

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCIO JUNIO CARDOSO DOS SANTOS

**OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
CONSIDERANDO RECONFIGURAÇÃO DINÂMICA.**

Itumbiara - GO

2026



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E
TECNOLOGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E
PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Marcio Junio Cardoso dos Santos

Matrícula: 20201040070026

Título do Trabalho: Otimização da operação de sistemas de distribuição considerando reconfiguração dinâmica.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Documento assinado digitalmente
MARCIO JUNIO CARDOSO DOS SANTOS
Data: 29/04/2026 14:43:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Itumbiara-GO, 24/04/2026.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

MARCIO JUNIO CARDOSO DOS SANTOS

**OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
CONSIDERANDO RECONFIGURAÇÃO DINÂMICA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr Diogo Soares Resende

Itumbiara - GO

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S237o Santos, Marcio Junio Cardoso dos
Otimização da operação de sistemas de distribuição considerando reconfiguração dinâmica. / Marcio Junio Cardoso dos Santos. – Itumbiara, 2026.
60 p.: il.

Trabalho de conclusão do curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Soares Resende.

1. Energia elétrica. 2. Algoritmo genético. 3. Qualidade. I. Título. II. Resende, Diogo Soares. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.3191

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

Marcio Junio Cardoso dos Santos

OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO RECONFIGURAÇÃO DINÂMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 12 de fevereiro de 2026, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dsc. Diogo Soares Resende - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. DSc. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente - Membro interno

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Profa. MSc. Thaissa de Melo César - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Itumbiara – GO

Documento assinado eletronicamente por:

- **Thaissa de Melo Cesar**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/04/2026 18:18:29.
- **Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/04/2026 15:44:34.
- **Diogo Soares Resende**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/04/2026 15:09:24.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/04/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 770310

Código de Autenticação: 60222461de



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Meirivane, por sempre ter me apoiado na jornada rumo ao conhecimento e pelo cuidado incondicional, acreditando na minha capacidade mesmo diante das adversidades.

À minha esposa, Talita, que esteve ao meu lado em todos os momentos, compartilhando dificuldades e conquistas, fortalecendo-me nos períodos de desânimo e sendo a pessoa que escolhi para a vida.

À minha filha, Sofia, que chegou durante minha formação acadêmica e se tornou uma das minhas maiores motivações para buscar um futuro melhor. Que eu possa ajudá-la a trilhar um caminho de sucesso.

Ao meu filho, Samuel, cuja chegada foi descoberta durante o desenvolvimento deste trabalho, trazendo um novo significado a cada esforço realizado. Mesmo antes de nascer, já se tornou fonte de inspiração, força e esperança para a construção de um futuro melhor.

Aos professores do campus, pela imensa contribuição ao meu desenvolvimento acadêmico, e a todos os funcionários, que mantêm um ambiente essencial e enriquecedor para o aprendizado.

Aos amigos e colegas de curso, pelo apoio mútuo, incentivo constante e pela amizade construída ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador, professor Diogo, pelo suporte, paciência e dedicação em me guiar no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo nessa trajetória, tornando minha caminhada mais feliz, significativa e harmoniosa.

RESUMO

O crescimento contínuo do consumo de energia elétrica, impulsionado pela expansão industrial e pelo avanço tecnológico, impõe novos desafios à operação dos sistemas de distribuição, especialmente no que se refere à eficiência energética e à manutenção da qualidade do fornecimento. Nesse contexto, técnicas de reconfiguração de redes surgem como alternativas para a melhoria do desempenho elétrico e operacional desses sistemas. Este trabalho propõe uma metodologia de otimização aplicada à reconfiguração dinâmica de redes de distribuição, baseada na integração entre os ambientes MATLAB e OpenDSS. A metodologia emprega um Algoritmo Genético como ferramenta de busca, responsável por determinar sequências ótimas de configurações de chaves ao longo de um horizonte diário de operação. O processo de otimização considera, de forma conjunta, indicadores elétricos como perdas ôhmicas, perfil de tensões e fator de desequilíbrio, incorporando penalizações fundamentadas nos limites de qualidade de energia estabelecidos pelo PRODIST. Além das penalizações elétricas, o estudo introduz diferentes níveis de penalização por chaveamento, permitindo avaliar o impacto das restrições operativas sobre as soluções ótimas encontradas. Os ensaios foram conduzidos em sistemas de distribuição padronizados, adaptados para a inserção de dispositivos de manobra adicionais, possibilitando uma análise mais abrangente do comportamento do algoritmo frente a alterações topológicas. Os resultados obtidos evidenciam que o algoritmo genético é capaz de adaptar suas soluções conforme o nível de penalização adotado, promovendo reduções de perdas e melhorias nos indicadores de qualidade da energia quando há maior flexibilidade operativa, e priorizando a estabilidade e a minimização de intervenções em cenários mais restritivos. Dessa forma, a metodologia proposta demonstra-se eficaz como ferramenta de apoio à análise e à tomada de decisão na operação de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Palavras-chave: Reconfiguração de redes, Sistemas de distribuição, Algoritmo Genético, OpenDSS, Qualidade da energia elétrica.

