

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**OTIMIZAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA UTILIZANDO
ALGORITMO PRIM E GENÉTICO**

Wilson Garcia Pereira Junior

FOZ DO IGUAÇU

2024

Wilson Garcia Pereira Junior

Otimização do fluxo de potência utilizando Algoritmo Prim e Genético

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Professor Dr. Ricardo Luiz Barros de Freitas

Co-orientador: Professor Dr. Edgar Manuel Carreno Franco

Foz do Iguaçu - Paraná

2024

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Garcia Pereira Junior, Wilson
Otimização do fluxo de potência com Algoritmo PRIM e Genético / Wilson Garcia Pereira Junior; orientador Ricardo Luiz Barros de Freitas; coorientador Edgar Manuel Carreno Franco. -- Foz do Iguaçu, 2024.
57 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico - Campus de Foz do Iguaçu) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, 2024.

1. Reconfiguração de Sistemas de Distribuição. 2. Otimização Combinatória. 3. Metaheurística. I. Luiz Barros de Freitas, Ricardo, orient. II. Manuel Carreno Franco, Edgar, coorient. III. Título.

Título da Dissertação: OTIMIZAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA UTILIZANDO ALGORITMO PRIM E GENÉTICO

Wilson Garcia Pereira Junior

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora assim constituída:

Prof. Dr. Ricardo Luiz Barros de Freitas - (Orientador)

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

Prof. Dr. Carlos Roberto Mendonça da Rocha

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

Prof. Dr. Renato Bobsin Machado

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

Prof. Dr. Helton Scherer

Centro Universitário Descomplica – UDC

Data da defesa: 24 de maio de 2024

RESUMO

A crescente demanda por energia elétrica e a necessidade de melhorar a eficiência dos sistemas de distribuição têm impulsionado pesquisas inovadoras, especialmente em países como o Brasil, que enfrentam desafios energéticos significativos. Uma abordagem para a Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica no contexto energético brasileiro, está sendo utilizada combinando diferentes técnicas como o Algoritmo PRIM, Multistart e Algoritmo Genético. O Brasil é um país com uma extensa rede de distribuição de energia elétrica, abrangendo áreas urbanas, bem como regiões rurais. Essa diversidade geográfica e demográfica apresenta desafios únicos para o fornecimento confiável e eficiente de energia elétrica em todo o país. A combinação de técnicas permite explorar um espaço de busca mais amplo e diversificado para encontrar resultados satisfatórios. Os resultados preliminares desta pesquisa indicam que essa combinação pode levar a melhorias significativas nos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil. Os resultados foram obtidos utilizando sistemas de 14, 33, 84, 136 e 415 barras.

Palavras-chave: Reconfiguração de sistemas de distribuição, Algoritmo PRIM, Algoritmo Genético, Multistart.

ABSTRACT

The growing demand for electrical energy and the need to improve the efficiency of distribution systems have driven innovative research, especially in countries like Brazil, which face significant energy challenges. An approach for the Reconfiguration of Electricity Distribution Systems in the Brazilian energy context is being used by combining different techniques such as the PRIM Algorithm, Multistart and Genetic Algorithm. Brazil is a country with an extensive electrical energy distribution network, covering urban areas as well as rural regions. This geographic and demographic diversity presents unique challenges to reliable and efficient electrical power across the country. Combining techniques allows you to explore a wider and more diverse search space to find overwhelming results. The preliminary results of this research indicate that this combination can lead to significant improvements in electrical energy distribution systems in Brazil. The results were obtained using 14, 33, 84, 136, and 415 bus systems.

Keywords: Reconfiguration of distribution systems, Prim's Algorithm, Genetic Algorithm, Multi-Start.

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE ABREVIACÕES.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
1 Introdução.....	11
1.1 Objetivos	12
1.2 Justificativa	12
1.3 Revisão Bibliográfica	13
1.3.1 Primeiras Abordagens e Otimização Clássica	13
1.3.2 Métodos Heurísticos e Metaheurísticas	14
1.3.3 Modelagem Híbridas.....	14
1.4 Estrutura da Dissertação	15
2 Sistema Elétrico de Potência	16
2.1 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	17
2.2 Formulação do Problema de RSDEE	19
2.3 Modelo Matemático.....	20
2.4 Algoritmo de PRIM.....	23
2.5 Renumeração das Barras e Ramos	24
2.6 Cálculo do Fluxo de Potência	26
2.7 Multistart	27
2.8 Algoritmo Genético	28
3 Metodologia	30
3.1 Criação de Estruturas.....	31
3.1.1 Estrutura “Teia”	32
3.2 Execução do Algoritmo PRIM	33
3.3 Cálculo do Fluxo de Potência	34
3.3.1 Implementação da Renumeração.....	34
3.3.2 Implementação do Cálculo do Fluxo	35
3.4 Implementação do Método Multistart.....	36
3.4.1 Atribuição aleatória de novos pesos.....	37

3.5 Conjunto Soluções de Qualidade	37
3.6 Implementação do Algoritmo Genético	39
4 Resultados e discussões	41
4.1 Sistema de 14 Barras.....	41
4.2 Sistema de 33 Barras.....	43
4.3 Sistema de 84 Barras.....	44
4.4 Sistema de 136 Barras.....	46
4.5 Sistema de 415 Barras.....	48
4.6 Discussões Finais	52
5 Conclusões.....	53
Referência Bibliográficas.....	54
ANEXO A.....	58

LISTA DE ABREVIACÕES

AG – Algoritmo Genético

AP - Algoritmo de PRIM

AS – Simulated Annealing

CMS – Conjunto de Melhores Soluções

CSQ – Conjunto de Soluções de Qualidade

FBS – Método Forward-Backward Sweep

FO – Função Objetivo

MMD – Método da Maior-Menor Distância

MS –Multistart

RB – Renumerar Barras

RR – Renumerar Ramos

RSDEE – Reconfiguração de Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SDEE – Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

TS – Busca Tabu

VNS – Busca em Vizinhança Variável

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração do Sistema de Distribuição

Figura 2.2 – Ilustração do Sistema Elétrico

Figura 2.3 – Ilustração do Algoritmo de PRIM

Figura 2.4 – Camadas para Renumeração – Adaptação do Sistema 14 Barras

Figura 3.1 – Fluxograma da Metodologia

Figura 3.2 – Estrutura “Teia”

Figura 3.3 – Método da Maior-Menor Distância

Figura 3.4 – Algoritmo Genético

Figura 4.1 – Sistema de 14 Barras

Figura 4.2 – Perfil de Tensão – 14 Barras

Figura 4.3 – Sistema de 33 Barras

Figura 4.4 – Perfil de Tensão – 33 Barras

Figura 4.5 – Sistema de 84 Barras

Figura 4.6 – Perfil de Tensão – 84 Barras

Figura 4.7 – Sistema de 136 Barras

Figura 4.8 – Perfil de Tensão – 136 Barras

Figura 4.9 – Sistema de 415 Barras

Figura 4.10 – Perfil de Tensão – 415 Barras

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, o Brasil tem testemunhado um crescimento constante e desafiador em suas demandas por energia elétrica. O contínuo avanço industrial, o desenvolvimento de infraestrutura e a crescente penetração de tecnologias dependentes de energia elétrica, têm gerado um aumento substancial na utilização desse recurso em todo o país. Esse cenário de expansão econômica e social, embora positivo, também traz consigo uma série de desafios intrincados, especialmente no que diz respeito à eficiência da distribuição de energia elétrica (Barbulescu et. al., 2021).

A modernização dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) emerge como uma resposta fundamental para enfrentar esses desafios de maneira eficaz e sustentável. A natureza dinâmica e interconectada da sociedade contemporânea exige sistemas elétricos igualmente flexíveis e adaptáveis. Como resultado, a reestruturação estratégica das redes elétricas é imperativa, a fim de acomodar a crescente demanda, garantir a estabilidade operacional e minimizar as perdas de energia durante a distribuição (Silveira et. al, 2021).

Uma maneira de superar as adversidades seria uma Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE). A ideia principal é a de procurar novas configurações no sistema de distribuição dentro do sistema elétrico de potência de modo a melhorar a alocação de energia para os consumidores, sem necessidade de grandes investimentos.

Um dos principais objetivos da RSDEE é a minimização das perdas de energia ativa, um problema que tem sido uma preocupação central para as operadoras de sistemas elétricos. Segundo Mahdavi et. al. (2021), as perdas de potência podem chegar à 15% do total do sistema elétrico. O Relatório de Perdas da ANEEL (2023), aponta que as perdas totais de potência chegaram à 14,9% do total do sistema em 2020, 14% em 2021 e 13,6% em 2022.

Os SDEE, tipicamente projetados em forma de malha (sistema malhado), na prática, operam em uma topologia radial. Essa abordagem visa simplificar a proteção do sistema e minimizar a necessidade de dispositivos de segurança complexos (TATIPALLY et. al. 2022). No entanto, essa simplicidade operacional não diminui a complexidade inerente ao problema de RSDEE.

A complexidade do problema da RSDEE é agravada pelo número de chaves de interconexão presentes no sistema. Uma abordagem de Enumeração Exaustiva, também conhecido como “força bruta”, consideraria até 2^n configurações topológicas possíveis para um

sistema com n chaves (Sakae et. al., 2020). Assim, achar uma solução ideal pode ser impossível caso tenha que observar todas as configurações, afim de achar a solução ótima.

Uma grande quantidade dessas configurações resulta em desconexões e ilhamentos indesejados, ou violam as restrições operacionais fundamentais. Diante desses desafios, a literatura científica tem explorado uma variedade de abordagens para resolver o problema complexo da RSDEE, como métodos tradicionais, heurísticas e metaheurísticas.

Este trabalho tem como objetivo encontrar boas soluções para o problema da RSDEE, avaliando sua eficácia e eficiência, através de um algoritmo utilizando técnicas combinadas, procurando achar a melhor solução possível com os exemplos da literatura, com baixo esforço computacional.

1.1 Objetivos

Elaboração de um algoritmo destinado a encontrar uma configuração radial para a RSDEE, visando minimizar as perdas de potência dos SDEE.

Os objetivos específicos que nortearão esse trabalho são:

- Desenvolver um sistema de cálculo da Função Objetivo (FO), capaz de avaliar as soluções propostas enquanto verifica as restrições do sistema;
- Desenvolver um algoritmo que encontre uma configuração radial do sistema e proporcione soluções de boa qualidade para RSDEE;
- Alcançar um baixo esforço computacional, permitindo a otimização das topologias radiais de maneira ágil e com recursos computacionais acessíveis ao público em geral;
- Contribuir para estudos e pesquisas futuras nesta área, fornecendo documentação detalhada de toda metodologia utilizada e resultados alcançados.

1.2 Justificativa

Segundo dados recentes divulgados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023) o Brasil registrou um aumento de 22% na demanda por energia elétrica no primeiro semestre de 2023, quando comparado ao mesmo período do ano anterior. Esse crescimento substancial na demanda destaca a importância de desenvolver estratégias eficientes para otimizar o sistema de distribuição e enfrentar os desafios associados a essa crescente demanda por energia elétrica.

A otimização do sistema de distribuição de energia elétrica torna-se, portanto, uma necessidade preocupante. Nesse contexto de aumento das demandas, é fundamental explorar

abordagens inovadoras e abrangentes para o problema da RSDEE. Ao enfrentar esse desafio, busca-se melhorar a confiabilidade do fornecimento elétrico, bem como reduzir as perdas de energia, minimizar interrupções e aprimorar a qualidade do serviço.

A importância de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) funcionando corretamente é chave para o desenvolvimento socioeconômico. A energia elétrica é essencial para a operação de praticamente todos os setores, desde a indústria até o cotidiano das pessoas. Uma infraestrutura elétrica robusta e confiável contribui para o crescimento econômico, melhoria da qualidade de vida e sustentabilidade ambiental.

Contribuir para o avanço do conhecimento científico nesse domínio é essencial para preencher as lacunas de pesquisa existentes, desenvolver abordagens mais eficazes e estabelecer uma base teórica sólida que oriente estudos e soluções futuras.

1.3 Revisão Bibliográfica

A problemática estudada no presente trabalho, tem sido abordada na literatura acadêmica por meio de uma diversidade de métodos, visando alcançar soluções eficientes para esse desafio complexo.

Dentre as abordagens exploradas, destacam-se métodos clássicos de otimização combinatória, heurísticas, metaheurísticas e, mais recentemente, métodos híbridos que combinam diferentes estratégias de otimização. A seguir, resume-se as principais contribuições encontradas na literatura para a resolução desse tipo de problema.

1.3.1 Primeiras Abordagens e Otimização Clássica

- Knight (1960) foi pioneiro na literatura ao apresentar um modelo de otimização baseado em programação inteira, visando minimizar os custos de expansão da rede;
- Wall et al. (1979) empregaram modelagem matemática para reconfiguração de alimentadores primários, considerando cargas não uniformes e segmentos de alimentadores com capacidades variáveis;
- Kaplan e Braunstein (1981) exploraram soluções diante da implementação de novas subestações, abordando esquemas de ligação e posicionamento da subestação.

1.3.2 Métodos Heurísticos e Metaheurísticas

- Civanlar et al. (1988) introduziram um método heurístico para reconfiguração de alimentadores, abordando alterações topológicas e estados das chaves para reduzir perdas de energia. Também foi um dos primeiros trabalhos a apresentar o Sistema de 14 Barras;
- A proposta de Baran e Wu (1989) para a RSDEE leva em conta tanto redução das perdas quanto o balanceamento de cargas. O trabalho apresenta dois métodos aproximados para o cálculo do FC, sendo um dos primeiros trabalhos a apresentar o Sistema de 33 Barras;
- Nara (1992) marcaram o uso pioneiro de Algoritmos Genéticos (AG) na RSDEE, focando na reconfiguração para minimização de perdas;
- Zeng et al. (2002) desenvolveram um método iterativo, combinando reconfiguração de alimentador e alocação de capacitores, visando a redução de perdas de energia;
- Míguez et. al. (2002) aprimoraram a técnica heurística Branch Exchange, incorporando melhorias na reestruturação de redes de energia de média tensão;
- Mantovani et. al. (2005) propõem um algoritmo evolutivo para o problema de RSDEE com demanda variável e topologia de operação única. São apresentados vários testes considerando modificações nos parâmetros do algoritmo. Foi um dos primeiros trabalhos a apresentar o sistema de 136 barras;
- Guimarães (2009) aplicou AG e Simulated Annealing (SA) para a reconfiguração e alocação de bancos de capacitores, focando na redução de perdas;
- Possagnolo (2015) desenvolveu uma metaheurística de Busca em Vizinhança Variável (VNS) para otimizar perdas, operando em vários níveis de demanda.

1.3.3 Modelagem Híbridas

- Cossi (2008) propôs um modelo de planejamento integrado para redes de distribuição, envolvendo média e baixa tensão, com enfoque em metaheurísticas mono e multiobjetivos;
- Montsutsumi et. al. (2019) utilizou uma abordagem multipartida para a reconfiguração de RSDEE, visando a topologia radial de menor custo;
- Alves (2019) empregou métodos híbridos, Busca Tabu (TS) integrada à RSDEE para a obtenção da topologia radial ótima;
- Ferreira (2022) introduziu metaheurísticas como AG e SA, combinando-as com decodificadores e métodos híbridos para resolver o problema de RSDEE de forma eficiente.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é organizada em cinco capítulos, que juntos compõem uma análise abrangente e progressiva sobre o tema e as estratégias de otimização empregadas para a sua resolução.

Neste primeiro capítulo, é traçado o contexto geral da pesquisa, destacando-se o objetivo, a justificativa e a revisão bibliográfica. São abordados desde os trabalhos pioneiros que exploraram as técnicas de otimização clássica até as abordagens modernas que incorporam métodos heurísticos, metaheurísticas e híbridas na solução do problema de RSDEE.

O segundo capítulo fornece uma visão sobre o Sistema Elétrico de Potência (SEP), com foco no Sistema de Distribuição e sua formulação no contexto do problema da RSDEE. O modelo matemático é detalhadamente apresentado, incluindo a aplicação do Algoritmo PRIM (AP) para gerar uma solução inicial. Além disso, o método MS, aliada aos AG, é descrita em profundidade como uma abordagem central para resolver o problema de otimização.

O terceiro capítulo concentra-se na exposição da metodologia utilizada no presente trabalho, destacando sua relevância e aplicação em problemas de otimização em SDEE. São abordados conceitos teóricos e práticos que sustentam a eficácia dessa abordagem multifacetada, bem como passos da implementação do algoritmo desenvolvido.

O quarto capítulo é dedicado à apresentação, análise e discussões dos resultados obtidos por meio da aplicação das estratégias propostas. São explorados sistemas de diferentes escalas, com 14, 33, 84, 136 e 415 barras. As melhorias alcançadas por meio da metodologia são minuciosamente expostas e discutidas, proporcionando uma compreensão abrangente do impacto das abordagens propostas.

