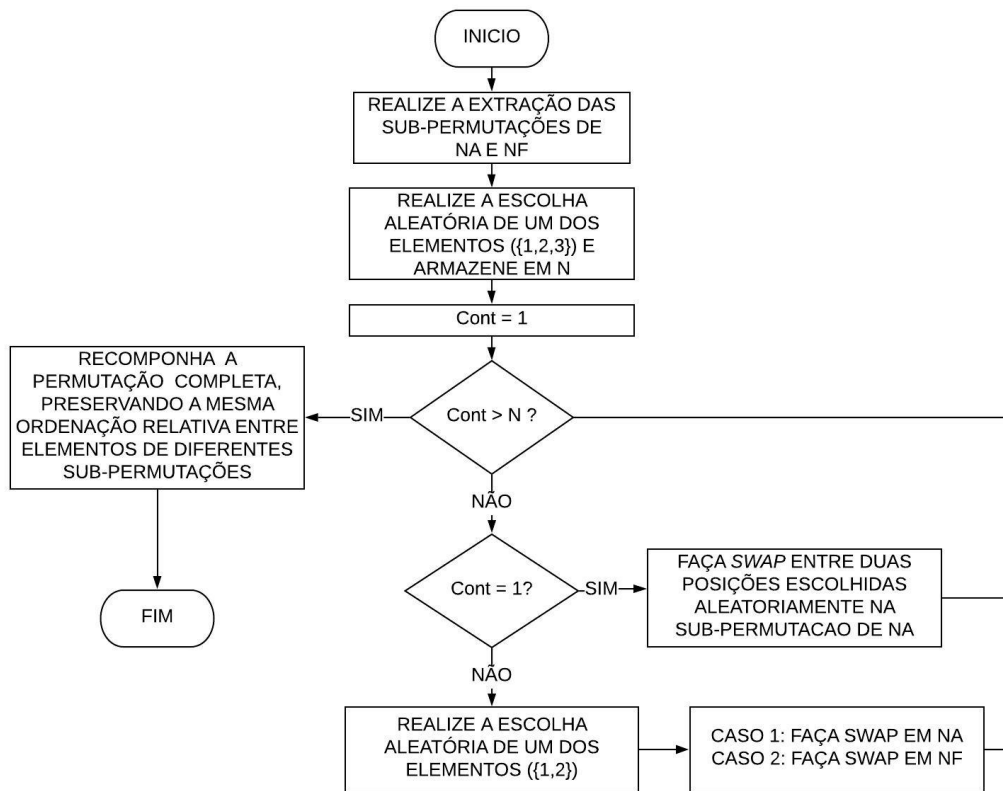


Figura 11 – Fluxograma do esquema de perturbação

O esquema desenvolvido permite realizar modificações na solução incumbente de tal forma a escapar de ótimos locais, permitindo a exploração de outras áreas do espaço de busca. Vale ressaltar que as modificações realizadas não podem ser muito pequenas, pois não permitiriam a exploração de novas soluções, nem muito grandes, pois assim, as buscas locais seriam realizadas a partir de pontos completamente aleatórios. Neste sentido, os parâmetros necessários para implementação deste esquema foram definidos com base em experimentação empírica (tentativa e erro).

4.9.2 Etapa de Busca Local - VND

A busca local no GVNS foi implementada utilizando o VND, apresentado no Algoritmo 2. Este método explora o espaço de soluções por meio de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança, de tal forma que uma nova solução é aceita somente quando for melhor em relação à solução corrente e retorna-se à primeira estrutura quando isto acontece.

A definição de estruturas de vizinhança é um dos tópicos mais relevantes para a implementação da metaheurística GVNS. Sendo que este procedimento é fundamental para a obtenção de uma velocidade de convergência adequada, assim como para minimizar a probabilidade de convergência prematura para um mínimo local. Desta forma, para a implementação da etapa de busca local deste algoritmo, foram definidas duas estruturas de vizinhança: *swap* entre chaves NA e *swap* entre chaves NF. A estratégia *first improvement*

foi utilizada para as duas estruturas de vizinhança, com o objetivo de acelerar o processo de obtenção de mínimos locais.

4.9.3 Mecanismos de Redução de Estruturas de Vizinhança

Um dos principais benefícios de trabalhar com um espaço de permutação x junto com um método de decodificação é que, uma vez que todas as soluções induzidas são factíveis, o algoritmo de otimização pode executar uma pesquisa irrestrita sobre $\mathcal{X}$. Contudo, a desvantagem disto é que, em alguns casos, vetores que são distintos no espaço de permutação podem mapear a mesma sequência de manobras, ou seja, a representação é redundante. Isso ocorre principalmente porque nem todos elementos de x são usados em sua decodificação e também porque a ordem em que os elementos aparecem na permutação é menos importante do que sua posição relativa dentro das partições de chaves NA e NF.