ABSTRACT

The continuous growth in electricity consumption, driven by industrial expansion and technological advancement, imposes new challenges on the operation of distribution systems, particularly with regard to energy efficiency and the maintenance of supply quality. In this context, network reconfiguration techniques emerge as effective alternatives to improve the electrical and operational performance of these systems. This work proposes an optimization methodology applied to the dynamic reconfiguration of distribution networks, based on the integration between MATLAB and OpenDSS environments. The methodology employs a Genetic Algorithm as a search tool, responsible for determining optimal sequences of switching configurations over a daily operating horizon. The optimization process jointly considers electrical indicators such as ohmic losses, voltage profile, and voltage unbalance factor, incorporating penalty terms based on the power quality limits established by PRODIST. In addition to electrical penalties, the study introduces different levels of switching penalties, allowing the evaluation of the impact of operational constraints on the optimal solutions obtained. The tests were carried out on standardized distribution systems adapted to include additional switching devices, enabling a broader analysis of the algorithm's behavior under topological changes. The results demonstrate that the genetic algorithm is capable of adapting its solutions according to the adopted penalty level, promoting loss reduction and improvements in power quality indicators when greater operational flexibility is available, while prioritizing stability and minimizing switching operations in more restrictive scenarios. Therefore, the proposed methodology proves to be an effective decision-support tool for the analysis and operation of electric power distribution systems.

Keywords: Network reconfiguration, Distribution systems, Genetic Algorithm, OpenDSS, Power quality.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Justificativa.....	8
1.2 Objetivo Geral.....	10
1.3 Objetivos Específicos.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Qualidade da Energia Elétrica.....	11
2.2 Reconfiguração de Redes.....	12
2.3 Algoritmos Genéticos.....	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1 Ferramentas computacionais.....	15
3.2 Modelagem do sistema de distribuição.....	16
3.3 Modelagem das cargas e cenários operativos.....	18
3.4 Grandezas elétricas analisadas.....	20
3.5 Função objetivo e penalizações.....	22
3.6 Algoritmo Genético aplicado à reconfiguração.....	24
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E AVALIAÇÃO DO ALGORITMO.....	31
4.1 Descrição dos cenários de simulação.....	31
4.2 Configuração dos sistemas analisados.....	34
4.3 Definição dos níveis de penalização por chaveamento.....	38
4.4 Impacto da penalização por chaveamento	42
4.5 Influência das penalizações elétricas no processo de otimização.....	44
4.6 Análise comparativa dos resultados e considerações operativas.....	46
5 CONCLUSÕES.....	57
5.1 Conclusões.....	57
5.2 Trabalho Futuros.....	58
REFERÊNCIAS.....	60

1 Introdução

Com o avanço da ciência e da tecnologia, a necessidade humana por energia elétrica tem se tornado cada vez mais crescente. Para atender a essa demanda, a engenharia elétrica tem se dedicado a desenvolver soluções capazes de garantir o fornecimento seguro e eficiente de energia, recurso essencial para a vida moderna. No Brasil, a matriz elétrica é predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica (EPE, 2023). Essa característica deve-se, em grande parte, à disponibilidade de recursos hídricos no território nacional. Entretanto, o sistema elétrico brasileiro é altamente complexo, não apenas pela predominância da fonte hidráulica, mas também pela diversificação crescente, impulsionada pelo avanço de fontes alternativas como a solar e a eólica.

De forma geral, a cadeia de produção de energia elétrica compreende três etapas fundamentais: geração, transmissão e distribuição. A geração ocorre com a conversão de diferentes formas de energia - mecânica, térmica ou química - em energia elétrica. Em seguida, a transmissão é responsável por transportar grandes blocos de energia, geralmente a longas distâncias, conectando centrais geradoras às subestações. Esse processo é realizado em níveis elevados de tensão, a fim de reduzir perdas e aumentar a eficiência no transporte.

Por fim, a distribuição assume a função de adequar os níveis de tensão para possibilitar o consumo nos centros urbanos e áreas rurais, interligando as redes de transmissão aos consumidores finais. Essa etapa é caracterizada por grande complexidade, pois atende diretamente uma diversidade de consumidores e deve garantir confiabilidade, qualidade e continuidade no fornecimento de energia elétrica (ANEEL, 2023). Diante desse contexto, este trabalho tem como foco a operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica, com ênfase na reconfiguração de redes como alternativa para melhorar o desempenho do sistema, reduzindo perdas técnicas e elevando a qualidade da energia entregue aos consumidores.

1.1 Justificativa

O setor de distribuição de energia elétrica representa uma das etapas mais críticas da cadeia energética, pois conecta diretamente o sistema elétrico aos consumidores finais. Nesse nível, fatores como perdas técnicas, desequilíbrios de tensão e interrupções no fornecimento podem

impactar significativamente a qualidade do serviço prestado. Além disso, a crescente inserção de novas fontes de energia e a variabilidade da demanda tornam a operação dos sistemas de distribuição ainda mais desafiadora(ANEEL, 2023; EPE, 2023).

Tradicionalmente, a operação e a reconfiguração de redes de distribuição são realizadas a partir de procedimentos operacionais pré-definidos ou com base na experiência das equipes técnicas das concessionárias. Em muitos casos, a definição das configurações de rede ocorre de forma estática ou por meio de análises pontuais, sem considerar de forma simultânea todos os indicadores elétricos relevantes do sistema. Embora essas abordagens sejam amplamente utilizadas na prática, elas apresentam limitações importantes, principalmente diante da crescente complexidade dos sistemas de distribuição modernos.