O último capítulo destaca as conclusões finais do trabalho desenvolvido. São reiterados os principais resultados alcançados e as contribuições do estudo para a área de RSDEE. Também são discutidas possíveis direções para pesquisas futuras, que podem se basear nas abordagens metodológicas apresentadas.

Capítulo 2

Sistema Elétrico de Potência

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é a infraestrutura fundamental que compreende os sistemas de geração, transmissão e distribuição de Energia Elétrica em larga escala. Compreendendo uma rede interconectada de linhas de transmissão, subestações e equipamentos elétricos, o SEP desempenha um papel central na entrega eficiente e confiável de eletricidade aos consumidores finais (Montsutsumi et. al., 2019).

Seu objetivo principal é assegurar a transmissão eficiente de grandes quantidades de energia elétrica a longas distâncias, minimizando as perdas e mantendo a qualidade do fornecimento (Nour, et. al. 2020).

Além disso, o SEP incorpora tecnologias avançadas de monitoramento, controle e proteção para garantir a estabilidade do sistema, prevenindo falhas e respondendo dinamicamente a variações na demanda e nas condições operacionais. O estudo e a otimização do sistema elétrico de potência são fundamentais para garantir a segurança, confiabilidade e sustentabilidade do fornecimento de energia elétrica em escala nacional e internacional.

No Brasil o SEP constitui uma infraestrutura complexa e extensa, que tem atendido à crescente demanda por energia elétrica no país, apresentando peculiaridades significativas devido à vasta extensão territorial e à diversidade de fontes de geração.

O Sistema de Geração constitui a primeira etapa do SEP, onde a energia elétrica é produzida a partir de fontes diversas, tais como: usinas hidrelétricas, termelétricas, eólicas, solares, entre outras. Cada fonte possui características específicas, influenciando a forma como a energia é gerada.

No Brasil esse sistema é notável pela sua diversificação, contando com diversas fontes geradoras. As hidrelétricas historicamente têm sido uma parte expressiva, aproveitando os abundantes recursos hídricos do país. No entanto, nos últimos anos, houve uma expansão considerável de fontes renováveis, como a energia eólica e solar, visando diversificar a matriz energética e promover a sustentabilidade (Melo e Lima, 2018).

No contexto brasileiro, as usinas geradoras produzem eletricidade predominantemente em duas tensões elétricas: 6,9 kV e 13,8 kV (quilovolts), que são posteriormente elevadas para tensões mais altas, como 138 kV ou 230 kV, para a transmissão eficiente a longas distâncias (Montemazzo, 2016).

A etapa subsequente é o Sistema de Transmissão, responsável por transportar a energia gerada a longas distâncias, conectando as áreas de geração aos centros de carga. Esse Sistema de transmissão de energia ocorre por meio de linhas de transmissão interligadas, formando uma extensa rede que conecta as usinas às subestações em todo país. Nestas subestações, as tensões são elevadas novamente para valores ainda mais altos, como 500 kV, facilitando a transmissão de grandes blocos de energia (Montemezzo, 2016).

O Brasil possui extensas linhas de transmissão que conectam diversas regiões, garantindo o fluxo eficiente da eletricidade. Essa interligação nacional permite otimizar a distribuição da carga, equilibrando a oferta e demanda em diferentes áreas geográficas.

Finalmente, o Sistema de Distribuição recebe a energia proveniente do sistema de transmissão e a distribui para os consumidores finais. Esse estágio envolve redes de distribuição de média e baixa tensão, conectando-se a indústrias, empresas e residências. A complexidade desses sistemas varia, mas todos têm o objetivo comum de fornecer eletricidade de maneira segura e contínua (Montemezzo, 2016).

Esse processo ocorre por meio de distribuidoras de energia, as quais administram a entrega da eletricidade aos consumidores finais, realizando operações de monitoramento, manutenção e expansão da rede de distribuição, respondendo dinamicamente às flutuações na demanda.

A automação e modernização das redes de distribuição têm sido focos de investimento para melhorar a eficiência e a qualidade do fornecimento. É importante destacar que o Brasil adota um modelo predominantemente interligado, onde os sistemas de todas regiões do país estão conectados. Essa interligação proporciona benefícios como a troca de energia entre diferentes regiões, aumento da confiabilidade do sistema e melhor aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis em cada região do país (Marinho, 2020).

Este trabalho concentrará sua análise no Sistema de Distribuição do Sistema Elétrico, em especial, no problema da reconfiguração do sistema de distribuição de energia elétrica. A RSDEE é de particular interesse, pois envolve a otimização da disposição dos equipamentos e da rede elétrica para melhorar a confiabilidade, reduzir perdas e garantir a eficiência operacional.

2.1 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

O SDEE desempenha um papel fundamental na entrega de energia elétrica aos consumidores finais, especialmente diante das mudanças nas demandas energéticas. Essas mudanças frequentemente impõem desafios que exigem a reconfiguração dos sistemas de distribuição para garantir sua adaptabilidade e eficácia contínuas (Shaheen et. al., 2021).

Nos SDEE, as barras representam os pontos de conexão que refletem os diferentes níveis de tensão em um sistema. Quando um consumidor final utiliza energia elétrica, a potência é

fornecida a partir das barras do sistema, onde a tensão é mantida em um nível adequado para atender às necessidades de operação dos equipamentos elétricos. A partir dessas barras, a energia é distribuída ao longo dos ramos (Melo e Lima, 2018). Estas são componentes principais para a compreensão da topologia e para garantir a estabilidade do sistema como um todo.

Os ramos referem-se às linhas de transmissão que conectam as barras, estabelecendo assim os caminhos pelos quais a energia flui. Cada ramo é caracterizado por parâmetros específicos, como resistência e reatância, que influenciam diretamente na eficiência e na qualidade da transmissão de energia. A análise cuidadosa dos ramos é essencial para minimizar as perdas de potência no sistema (GAUTAM et.al., 2020).

Em resumo, os Sistemas Elétricos de Potência são arranjos de barras e ramos, onde cada componente desempenha um papel específico na distribuição de energia elétrica.

Para melhor exemplificar, basta realizar a observação dos postes de transmissão de energia que percorrem as ruas urbanas, onde é possível enxergar uma representação palpável dos conceitos fundamentais de barras e ramos em um sistema elétrico. Cada transformador assume o papel de uma barra, constituindo um ponto de conexão essencial para o fluxo de energia ao longo da rede. Essas barras, sinalizam os diferentes níveis de tensão que caracterizam o sistema, como ilustra a Figura 2.1:

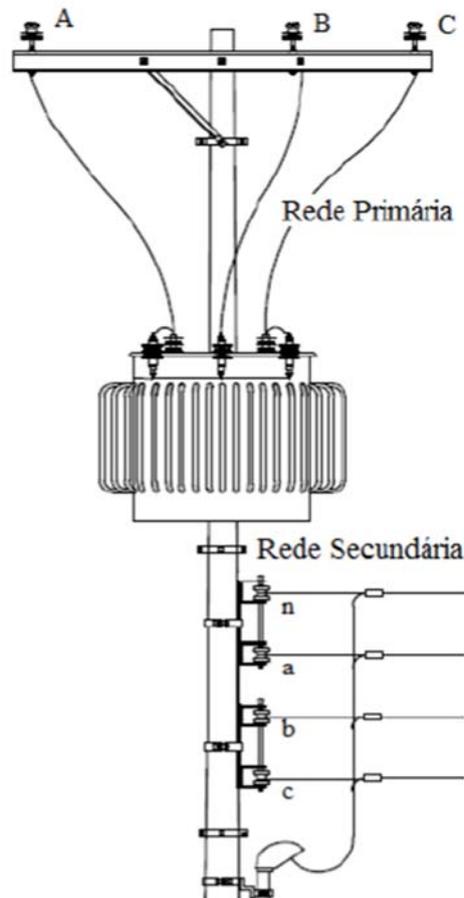


Figura 2.1: Ilustração do Sistema de Distribuição.

(Montemezzo, 2016).

Os ramos se materializam nos cabos de transmissão que se estendem a partir desses postes, interligando-os em uma grande teia elétrica. Conforme ilustrado na Figura 2.1, os fios de número de “A” a “C” representam os ramos dos SDEE primária (média tensão). Os cabos representam os caminhos que atravessam os bairros e ruas para alcançar os consumidores finais. Cada ramo, por sua vez, é dotado de sua própria complexidade, determinando a eficiência da transmissão.

Os transformadores desempenham o papel de modular a tensão, ajustando-a conforme necessário para atender às demandas variáveis da rede. Esses componentes, ao agirem como interfaces entre diferentes níveis de tensão, ilustram a importância das barras na estabilidade do sistema.

A distribuição primária e secundária torna-se tangível após a observação da sequência lógica dos postes. Nos postes mais altos e robustos, geralmente dispostos na horizontal, associados às subestações de transmissão, a energia é conduzida em níveis de tensão elevados, variam em médias de 13 à 33 kV, caracterizando a distribuição primária. À medida que os cabos descem, após passarem pelos transformadores, para postes menores e mais próximos dos lares e empresas (geralmente dispostos na vertical), a tensão é reduzida, indicando o estágio de distribuição secundária (baixa tensão), que predominantemente varia entre 110 e 330 V (Montsutsumi, 2019).

Na distribuição secundária, a energia é direcionada aos consumidores finais em níveis de tensão mais baixos. Este estágio, embora localizado mais próximo dos consumidores, não é menos significativo. A eficácia da distribuição secundária impacta diretamente na qualidade do fornecimento de energia aos usuários, sendo vital para a integridade do sistema elétrico em sua totalidade.

Entretanto, o presente trabalho busca aprimorar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de distribuição primária de energia elétrica (média tensão), concentrando-se na otimização do fluxo de potência nas barras.

Reconhecendo que a potência atinge seu valor máximo nas barras do sistema, este estudo direciona sua análise para compreender e aperfeiçoar os elementos fundamentais que compõem esse estágio crítico da infraestrutura elétrica. A investigação aprofundada das características das barras permite identificar oportunidades de melhoria na gestão do fluxo de energia, visando a minimização de perdas e a maximização da capacidade de carga.

2.2 Formulação do Problema de RSDEE

Uma formulação teórica sobre o problema da RSDEE pode fornecer uma visão geral e auxiliar no desenvolvimento de soluções eficientes. As barras desempenham um papel central como elementos fundamentais do modelo. Estas representam pontos estratégicos onde diversos componentes, como geradores, cargas, bancos de reatores e indutores, convergem na rede

elétrica. Os ramos do sistema constituem os condutores que estabelecem as conexões entre os elementos, sendo retratados no modelo como impedâncias interligando as barras (Gerez et. al., 2020).

A primeira etapa é identificar e calcular a Função Objetivo (FO) do sistema radial. Esse cálculo requer a resolução do problema de fluxo de carga, fornecendo, assim, uma análise das perdas de potência ativa que ocorrem em cada nível do sistema (Vargas, 2024).

A seguir, a etapa de abertura e fechamento das chaves no sistema malhado é proposta como um mecanismo para otimizar a FO. Essa abordagem se desdobra na avaliação dos fluxos de potência ativa em cada ramo da rede, os quais desempenham um papel crucial na formulação do Algoritmo PRIM (AP) para a construção da árvore geradora.

Essa caracterização da função objetivo, centrada na análise das perdas de potência ativa, permite a consecução das etapas posteriores da metodologia. Ao incorporar a topologia radial com a análise criteriosa dos fluxos de potência, a abordagem delineada visa otimizar o sistema de distribuição, mitigando perdas e garantindo um fornecimento elétrico eficiente e confiável.

2.3 Modelo Matemático

A formulação do problema de RSDEE pode ser entendida como expressões matemáticas que traduzem os objetivos e limitações intrínsecos ao processo de aprimoramento da rede elétrica (Vargas et. al., 2018).

O cerne dessa abordagem é encontrar uma boa configuração para o sistema, capaz de minimizar as perdas de potências operacionais e elevar os níveis de tensão, aumentando assim a confiabilidade do fornecimento energético e responder eficazmente às demandas de carga.

Essa formulação é delineada por meio de um modelo fundamentado em ferramentas da programação matemática e teoria de grafos. Esse processo de otimização abrange uma multiplicidade de variáveis e restrições, convergindo para uma solução que alia eficiência, confiabilidade e integridade operacional (Shaheen et. al., 2021).

Dentre as restrições consideradas no âmbito do problema, destacam-se as limitações físicas intrínsecas aos elementos da rede elétrica. A adaptação do equacionamento apresentado por Jakus et. al. (2020) e Mahdavi et. al. (2021) oferece uma abordagem prática da Função Objetivo:

$$\text{Min}(Ls) = \sum_{(a,b) \in B} (x_{ab} * Pd_{ab}) \quad (2.1)$$

s.a.

$$x_{ab} \in \{0,1\} \quad (2.2)$$

$$\sum_{(a,b) \in B} x_{ab} = n_b - 1 \quad (2.3)$$

$$V_{min_k} \leq V_k \leq V_{max_k} \quad (2.4)$$

$$I_{rb} = \frac{(P_b * V_{rb} + Q_b * V_{ib})}{(V_{rb}^2 + V_{ib}^2)} \quad (2.5)$$

$$I_{ib} = \frac{(P_b * V_{ib} - Q_b * V_{rb})}{(V_{rb}^2 + V_{ib}^2)} \quad (2.6)$$

$$V_{rb} = V_{ra} - (R_{ab} * I_{rab} + X_{ab} * I_{iab}) \quad (2.7)$$

$$V_{ib} = V_{ia} - (R_{ab} * I_{iab} + X_{ab} * I_{rab}) \quad (2.8)$$

$$Pd_{ab} = R_{ab} * (I_{rab}^2 + I_{iab}^2) \quad (2.9)$$

$$I_{ab} = \sum_{n \neq a} I_{bn} + I_b \quad (2.10)$$

$$V_k = V_{rk} + jV_{ik}, \quad k \in B \quad (2.11)$$

$$I_{ab} = I_{rab} + jI_{iab}, \quad (a, b) \in B \quad (2.12)$$

- $Min(Ls)$: indica que o objetivo é minimizar a perda de potência no sistema elétrico;
- B : conjunto de barras do SEP;
- x_{ab} : variável de decisão que representa se o ramo (a, b) está aberto (0) ou fechado (1);
- V_{min_k} : valor mínimo permitido para a magnitude da tensão na barra k .
- V_{max_k} : valor máximo permitido para a magnitude da tensão na barra k .
- k : índice de barra;
- V_k : Esta é a tensão na barra k . No contexto deste trabalho, a tensão é representada por um número complexo que possui uma parte real (V_r) e uma parte imaginária (jV_i);
- j : unidade imaginária, comumente utilizada para denotar a parte imaginária em números complexos;
- n_b : número de barra do sistema;
- V_{rb} : componente real da tensão na barra atual;
- V_{ib} : componente imaginária da tensão na barra atual;
- V_{ra} : componente real da tensão na barra de origem;
- V_{ia} : componente imaginária da tensão na barra de origem;
- I_{rb} : componente real da corrente na barra atual;
- I_{ib} : componente imaginária da corrente na barra atual;

- $I_{r_{ab}}$: componente real da corrente no ramo entre as barras a e b ;
- $I_{i_{ab}}$: componente imaginária da corrente no ramo entre as barras a e b ;
- P_b : potência ativa de demanda da barra atual;
- Q_b : potência reativada de demanda da barra atual;
- X_{ab} : reatância do ramo que conectam as barras a e b ;
- R_{ab} : resistência do ramo que conectam as barras a e b ;
- Pd_{ab} : perda de potência ativa no ramo que conectam as barras a e b ;
- I_{ab} : corrente de entrada no ramo que conecta as barras a e b ;
- I_b : corrente na barra b ;
- $\sum_{n \neq a} I_{bn}$: representa o somatório de todas as correntes que saem da barra b , e se conectam a outras n barras, não incluindo a barra de origem (a).

A FO deste problema é expressa pela Equação 2.1, onde o objetivo primário é a minimização das perdas de potência ativa no sistema elétrico. Para cada ramo (a, b) pertencente ao conjunto B , a perda de potência ativa nesse ramo (Equação 2.9) é multiplicada pela variável de decisão x_{ab} , a qual indica se o ramo está aberto (0) ou fechado (1), conforme a Equação 2.2. Essas variáveis são determinantes na configuração da topologia da rede elétrica. A soma agregada desses termos representa a totalidade das perdas de potência ativa no sistema.

A equação 2.3 impõe a restrição de radialidade. A soma das variáveis de decisão para todos os ramos no conjunto B deve ser igual a $n_b - 1$, onde n_b é o número total de barras do sistema elétrico. Essa restrição assegura que o número de ramos fechados seja suficiente para conectar todas as barras.