Para evitar problemas de convergência que podem surgir a partir disto, mecanismos de redução de estruturas de vizinhança específicos são propostos para criar soluções vizinhas de maneira mais eficiente, a fim de reduzir a ocorrência de movimentos neutros durante a busca local. Como o tamanho das vizinhanças pode ser muito grande, estes mecanismos tornam a busca local muito mais eficiente. Estes esquemas de redução de vizinhança são apresentados a seguir.

4.9.3.1 Evitar trocas entre chaves não usadas

Em geral, após a decodificação de uma permutação x é possível identificar algumas chaves que nunca seriam consideradas para abertura pelo algoritmo de decodificação, portanto, qualquer troca entre elas levaria a soluções com o mesmo valor de função objetivo. Assim, este esquema sugere evitar trocas entre chaves não usadas pelo algoritmo de decodificação. Tal esquema, proposto por (GOULART et al., 2018), é exemplificado a seguir.

Para entender o esquema de redução utilizado, considere uma permutação x com 10 chaves NF. Imaginemos que apenas as seis primeiras chaves NF foram efetivamente testadas pelo algoritmo de decodificação (incluindo as que originaram uma configuração infactível e aquelas que se tornaram NF durante a decodificação), conforme mostrado na Figura 12. É fácil notar que, uma vez que as últimas quatro chaves nunca foram consideradas na avaliação, qualquer permutação entre elas resultaria na mesma sequência de manobras, desde que as chaves NA permaneçam inalteradas. Um resultado semelhante pode ser esperado se as duas primeiras chaves, que acabaram sendo redundantes, forem trocadas. Portanto, movimentos que envolvem as chaves NF₃ a NF₆, que incluem chaves testadas (que foram efetivamente abertas ou não) e algumas outras no meio, têm maiores chances de não mapearem a mesma sequência de manobras. Neste esquema, propomos ignorar todos os outros elementos e permitir trocas que envolvam apenas chaves efetivamente testadas. Com isto, se em uma permutação x , N_{eff} chaves foram efetivamente

testadas, cada uma delas pode ser trocada com qualquer outra chave NF. Deve-se tomar cuidado para que não sejam realizadas trocas repetidas entre chaves.

NF ₁	NF ₂	NF ₃	NF ₄	NF ₅	NF ₆	NF ₇	NF ₈	NF ₉	NF ₁₀
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------

Figura 12 – Chaves NF de um sistema arbitrário

4.9.3.2 Realizar trocas com chaves ignoradas para abertura

Mesmo impedindo trocas entre chaves não utilizadas, ainda podem surgir muitas soluções que mapeiam a mesma sequência de manobras. Conforme descrito na etapa de decodificação, após o fechamento de uma chave NA, a primeira chave NF que desfaz o laço formado é aberta, sendo todas as demais chaves NF do laço ignoradas pelo esquema de decodificação. O mesmo ocorre com as chaves consideradas para corte de cargas.

Logo, este esquema de redução sugere restringir os movimentos da seguinte forma: cada chave efetivamente testada poderá ser trocada apenas com as chaves do conjunto NF (chaves do laço ou chaves habilitadas para corte de cargas) que foram ignoradas para abertura na respectiva iteração. Para implementação dessa estratégia, é necessário identificar para cada iteração todas as chaves que foram ignoradas pelo algoritmo de decodificação.

4.10 Conclusão

No presente capítulo, foi apresentada a metodologia desenvolvida para a resolução do problema de reconfiguração de redes de distribuição primária com foco na minimização das perdas técnicas. Na etapa de processamento dos dados, o sistema foi classificado em blocos de cargas e chaves. Um esquema de pré-processamento foi implementado a fim de reduzir o espaço de busca do problema. Os componentes desenvolvidos para a implementação da metaheurística Busca em Vizinhança Variável Generalizada foram descritos. Vale ressaltar que um esquema eficiente para codificação/decodificação específico para o problema de reconfiguração foi desenvolvido. Além do mais, técnicas eficientes para redução do tamanho das estruturas de vizinhança foram propostas.

5 Resultados e Discussões

5.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar e discutir os resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta para resolução do problema de RSDEE. Para tanto, dois sistemas de teste amplamente utilizados na literatura especializada, bem como dois sistemas de distribuição reais de uma concessionária brasileira são utilizados nas simulações.

As simulações foram realizadas utilizando MATLAB 2017b em um computador Intel Core i7, 2.7 GHz, 8 GB de RAM com sistema operacional Windows 10 Home Single Language. Os resultados são apresentados considerando dois cenários distintos: (i) reconfiguração considerando demandas de carga fixa e (ii) reconfiguração considerando patamares de carga. Os parâmetros de entrada dos algoritmos foram atribuídos com base em diversas simulações, utilizando a estratégia de experimentação empírica (tentativa e erro), até se obter os valores que proporcionassem o melhor desempenho. Vale ressaltar que os parâmetros utilizados foram os mesmos para todas as instâncias. Assim, para ajustá-los decidiu-se utilizar como base a instância de teste de 84 barras.