Entre as principais limitações das abordagens tradicionais destacam-se a dificuldade de analisar um grande número de combinações possíveis de estados de chaves, a limitação na consideração simultânea de múltiplos critérios de desempenho como perdas elétricas, níveis de tensão e equilíbrio entre fases, e a necessidade de respeitar diversas restrições operativas, como manutenção da radialidade da rede, limites de tensão e redução de manobras excessivas. Essas restrições tornam o problema de reconfiguração altamente complexo do ponto de vista computacional, caracterizando-o como um problema de otimização combinatória de grande escala.

Na literatura científica, diversos métodos têm sido propostos para lidar com esse problema, incluindo técnicas heurísticas, metaheurísticas e algoritmos de otimização aplicados à análise de sistemas elétricos de potência (SILVA, JP., 2020). No entanto, muitos desses estudos concentram-se predominantemente na minimização de perdas elétricas, frequentemente sem considerar de forma integrada outros indicadores de qualidade da energia ou restrições operativas associadas ao número de chaveamentos realizados no sistema. Além disso, observa-se que parte das abordagens existentes não incorpora explicitamente critérios normativos relacionados à qualidade do fornecimento de energia elétrica, como os limites estabelecidos pelos procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional.

Diante desse contexto, identifica-se uma lacuna na aplicação de metodologias capazes de integrar, em um mesmo processo de otimização, diferentes indicadores de desempenho elétrico e restrições operativas relevantes para a operação real dos sistemas de distribuição. Nesse sentido, este trabalho propõe a utilização de métodos de otimização aplicados à reconfiguração de redes, empregando ferramentas computacionais que possibilitam avaliar múltiplos cenários de operação e apoiar o processo de tomada de decisão no planejamento e na operação de sistemas de distribuição de energia elétrica.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar uma metodologia de otimização aplicada à reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica, por meio da integração entre MATLAB e OpenDSS, com o objetivo de reduzir as perdas técnicas e melhorar os índices de qualidade da energia elétrica, considerando diferentes condições de carregamento e restrições operacionais da rede.

1.3 Objetivos Específicos

- Modelar redes de distribuição de energia elétrica no ambiente OpenDSS, integrando-as ao MATLAB para o controle das simulações, execução dos processos de otimização e coleta automatizada dos resultados elétricos;
- Definir e aplicar curvas de carga horárias representativas de diferentes classes de consumidores, de forma a reproduzir condições realistas de operação ao longo de um período de 24 horas;
- Avaliar o desempenho elétrico das redes por meio da análise das perdas técnicas, do perfil de tensões nas barras e do fator de desequilíbrio, considerando os limites estabelecidos por normas técnicas aplicáveis;
- Implementar um Algoritmo Genético para a determinação da melhor sequência de configurações de chaves ao longo do horizonte diário, incorporando funções objetivo e penalizações associadas a desvios de tensão, desequilíbrio de tensão e número de manobras de chaveamento;
- Comparar os resultados obtidos em diferentes cenários de operação, evidenciando os impactos da reconfiguração dinâmica no desempenho elétrico da rede e discutindo os compromissos entre melhoria técnica e esforço operacional.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Qualidade de energia

O sistema de distribuição representa o estágio final da cadeia de suprimento de energia elétrica, sendo responsável por conectar os sistemas de geração e transmissão aos consumidores finais. Nesse nível do sistema elétrico, a manutenção de condições adequadas de fornecimento é essencial para garantir o funcionamento correto dos equipamentos conectados à rede. Essas condições estão associadas a parâmetros técnicos operacionais, como a manutenção dos níveis de tensão dentro das faixas regulamentadas, a limitação do desequilíbrio entre fases e a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamenta esses aspectos por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), os quais estabelecem critérios e limites para diversos indicadores relacionados à qualidade da energia elétrica nas redes de distribuição. Entre os principais parâmetros definidos pelo PRODIST destacam-se os limites de variação de tensão em regime permanente, os critérios para avaliação do desequilíbrio de tensão e os indicadores associados à continuidade do fornecimento de energia elétrica (ANEEL, 2018).

Nesse contexto, o monitoramento e a análise desses indicadores tornam-se fundamentais para a adequada operação dos sistemas de distribuição. De acordo com Carvalho et al. (2018), o gerenciamento da qualidade da energia elétrica tem se tornado cada vez mais relevante devido à crescente sensibilidade dos equipamentos modernos às variações nos parâmetros elétricos da rede, exigindo maior atenção ao acompanhamento contínuo de indicadores operacionais e ao desenvolvimento de ferramentas de análise que auxiliem no planejamento e na operação das redes de distribuição.

Diversos estudos presentes na literatura técnica investigam os impactos de diferentes condições operativas sobre os indicadores de qualidade da energia elétrica em sistemas de distribuição. Ferreira, Santos e Otto (2020) analisaram o comportamento de parâmetros como variações de tensão, distorção harmônica e fator de potência em redes de distribuição, destacando a importância da avaliação sistemática desses indicadores para identificar

possíveis desvios em relação aos limites normativos estabelecidos. De forma complementar, Gimenes (2020) avaliou a influência de diferentes condições de operação da rede sobre os indicadores de qualidade da energia elétrica, demonstrando que alterações na distribuição de cargas e nas condições de operação podem provocar mudanças significativas no perfil de tensão ao longo dos alimentadores.