Já a equação 2.4 define as restrições de tensão para cada barra k no sistema elétrico. Estabelece limites para a magnitude da tensão (V_{min} e V_{max}) em cada barra. Ela assegura que as tensões estejam dentro de um intervalo especificado, evitando valores muito altos ou muito baixos que poderiam causar problemas na operação da rede.

As Equações 2.5 e 2.6 são chave para o cálculo da corrente em uma barra. Estas Equações expressam a corrente real (I_r) em termos da potência ativa (P), potência reativa (Q), componente real e imaginária da tensão (V_r e V_i). Elas derivam das fórmulas de potência ativa (P) e reativa (Q) em termos de tensões (V_r e V_i) e corrente (I_r e I_i).

A determinação das tensões em barras (V_r e V_i) é um componente fundamental na análise do fluxo de potência. A equação para o cálculo das tensões em uma barra específica é dada pelas Equações 2.7 e 2.8. Estas Equações descrevem como as componentes reais e imaginárias da tensão na barra atual são calculadas.

Segundo Jakus et. al. (2023) e Mahdavi et.al. (2021), a equação que descreve como calcular as perdas de potência ativa em um ramo específico do sistema, é a Equação 2.9. Essa equação é uma expressão da Lei de Ohm para perdas de potência ativa. Ela descreve as perdas

de potência ativa em um ramo específico em termos das componentes real e imaginária da corrente, considerando a resistência naquele ramo.

A Equação 2.10 representa a corrente em um ramo, a qual é descrita pela Lei das Correntes de Kirchhoff. A lei estabelece que a soma das correntes que entram em um ramo (ponto de conexão) de um circuito é igual à soma das correntes que saem desse nó. Essa lei é uma aplicação do princípio da conservação de carga.

Finalmente, as Equações 2.11 e 2.12 indicam respectivamente que a tensão V_k e a corrente I_{ab} podem ser representadas como a soma de suas componentes real e imaginária, onde V_r está em fase com a tensão real e V_i em fase com a tensão imaginária, assim como I_{ab} está em fase com a corrente real $I_{r_{ab}}$ e $I_{i_{ab}}$ em fase com a corrente imaginária. A Figura 2.2 ilustra o funcionamento dos elementos do Sistema.

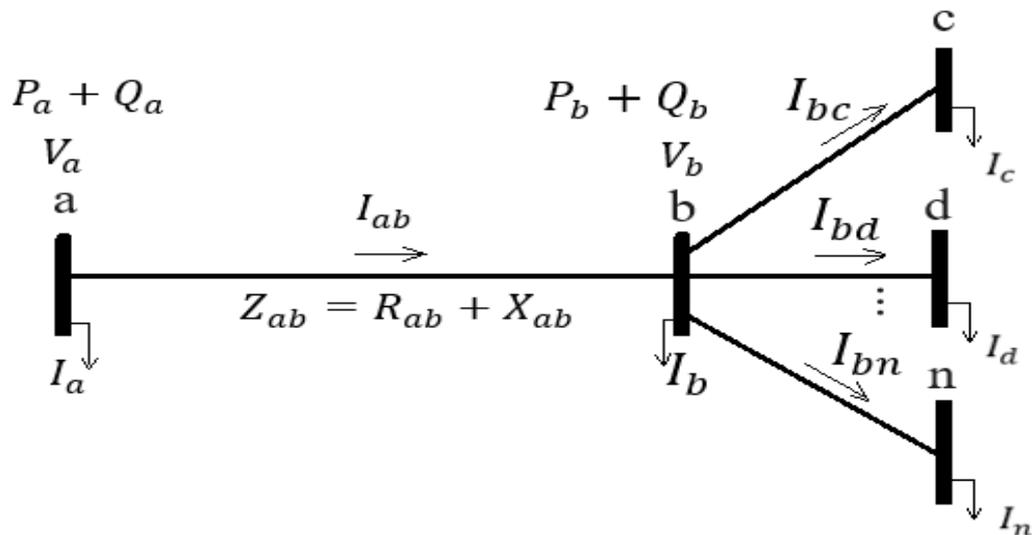


Figura 2.2: Ilustração do Sistema Elétrico.

Todas essas equações juntas modelam o comportamento do sistema de distribuição, garantindo que a injeção de energia seja suficiente para atender às demandas dos consumidores, considerando as perdas nos ramos. Além disso, as restrições de tensão são aplicadas para manter o sistema dentro de operação segura e estável.

2.4 Algoritmo de PRIM

O Algoritmo de PRIM é uma técnica de busca gulosa usada para resolver o problema da árvore geradora mínima (*Minimum Spanning Tree* - MST) em um grafo não direcionado e ponderado. O algoritmo foi proposto por Robert Clay Prim em 1957 (Prim, 1957).

O AP no presente trabalho foi adaptado de forma a encontrar um subconjunto de vértices e arestas conectados de tal forma que todos os vértices estejam interligados e não haja nenhum ciclo formado. Além disso, a árvore geradora deve possuir o maior peso total possível (potência

aparente do ramo) em relação a todas as outras árvores que podem ser construídas usando os mesmos vértices, conforme ilustrado na Figura 2.3:

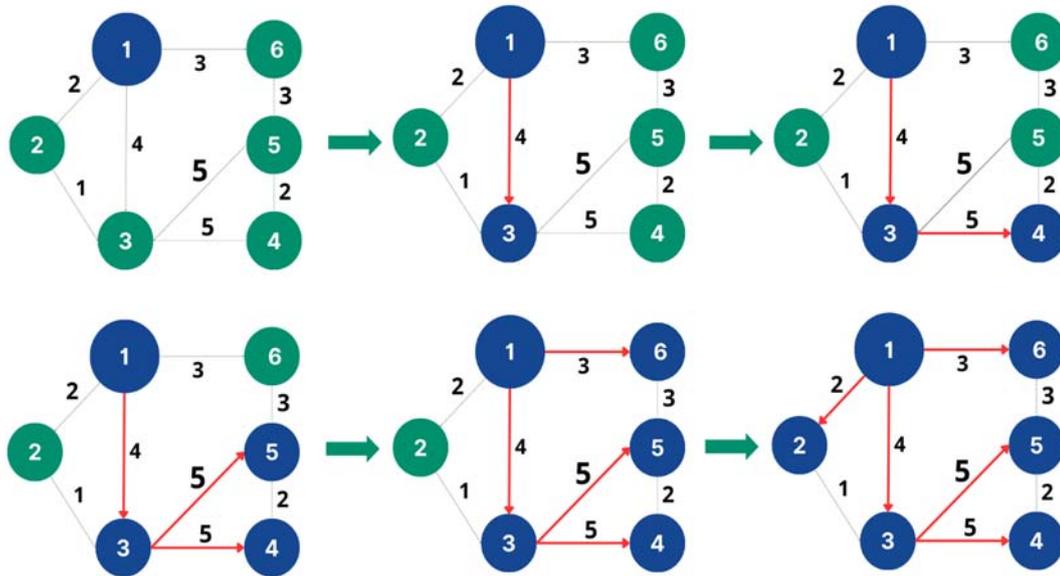


Figura 2.3: Ilustração do Algoritmo PRIM.

A Figura 2.3 ilustra um sistema de 5 barras, iniciando com o vértice de número “1” (subestação), única barra que inicialmente pertence ao conjunto solução. Em seguida, seleciona-se o ramo de maior peso que conecta um vértice isolado a um vértice já conectado à árvore em construção.

No início do processo, o vértice inicial (subestação) é designado a partir dos dados globais do sistema. As arestas diretamente conectadas a este vértice são ordenadas com base em seus pesos. A construção da árvore geradora ocorre selecionando iterativamente as arestas de maior peso conectadas aos vértices que ainda não foram incorporados à topologia radial, partindo das barras já conectadas. Essa barra é incorporada ao conjunto de barras conectadas, sendo que esse processo é repetido até que todas as barras estejam conectadas, formando uma topologia radial.

O AP adota uma estratégia gulosa, operando de maneira iterativa, concentrando-se em conectar um vértice por vez à árvore geradora, sem analisar o panorama global em cada iteração, conectando um vértice isolado a um vértice já conectado. Ao término do algoritmo, a árvore geradora obtida possui a característica de ser acíclica, conectando todos os vértices do grafo original de maneira a maximizar a potência total, conforme ponderado pelas arestas.

2.5 Renumeração das Barras e Ramos

A renumeração em SDEE é um processo que visa facilitar o cálculo do fluxo de potência. Este procedimento consiste em atribuir novos números de identificação às barras e aos ramos de entrada e saída, sem alterar sua configuração física.

O objetivo primário da renumeração é melhorar a eficiência dos cálculos realizados sobre o sistema elétrico. Ao utilizar números mais condizentes com a estrutura após a execução do AP, torna-se mais fácil e rápido determinar os fluxos de potência, permitindo uma operação mais segura e confiável da rede (Kawambwa et. al., 2021).

O Método de Renumeração opera de maneira sequencial, começando pela subestação (primeira barra do sistema) e incrementando progressivamente de acordo com as camadas da árvore gerada pelo AP. A cada iteração, verifica-se se existem ramos conectados a essa barra. Em caso afirmativo, são realizadas as verificações necessárias e as atualizações de números de identificação.

Todo o processo é conduzido de forma hierárquica, levando em consideração a estrutura e conectividade do sistema. A barra principal (subestação), é a primeira a receber um novo identificador. Em seguida, as barras conectadas diretamente a esta são renumeradas sequencialmente, bem como seus ramos de entrada e saída. Esse processo se repete em camadas sucessivas, abrangendo barras em níveis cada vez mais distantes da subestação (Kawambwa et. al., 2021).

O processo é realizado com o intuito de atribuir identificadores únicos a cada barra do sistema, conforme ilustrado na Figura 2.4 abaixo:

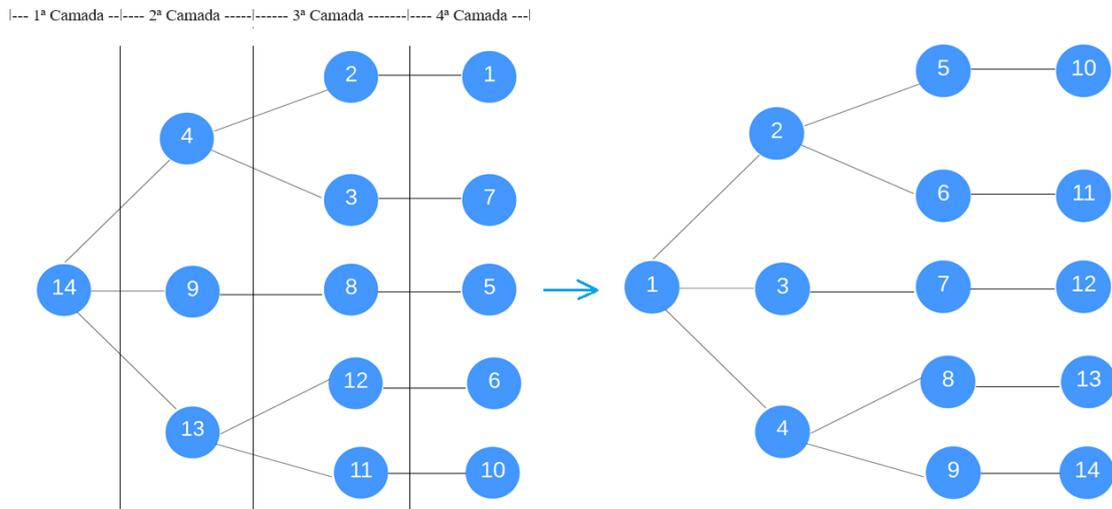


Figura 2.4: Camadas para Renumeração – Adaptação do Sistema 14 Barras.

Durante o processo de renumeração, são realizadas comparações para garantir que os novos identificadores não se sobreponham. Cada novo número é verificado em relação aos identificadores existentes para evitar duplicações ou conflitos na identificação das barras.

Um ponto fundamental é o tratamento de ramos radiais. Estes são condutores de energia que se conectam apenas a uma barra de entrada e uma barra de saída, sem formar laços. Para garantir a consistência das informações, é necessário assegurar que as novas identificações sejam coerentes em ambos os extremos do ramo.

Além disso, a renumeração por camadas não altera a configuração física do sistema, mantendo a integridade das conexões entre barras e ramos. Ela atua exclusivamente na

reorganização numérica dos identificadores para otimizar os cálculos subsequentes. Ao final deste processo, cada barra do sistema possui um novo identificador único, o que facilita significativamente a realização de cálculos e análises posteriores (Kawambwa et. al., 2021).

Antes da realização da renumeração propriamente dita, a numeração inicial das barras e ramos de entrada e saída são copiados para que posteriormente, após o cálculo de fluxo de cargas, as barras e ramos retornem à numeração original.

Este procedimento ocorre para que se possa realizar comparações de resultados, a fim de encontrar uma boa topologia radial que otimiza o sistema, de acordo com as menores perdas possíveis. Os principais pontos positivos deste método de renumeração incluem:

- a. **Eficiência no Cálculo do Fluxo de Potência:** Ao atribuir novos números às barras e ramos, os cálculos de fluxo de potência tornam-se mais eficazes, economizando tempo e recursos computacionais.
- b. **Simplicidade de Implementação:** O algoritmo desenvolvido é estruturado e fácil de compreender, tornando sua implementação acessível mesmo para programadores menos experientes.
- c. **Preservação da Configuração Física:** A renumeração não altera a configuração física do sistema, mantendo as conexões e relações entre os elementos inalteradas.

2.6 Cálculo do Fluxo de Potência

A etapa seguinte compreende o cálculo do fluxo de potência no sistema. Esta análise é o mecanismo principal para obter a compreensão plena do comportamento operacional da rede elétrica. Ele permite determinar as variáveis elétricas, como tensões e correntes, em cada ponto do sistema, considerando as características dos elementos e as condições de operação (Kawambwa et. al., 2021).

No presente trabalho foi adotado o Método *Backward Forward-Sweep* (BFS), uma abordagem iterativa que calcula as variáveis elétricas em cada ponto do sistema. O Método é amplamente utilizado na análise de sistemas elétricos de potência.

O BFS é inicializado com valores previamente calculados para as tensões de todas as barras no sistema. A Fase *Forward* é responsável por propagar as tensões e correntes a partir da subestação até as barras mais remotas, de acordo com a topologia radial (camadas) gerada após a execução do AP.

Em seguida, a Fase *Backward* recalcula as correntes levando em conta as perdas nos ramos. Essa etapa visa obter resultados mais precisos e representativos das condições reais de operação. Durante esta fase, são calculadas as perdas de potência em cada ramo, bem como a perda total do sistema.

Durante cada nova iteração, é calculado o consumo de potência ativa e reativa em cada barra com base nas informações advindas dos dados iniciais dos sistemas base. Esse consumo é aplicado para atualizar as variáveis, e o processo é repetido até que a convergência seja alcançada.

O cálculo das perdas totais no sistema é fundamental nesse processo. As perdas são calculadas como a soma das perdas em todos os ramos na iteração em análise. A verificação da tolerância é a condição de parada do cálculo do fluxo de potência, a qual é a diferença entre as perdas totais da iteração atual e as perdas da iteração anterior, determinando assim se o processo iterativo deve ser encerrado. A utilização da tolerância assegura a precisão das soluções encontradas, contribuindo para a eficiência computacional do algoritmo de cálculo do fluxo de potência (Kahouli, 2022).

Os processos apresentados (*Forward* e *Backward*) interagem de forma sinérgica para realizar o cálculo do fluxo de potência. A etapa inicial de renumeração prepara o terreno, seguida pela propagação das grandezas elétricas na Fase *Forward* e a subsequente correção das correntes na Fase *Backward*, levando em conta as perdas. Esse ciclo se repete até atingir a convergência, dentro da tolerância máxima estabelecida para perdas elétricas.

2.7 Multistart

O método MS é uma abordagem utilizada em problemas de otimização para encontrar soluções diversificadas no espaço de busca. O método se baseia na ideia de explorar múltiplos pontos de partida para a busca de boas soluções. Seu funcionamento envolve a execução repetida do AP, a partir de diferentes configurações iniciais (Montsutsumi et. al., 2019).

Cada execução, a partir de um ponto de partida diferente, resultará em uma nova solução. O objetivo é explorar a diversidade do espaço de busca para aumentar as chances de encontrar melhores soluções.

A implementação do método MS no contexto da RSDEE oferece uma abordagem mais eficiente para a busca de novas soluções (Montsutsumi et. al., 2019). Ao explorar múltiplos pontos de partida, essa metodologia tem o potencial de encontrar configurações que permitam uma maior diversificação de estratégias, ampliando assim as possibilidades de otimização. Esse enfoque não apenas fortalece a aplicação da MS, mas também estabelece uma base sólida para a incorporação de outras heurísticas.