O algoritmo de fluxo de carga utilizado é significativamente preciso, o que permitiu validar os valores das perdas obtidas para os sistemas da literatura com resultados alcançados em outros trabalhos.

5.2 Instâncias de Teste

A seguir são apresentadas as características gerais das instâncias utilizadas para validação da metodologia proposta. Os dados do sistema de 16 barras e 84 barras podem ser encontradas em (ZHU, 2002) e (CHIOU; CHANG; SU, 2005), respectivamente. Já os dados de topologia dos sistemas reais não são fornecidos devido a um acordo de confidencialidade.

5.2.1 Sistema de 16 Barras

O sistema de 16 barras possui 3 alimentadores, 13 barras de carga e 16 chaves manobráveis (3 NA e 13 NF). A tensão base é de 23 KV e a potência base é de 100 MVA. As perdas iniciais são iguais a 511,4356 kW. O estado inicial deste sistema pode ser visto na Figura 13.

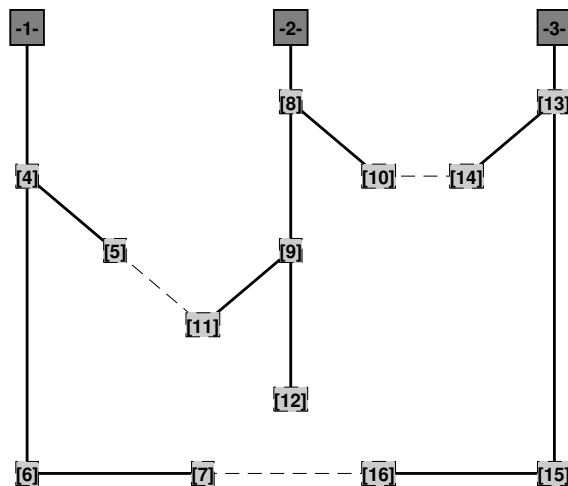


Figura 13 – Sistema de 16 barras

5.2.2 Sistema de 84 Barras

O sistema de 84 barras possui uma subestação, 11 alimentadores, 83 barras de carga e 96 chaves manobráveis (13 NA e 83 NF). A tensão base é de 11,4 kV e a potência base é de 100 MVA. Os valores totais de carga ativa e reativa são de 28.350 kW e 20.700 kVAr, respectivamente. As perdas iniciais para este sistema são iguais a 532 kW. O estado inicial deste sistema pode ser visto na Figura 14.

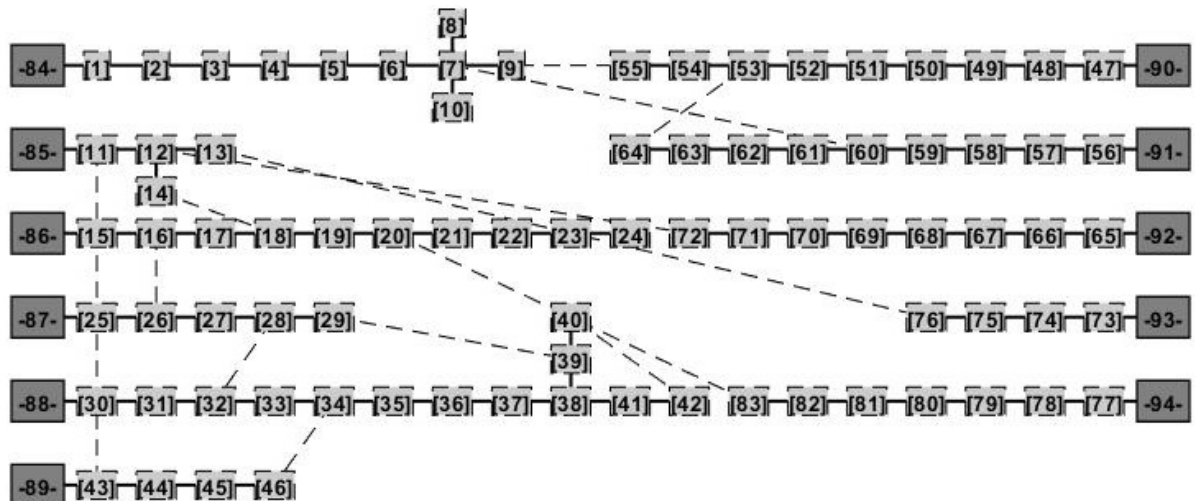


Figura 14 – Sistema de 84 barras

5.2.3 Sistema Real A

O Sistema Real A possui 5 alimentadores, 703 barras e 714 linhas, sendo 132 manobráveis (16 NA e 116 NF). O estado inicial deste sistema, representado por meio da estrutura de blocos

e chaves, pode ser visto na Figura 15. Após a aplicação da etapa de pré-processamento, este sistema passa a ter 65 chaves (16 NA e 49 NF).