No contexto da interação entre equipamentos conectados à rede e os parâmetros elétricos do sistema, Urbanetz Junior e Rüther (2016) analisaram o comportamento de inversores conectados à rede elétrica e seus possíveis efeitos sobre indicadores como distorção harmônica e flutuações de tensão, ressaltando a importância da conformidade com os critérios normativos para garantir a operação segura das redes de distribuição. Mais recentemente, Silva e Souza (2022) investigaram aspectos relacionados à qualidade da energia elétrica em redes de distribuição brasileiras, avaliando parâmetros como qualidade da tensão, desequilíbrio entre fases e impactos operacionais associados às condições de funcionamento do sistema.

De modo geral, os estudos apresentados na literatura reforçam a importância da análise integrada de indicadores elétricos relacionados à qualidade da energia elétrica, especialmente no que se refere ao comportamento da tensão e ao equilíbrio entre fases. Esses parâmetros tornam-se particularmente relevantes em análises que envolvem alterações operacionais na rede, como nos processos de reconfiguração de sistemas de distribuição. Nesses casos, diferentes configurações topológicas podem provocar variações nos perfis de tensão e no equilíbrio entre fases, tornando necessária a avaliação desses indicadores para garantir que a operação da rede permaneça dentro dos limites estabelecidos pelos critérios normativos.

2.2 Reconfiguração de Redes

A reconfiguração de redes de distribuição consiste na alteração da topologia do sistema por meio do acionamento de chaves seccionadoras e interligadoras, mantendo a estrutura radial da rede, com o objetivo de melhorar seu desempenho técnico e operacional. Segundo Teles et al. (2020), essa técnica é amplamente utilizada para a redução de perdas técnicas, melhoria do perfil de tensão e balanceamento de carga, sendo considerada uma ferramenta eficaz para a otimização da operação dos sistemas de distribuição.

Com o avanço da automação e a crescente complexidade das redes elétricas, a reconfiguração tem sido aplicada não apenas em situações de contingência, mas também de forma planejada, visando à melhoria contínua dos indicadores de qualidade do fornecimento. Nesse contexto, Araújo Junior (2023) destaca que a aplicação de algoritmos de reconfiguração baseados em critérios de qualidade da energia elétrica permite mitigar violações de tensão e melhorar índices associados à continuidade e confiabilidade do sistema.

A presença crescente de geração distribuída, especialmente de fonte fotovoltaica, introduz novos desafios à operação das redes de distribuição, tornando a reconfiguração ainda mais relevante. Estudos como o de Pletsch Junior e Pereira (2020) demonstram que estratégias de reconfiguração podem ser utilizadas para viabilizar a operação de redes com geração distribuída, contribuindo para o controle dos níveis de tensão e para o aumento da flexibilidade operacional, inclusive em cenários de ilhamento.

Além disso, técnicas de otimização e métodos metaheurísticos têm sido amplamente empregados para resolver o problema da reconfiguração, devido à natureza combinatória do número de configurações possíveis. Amorim (2025) ressalta que o uso de algoritmos como o recozimento simulado em redes de distribuição inteligentes possibilita a obtenção de soluções eficientes, mesmo em sistemas de grande porte, garantindo melhor desempenho operacional.

De forma complementar, Monteiro (2025) evidencia que a reconfiguração otimizada de redes, aliada à presença de geração distribuída e ao uso de ferramentas computacionais, contribui significativamente para a redução de perdas, melhoria dos níveis de tensão e aumento da confiabilidade do fornecimento. Esses aspectos reforçam a importância da reconfiguração como estratégia fundamental para a operação moderna dos sistemas de distribuição, especialmente quando integrada a ambientes de simulação e análise como o OpenDSS, associados a rotinas computacionais em MATLAB.

2.3 Algoritmo Genético

A resolução de problemas de otimização em sistemas de distribuição, como a reconfiguração de redes, envolve elevada complexidade computacional, uma vez que o número de combinações possíveis de chaveamento cresce exponencialmente com o tamanho da rede.

Dessa forma, métodos tradicionais de busca exata tornam-se inviáveis na prática, especialmente para sistemas reais de grande porte. Nesse contexto, os algoritmos evolutivos têm se destacado como ferramentas eficazes, pois apresentam boa capacidade de exploração do espaço de busca com menor custo computacional. Inspirados nos mecanismos de seleção natural propostos por Darwin, estes métodos aplicam conceitos de reprodução, mutação e sobrevivência dos indivíduos mais aptos para conduzir o processo de otimização.

Entre os algoritmos evolutivos, o Algoritmo Genético (AG) é um dos mais aplicados em problemas de sistemas elétricos de potência, especialmente em estudos voltados aos sistemas de distribuição. De acordo com Resende (2016), a utilização de algoritmos evolutivos na reconfiguração de redes tem mostrado resultados promissores, permitindo não apenas a redução de perdas técnicas, mas também a melhoria dos índices de confiabilidade e a adequação dos níveis de tensão aos limites regulatórios. Resultados semelhantes são apresentados por Lima et al. (2021), que demonstram a eficiência do Algoritmo Genético na otimização da operação de redes de distribuição com geração distribuída, evidenciando sua aplicabilidade em estudos baseados em simulação computacional.