No contexto da RSDEE, a implementação desse método envolve os seguintes passos:

- a. Geração de Múltiplos Pontos Iniciais: A implementação da MS inicia gerando aleatoriamente uma série de configurações iniciais para a rede de distribuição. Essas configurações iniciais servirão como pontos de partida para a busca por melhores solução.

b. Aplicação recorrente do Algoritmo PRIM: Atributos dos ramos são aleatoriamente alterados e o sistema é submetido ao AP a cada nova iteração. Isso resultará em diferentes topologias radiais, cada uma com seus próprios indicadores de desempenho. Isso pode gerar a minimização de perdas de potência, aumento dos níveis de tensão, ou otimização de múltiplos objetivos.

c. Seleção das Soluções Promissoras: Com base nos resultados obtidos, serão selecionadas as soluções que apresentarem melhor desempenho de acordo com os critérios definidos. Estas configurações serão utilizadas como candidatas para a próxima etapa.

d. Refinamento das Soluções Selecionadas: As soluções selecionadas passarão por um processo de refinamento, no qual poderão ser exploradas variações locais para buscar melhorias adicionais.

2.8 Algoritmo Genético

A implementação do Algoritmo Genético desempenha o papel de refinamento na busca de soluções mais eficientes. Segundo Kahouli (2022), sua aplicação visa explorar o espaço de soluções por meio da recombinação de operadores genéticos do sistema, que são conceitualmente inspirados nos mecanismos da evolução natural.

O AG é uma técnica de otimização baseada nos princípios da seleção natural e genética. Essa metodologia faz parte dos algoritmos evolutivos e é amplamente usada para resolver problemas complexos onde soluções tradicionais são ineficazes ou muito lentas (Vargas et.al., 2018). São inspirados pelo processo de evolução biológica observado na natureza, onde organismos mais adaptados têm maiores chances de sobreviver e reproduzir. O conceito central é que a próxima geração deve herdar as características dos “pais” mais aptos, o que gradualmente leva a uma população melhorada.

Algoritmos Genéticos oferecem uma abordagem versátil e eficiente para encontrar soluções de boa qualidade para problemas de otimização, onde as principais etapas são:

a. Codificação das Soluções: Cada configuração radial da rede é representada como um indivíduo na população do AG. Isso envolve uma forma de codificar a estrutura da rede, como por exemplo, uma lista de ramos conectados e abertos;

b. Inicialização da População: Dentro do escopo do presente trabalho, uma população inicial de indivíduos é criada utilizando os resultados conseguidos após a execução do MS. Essa população servirá como ponto de partida para o processo de otimização;

c. Avaliação de Desempenho: Cada indivíduo na população é avaliado de acordo com os critérios de desempenho definidos, como minimização de perdas de potência, aumento da confiabilidade do sistema, entre outros;

- d. Seleção: Indivíduos são selecionados para reprodução com base na sua aptidão. Indivíduos mais aptos têm uma maior probabilidade de serem escolhidos;
- e. Crossover (Recombinação): Pares de indivíduos selecionados são combinados para gerar descendentes. O crossover envolve a troca de informações genéticas entre os pais para criar novos indivíduos;
- f. Avaliação de Desempenho dos Descendentes: Os descendentes gerados (após crossover) são avaliados em termos de desempenho. Isso inclui a mesma avaliação de desempenho aplicada à população inicial;
- g. Critério de Parada: O processo é repetido até que todos os indivíduos da população inicial sejam recombinaados entre si.

Capítulo 3

Metodologia

A presente pesquisa propõe criar um Algoritmo em Linguagem C (Pereira Jr, 2024), desenvolvido no ambiente de programação Code:block 20.30, a fim de encontrar boas soluções para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Para tanto, serão realizadas simulações em sistemas com 14, 33, 84, 136 e 415 barras. Os sistemas testes foram simulados em um microcomputador Dell/Vostro 14, com processador Intel Core i3-11154G, de 3.00GHz e com 4 GB de memória RAM. A metodologia adotada segue uma abordagem sequencial que compreende as seguintes etapas, ilustradas na Figura 3.1.

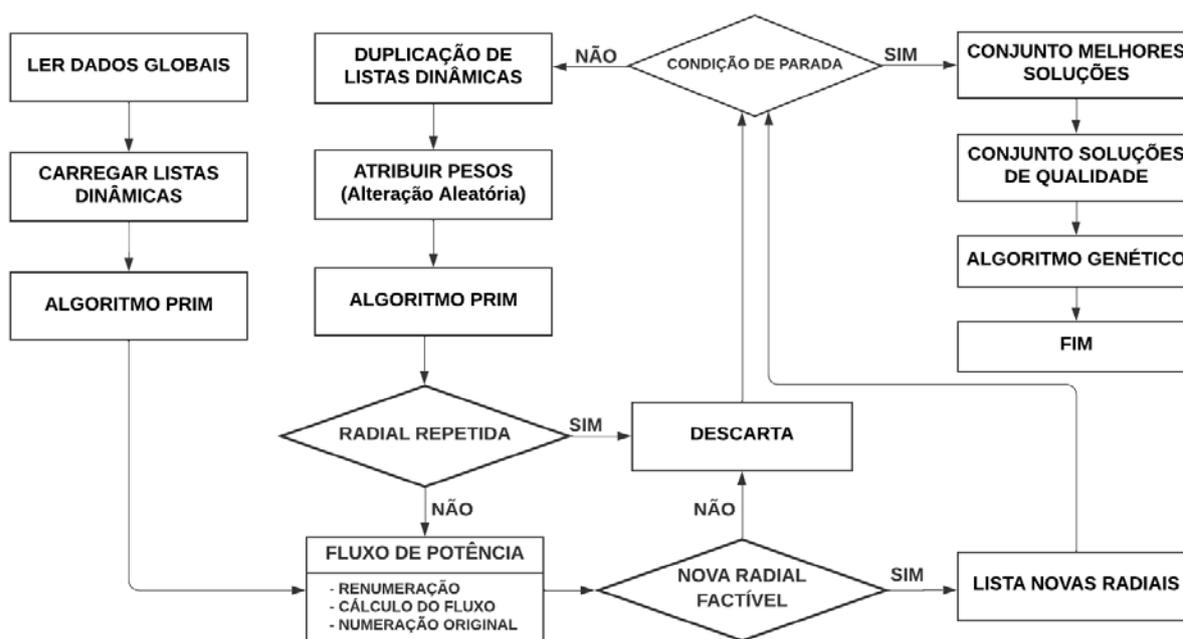


Figura 3.1: Fluxograma da Metodologia.

O processo começa com a leitura dos dados globais, como a topologia da rede, capacidades dos elementos e demandas de carga do sistema, barras e ramos. Com os dados padronizados, ocorre a coleta automática de dados, gerando as listas dinâmicas (barras e ramos), que contêm informações atualizadas sobre o estado da rede, sendo então carregadas para permitir uma análise mais detalhada.

O AP é utilizado para encontrar a árvore geradora inicial da rede. Este passo garante que sistema esteja configurada de maneira eficiente, garantindo a radicalidade do sistema. Em

seguida, essas listas dinâmicas são duplicadas para possibilitar a exploração de múltiplas configurações simultaneamente, aumentando as chances de encontrar uma melhor solução.

Atribuem-se atributos aleatórios às listas duplicadas, introduzindo variabilidade e permitindo a exploração de diferentes cenários de reconfiguração. Com esses novos atributos, o AP é aplicado novamente para gerar uma nova configuração potencial da rede. Nesse ponto, verifica-se se a nova configuração radial obtida é repetida, ou seja, se já foi gerada anteriormente. Se a configuração for repetida, ela é descartada para evitar redundância.

Caso a configuração não seja repetida, procede-se ao cálculo do fluxo de potência, que envolve três etapas principais: a renumeração dos nós da rede, o cálculo do fluxo de potência na nova configuração e a restauração da numeração original dos nós. Durante cálculo do fluxo de potência, avalia-se se a nova configuração radial é factível, ou seja, se ela atende a todas as restrições técnicas e operacionais da rede de distribuição. Se a nova configuração for considerada factível, ela é adicionada a uma lista de novas configurações radiais. Essa etapa assegura que a nova configuração é viável do ponto de vista operacional.

O processo de reconfiguração continua até que uma condição de parada seja atingida. Quando a condição de parada é finalmente atingida, as melhores soluções encontradas até o momento são agrupadas. Desse conjunto de soluções, seleciona-se um subconjunto de soluções de qualidade superior. Em seguida, aplica-se um Algoritmo Genético a essas soluções de qualidade para realizar uma otimização adicional, buscando encontrar a configuração mais eficiente e robusta para a rede de distribuição de energia elétrica.

O processo é concluído com a definição da configuração otimizada do sistema de distribuição, resultando em uma rede que atende de forma eficaz às demandas de carga e às restrições operacionais, enquanto minimiza perdas e maximiza a eficiência operacional.

3.1 Criação de Estruturas

A escolha da estrutura de dados é um elemento fundamental para a eficiência e operabilidade do algoritmo proposto. O algoritmo desenvolvido no presente trabalho, inicialmente carrega dados globais referentes à sistemas de testes utilizados na literatura acadêmica (LaPSEE, 2023).

Duas estruturas centrais, lista de barras dinâmicas e lista de ramos dinâmicos, são a espinha dorsal do código, encapsulando as principais informações sobre as barras e ramos do sistema, respectivamente. Estas estruturas, modeladas como listas duplamente encadeadas (LDE), possuem uma versatilidade inerente. As listas circulares proporcionam uma gestão simplificada e eficiente, permitindo operações uniformes em qualquer ponto da lista. Em todo código foi adotado a alocação dinâmica de memória, através do uso de ponteiros.

A relação entre as estruturas de dados é evidenciada na função de recombinação genética, onde a clonagem de ramos e barras é determinante para a geração de novas soluções. A função

evidencia essa relação, integrando de forma coesa as estruturas referentes às barras livres e barras usadas, ramos malhados e ramos conectados. A utilização de LDE, em conjunto com a técnica do nó sentinela, agiliza a busca, inserção e remoção de elementos, otimizando o desempenho do algoritmo.

A escolha de LDE para manipular barras e ramos destaca-se por sua adaptabilidade à dinâmica mutável dos sistemas elétricos. A natureza bidirecional dessas listas facilita operações que envolvem a conexão de elementos, um aspecto importante na representação eficaz da topologia do sistema.

A criação de listas de novas radiais, tanto na fase do MS quanto na fase de refinamento se destaca como uma etapa chave no processo. Essa função gera novas topologias radiais a partir das barras e ramos utilizados, sendo vital para garantir a diversidade genética na busca por melhores soluções.

A interação harmoniosa entre as estruturas, permitem a criação de novas listas de radiais, evidenciando na capacidade do algoritmo de gerar e avaliar novas soluções. As estruturas de dados implementadas são profundamente interligadas, refletindo um cuidadoso planejamento na representação dos sistemas elétricos.

3.1.1 Estrutura “Teia”

A “Teia” é uma representação concisa da conectividade da rede. Através de sua construção bidimensional, a estrutura mapeia as conexões entre as diversas unidades da rede, fornecendo todas as informações necessárias para o cálculo das correntes e tensões presentes no sistema. A criação da Teia se dá através da análise da lista de ramos dinâmicos presente no sistema elétrico.

Para cada ramo identificado, os elementos da lista nas posições que correspondem às barras de origem e destino são incrementados, indicando a existência de uma conexão entre as mesmas. Essa estrutura permite a visualização da topologia da rede de forma clara, precisa e concisa, facilitando a compreensão e análise do sistema.

Os objetivos da utilização da Teia no contexto do cálculo do fluxo de potência se concentram em:

- Armazenar da conectividade da rede: A teia oferece um método conciso para representar a complexa estrutura de interconexões presente em um sistema elétrico, facilitando o acesso e a manipulação das informações de conectividade;
- Facilitar o cálculo das correntes nos ramos: A partir da Teia, é possível determinar quais barras estão conectadas por quais ramos, permitindo o cálculo das correntes em cada ramo utilizando a Lei de Ohm e as tensões nas barras.

No contexto do presente trabalho, a estrutura assume um papel fundamental no cálculo do fluxo de potência. Durante cada iteração do processo, a teia é utilizada para determinar quais

barras estão conectadas à barra em análise, bem como quais os ramos que à conectam, conforme ilustra a Figura 3.2:

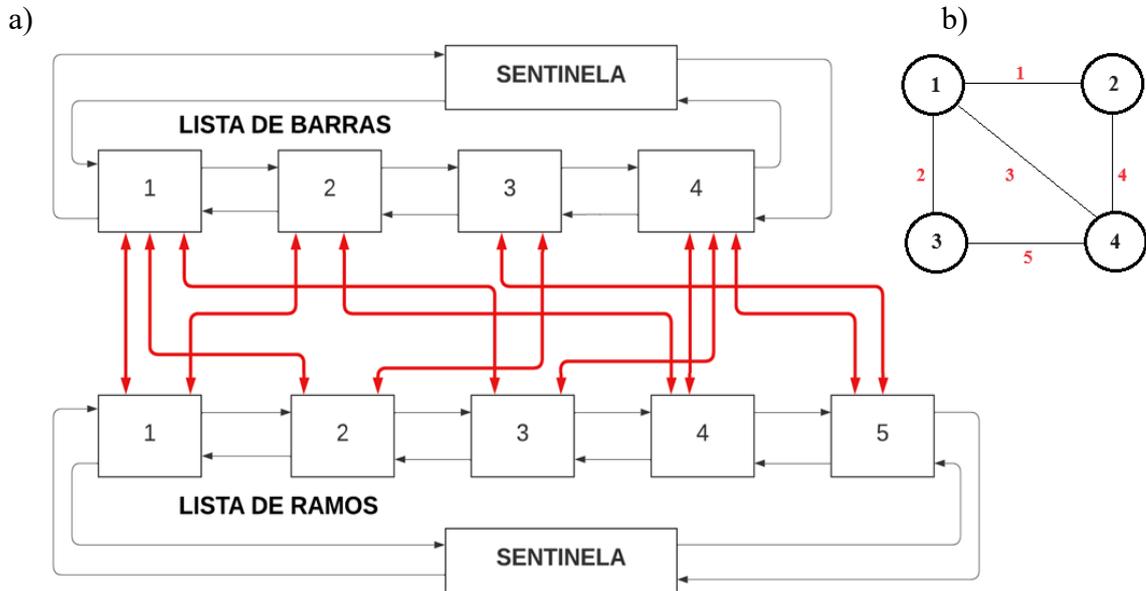


Figura 3.2: Estrutura “Teia”.

A Estrutura “Teia” da Figura 3.2.a representa o Sistema de 5 barras ilustrado na Figura 3.2.b., onde sua conectividade é totalmente descrita através das setas em vermelho.

3.2 Execução do Algoritmo PRIM

Como passo inicial da metodologia abordada neste trabalho, foi utilizado o AP para garantir que a estrutura radial da rede seja mantida. Entretanto, em razão de sua natureza “gulosa” em que pese obter-se uma solução inicial de boa qualidade, a literatura acadêmica é unânime em demonstrar que o desempenho de metaheurísticas é superior (Luo et. al., 2020).

A primeira execução do AP propõe-se obter uma solução inicial de boa qualidade, porém, como será apresentado nos resultados, as iterações subsequentes, ao adaptar e encontrar múltiplos pontos de partida, outras regiões do espaço de busca serão exploradas, melhorando a solução global ao longo do tempo.

É importante notar que, devido à sua natureza “miope”, a solução obtida nesta primeira execução não representa a solução ótima global para o problema.

A “miopia” do AP significa que, ao fazer melhores escolhas locais em cada passo, o algoritmo não considera o panorama completo do espaço de busca. Portanto, a solução inicial gerada pelo AP pode não ser globalmente ótima, principalmente nos sistemas mais complexos. No entanto, essa característica não diminui a importância dessa etapa, pois ela fornece uma base para o desenvolvimento posterior do algoritmo.

Exceção à regra é o sistema de 14 barras, pois se trata de um modelo amplamente utilizado no meio acadêmico, principalmente para facilitar o entendimento do problema por parte de alunos e novos pesquisadores, sendo que a primeira execução do AP encontra a solução ótima global.

3.3 Cálculo do Fluxo de Potência

O processo de cálculo do fluxo de potência dentro da metodologia adotada neste estudo envolve diversas etapas essenciais para a análise do sistema elétrico. Inicialmente, destaca-se a fase de renumeração, um procedimento que facilita a representação das barras e ramos, otimizando as análises subsequentes.

O cálculo do fluxo de potência segue esse processo iterativo para determinar as tensões em cada barra da rede. Inicializando as tensões em todas as barras com valores pré-definidos, e injetadas as potências ativas e reativas, as correntes nos ramos são calculadas utilizando a Lei de Ohm e a impedância de cada ramo.