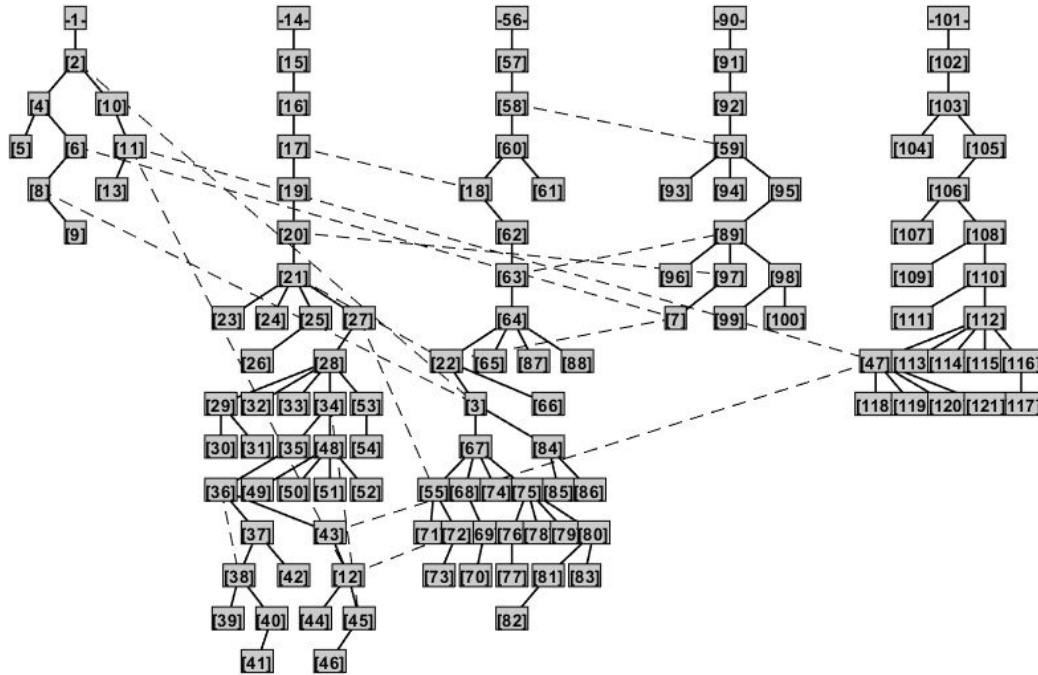


Figura 15 – Sistema Real A

5.2.4 Sistema Real B

O Sistema Real B possui 5 alimentadores, 484 barras e 530 linhas, sendo 168 manobráveis (48 NA e 120 NF). O estado inicial deste sistema, representado por meio da estrutura de blocos e chaves, pode ser visto na Figura 16. Após a aplicação da etapa de pré-processamento, este sistema passa a ter 108 chaves (48 NA e 60 NF).

Esse sistema apresenta um número maior de possibilidades de chaves NAs comparado aos sistemas descritos anteriormente, o que o caracteriza como interessante do ponto de vista de reconfiguração, uma vez que ganhos expressivos podem ser alcançados nos alimentadores com muitas possibilidades de interconexão.

Tabela 3 – Solução ótima para o sistema de 16 Barras: sequência de manobras

Número da Manobra	Manobra	Número da Manobra	Manobra
01	Fechar 10-14	02	Abrir 8-10
03	Fechar 5-11	04	Abrir 9-11

A configuração final obtida pelo algoritmo apresenta uma redução de 8,66 % de perdas em relação à configuração inicial. Vale ressaltar que esta configuração final corresponde a solução ótima global deste sistema. Outros trabalhos, tais como (CIVANLAR et al., 1988), (CHEN; CHO, 1993), (CHANG; KUO, 1994), (SU; CHANG; CHIOU, 2005), (GOMES et al., 2006) e (CHANG, 2008) encontraram a mesma solução.

5.3.2 Sistema de 84 Barras

Esse sistema contém um número de possíveis configurações significativamente superior ao anterior. O critério de parada adotado foi de 100.000 avaliações de função. Este valor foi adotado porque foi capaz de encontrar soluções de boa qualidade em 10 execuções consecutivas do algoritmo. O tempo médio de execução foi igual a 1.522 segundos. Nestas execuções, duas configurações foram encontradas. A Tabela 4 ilustra os resultados obtidos para este sistema.