Além disso, a literatura recente aponta que os algoritmos genéticos também podem ser empregados visando à melhoria da qualidade da energia elétrica. Souza et al. (2024) utilizam o AG como ferramenta de apoio à tomada de decisão para a melhoria de indicadores de qualidade em redes de distribuição, considerando múltiplos critérios operacionais. De forma complementar, Vasconcelos et al. (2020) aplicam o Algoritmo Genético na priorização de inspeções em concessionárias de distribuição, demonstrando sua eficácia na análise de desempenho da rede e na mitigação de problemas que impactam a continuidade e a qualidade do fornecimento. Ainda nesse contexto, Da Mata e Bessani (2020) propõem uma abordagem híbrida baseada em Algoritmo Genético e busca local para o restabelecimento de sistemas de distribuição, reforçando a adequação dessas técnicas para problemas de natureza combinatória e topológica, como a reconfiguração de redes. Dessa forma, os estudos recentes da literatura nacional confirmam a relevância do uso de Algoritmos Genéticos em problemas de reconfiguração e operação de sistemas de distribuição, validando a abordagem adotada neste trabalho e sua contribuição para a melhoria da eficiência operacional e da qualidade da energia elétrica.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho propõe uma metodologia para a reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica com o objetivo de melhorar o desempenho operacional do sistema, considerando a redução de perdas técnicas, a adequação dos níveis de tensão e a mitigação do desequilíbrio de tensão. A abordagem adotada baseia-se em simulação computacional e em técnicas de otimização, permitindo a análise de diferentes cenários operacionais de forma sistemática e automatizada.

A metodologia desenvolvida combina ferramentas consolidadas na área de sistemas elétricos de potência com técnicas de inteligência computacional, de modo a viabilizar a avaliação de múltiplas configurações de rede resultantes do chaveamento de dispositivos seccionadores. Para a modelagem e a simulação elétrica das redes de distribuição é utilizada uma plataforma especializada, enquanto a etapa de otimização é conduzida por meio de rotinas computacionais responsáveis pelo controle das simulações, pela coleta de dados e pela aplicação do algoritmo de otimização.

O processo metodológico contempla a modelagem das cargas com base em perfis típicos de consumo, a definição de cenários horários de operação e a análise de grandezas elétricas relevantes para a qualidade da energia elétrica. A partir dessas informações, é formulada uma função objetivo que incorpora critérios técnicos e penalizações operacionais, orientando o processo de busca por configurações mais eficientes da rede.

A técnica de otimização empregada é o Algoritmo Genético, escolhido por sua capacidade de lidar com problemas de natureza combinatória e não linear, características inerentes ao problema de reconfiguração de redes de distribuição. A metodologia proposta é genérica e pode ser aplicada a diferentes sistemas de distribuição, sendo posteriormente validada por meio de estudos de caso apresentados nos capítulos seguintes

3.1 Ferramentas computacionais

A metodologia proposta neste trabalho foi desenvolvida com o auxílio de ferramentas computacionais amplamente empregadas na análise e simulação de sistemas de distribuição

de energia elétrica. A utilização dessas ferramentas permite a modelagem detalhada da rede, a simulação do comportamento elétrico sob diferentes condições operativas e a implementação de técnicas de otimização de forma automatizada.

Para a simulação elétrica dos sistemas de distribuição, foi utilizado o software Open Distribution System Simulator (OpenDSS), desenvolvido pelo Electric Power Research Institute. O OpenDSS é uma ferramenta consolidada na área de sistemas elétricos de potência, especialmente voltada para estudos em redes de distribuição, permitindo a modelagem de sistemas trifásicos desequilibrados, incluindo linhas, transformadores, cargas, dispositivos de proteção e chaves, além da realização de análises de fluxo de potência em regime permanente (EPRI, 2016). Essas características tornam o software adequado para estudos que envolvem reconfiguração de redes e avaliação de indicadores de desempenho elétrico.

O ambiente MATLAB foi empregado para o desenvolvimento das rotinas computacionais responsáveis pelo controle das simulações, pela implementação do algoritmo de otimização e pelo processamento dos resultados. O MATLAB é amplamente utilizado em aplicações de engenharia por oferecer recursos para programação numérica, análise de dados e desenvolvimento de algoritmos, possibilitando a implementação eficiente de técnicas de otimização, como os algoritmos genéticos (MATHWORKS, 2023).

A integração entre o MATLAB e o OpenDSS permite a automação do processo de simulação, possibilitando a alteração da topologia da rede por meio do acionamento de chaves, a execução iterativa do fluxo de potência e a coleta das grandezas elétricas necessárias à avaliação da função objetivo. Essa integração combina a capacidade de simulação elétrica detalhada do OpenDSS com a flexibilidade do MATLAB para a implementação de algoritmos evolutivos, resultando em um ambiente computacional robusto e adequado para a aplicação da metodologia proposta.