3.3.1 Implementação da Renumeração

O código desenvolvido no presente trabalho (Pereira Jr, 2024) descreve a modificação dos números associados a elementos de uma estrutura em árvore, dos circuitos elétricos, os quais representam os SDEE. O objetivo do algoritmo é renumerar as barras e os ramos, de modo a simplificar a análise da rede sob certas condições operacionais.

O algoritmo pode ser dividido em duas partes principais de renumeração: “Renumerar Ramos” (RR) e “Renumerar Barras” (RB). A função RB ajusta seus identificadores, incrementando-os com um valor baseado no número total de barras multiplicado por 100. Isso categoriza as barras em grupos centenários, para diferenciar entre as camadas seções ou tipos de barras em uma análise posterior. De forma similar, a função RR modifica os números dos ramos, também para refletir essa categorização em escala ampliada, mantendo a estrutura da árvore original.

No núcleo do algoritmo, é apresentado um processo iterativo que começa com inicializações de variáveis representando os números inicial e final de um ramo (“ne” e “ns” respectivamente), e um ponteiro para uma barra. O loop principal se desenrola enquanto esse ponteiro for menor ou igual ao número total de barras. Dentro deste loop, há um sub-loop que percorre todos os ramos conectados diretamente à barra em análise.

Durante a iteração dos ramos, o algoritmo verifica se um ramo é radial, indicando uma configuração de layout ou de funcionamento particular. Se as condições forem verdadeiras, os identificadores de ambos os extremos do ramo sendo maiores que o “número de barras * 100”,

o algoritmo decide qual extremidade do ramo será renumerada com base em uma comparação de igualdade entre um extremo do ramo e a barra atual referenciada.

Este método de escolha direciona a reconfiguração dos números de ramos e barras de modo que todos os ramos radiais possam ser diretamente associados à sua barra de origem por um novo número que reflete sua posição na estrutura maior da rede. O incremento nas iterações subsequentes permite que o algoritmo prossiga para a próxima barra e seus ramos associados.

Finalmente, o algoritmo busca a próxima barra que não foi ainda renumerada, usando um loop que percorre as barras até encontrar a última barra conectada à barra em análise. Este procedimento garante que cada barra e seus ramos associados sejam processados, renumerados adequadamente dentro de sua camada, e prontos para análises subsequentes, conforme ilustrado na Figura 2.4.

3.3.2 Implementação do Cálculo do Fluxo

A formulação das equações do fluxo de potência (Eq. 2.5 a 2.12) foi implementado no algoritmo desenvolvido, descrevendo o conjunto de procedimentos necessários para gerenciar e analisar o fluxo de potência em uma rede elétrica.

O foco principal foram os aspectos dinâmicos das tensões e correntes nas barras (pontos de conexão) e correntes e perdas ramos (linhas de transmissão) dos sistemas de distribuição.

Inicialmente, o algoritmo calcula as tensões em cada barra, bem como a corrente. O objetivo é determinar quão efetivamente a energia está sendo transportada através de diferentes seções da rede. O método começa com uma estimativa inicial para as tensões em todos os nós do sistema elétrico. Para sistemas radiais (sem laços fechados), uma estimativa típica é utilizar as tensões nominais iguais a 1 p.u. (uma unidade de medida adimensional, “*per unit*” do inglês) e zero para as correntes, em todos os nós (Possagnolo, 2015).

O algoritmo procede então uma propagação progressiva dos valores calculados de tensão ao longo da rede, começando da subestação e avança até que todos os nós tenham sido considerados. Durante esse processo, verifica-se continuamente se a tensão em qualquer barra cai abaixo de um mínimo aceitável, o que indicaria um potencial problema de distribuição ou de carga. Caso isso ocorra, a topologia em análise é imediatamente descartada.

Além disso, o algoritmo calcula a potência total injetada na subestação e as perdas de potência ao longo da rede. Isso inclui somar as correntes de ramos identificados na configuração radial. As perdas são calculadas baseadas na resistência dos ramos e nas correntes que passam por eles, o que ajuda a identificar áreas onde melhorias na infraestrutura podem reduzir o desperdício de energia.

Finalmente, uma série de iterações é realizada para ajustar os cálculos e melhorar a precisão das estimativas de perda de energia. Esse processo iterativo envolve reavaliar e ajustar

as tensões e correntes para assegurar que todos os dados estejam consistentes e reflitam as condições reais tanto quanto possível.

Resumidamente, a fase de *forward* permite calcular as tensões nas barras, e consequentemente suas correntes. A fase de *backward* permite calcular as correntes nos ramos e consequentemente suas perdas (Possagnolo, 2015).

Após a conclusão do cálculo do fluxo de potência, é realizada a restauração da numeração original. A numeração original é restituída para facilitar a análise dos resultados e a identificação dos componentes, contribuindo para uma compreensão mais intuitiva das condições operacionais do sistema elétrico após a avaliação do fluxo de potência (VAI et. al., 2021).

3.4 Implementação do Método Multistart

O método MS é uma estratégia que tem como objetivo explorar diversas topologias de redes. Nesse ponto da execução do algoritmo, as listas contendo as variáveis originais são duplicadas, criando conjuntos independentes para cada execução do MS até sua condição de parada.

Essa duplicação das listas e alteração aleatória dos pesos, proporciona pontos de partida distintos para cada execução subsequente do Algoritmo PRIM, explorando de maneira mais abrangente o espaço de busca e aumentando as chances de identificar soluções de melhor qualidade.

Apenas as topologias factíveis, ou seja, aquelas que atendem a todas as restrições do sistema, têm o fluxo de potência realizado. Caso contrário, a topologia é descartada, liberando sua alocação de memória. A modificação nos pesos resulta em diversas novas possibilidades de topologias radiais, ampliando a busca por soluções mais eficientes. Posteriormente, essas soluções são comparadas, e as mais eficientes são selecionadas em um conjunto de melhores soluções.

Como critério de parada, foi estabelecido um total de 1000 iterações para a geração de novas topologias, no pré-processamento usado na definição de constantes. O estabelecimento de um número máximo foi determinado de forma empírica, considerando um equilíbrio entre a precisão dos resultados e o custo computacional associado.

Após experimentações e análises, verificou-se que aumentar o número de iterações nos modelos de sistemas estudados, não resultava em melhorias significativas nos resultados obtidos. Pelo contrário, isso gerava um aumento desnecessário no tempo de processamento e no consumo de recursos computacionais.

3.4.1 Atribuição aleatória de novos pesos

Inicialmente, foram atribuídos pesos aos ramos, os quais são gerados a partir da potência aparente dos sistemas base, estabelecendo um critério de priorização. Após o algoritmo ler os dados originais, é realizada a ordenação dos pesos em ordem crescente, sendo que o menor peso foi inicializado com o valor “20” e, a cada ramo subsequente, foi adicionado o valor unitário.

Vale salientar que o elemento “peso” não é um atributo existente no ramo, ele é criado com base na potência aparente, a qual não pode ser alterada, entretanto o peso é recorrentemente alterado para poder determinar estes novos pontos de partida, gerando assim possibilidades de novas radiais.

A cada nova iteração do algoritmo, os pesos são inicializados, variando de forma aleatória até 40% acima ou abaixo do valor inicial. Isso introduz uma componente de aleatoriedade que afeta a trajetória da busca. Essa aleatoriedade na inicialização dos pesos pode ajudar a escapar de mínimos locais e explorar diferentes regiões do espaço de solução, contribuindo para uma busca mais abrangente.

Ao criar radiais iniciais diferentes, submetendo essa nova radial à execução do AP, o MS estabelece uma base sólida para a busca dispersa, um aspecto fundamental da metodologia proposta no presente trabalho. Essa busca por diversidade no espaço de soluções é viabilizada pela capacidade do AP de encontrar novas radiais após alterações nos pesos, explorando assim diferentes pontos de partida.

Essa adaptabilidade contribui para a formação de um Conjunto de Melhores Solução (CMS) robusto e diversificado, e conseqüentemente, ampliar as possibilidades na fase final de refinamento com o AG. O CMS é composto por todas as radiais factíveis encontradas pelo MS, ordenadas em ordem crescente de acordo com as menores perdas totais de potência.

O MS fundamenta-se na premissa de que iniciar o processo de otimização a partir de diferentes pontos de partida pode aumentar a probabilidade de encontrar uma solução mais aprimorada, especialmente em sistemas de maior complexidade. Isso se justifica pelo fato de que o AP não abrange o sistema de maneira global, dada a sua natureza gulosa.

3.5 Conjunto Soluções de Qualidade

A metodologia deste estudo incorpora o Método da Maior-Menor Distância (MMD) para formar o Conjunto de Soluções de Qualidade (CSQ), essencial na filtragem de topologias para a recombinação genética. Este método contempla não apenas as soluções mais eficientes encontradas em CMS, mas também promove a diversificação dentro do espaço de busca.

No CSQ, as 50% primeiras posições são reservadas para as topologias que apresentaram os resultados mais promissores durante a fase do MS (CMS). Esta abordagem é adotada com o

objetivo de manter a intensificação, ou seja, reter as soluções de mais alta qualidade, estabelecendo assim uma base sólida para as iterações subseqüentes do algoritmo. Contudo, reconhece-se que a exploração eficaz do espaço de busca exige a inclusão de novas possibilidades soluções.

A outra metade do CSQ é preenchida por soluções que, mesmo não figurando entre as mais eficientes em termos de perda de potência, apresentam elementos que contribuem para a diversificação do conjunto. Elementos exploratórios são incorporados ao conjunto, permitindo ao algoritmo inserir regiões menos exploradas do espaço de busca, potencialmente identificando soluções não convencionais, evitando estagnação do algoritmo em ótimos locais.

O MMD calcula a distância, comparando a radial em análise no CMS com as radiais que já compõem o CSQ. “Distância” significa verificar se um ramo da radial em análise está presente na lista de ramos da segunda radial. A distância é representada pelo número de ramos comuns entre as duas radiais, logo, a menor distância é a quantidade de ramos abertos diferentes.

A função percorre o CMS, calculando a distância entre a radial atual e cada uma das radiais do CSQ. A maior distância é armazenada em uma variável da radial em análise.

A lógica empregada consiste em marcar as radiais com maior distância em relação ao CSQ e, em seguida, preencher o conjunto com a radial que têm a menor “distância” nominal, entre todas as radiais de CMS, conforme ilustrado na Figura 3.3.

CSQ \ CMS	1	2	3	4	5	Maior
6	3	5	8	2	9	9
7	1	6	3	4	7	7
8	2	5	3	5	4	5
9	5	1	4	6	1	6
...						...

CSQ \ CMS	1	2	3	4	5	8	Maior
6	3	5	8	2	9	4	9
7	1	6	3	4	7	5	7
9	5	1	4	6	1	2	6
...							...

Figura 3.4: Método da Maior-Menor Distância.

O MMD empregado na criação do CSQ reflete uma abordagem que visa equilibrar soluções de alta qualidade encontradas pelo MS e a promoção da diversificação.

3.6 Implementação do Algoritmo Genético

A função de recombinação genética, é a etapa final desse processo de otimização. Seu funcionamento é delineado por um conjunto de passos que visam otimizar ainda mais as soluções encontradas pelo método MS.

A partir da primeira topologia do CSQ, onde os ramos representam os cromossomos, ocorre o processo de seleção de um cromossomo por meio de um método aleatório.

Esse método conhecido como “Regra da Roleta” (*Roulette Wheel Selection*), também chamado de Seleção Proporcional à Aptidão, é um método de seleção com padrão similar à roleta de um cassino, onde cada posição tem uma chance de ser selecionado de acordo com critérios previamente definidos (Vargas, 2024).

Um ponto da primeira radial é aleatoriamente escolhido, e a partir deste, cromossomos de uma segunda radial são incorporados (contanto que não estejam previamente presentes), originando assim uma nova configuração radial. Esse processo permite uma maior diversificação nas opções de solução, baseando-se nas probabilidades vinculadas às soluções já existentes.

Durante a recombinação genética, ramos de duas topologias selecionadas são mesclados para criar uma nova configuração radial. Para assegurar a viabilidade desta nova solução,

$$\begin{aligned}
 CSQ &= \{R_1, R_2, \dots, R_{20}\} \\
 \text{Sendo que:} & \quad \begin{array}{c} \text{Roleta} \\ \downarrow \\ \text{Ramos radiais} \quad \text{Ramos abertos} \end{array} \\
 R_1 &= \underbrace{\{3,4,11,5,1\}}_{\text{Parte 1}} \{9,2,8,12,16\} \{6,7,10,13,14,15\} \\
 R_2 &= \{3,4,13,7,6,2,9,10,15,14\} \{1,5,8,11,12,16\} \\
 R_{1,2} &= \underbrace{\{3,4,11,5,1,13,7,6,2,9\}}_{\text{Parte 1}} \{8,10,12,14,15,16\}
 \end{aligned}$$

verificações são realizadas para confirmar que a nova radial cumpre com os requisitos do sistema, incluindo radialidade e limitações operacionais. A Figura 3.3 ilustra o processo de Recombinação Genética empregada na metodologia proposta.

Figura 3.4: Recombinação Genética.

O tamanho do CSQ foi definido empiricamente como 20, considerando um equilíbrio entre a precisão dos resultados e o custo computacional. Esse número foi escolhido de maneira análoga à determinação do número máximo de iterações do MS. Com esta configuração, o total de novas configurações possíveis, geradas após o processo de recombinação genética, é de 380 radiais.

Após a geração de uma nova radial factível, é realizada uma avaliação da sua qualidade em termos de perdas totais de potência. Caso a nova configuração atenda aos critérios estabelecidos e não seja repetida, ela é armazenada como parte do conjunto solução. Caso contrário, as estruturas de dados são liberadas e o processo de geração de novas radiais continua.

Capítulo 4

Resultados e discussões

Para avaliar a eficácia das abordagens propostas, serão realizadas simulações em sistemas de 14, 33, 84, 136 e 415 barras. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram o potencial da metodologia adotada para encontrar soluções de boa qualidade para o problema de RSDEE. A análise dos resultados se concentrará em dois pontos principais:

- Menores perdas totais de potência: A principal meta da reconfiguração de sistemas elétricos é reduzir as perdas totais de potência. O algoritmo desenvolvido foi capaz de encontrar soluções com perdas significativamente menores do que métodos tradicionais.
- Elevação dos níveis de tensão: A reconfiguração da rede também pode contribuir para elevar os níveis de tensão em pontos críticos do sistema. O objetivo foi encontrar soluções que elevaram os níveis de tensão dentro dos limites aceitáveis, garantindo a qualidade da energia fornecida aos consumidores.
-

4.1 Sistema de 14 Barras

O sistema de 14 barras é um sistema de pequeno porte, apresentado por Civanlar et. al. (1998). Possui 14 barras de carga, sendo a barra 14 a subestação, e 16 ramos. A tensão na subestação é 23,00 kV, o limite mínimo de tensão é de 0,93 p.u. e máximo de 1,05 p.u., e a base de impedância é 1,0 Ω .

O espaço de busca total é de 2^{14} (16.384) possibilidades. Notavelmente, para o sistema de 14 barras o AP alcançou a solução ótima global, com perdas mínimas de potência, refletindo sua capacidade de estabelecer uma estrutura radial inicial eficiente.

Este fato se deu em razão deste ser um sistema teste de baixa complexidade, ou seja, com baixo número de ramos, criado para facilitar o entendimento de novos pesquisadores sobre o tema. No entanto, para sistemas mais complexos, como os sistemas de 136 e 415 barras, é necessário aplicar uma metodologia mais eficiente para encontrar soluções de melhor qualidade. A Figura 4.1 ilustra o Sistema.

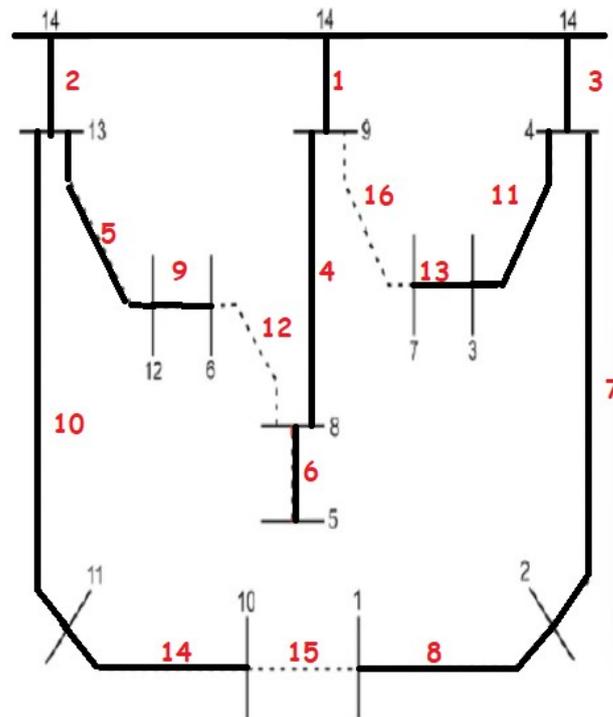


Figura 4.1: Sistema de 14 Barras

(Civanlar et. al., 1998)

A Tabela 4.1 apresenta os resultados após a execução do AP, e os resultados obtidos com o MS e AG. As Perdas totais e a Otimização (OT) são apresentadas em kW. Radiais Factíveis (RF) representa o número total de radiais encontradas após a execução do método e o Tempo de Execução (TE) é apresentado em segundos.