Tabela 4 – Resultados para o sistema de 84 barras

Configuração	Perdas Ativas Finais (kW)	Chaves Abertas
1	469,8799	7-13-34-39-55-61-83-86-72-89-90-92-95
2	470,1068	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92

É possível observar que ambas configurações são muito próximas. A configuração 1 é igual a melhor configuração encontrada na literatura para o sistema de 84 barras e é alcançada através da sequência de manobras apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Solução ótima para o sistema de 84 barras: sequência de manobras

Número da Manobra	Manobra	Número da Manobra	Manobra
01	Fechar 7-60	02	Abrir 6-7
03	Fechar 34-46	04	Abrir 33-34
05	Fechar 29-39	06	Abrir 38-39
07	Fechar 40-42	08	Abrir 41-42
09	Fechar 12-72	10	Abrir 71-72
11	Fechar 5-55	12	Abrir 54-55
13	Fechar 13-76	14	Abrir 12-13
15	Fechar 53-64	16	Abrir 61-62
17	Fechar 20-83	18	Abrir 82-83

Com respeito às perdas ôhmicas, observa-se que comparado com a configuração inicial, a melhor topologia encontrada apresenta uma redução de perdas de técnicas de 11,68 % de perdas em relação à configuração inicial. Outros trabalhos, tais como (SU; CHANG; CHIOU, 2005), (OLIVEIRA, 2011) e (SOUZA, 2013) encontraram a mesma solução.

5.4 Resultados Considerando Patamares de Carga

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos para os sistemas reais, considerando reconfiguração por patamares de carga.

5.4.1 Avaliação de Demanda: Análise por Patamares de Carga

Em redes de distribuição de energia, as cargas variam ao longo do dia. Essas variações dependem do tipo de carga predominante, que podem ser divididas basicamente em três tipos: residencial, comercial e industrial, ou de acordo com o dia da semana ou a estação do ano. As alterações de carga podem afetar a perda de energia na rede e, consecutivamente, o ponto de operação do sistema.

Desta forma, uma possível abordagem para reduzir perdas é a solução de um problema de reconfiguração de rede para atender a cada uma das variações de carga ao longo do dia. No entanto, mudanças frequentes na configuração podem provocar diminuição da vida útil dos equipamentos de manobra ou causar eventos transitórios, uma vez que ações de chaveamento afetam o comportamento elétrico do sistema.

Assim, uma abordagem interessante para o problema de reconfiguração consiste em considerar explicitamente as variações de carga e restringir a frequência de reconfigurações, assumindo que as topologias de rede permanecerão inalteradas para um determinado período de planejamento.

Nas distribuidoras as cargas são geralmente representadas por curvas de carga típicas, que são divididas em intervalos de tempo. As cargas do sistema (residenciais, comerciais e industriais) têm padrões de variação distintos e portanto, diferentes curvas de carga. Um exemplo de curva de carga diária para um consumidor comercial é mostrado na Figura 17. É possível notar que a demanda sofre grandes variações ao longo do dia.

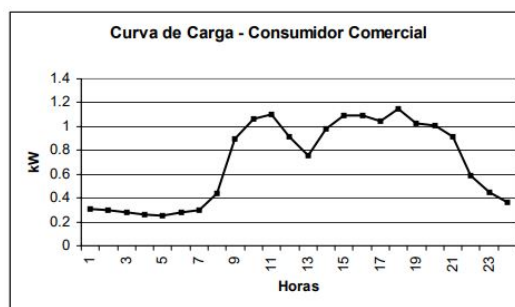


Figura 17 – Exemplo de curva de carga para um consumidor comercial

Visando obter uma boa discretização da curva de carga, mas sem exigir reconfigurações frequentes na rede, propõe-se neste trabalho a utilização de um conjunto de 5 patamares de carga, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Definição de Patamares de Carga

Patamar de Carga	Horário
Madrugada	00:00h às 05:00h
Manhã	06:00h às 12:00h
Tarde	13:00h às 18:00h
Pico	19:00h às 21:00h
Noite	22:00h às 24:00h

No presente trabalho, os patamares são construídos a partir de dados históricos, por meio do uso de curvas típicas de demanda residenciais, comerciais e industriais referentes a dias úteis, que são considerados os dias mais críticos. Cada curva de carga é dividida conforme os 5 períodos da Tabela 6, nos quais se define o máximo valor de demanda de potência ativa observado no período como sendo o valor representativo para todo o período.

Para o Sistema Real A e Sistema Real B o critério de parada adotado foi de 100.000 avaliações de função. Este valor foi adotado porque foi capaz de encontrar soluções similares em cinco execuções independentes, e consecutivas, do algoritmo. O algoritmo de otimização foi executado para o ponto de curva de carga mais crítico de cada patamar de carga (horário com maior carga total dentro do patamar).

5.4.2 Sistema Real A

Os resultados apresentados na Tabela 7 indicam o percentual de redução de perdas obtido para a melhor configuração de cada patamar. Os valores percentuais apresentados são relativos a redução de perdas ativas em relação à configuração inicial (configuração em operação no momento da captura dos dados).