3.2 Modelagem do sistema de distribuição

A modelagem do sistema de distribuição analisado constitui uma etapa fundamental para a correta aplicação do algoritmo genético proposto. Neste trabalho, a metodologia desenvolvida

é aplicada a dois sistemas de distribuição distintos, de diferentes portes, com o objetivo de avaliar o desempenho do método de reconfiguração em cenários variados. A abordagem adotada é genérica, permitindo que o algoritmo seja aplicado a sistemas reais ou de teste, desde que respeitadas as restrições operativas características das redes de distribuição.

Um dos primeiros aspectos considerados na modelagem refere-se à disposição das chaves ao longo da rede. A definição adequada dessas chaves é essencial, uma vez que as combinações de chaveamento avaliadas pelo algoritmo não podem, em nenhuma circunstância, resultar na interrupção do fornecimento de energia a qualquer ponto do sistema. Dessa forma, é necessário realizar previamente um levantamento das configurações de chaves consideradas viáveis, garantindo que todas as combinações analisadas preservem a continuidade do atendimento às cargas.

Outro critério fundamental incorporado à modelagem é a manutenção da radialidade da rede. Sistemas de distribuição de energia elétrica são, em sua maioria, projetados para operar de forma radial, característica que contribui para a simplicidade da proteção, maior confiabilidade operacional e facilidade de operação. Assim, todas as configurações de chaveamento consideradas no processo de otimização devem respeitar essa condição, não sendo permitidas topologias malhadas durante a operação normal do sistema.

A partir desses critérios, são definidas apenas as configurações topológicas admissíveis, que atendem simultaneamente à continuidade do fornecimento e à radialidade da rede. Esse conjunto de configurações viáveis constitui o espaço de busca do algoritmo genético, reduzindo soluções inviáveis e aumentando a eficiência do processo de otimização.

Além disso, embora a caracterização detalhada das cargas seja tratada em seção específica, a modelagem do sistema já considera que a rede pode ser subdividida em zonas com diferentes características de consumo, refletindo a presença de áreas residenciais, comerciais e industriais. Essa divisão influencia diretamente o comportamento elétrico do sistema e justifica a necessidade de uma modelagem consistente da topologia da rede antes da aplicação dos cenários operacionais.

Dessa forma, a etapa de modelagem do sistema de distribuição estabelece as bases necessárias para a aplicação do algoritmo genético, assegurando que as soluções avaliadas sejam fisicamente realizáveis, operativamente seguras e representativas das condições reais de operação dos sistemas analisados.

3.3 Modelagem das Cargas e Cenários Operativos

A modelagem das cargas constitui uma etapa fundamental da metodologia proposta, uma vez que o comportamento da demanda ao longo do tempo influencia diretamente as grandezas elétricas analisadas e, conseqüentemente, as decisões do algoritmo genético no processo de reconfiguração da rede. Neste trabalho, buscou-se representar de forma realista os diferentes perfis de consumo presentes nos sistemas de distribuição analisados, considerando tanto a diversidade de tipos de consumidores quanto a variação horária da carga. Os sistemas estudados foram divididos em zonas de consumo residencial, comercial e industrial, de modo a refletir a heterogeneidade típica encontrada em redes de distribuição reais. Essa separação por zonas permite que o impacto de cada tipo de carga sobre o desempenho elétrico da rede seja adequadamente avaliado, além de possibilitar a análise de diferentes cenários operativos ao longo do dia.

Para cada classe de consumo foram adotadas curvas de carga horárias típicas, com resolução de 24 pontos, representando um ciclo diário completo. Essas curvas foram utilizadas para definir a variação da potência demandada ao longo do tempo, sendo aplicadas diretamente aos elementos de carga no ambiente de simulação. Dessa forma, o comportamento dinâmico do sistema ao longo do dia pôde ser avaliado, considerando períodos de baixa, média e alta demanda.

As curvas de carga residencial, comercial e industrial empregadas neste estudo são apresentadas conjuntamente na Figura A, permitindo uma visualização comparativa dos diferentes perfis de consumo adotados. De forma geral, observa-se que cada tipo de carga apresenta características distintas ao longo do dia, refletindo os hábitos de consumo associados a cada classe, o que justifica a adoção de múltiplos cenários operativos na análise proposta.