Tabela 4.1: Resultados Obtidos – Sistema 14 Barras

MÉTODO	PERDAS	OT	RF	TE
AP	466,13546753	-	1	0,011
MS	466,13546753	-	74	0,055
AG	466,13546753	-	156	0,078

A Figura 4.2 ilustra os perfis de tensão no sistema de 14 barras. Vale Salientar que em razão do AP ter encontrado a solução ótima global, todas as demais etapas mantem o resultado, logo, o perfil de tensão permanece inalterado, apenas sendo possível visualizar uma linha única.

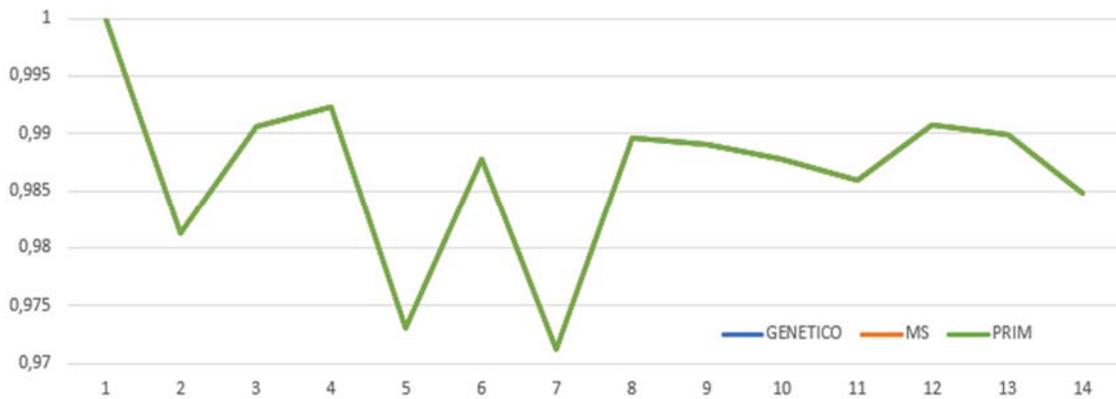


Figura 4.2: Perfil de Tensão – 14 Barras.

4.2 Sistema de 33 Barras

O sistema de 33 barras é um sistema de pequeno porte, apresentado em Baran e Wu (1989). Possui 33 barras de carga, sendo a barra 1 a subestação, e 37 ramos. A tensão na subestação é 12,66 kV, o limite mínimo de tensão é de 0,93 p.u. e máximo de 1,05 p.u., e a base de impedância é 1,6 Ω .

O espaço de busca total é de 2^{33} (8.589.934.592) possibilidades. A metodologia proposta restringe o número máximo em 1001 soluções radiais, sendo 190 novas radiais geradas na fase de Recombinação Genética, foram realizadas um total de 354 operações de cálculo do fluxo de potência. A Figura 4.3 ilustra o Sistema.

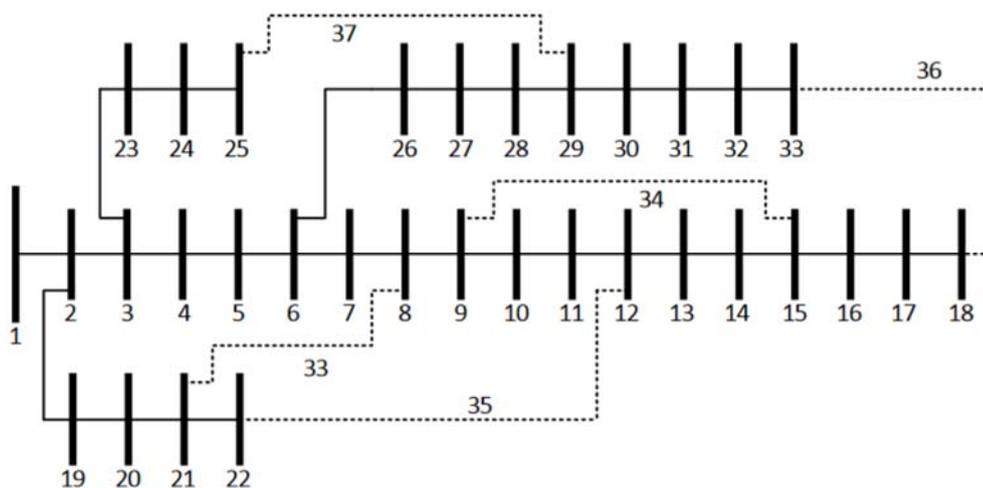


Figura 4.3: Sistema de 33 Barras.

(Baran e Wu, 1989).

A Tabela 4.2 apresenta os resultados após a execução do AP, e os resultados obtidos com o MS e AG.

Tabela 4.2: Resultados Obtidos – Sistema 33 Barras

MÉTODO	PERDAS	OT	RF	TE
Baran e Wu (1989)	202,68	-	-	-
AP	140,68	61,99	1	0,017
MS	139,95	62,72	281	0,142
AG	139,52	63,15	72	0,227

Verifica-se que o AP encontrou uma solução com perdas 30,59% menores que a configuração inicial do Sistema apresentado pelos autores (Baran e Wu, 1989). Já o método MS encontrou uma solução com perdas 30,95% menores que a solução inicial. A redução total das perdas ao final da metodologia foi de 31,16%.

A Figura 4.4 ilustra os perfis de tensão no sistema de 33 barras antes e depois da reconfiguração.

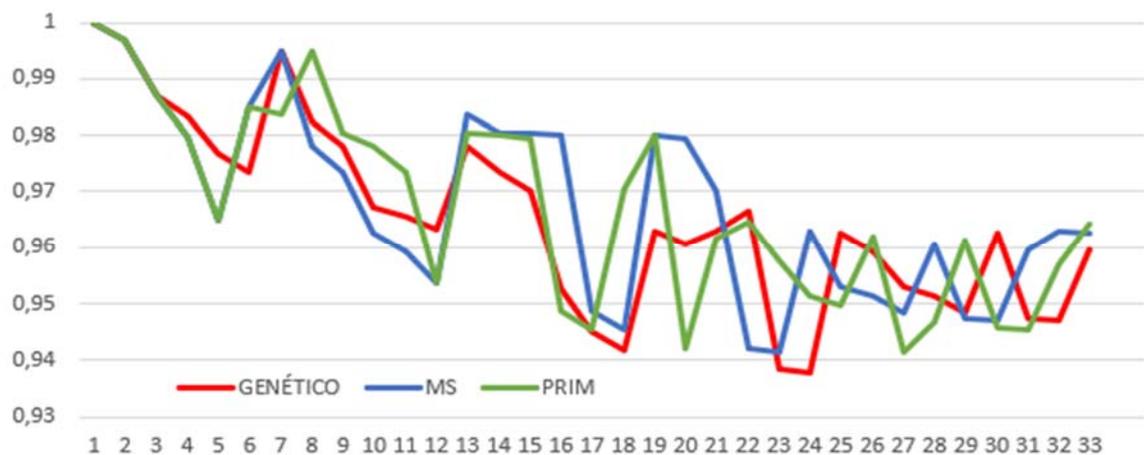


Figura 4.4: Perfil de Tensão – 33 Barras.

4.3 Sistema de 84 Barras

O sistema de 84 barras é um sistema de médio porte, apresentado em Chiou et al. (2005). Possui 84 barras de carga, sendo a barra 84 a subestação, e um total de 96 ramos. A tensão na subestação é 11,40 kV, o limite mínimo de tensão é de 0,93 p.u. e máximo de 1,05 p.u., e a base de impedância é 1,3 Ω .

O espaço de busca total seria de 2^{84} ($1,9342813 \cdot e^{25}$) possibilidades, caso não fosse realizada nenhuma estratégia de otimização. No total, após a fase de Recombinação Genética, foram realizadas 549 operações de cálculo do fluxo de potência. A Figura 4.5 ilustra o Sistema.

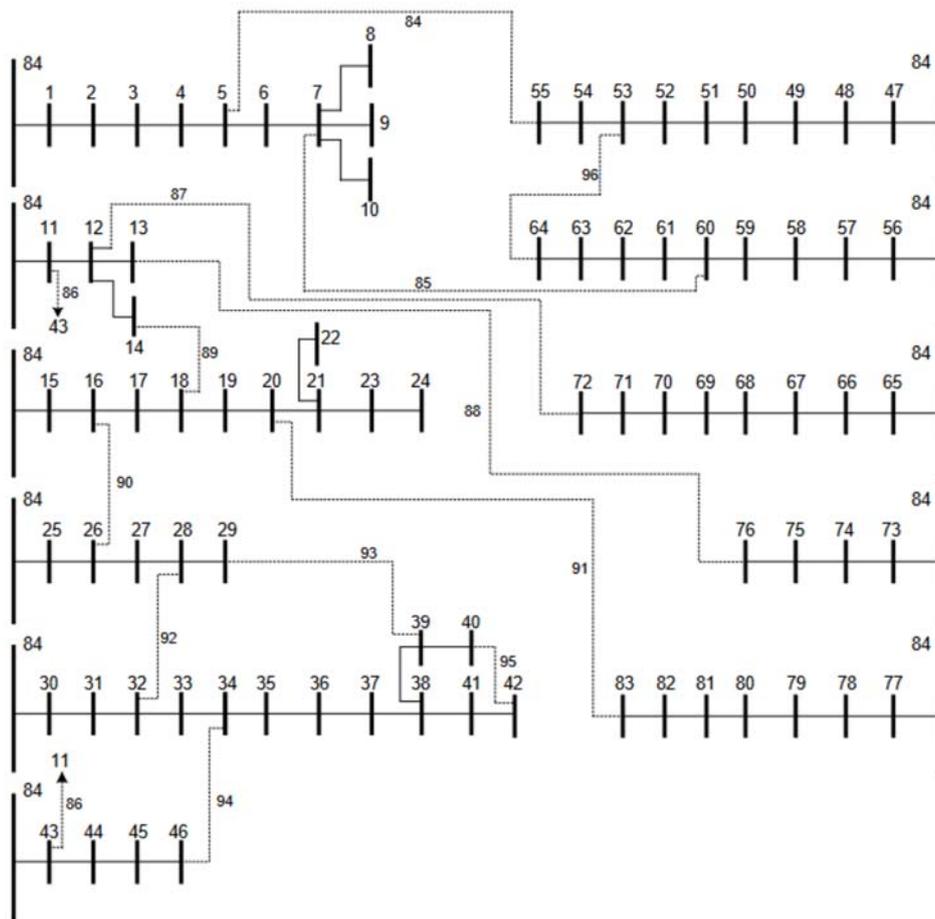


Figura 4.5: Sistema de 84 Barras.

(Chiou et al., 2005).

A Tabela 4.3 apresenta o resultado após a execução do AP, e os resultados obtidos com o MS e AG.

Tabela 4.3: Resultados Obtidos – Sistema 84 Barras

MÉTODO	PERDAS	OT	RF	TE
Configuração Inicial	531,99	-	-	-
AP	471,57	60,42	1	0,033
MS	470,65	61,34	416	0,532
AG	469,72	62,27	132	0,727

Verifica-se que o AP encontrou uma solução com perdas 11,35% menores que a configuração inicial apresentada pelos autores (Chiou et al., 2005). O método MS encontrou uma solução com perdas 11,53% menores. A redução total das perdas ao final da metodologia foi de 11,70%.

A Figura 4.6 ilustra os perfis de tensão no sistema de 84 barras durante as etapas da reconfiguração proposta pela metodologia.

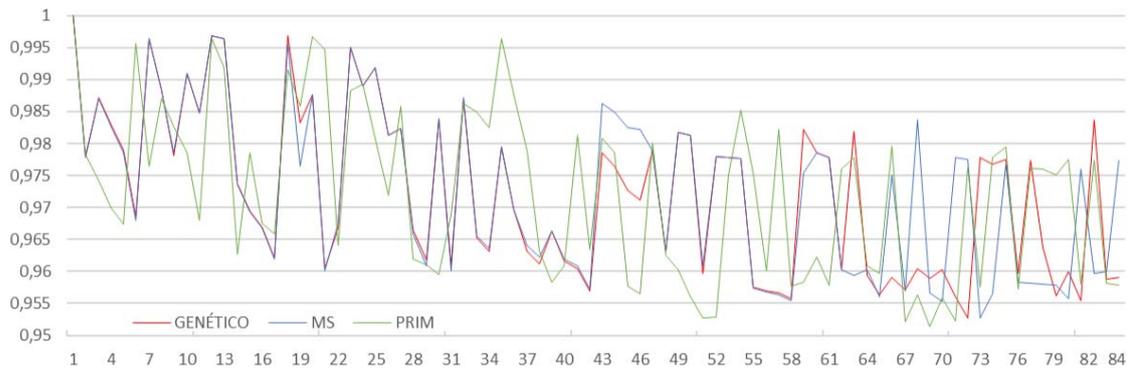


Figura 4.1: Perfil de Tensão – 84 Barras.

O sistema de 84 barras foi resolvido em Chiou et al. (2005), por Vargas et. al. (2018) e Yamamoto (2023), conforme apresentado da Tabela 4.4:

Tabela 4.4: Comparação de resultados - Sistema de 84 barras

MÉTODO	PERDAS (kW)
Configuração inicial	531,99
Chiou et al. (2005)	469,88
Vargas et. al. (2018)	469,87
Yamamoto (2023)	469,87
Metodologia Proposta	469,72

4.4 Sistema de 136 Barras

O sistema de 136 barras é um sistema real de médio porte, apresentado em Mantovani et al. (2000). Possui 136 barras de carga, sendo a barra 136 a subestação, e um total 156 ramos. A tensão na subestação é 13,80 kV, o limite mínimo de tensão é de 0,93 p.u. e máximo de 1,05 p.u., e a base de impedância é 1,9 Ω . A Figura 1 ilustra o Sistema.

O espaço de busca total seria de 2^{136} ($8,711228593176 \cdot e^{40}$) possibilidades, caso não fosse realizada nenhuma estratégia de otimização. Em que pese a metodologia proposta restringir o número máximo em 1001 soluções radiais possíveis, o espaço de busca é amplamente explorado visto a característica de aleatoriedade que o método proporciona.

Após a fase do MS, 20 radiais foram selecionadas dando origem a 190 novas radiais após a Recombinação Genética, realizando um total de 849 operações de cálculo do fluxo de potência. A Figura 4.7 ilustra o Sistema.

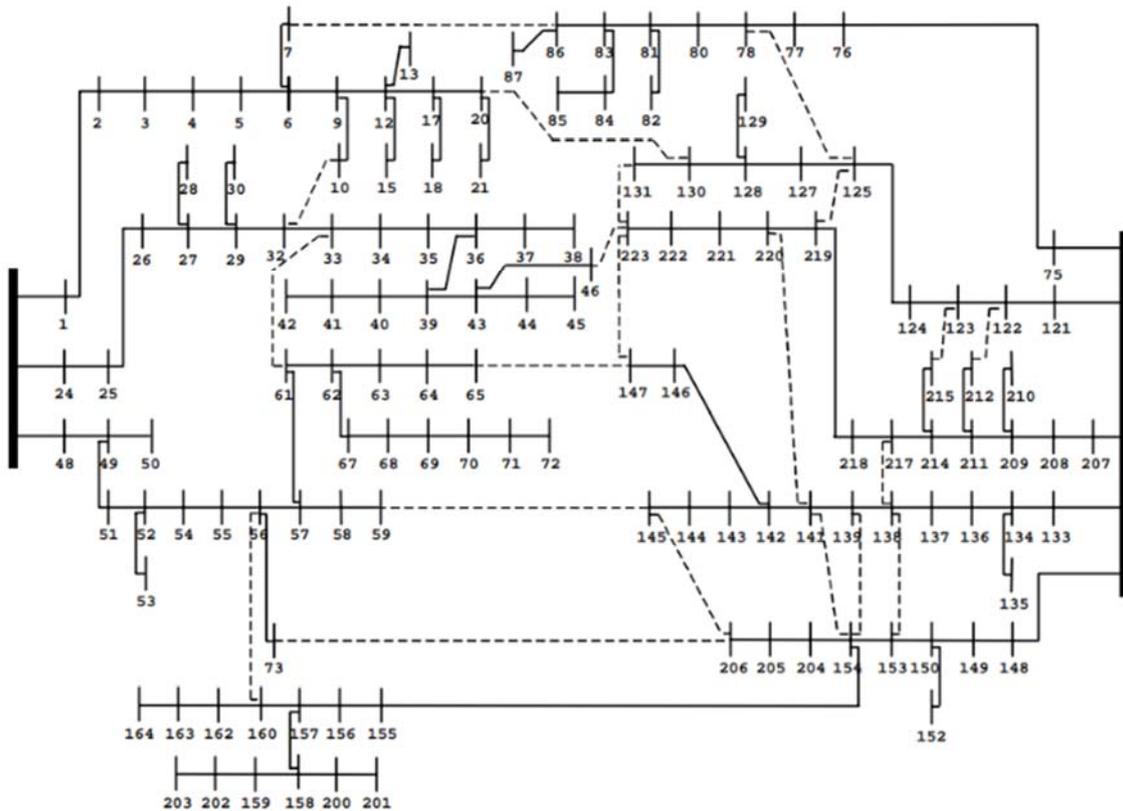


Figura 4.7: Sistema de 136 Barras.