Tabela 7 – Sistema Real A - Redução percentual de perdas ativas por patamar de carga

Patamar de Carga	Configuração	Redução de perdas ativas (%)
Madrugada	1	33,71
Manhã	2	14,19
Tarde	3	14,21
Pico	4	22,56
Noite	5	31,35

A Tabela 8 apresenta as chaves que deverão estar abertas para cada uma das configurações da Tabela 7. É possível observar que as configurações 1 e 5 são iguais. Isso provavelmente ocorreu por não haver mudanças tão significativas entre os patamares da noite e da madrugada. Apesar das cargas residenciais terem variação entre noite e madrugada, essas cargas

são pequenas quando comparadas às comerciais e industriais, muito similares durante esses dois patamares.

Tabela 8 – Sistema Real A - Chaves NA por patamar de carga

Configuração	Chaves Abertas
1	19-24-42-80-106-167-173-187- 226-294-302-435-498-552-564-714
2	19-24-42-60-80-106-176-187- 226-232-302-394-498-552-564-714
3	19-24-42-60-80-106-173-187-] 226-294-302-435-498-552-564-714
4	19-24-42-80-106-176-187-226- 232-294-302-435-498-552-564-714
5	19-24-42-80-106-167-173-187- 226-294-302-435-498-552-564-714

Para verificar a qualidade das configurações obtidas, cada uma delas foi avaliada nos outros quatro patamares, ou seja, verificou-se quais seriam as perdas ativas para cada patamar caso a mesma configuração fosse utilizada durante todo o dia. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos considerando a redução percentual de perdas em relação à configuração inicial.

É possível observar através dos resultados apresentados na Tabela 9 que manter uma única configuração durante todo o dia faz com que o desempenho máximo deste sistema (em termos de perdas ativas) não seja alcançado. Note, por exemplo, que se a Configuração 2 fosse escolhida para ser utilizada durante todo o dia, obteríamos a melhor redução de perdas no período da manhã. No entanto, o mesmo não aconteceria para os demais períodos. Vale ressaltar que nenhuma das configurações avaliadas violam os limites de tensão e corrente.

Tabela 9 – Sistema Real A - Avaliação da redução percentual de perdas de cada configuração para cada patamar

Configuração	Madrugada	Manhã	Tarde	Pico	Noite
1	33,71	9,04	10,21	22,34	31,35
2	15,32	14,19	13,5	12,91	12,11
3	27,51	13,81	14,21	20,54	24,68
4	32,08	11,81	12,71	22,56	29,5
5	33,71	9,04	10,21	22,34	31,35

5.4.3 Sistema Real B

Os resultados apresentados na Tabela 10 indicam o percentual de redução de perdas obtido para a melhor configuração de cada patamar. Os valores percentuais apresentados são relativos a redução de perdas ativas em relação às perdas da configuração inicial (configuração em operação no momento da captura dos dados).

Tabela 10 – Sistema Real B - Redução percentual de perdas ativas por patamar de carga

Patamar de Carga	Configuração	Redução de perdas ativas (%)
Madrugada	1	43,28
Manhã	2	42,96
Tarde	3	42,36
Pico	4	42,88
Noite	5	43,05

Para verificar a qualidade das configurações obtidas, cada uma delas foi avaliada nos outros quatro patamares, ou seja, verificou-se quais seriam as perdas ativas para cada patamar caso a mesma configuração fosse utilizada durante todo o dia. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos considerando a redução percentual de perdas em relação à configuração inicial.

Tabela 11 – Sistema Real B - Avaliação da redução percentual de perdas de cada configuração para cada patamar

Configuração	Madrugada	Manhã	Tarde	Pico	Noite
1	43,28	41,71	41,84	42,29	42,65
2	43,46	42,96	42,97	43,08	42,54
3	42,78	42,34	42,36	42,52	42,05
4	43,35	42,24	42,36	42,88	42,76
5	43,71	41,91	42,09	42,96	43,05

É possível observar através dos resultados apresentados na Tabela 11 que, para este sistema, manter uma única configuração durante todo o dia não altera de forma significativa o seu desempenho (em termos de redução de perdas ativas). No entanto, pode-se observar neste caso que os resultados são mais expressivos, isso provavelmente se justifica pelo fato de existirem mais chaves de interconexão disponíveis para manobra.

6 Considerações Finais

Nesta dissertação, apresentou uma nova metodologia baseada no esquema geral da metaheurística Busca em Vizinhança Variável Generalizada para reconfiguração dinâmica de redes de distribuição de energia considerando diferentes patamares de carga. A abordagem proposta é baseada na metaheurística Busca em Vizinhança Variável Generalizada, tendo como objetivo a minimização das perdas técnicas do sistema. Considerando o contexto de Redes Inteligentes, assumiu-se que todas as chaves manobráveis do sistema são telecomandadas.