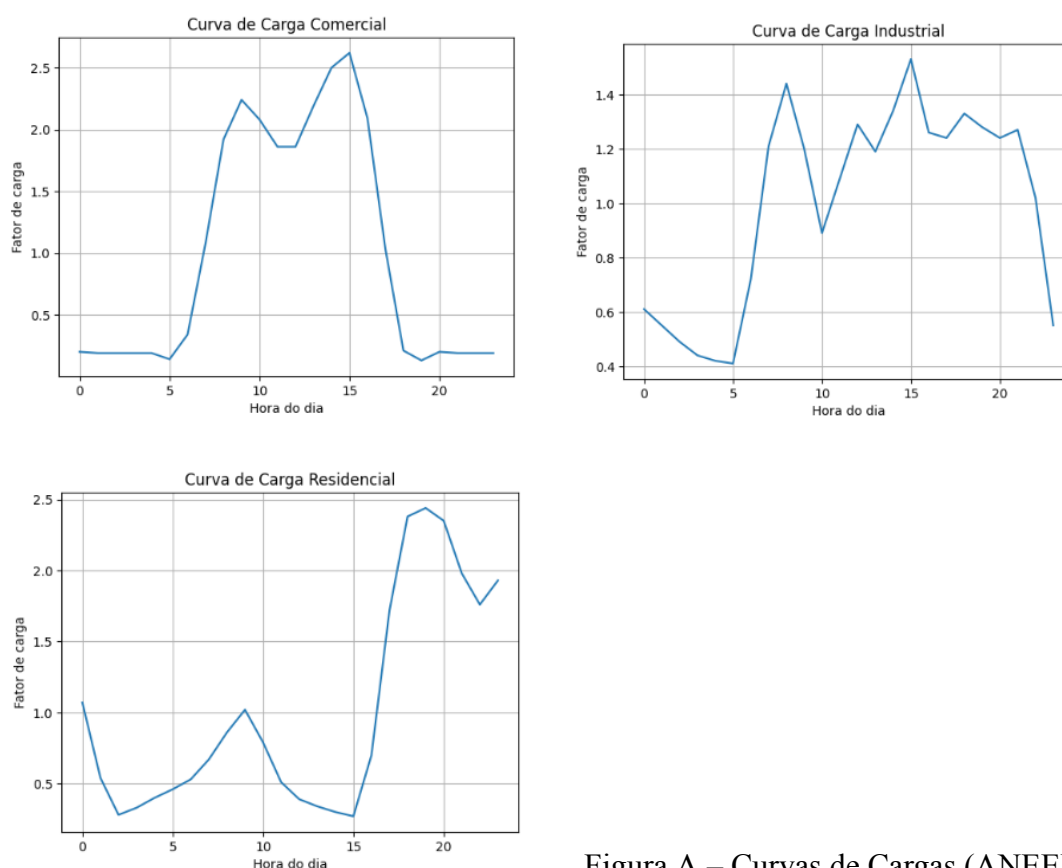


Figura A – Curvas de Cargas (ANEEL, 2023).

A consideração desses diferentes cenários horários é essencial para a avaliação do desempenho da rede sob condições operativas variadas, bem como para a análise do impacto da reconfiguração e da penalização por chaveamentos ao longo do dia. Ao incorporar a variação temporal das cargas, o algoritmo genético passa a buscar soluções que não apenas otimizem o desempenho elétrico em um ponto específico, mas que apresentem bom comportamento ao longo de todo o horizonte diário analisado.

As curvas de carga utilizadas foram obtidas a partir de dados públicos disponibilizados por órgão regulador do setor elétrico brasileiro, acessados por meio de sua base de dados abertos, os quais apresentam perfis típicos de consumo para diferentes classes de consumidores, amplamente empregados em estudos de planejamento e operação de sistemas de distribuição (ANEEL, 2023).

3.4 Grandezas elétricas analisadas

A avaliação do desempenho das diferentes configurações da rede de distribuição propostas pelo algoritmo genético é realizada por meio da análise de grandezas elétricas que representam aspectos fundamentais da operação e da qualidade da energia elétrica. Entre essas grandezas destacam-se as perdas elétricas, os níveis de tensão e o fator de desequilíbrio de tensão, que são utilizados como indicadores do impacto das alterações topológicas na rede e servem de base para a construção da função objetivo empregada no processo de otimização.

Para a obtenção desses dados, é implementada no código uma estrutura de repetição responsável por percorrer todas as combinações possíveis de estados das chaves previamente definidas na etapa de entrada de dados, na qual também são especificados o sistema teste e suas características operativas. A partir desse processo iterativo, cada configuração da rede é simulada individualmente, permitindo a coleta sistemática dos resultados associados a cada cenário analisado.

Em cada iteração do processo, o circuito é resolvido por meio do fluxo de potência executado no ambiente OpenDSS. Após a convergência da solução, são extraídos os valores das grandezas elétricas de interesse para aquela configuração específica da rede. Dessa forma, o conjunto de resultados obtidos ao longo das simulações constitui a base de dados utilizada na etapa de avaliação das soluções e no processo de otimização conduzido pelo algoritmo genético.

Os valores das tensões nas barras do sistema são obtidos a partir do fluxo de potência executado no software OpenDSS. Após a resolução do fluxo de potência para cada condição de operação analisada, o ambiente MATLAB acessa as tensões nodais por meio da interface de comunicação com o OpenDSS. Inicialmente são coletadas as magnitudes das tensões em valor por unidade por meio do comando `AllBusVmagPu`, que retorna os valores de tensão de todos os nós do sistema. Em seguida, são obtidas também as tensões complexas por meio do comando `AllBusVolts`, permitindo reconstruir as componentes complexas das tensões e organizar os valores por barra e por fase do sistema elétrico.

A partir dessas informações, as tensões são armazenadas em uma matriz que representa as tensões das fases de cada barra da rede, possibilitando a análise do perfil de tensão ao longo do sistema. Essa organização dos dados também permite a posterior avaliação de indicadores relacionados ao equilíbrio entre fases e à qualidade da energia elétrica.

O desequilíbrio de tensão é calculado a partir das tensões em valor por unidade obtidas nas diferentes fases das barras do sistema por meio do fluxo de potência executado no software OpenDSS. Esses valores são extraídos pelo ambiente MATLAB, que realiza o processamento dos dados e o cálculo do fator de desequilíbrio. O procedimento adotado baseia-se nas diferenças entre as tensões de fase, permitindo estimar o nível de desequilíbrio do sistema a partir das tensões Va , Vb e Vc .