(Mantovani et al., 2000).

A Tabela 4.5 apresenta o resultado após a execução do AP, e os resultados obtidos com o MS e AG. As Perdas totais e a Otimização (OT) são apresentadas em kW, onde a otimização é calculada sob a perspectiva da configuração inicial apresentada pelos autores (Mantovani et al., 2000). Radiais Factíveis (RF) representa o número total de radiais encontradas após a execução do método e o Tempo de Execução (TE) é apresentado em segundos.

Tabela 4.5: Resultados Obtidos – Sistema 136 Barras

MÉTODO	PERDAS	OT	RF	TE
Configuração Inicial	320,66	-	-	-
AP	293,00	27,65	1	0,047
MS	282,59	38,06	816	0,632
AG	280,37	40,28	32	0,727

Verifica-se que o 8,64%. O método MS encontrou uma solução com perdas 11,87% menores que a solução inicial. A redução total das perdas ao final da metodologia foi de 12,56%.

A Figura 4.8 ilustra os perfis de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da reconfiguração.

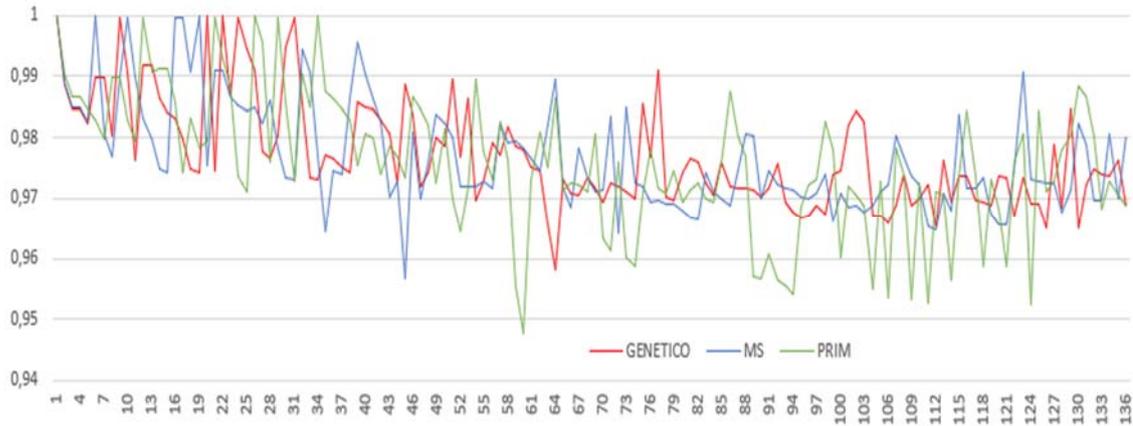


Figura 4.8: Perfil de Tensão – 136 Barras.

O sistema de 136 barras foi resolvido em Mantovani et al. (2000), por Alves (2019) e Eldurssi e O'Connell (2020), conforme apresentado da Tabela 4.6:

Tabela 4.6: Comparação de resultados - Sistema de 136 barras

MÉTODO	PERDAS (kW)
Configuração inicial	320,66
MANTOVANI et. al. (2000)	285,5
ALVES (2019)	280,4
Eldurssi e O'Connell (2020)	280,69
Metodologia Proposta	280,37

4.5 Sistema de 415 Barras

O sistema de 415 barras é um sistema de grande porte, apresentado em Bernal-Agustin (1998). Possui 415 barras de carga, sendo a barra 1 a subestação, e um total de 473 ramos. A tensão na subestação é 10,00 kV, o limite mínimo de tensão é de 0,93 p.u. e máximo de 1,05 p.u., e a base de impedância é 1,00 Ω . A Figura 3 ilustra o Sistema de 415 Barras

A complexidade do sistema é evidenciada pelo espaço de busca total, que abrange 2^{415} ($8,4615164 \cdot e^{124}$) diferentes configurações possíveis. Este número extremamente elevado torna impraticável a enumeração exaustiva de todas as configurações radiais potenciais.

Similarmente ao experimento anterior, a metodologia aplicada viabiliza a exploração eficiente deste vasto espaço de soluções, permitindo a identificação de configurações de boa qualidade mesmo diante de uma grande quantidade de alternativas. A Figura 4.9 ilustra o Sistema.

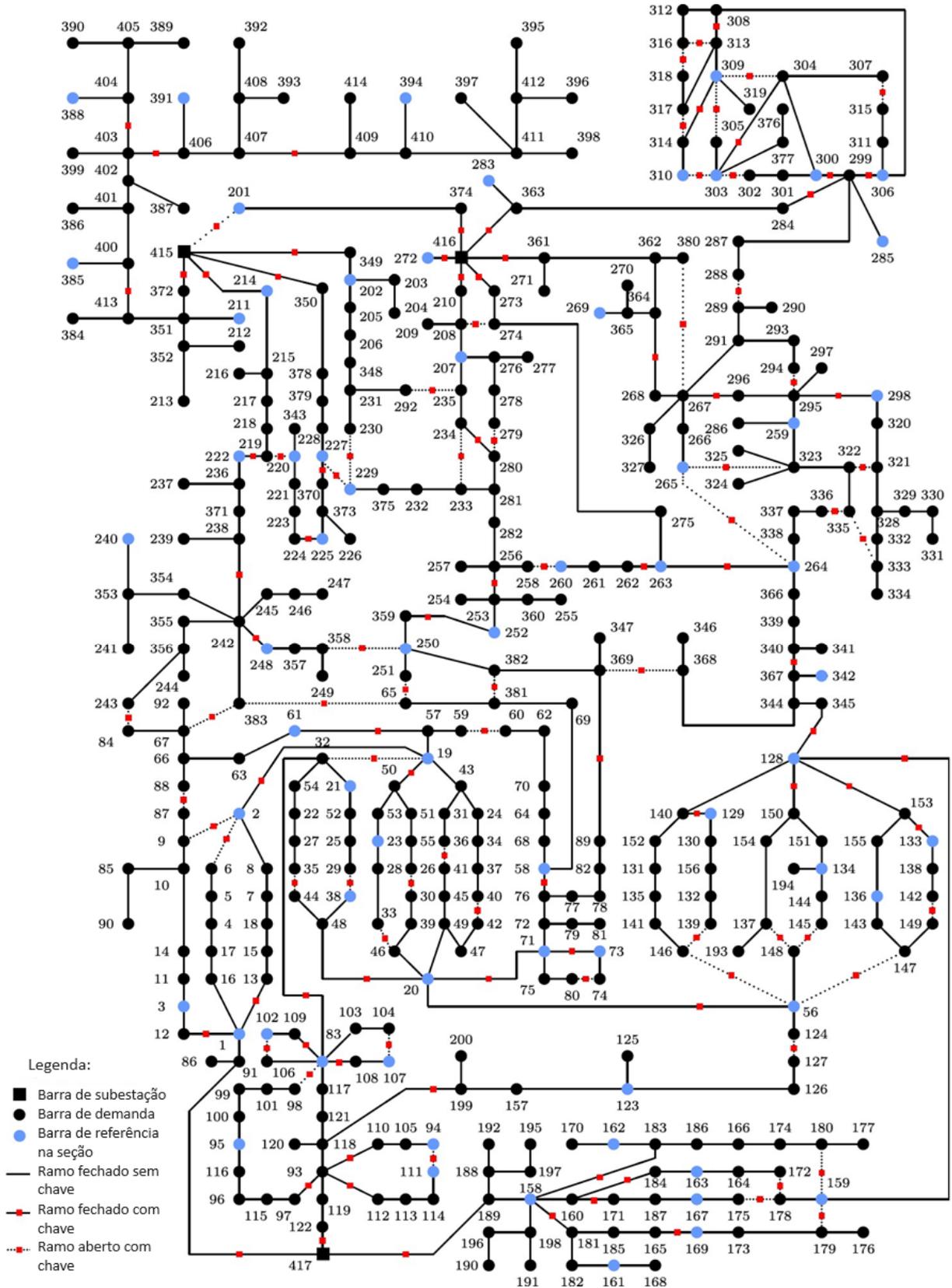


Figura 4.9: Sistema de 415 Barras - adaptado com 125 chaves e 66 seções.

(LaPSEE, 2023).

Durante toda a execução da metodologia foram realizadas um total de 456 operações de cálculo do fluxo de potência. A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.7: Resultados obtidos – Sistema de 415 barras

MÉTODO	PERDAS	OT	RF	TE
Bernal-Agustin (1998)	708,94	-	-	-
AP	662,50	46,43	1	0,063
MS	596,47	112,46	398	2,908
AG	592,68	116,25	57	4,543

Verifica-se que o AP encontrou solução 6,55% de menores perdas que a solução encontrada pela configuração inicial apresentada pelo autor (Bernal-Agustin, 1998). O método MS encontrou uma solução com perdas 15,86% menores. A redução total das perdas ao final da metodologia foi de 16,40%.

O sistema de 415 barras foi resolvido em Bernal-Agustin (1998), por Pádua et. al. (2014) e Melo e Lima (2018), conforme apresentado da Tabela 4.8:

Tabela 4.8: Comparação de resultados - Sistema de 136 barras

MÉTODO	PERDAS (kW)
Bernal-Agustin (1998)	708,94
Pádua et. al. (2014)	624,19
Melo e Lima (2018)	626,68
Metodologia Proposta	592,68

Os resultados obtidos neste trabalho, demonstram o potencial da metodologia adotada para encontrar soluções de boa qualidade para o problema de RSDEE, objetivando minimizar as perdas de potência.

A introdução do método Multistart possibilitou uma ampla exploração do espaço de busca, resultando em soluções mais eficientes. A metodologia evidencia a importância de iniciar o processo de otimização a partir de diferentes pontos de partida, contribuindo para a diversificação do conjunto de soluções e evitando convergência prematura a mínimos locais.

Em sistemas complexos, onde existem elevados números de ramos de ligação, como os Sistemas de 136 e 415 barras, o AG demonstrou resultados significativos em comparação com o estado inicial da rede, apresentando baixo esforço computacional.

Os resultados obtidos também indicam que os níveis de tensão em ambos os sistemas foram mais altos em comparação com os valores iniciais após a primeira execução do AP.

A elevação observada, sugere que a aplicação do algoritmo impactou positivamente o controle e a manutenção dos níveis de tensão no sistema, constituindo um elemento promissor para investigações mais aprofundadas.

A Figura 4.10 mostra os perfis de tensão no sistema de 415 barras antes e depois da reconfiguração.

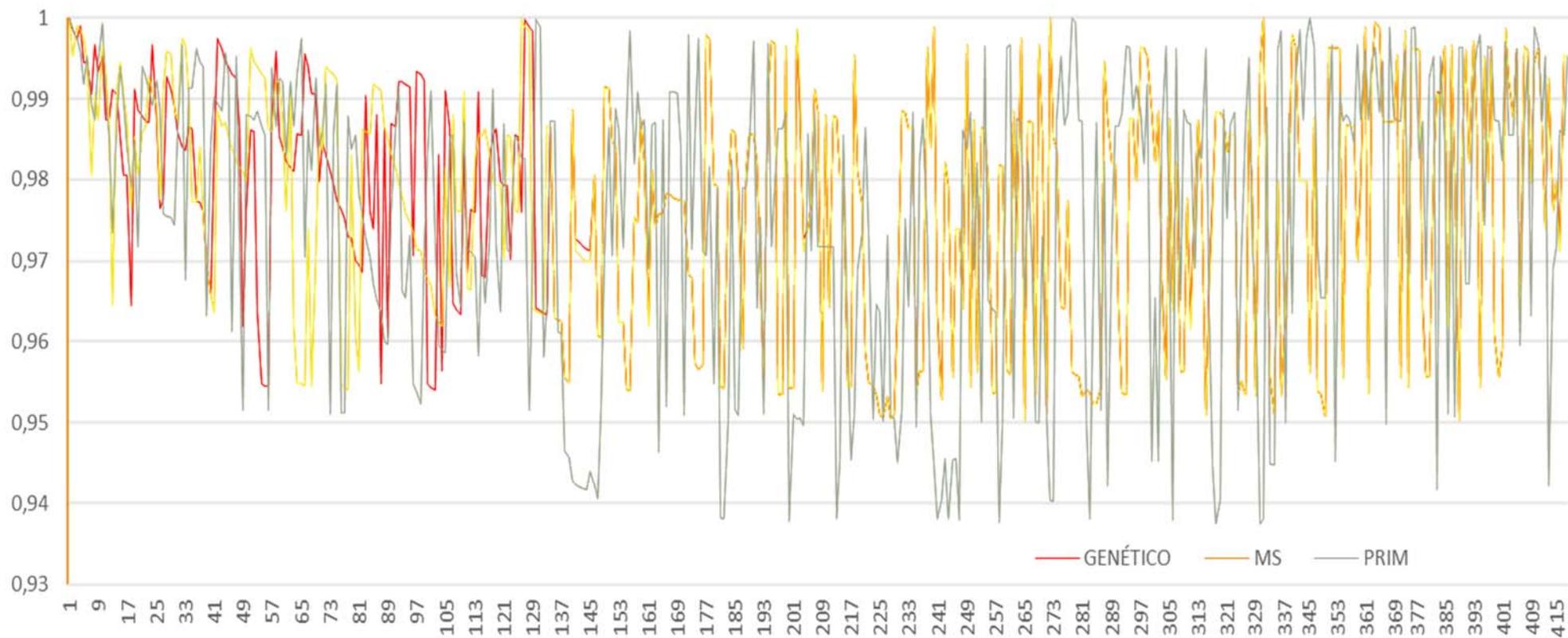


Figura 4.10: Perfil de Tensão – 415 Barras

4.6 Discussões Finais

Para a análise do presente trabalho, os sistemas estudados foram considerados operando com a demanda máxima possível. Esta abordagem foi adotada para avaliar o desempenho do sistema sob as condições mais extremas e desafiadoras, representando o pior caso em termos de demanda de consumo. Ao simular essa situação, é possível identificar possíveis pontos de falha, avaliar a resiliência do sistema e propor soluções que garantam a continuidade e a qualidade do fornecimento de energia mesmo nos momentos de maior demanda.

Todos os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos a partir da mesma execução do algoritmo desenvolvido. Ou seja, o resultado do Algoritmo Genético não é fruto de uma execução independente, mas sim, advém dos resultados obtidos a partir do Multistart.

Embora possam existir diversas execuções do MS que geraram resultados distintos, o presente trabalho optou por considerar apenas os resultados obtidos na mesma execução do algoritmo para dar origem ao resultado do AG. Essa escolha se justifica pela necessidade de garantir a comparabilidade entre os métodos, assegurando que ambos foram avaliados em condições equivalentes.

Também é importante salientar que à medida que a complexidade dos sistemas aumenta, tornam-se mais perceptíveis as divergências nos resultados. Essas disparidades podem ser atribuídas à presença de uma quantidade significativa de ramos de ligação, nos quais a busca por uma melhor solução se torna mais desafiadora. A aplicação da MS permite explorar diferentes regiões do espaço de solução, o que pode levar a resultados significativamente diferentes.

No Anexo A do presente trabalho, serão apresentados apenas os ramos desconectados dos sistemas. Esta escolha foi feita para garantir a objetividade e a clareza das informações. Dado o volume extenso dos resultados completos, essa abordagem facilita a apresentação dos dados.