O esquema de decodificação, elaborado especificamente para o problema de reconfiguração de SDEE pode ser considerado como uma contribuição inédita. Este esquema gera apenas soluções topologicamente factíveis, o que possibilitou contornar a inconveniente geração de soluções não radiais durante o processo de otimização, de tal forma que a radialidade e a conectividade das soluções candidatas são mantidas durante todas as etapas da otimização. Além do mais, ele também fornece a ordem em que as manobras devem ser executadas, sendo esta uma informação valiosa para o operador do sistema. Portanto, toda solução entregue pelo algoritmo de otimização atende às restrições do problema de reconfiguração: radialidade, suprimento das cargas, limites operacionais, técnicos e regulatórios.

As estruturas de vizinhança, bem como os esquemas de redução proposto demonstraram-se eficientes para otimização do problema de reconfiguração. O espaço de busca reduzido, garante a entrega de soluções com excelente tempo computacional, tendo em vista o contexto de planejamento da operação a curto prazo. Neste contexto, pode-se afirmar que a metodologia proposta apresenta grande potencial de aplicação em instâncias de maior porte. Como limitação deste trabalho, ressalta-se a possível necessidade de ajuste de parâmetros na etapa de perturbação.

Para validação da metodologia desenvolvida, simulações computacionais foram realizadas utilizando dois sistemas de teste amplamente utilizados pela literatura especializada (16 barras e 84 barras) e dois sistemas de distribuição reais (703 barras e 484 barras). As topologias obtidas para as redes de 16 e 84 barras, em termos de perdas técnicas, correspondem aos melhores valores obtidos para estes sistemas. Para os sistemas de distribuição reais, por meio das simulações realizadas é possível inferir que ao considerar diferentes patamares a topologia do sistema pode ser alterada com possibilidade de redução das perdas técnicas totais do sistema. Em situações reais, as soluções apresentadas em cada patamar de carga poderiam ser combinadas, de forma a reduzir as perdas diárias de energia na rede. Além do mais, a utilização de patamares de carga limita o número de chaveamentos ao longo de um dia, o que fica mais próximo de um cenário real de uma rede auto-reconfigurável. Desta forma, esta metodologia poderia ser aplicada à reconfiguração automática. Assim, com uma implantação cada vez maior de automação e sistemas de comunicação em redes inteligentes, a reconfiguração de redes de distribuição está se tornando uma solução viável para melhorar a operação de redes de energia.

Neste sentido, por meio dos resultados obtidos, é possível verificar a viabilidade do uso

da reconfiguração para minimização das perdas técnicas totais em sistemas de distribuição, bem como a eficiência e robustez da metodologia proposta, uma vez que soluções de boa qualidade foram encontradas para todas as instâncias de teste utilizadas.

7 Trabalhos Futuros

Seguindo a linha de pesquisa desenvolvida nesta dissertação e tendo em vista os resultados obtidos, alguns tópicos tornam-se promissores como propostas de trabalhos futuros, a saber:

- Estudar e implementar conceitos relacionados à computação paralela, bem como conceitos de parâmetros auto-adaptativos, a fim de melhorar a eficiência computacional do método proposto;
- Analisar como a qualidade das soluções são afetadas mediante a inserção de recursos energéticos distribuídos (REDs) no sistema;
- Desenvolver uma metodologia para considerar simultaneamente a reconfiguração e alocação ótima de capacitores e reguladores de tensão;
- Realizar a inclusão de incertezas na modelagem de carga para analisar o impacto destas na reconfiguração do sistema.

Referências

- ABUR, A. Determining the optimal radial network topology within the line flow constraints. In: IEEE. *1996 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Circuits and Systems Connecting the World. ISCAS 96*. [S.l.], 1996. v. 1, p. 673–676.
- AMELI, A. et al. A dynamic method for feeder reconfiguration and capacitor switching in smart distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 85, p. 200–211, 2017.
- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 3, n. 5, p. 34–41, 2005.
- ANEEL. Atlas de energia elétrica no Brasil. *ANEEL*, 2008.
- ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST - Módulo 7– Cálculo de perdas na distribuição. *ANEEL*, 2018.
- BARAN, M.; WU, F. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989.
- BARBOSA, C. H. N. de R. *Reconfiguração e Restauração Ótima de Sistemas de Distribuição Primária de Energia Elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- CARRANO, E. G. et al. Subpermutation-based evolutionary multiobjective algorithm for load restoration in power distribution networks. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, IEEE, v. 20, n. 4, p. 546–562, 2016.
- CARVALHO, R. *Heurísticas paralelas aplicadas a problemas de alocação de concentradores*. 168 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- CHANG, C.-F. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 23, n. 4, p. 1747–1755, 2008.
- CHANG, H.-C.; KUO, C.-C. Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 227–238, 1994.
- CHEN, S.; CHO, M. Y. Energy loss reduction by critical switches. *IEEE Transaction on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 3, p. 1246–1253, 1993.
- CHIOU, J.-P.; CHANG, C.-F.; SU, C.-T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 20, n. 2, p. 668–674, 2005.
- CIVANLAR, S. et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988.
- CYME, I. *CYME International*. s.d. Disponível em: <http://www.cyme.com/>.
- DUAN, D.-L. et al. Reconfiguration of distribution network for loss reduction and reliability improvement based on an enhanced genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 64, p. 88–95, 2015.

- ENERGIA, M. de Minas e. *Avaliação das Perdas no Sistema Elétrico Brasileiro*. Brasília, 2017. 80 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: 14 fev. de 2019.
- EPRI. *Simulation Tool - OpenDSS*. s.d. Disponível em: <http://www.cyme.com/>. Acesso em: 6 jun. de 2019.
- FUCHS, R. D. Transmissão de energia elétrica - linhas aéreas. 1997.
- GLAMOCANIN, V. Optimal loss reduction of distributed networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 774–782, 1990.
- GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Comput. Ops. Res.*, v. 13, n. 5, p. 533–549, 1986.
- GOMES, F. V. et al. A new distribution system reconfiguration approach using optimal power flow technique and sensitivity analysis for loss reduction. *IEEE Transaction on Power System*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1616–1623, 2006.
- GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 7, n. 3, p. 1484–1491, 1992.
- GOULART, F. et al. Permutation-based optimization for the load restoration problem with improved time estimation of maneuvers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 101, p. 339–355, 2018.
- HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search: Principles and applications. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 130, n. 3, p. 449–467, 2001.
- HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search. In: *Handbook of metaheuristics*. [S.l.]: Springer, 2003. p. 145–184.
- HEFFNER, G. Smart grid-smart customer policy needs. In: *Workshop Report for the IEA Energy Efficiency Working Party, April, Paris*. [S.l.: s.n.], 2011.
- KIM, H.; KO, Y.; JUNG, K.-H. Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 3, p. 1356–1366, 1993.
- LAVORATO, M. et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 27, n. 1, p. 172–180, 2012.
- LISBOA, A. C. et al. A fast power flow method for radial networks with linear storage and no matrix inversions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 63, p. 901–907, 2014.
- LIU, L.; CHEN, X. Distribution network reconfiguration based on niche binary particle swarm optimization algorithm. *Elsevier*, Elsevier, v. 17, p. 178–182, 2012.
- LÓPEZ, E. et al. Online reconfiguration considering variability demand: applications to real networks. *IEEE Transactions on Power System*, IEEE, v. 19, n. 1, p. 549–553, 2004.
- MCDERMOTT, T. E.; DREZGA, I.; BROADWATER, R. P. A heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 14, n. 2, p. 478–483, 1999.

- MENDOZA, J. et al. Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: real application. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 21, n. 2, p. 948–954, 2006.
- MERLIN; BACK. Search for minimum-loss operational spanning tree configuration for urban power distribution system. *Proceedings of the 5^a Power System Computation Conference*, PSCC, Cambridge - UK, v. 28, p. 1–18, 1975.
- MLADENović, N. et al. General variable neighborhood search for the continuous optimization. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 191, n. 3, p. 753–770, 2008.
- MLADENović, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, Elsevier, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997.
- NARA, K. et al. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration. *IEEE Transactions on Power systems*, IEEE, v. 7, n. 3, p. 1044–1051, 1992.
- OLIVEIRA, M. B. C. *Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a metaheurística GRASP*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2011.
- PEREIRA, E. C. *Reconfiguração de Redes de Energia Elétrica para Minimização de Perdas Técnicas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- SALAZAR, H.; GALLEGO, R.; ROMERO, R. Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 1735–1742, 2006.
- SARFI, R.; SALAMA, M.; CHIKHANI, A. A survey of the in distribution system reconfiguration for system loss reduction. *Electric Power System Research*, Elsevier, p. 61–70, 1994.
- SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution network for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 4, p. 1492–1498, 1989.
- SIEMENS. *PSSSincal*. s.d. Disponível em: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/services/transmission-distribution-smart-grid/consulting-and-planning/pss-software/pss-sincal.html>.
- SOUZA, S. S. et al. Artificial immune algorithm applied to distribution system reconfiguration with variable demand. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 82, p. 561–568, 2016.
- SOUZA, S. S. F. d. *Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2013.
- SU, C.-T.; CHANG, C.-F.; CHIOU, J.-P. Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 75, n. 2-3, p. 190–199, 2005.
- SU, C.-T.; LEE, C.-S. Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 1022–1027, 2003.

TIMOSSI, M. S. *Reconfiguração de redes de distribuição de energia considerando variáveis multiatributo no desenvolvimento de novas topologias*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

ZHU, J. Z. Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 62, n. 1, p. 37–42, 2002.

ZVIETCOVICH, W. G. *Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2016.