Os resultados completos deste trabalho, incluindo as tensões e correntes nas barras, bem como as correntes e perdas nos ramos (conectados e desconectados), estão no repositório de dados (Pereira Jr, 2024), onde é possível acessar uma análise detalhada das medições e dos resultados obtidos, fornecendo uma visão abrangente sobre o comportamento dos sistemas estudados.

Finalizando, vale salientar que o algoritmo desenvolvido é uma ferramenta versátil que pode ser utilizada para otimizar qualquer sistema de distribuição de energia elétrica. Para tanto, é necessário que os dados de entrada do sistema estejam formatados de acordo com a padronização pré-definida. Essa padronização dos dados garante que o algoritmo possa interpretar as informações corretamente e gerar soluções otimizadas para o sistema específico.

Capítulo 5

Conclusões

A importância fundamental de encontrar soluções eficientes para o problema da RSDEE torna-se evidente, considerando o impacto direto desse recurso vital na vida cotidiana. A utilização de métodos avançados de otimização, como a combinação de diferentes técnicas, contribuiu significativamente para a formulação de estratégias que não apenas atendem aos requisitos técnicos, mas também consideram aspectos econômicos e ambientais.

No horizonte das possibilidades futuras, a expansão da análise para incluir sistemas com Geração Distribuída e a consideração da interação entre outras metaheurísticas prometem uma compreensão ainda mais completa e integrada da rede elétrica. A adaptação das estratégias propostas para cenários de microrredes e a integração eficiente de fontes de energia renovável destacam-se como caminhos promissores para aprimorar ainda mais a resiliência e a sustentabilidade dos sistemas de distribuição.

A metodologia proposta não apenas se mostrou eficaz na resolução de problemas específicos dos SDEE teste, mas também possui um potencial significativo para aplicação em cenários reais. Além disso, sua flexibilidade e adaptabilidade tornam-na uma ferramenta valiosa para enfrentar desafios em outras áreas que demandam soluções para problemas de otimização complexos.

A capacidade de integrar diversas técnicas de otimização e considerar múltiplos aspectos, como técnicos, econômicos e ambientais, amplia as possibilidades de aplicação desta abordagem, proporcionando avanços não apenas no campo da engenharia elétrica, mas também em setores como logística, gestão de recursos, sistemas hídricos e planejamento urbano. Com isso, a metodologia aqui desenvolvida se consolida como uma contribuição relevante para a busca de soluções eficientes e sustentáveis em diversas esferas.

Dessa forma, as conclusões extraídas desta pesquisa enfatizam a necessidade de encontrar melhores soluções para os desafios enfrentados pelos SDEE. Diante do impacto significativo desse recurso no modo de vida atual, a continuidade dos estudos nesta área é essencial para moldar a infraestrutura elétrica do futuro e garantir um fornecimento confiável e eficiente de energia para todas as pessoas.

Referência Bibliográficas

- Aneel (2023). Agência nacional de energia elétrica. Perda de Energia Elétrica na Distribuição, Agência Nacional de Energia Elétrica. Acesso em 27/01/2023 URL: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/perdasenergias#!>
- Alves, B. P. (2019). Busca Tabu Reformulada aplicada ao problema de operação de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira.
- Baran, M. E.; WU, F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 4, n. 2, p. 1401-1407.
- Barbulescu C., Kilyeni S., Oros C., Bittenbinder A. and Salinschi M., (2021). "Heuristic and Metaheuristic Techniques based Distribution Network Reconfiguration. Case study: IEEE 33 Bus System," *2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, Craiova, Romania, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICATE49685.2021.9465030;
- Bernal-Agustin, J. L. (1998). Application of genetic algorithms to the optimal design of power distribution systems. 1998. 346f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - University of Zaragoza, Zaragoza.
- Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H., & Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), 1217-1223.
- Chiou, J. P.; Chang, C. F.; SU, C. T. (2005). Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York.
- Cossi, A. M. (2008). Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira.
- EPE (2023), Empresa de Pesquisas Energéticas. Acesso em 27/01/2023 URL: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>.
- Eldurssi, A. M., & O'Connell, R. M. (2014). A fast nondominated sorting guided genetic algorithm for multi-objective power distribution system reconfiguration problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(2), 593-601.
- Ferreira, O. J. N. (2022). Algoritmo genético de chaves aleatórias viciadas e recozimento simulado aplicados ao problema da reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica considerando técnicas de reinicialização e hibridização. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- Gautam, M., Bhusal, N., Benidris, M., & Louis, S. J. (2020). A spanning tree-based genetic algorithm for distribution network reconfiguration. *Industry applications society annual meeting. IEEE*, p. 1-6.

- Gerez, C., Belati, E. A., Costa, E. C., & Sguarezi Filho, A. J. (2020). Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Trifásicos Desequilibrados com Demanda Variável por meio de uma Técnica Meta-heurística Bioinspirada. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, 1(1).
- Guimarães, M. A. N. (2009). *Plataforma Integrada para o Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Metaheurísticas*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.
- Jakus, D., Čadenović, R., Vasilj, J., & Sarajčev, P. (2020). Optimal reconfiguration of distribution networks using hybrid heuristic-genetic algorithm. *Energies*, 13(7), 1544.
- Kahouli, O; Boubaker, S; Kolsi, L. (2022). Distribution Network Reconfiguration for reliability Enhancement via Genetic Algorithm approach. In: 2022 5th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA). IEEE. p. 1-6.
- Kaplan, M.; Braunstein, A. (1981). Contribution to the Determination of the Optimum Site for Substations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*.
- Kawambwa, S., Mwifunyi, R., Mnyanghwalo, D., Hamisi, N., Kalinga, E., & Mvungi, N. (2021). An improved backward/forward sweep power flow method based on network tree depth for radial distribution systems. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 8, 1-18.
- Knight, U.G.W. (1960). The logical design of electrical networks using linear programming methods. *Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering*.
- Lapsee (2023). Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica: banco de dados. Acesso em 27/01/2023.
- URL:** <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193/>.
- Luo L., Ma J., Wang H., Luo S. (2020). "Optimal Network Reconfiguration Using Beetle Antennae Search Based on the Prim Algorithm," 2020 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), Zhanjiang, China, pp. 656-660, doi: 10.1109/YAC51587.2020.9337690.
- Mantovani, J. R. S.; Casari, F.; Romero, R. (2000). Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *SBA Controle e Automação*, Heidelberg.
- Marinho, M. R. (2020). Otimização do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica por meio das Meta-Heurísticas Busca Tabu, GRASP e Path Relinking. Tese (Doutorado em Engenharia elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha solteira.
- Mahdavi M., Alhelou H. H., Bagheri A., Djokic S. Z., Ramos R. A. V. (2021). "A Comprehensive Review of Metaheuristic Methods for the Reconfiguration of Electric Power Distribution Systems and Comparison With a Novel Approach Based on Efficient Genetic Algorithm," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 122872-122906, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3109247.
- Melo, SFRC; Lima, BSLP. (2018). Optimization of distribution network topology with genetic algorithms in GIS environment. *Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. IEEE, p. 1-6.

- Míguez, E., Cidrás, J., Díaz-Dorado, E., & García-Dornelas, J. L. (2002). An improved branch-exchange algorithm for large-scale distribution network planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(4), 931-936.
- Montemuzzo, J.F. (2016). Influência dos parâmetros e modelos de linhas na solução do fluxo de carga de sistemas de distribuição de energia elétrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu.
- Montsutsumi, M. M., Alves, B. P., Macedo, L. H., & Romero, R. (2019). Reconfiguração de alimentadores e alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais usando uma meta-heurística multipartida. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA* (Vol. 1, No. 1).
- Nara, K. (1992). Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum re-configuration. *IEEE Trans. on Power Systems*, 5, 1902-1909.
- Nour, M., Chaves-Ávila, J. P., Magdy, G., & Sánchez-Miralles, Á. (2020). Review of positive and negative impacts of electric vehicles charging on electric power systems. *Energies*, 13(18), 4675.
- Pádua, S. G. B.; Mantovani, J.R.S; Cossi, A.M. (2015). Planning medium-voltage electric power distribution systems through a scatter search algorithm. *IEEE Latin America Transactions*, v. 13, n. 8, p. 2637-2645.
- Pereira Jr, W. G. DSR - Genetic Algorithm. GitHub Data (2024). Available at: <https://github.com/garciaguibor/DSR-Genetic-Algorithm.git>;
- Possagnolo, L. H. F. M. (2015). Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira.
- Prim, R. C. Shortest Connection Networks and Some Generalizations. *Bell System Technical Journal*, v. 36, n. 6, novembro, 1957.
- Sakae, Y., Zhang, B. W., Levy, R. M., & Deng, N. (2020). Absolute protein binding free energy simulations for ligands with multiple poses, a thermodynamic path that avoids exhaustive enumeration of the poses. *Journal of computational chemistry*, 41(1), 56-68.
- Shaheen, A. M., El-Sehiemy, R. A., Kamel, S., Elattar, E. E., & Elsayed, A. M. (2021). Improving distribution networks' consistency by optimal distribution system reconfiguration and distributed generations. *IEEE Access*, 9, 67186-67200.
- Silveira, C. L. B., Tabares, A., Faria, L. T., & Franco, J. F. (2021). Mathematical optimization versus Metaheuristic techniques: A performance comparison for reconfiguration of distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 196, 107272.
- Tatipally, S.; Ankeshwarapu, S.; Maheswarapu, S. (2022). Swarm intelligence methods for optimal network reconfiguration of distribution system. In: *2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*. IEEE, p. 1-6.
- Vai, V., Suk, S., Lorm, R., Chhlonh, C., Eng, S., & Bun, L. (2021). Optimal reconfiguration in distribution systems with distributed generations based on modified sequential switch opening and exchange. *Applied Sciences*, 11(5), 2146.

- Vargas, R.; Romero, R.; Franco, J.F. (2018). Biased Random-Key Genetic Algorithm Applied to the Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems. In: 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA). Ieee, p. 1-5.
- Vargas, G.A.D. (2024); Mosquera, D.J.; Trujillo, E.R. Optimization of Topological Reconfiguration in Electric Power Systems Using Genetic Algorithm and Nonlinear Programming with Discontinuous Derivatives. *Electronics*, v. 13, n. 3, p. 616.
- Wall, D. L.; Thompson, G. L.; Northcote-Green, J. E. D. (1979) An optimization model for planning radial distribution networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*.
- Yamamoto, R.Y.S (2023). GRASP com path relinking aplicado ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira.
- Zeng, R.; Pan, X.; He, J.; Sheng, X (2022); Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution system. In: 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering. TENCOM'02. Proceedings. IEEE.

ANEXO A

Resultados Sistema de 14 Barras - Ramos Desconectados:

Ramo: 12 -- Barra: 8 -- Para: 6

Ramo: 16 -- Barra: 9 -- Para: 7

Ramo: 15 -- Barra: 10 -- Para: 1

Resultados Sistema de 33 Barras - Ramos Desconectados:

Ramo: 16 -- Barra: 25 -- Para: 29

Ramo: 34 -- Barra: 14 -- Para: 15

Ramo: 29 -- Barra: 7 -- Para: 8

Ramo: 35 -- Barra: 9 -- Para: 10

Ramo: 33 -- Barra: 32 -- Para: 33

Resultados Sistema de 84 Barras - Ramos Desconectados:

Ramo: 50 -- Barra: 16 -- Para: 26

Ramo: 78 -- Barra: 6 -- Para: 7

Ramo: 55 -- Barra: 71 -- Para: 72

Ramo: 81 -- Barra: 33 -- Para: 34

Ramo: 58 -- Barra: 28 -- Para: 32

Ramo: 83 -- Barra: 54 -- Para: 55

Ramo: 64 -- Barra: 12 -- Para: 13

Ramo: 89 -- Barra: 38 -- Para: 39

Ramo: 68 -- Barra: 82 -- Para: 83

Ramo: 94 -- Barra: 14 -- Para: 18

Ramo: 73 -- Barra: 11 -- Para: 43

Ramo: 95 -- Barra: 41 -- Para: 42

Ramo: 74 -- Barra: 61 -- Para: 62

Resultados Sistema de 136 Barras - Ramos Desconectados:

Ramo: 67 -- Barra: 91 -- Para: 104

Ramo: 113 -- Barra: 90 -- Para: 129

Ramo: 68 -- Barra: 66 -- Para: 79

Ramo: 114 -- Barra: 134 -- Para: 135

Ramo: 73 -- Barra: 79 -- Para: 131

Ramo: 115 -- Barra: 48 -- Para: 51

Ramo: 75 -- Barra: 92 -- Para: 132

Ramo: 116 -- Barra: 125 -- Para: 126

Ramo: 87 -- Barra: 89 -- Para: 90

Ramo: 118 -- Barra: 128 -- Para: 77

Ramo: 92 -- Barra: 6 -- Para: 7

Ramo: 120 -- Barra: 92 -- Para: 104

Ramo: 98 -- Barra: 104 -- Para: 118

Ramo: 124 -- Barra: 105 -- Para: 106

Ramo: 125 -- Barra: 15 -- Para: 83

Ramo: 126 -- Barra: 84 -- Para: 135

Ramo: 128 -- Barra: 9 -- Para: 24

Ramo: 131 -- Barra: 31 -- Para: 35

Ramo: 136 -- Barra: 54 -- Para: 55

Ramo: 139 -- Barra: 50 -- Para: 96

Ramo: 145 -- Barra: 95 -- Para: 96

Resultados Sistema de 415 Barras - Ramos Desconectados:

Ramo: 76 -- Barra: 381 - Para: 268

Ramo: 95 -- Barra: 280 - Para: 281

Ramo: 146 -- Barra: 58 - Para: 20

Ramo: 154 -- Barra: 235 - Para: 234

Ramo: 156 -- Barra: 77 - Para: 78

Ramo: 166 -- Barra: 160 - Para: 180

Ramo: 183 -- Barra: 265 - Para: 266

Ramo: 184 -- Barra: 6 - Para: 7

Ramo: 186 -- Barra: 382 - Para: 66

Ramo: 188 -- Barra: 21 - Para: 72

Ramo: 203 -- Barra: 296 - Para: 295

Ramo: 204 -- Barra: 221 - Para: 220

Ramo: 205 -- Barra: 259 - Para: 261

Ramo: 209 -- Barra: 176 - Para: 179

Ramo: 228 -- Barra: 234 - Para: 233

Ramo: 229 -- Barra: 251 - Para: 252

Ramo: 238 -- Barra: 84 - Para: 99

Ramo: 241 -- Barra: 384 - Para: 68

Ramo: 242 -- Barra: 20 - Para: 33

Ramo: 255 -- Barra: 173 - Para: 179

Ramo: 261 -- Barra: 230 - Para: 228

Ramo: 262 -- Barra: 275 - Para: 209

Ramo: 274 -- Barra: 149 - Para: 138

Ramo: 284 -- Barra: 135 - Para: 145

Ramo: 288 -- Barra: 324 - Para: 266

Ramo: 291 -- Barra: 88 - Para: 89

Ramo: 304 -- Barra: 310 - Para: 305

Ramo: 306 -- Barra: 160 - Para: 181

Ramo: 308 -- Barra: 150 - Para: 148

Ramo: 314 -- Barra: 292 - Para: 290

Ramo: 319 -- Barra: 309 - Para: 313

Ramo: 326 -- Barra: 232 - Para: 293

Ramo: 341 -- Barra: 323 - Para: 322

Ramo: 343 -- Barra: 345 - Para: 369

Ramo: 349 -- Barra: 305 - Para: 308

Ramo: 350 -- Barra: 105 - Para: 108

Ramo: 351 -- Barra: 337 - Para: 338

Ramo: 354 -- Barra: 61 - Para: 60

Ramo: 363 -- Barra: 49 - Para: 39

Ramo: 377 -- Barra: 49 - Para: 45

Ramo: 379 -- Barra: 334 - Para: 336

Ramo: 384 -- Barra: 41 - Para: 43

Ramo: 387 -- Barra: 202 - Para: 1

Ramo: 390 -- Barra: 304 - Para: 306

Ramo: 392 -- Barra: 148 - Para: 57

Ramo: 393 -- Barra: 29 - Para: 34

Ramo: 401 -- Barra: 310 - Para: 315

Ramo: 405 -- Barra: 75 - Para: 81

Ramo: 409 -- Barra: 318 - Para: 315

Ramo: 411 -- Barra: 140 - Para: 147

Ramo: 418 -- Barra: 46 - Para: 42

Ramo: 422 -- Barra: 3 - Para: 10

Ramo: 433 -- Barra: 107 - Para: 103

Ramo: 441 -- Barra: 359 - Para: 251

Ramo: 450 -- Barra: 147 - Para: 142

Ramo: 452 -- Barra: 303 - Para: 304

Ramo: 453 -- Barra: 27 - Para: 31

Ramo: 457 -- Barra: 95 - Para: 112

Ramo: 460 -- Barra: 319 - Para: 318