Inicialmente, são calculadas as diferenças entre as tensões de fase, conforme apresentado nas equações a seguir

$$V_{ab} = |Va - Vb|, V_{bc} = |Vb - Vc|, V_{ac} = |Va - Vc|$$

A partir dessas grandezas é determinado o parâmetro intermediário β , dado por:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$$

Por fim, o fator de desequilíbrio de tensão, expresso em porcentagem, é calculado pela Equação:

$$FD(\%) = 100 \sqrt{\frac{(1 - \sqrt{3 - 6\beta})}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$$

Esse índice permite quantificar o grau de assimetria entre as tensões das fases nas diferentes barras do sistema. No processo de otimização adotado neste trabalho, valores elevados do fator de desequilíbrio são penalizados na função objetivo quando ultrapassam o limite

estabelecido, contribuindo para que o algoritmo genético busque configurações de rede que mantenham condições operativas mais equilibradas.

As perdas elétricas da rede são obtidas diretamente a partir dos resultados do fluxo de potência fornecidos pelo OpenDSS. O software disponibiliza as perdas totais do circuito por meio do comando Losses, que retorna os valores de potência ativa e reativa dissipada no sistema. No presente trabalho, utiliza-se a componente de potência ativa das perdas totais da rede, convertida para quilowatts, como indicador de desempenho das diferentes configurações de rede avaliadas no processo de otimização.

Dessa forma, as grandezas elétricas analisadas sendo perfil de tensão, perdas elétricas e fator de desequilíbrio de tensão são obtidas a partir dos resultados do fluxo de potência realizado no OpenDSS, sendo posteriormente processadas no ambiente MATLAB para compor os indicadores utilizados na avaliação das diferentes configurações topológicas analisadas pelo algoritmo de otimização.

3.5 Função objetivo e penalizações

A função objetivo representa o critério utilizado para avaliar o desempenho de cada configuração da rede durante o processo de reconfiguração. Nesse trabalho, a função objetivo foi construída de forma a considerar simultaneamente diferentes indicadores operativos do sistema de distribuição, permitindo comparar as diversas combinações de chaveamento avaliadas ao longo das simulações.

Inicialmente, são definidos os dados de entrada do sistema, incluindo a topologia da rede, as combinações viáveis de estados das chaves, as curvas de carga associadas ao sistema e suas respectivas características operativas. Além disso, são consideradas as zonas da rede às quais cada curva de carga é aplicada, permitindo representar a variação temporal da demanda ao longo de um período diário. A partir dessas informações, o circuito é simulado no ambiente computacional OpenDSS para cada combinação de chaves e para cada ponto da curva de carga diária.

Durante cada execução do fluxo de potência, são obtidos os principais indicadores elétricos do sistema, incluindo as perdas ôhmicas totais, os níveis de tensão nas barras e o fator de

desequilíbrio de tensão. Esses parâmetros são extraídos diretamente das rotinas internas do OpenDSS após a convergência da solução do fluxo de potência. As perdas elétricas são obtidas por meio do comando `DSSCircuit.Losses`, que retorna as perdas totais do circuito, posteriormente convertidas para kW. Já os níveis de tensão são coletados através do vetor `DSSCircuit.AllBusVmagPu`, que fornece as magnitudes das tensões em por unidade para todas as barras do sistema.

A partir desses dados, são aplicadas penalizações associadas a possíveis violações operativas. No caso das tensões, são aplicadas penalizações quando os valores ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas de qualidade da energia elétrica. De forma semelhante, o fator de desequilíbrio de tensão também recebe penalização quando ultrapassa o limite de 3%, valor amplamente adotado em estudos de qualidade da energia em sistemas de distribuição.

No caso específico das tensões, a penalização é aplicada individualmente para cada barra e para cada fase do sistema. Inicialmente, são analisados os níveis de tensão em por unidade de cada fase, considerando o nível de tensão nominal da barra. Com base nesse valor nominal, as barras são classificadas em três categorias principais: Extra-Alta Tensão (EAT), Alta Tensão (AT) e Média ou Baixa Tensão (MT/BT). Para cada uma dessas categorias são definidos limites operativos distintos.

Quando os níveis de tensão permanecem dentro da faixa considerada adequada, nenhuma penalização é aplicada. Entretanto, quando a tensão ultrapassa limites de operação considerados aceitáveis, é aplicada uma penalização proporcional ao desvio em relação ao valor nominal. No modelo adotado neste trabalho, são considerados dois níveis de penalização: uma penalização moderada para desvios considerados toleráveis e uma penalização severa para situações em que os limites operativos são significativamente violados. Essa penalização é calculada com base na diferença absoluta entre o valor da tensão observada e o valor nominal em por unidade.

Assim, para cada barra do sistema, as penalizações associadas às suas três fases são acumuladas, resultando em um valor total de penalização de tensão para aquela barra. Ao final do processo, a soma das penalizações de todas as barras da rede é utilizada como indicador global de violação dos limites de tensão no sistema.

Dessa forma, a avaliação de cada configuração da rede é realizada por meio de uma função objetivo composta pela soma ponderada das perdas elétricas, das penalizações associadas ao

desequilíbrio de tensão e das penalizações relacionadas às violações de limites de tensão.

Essa avaliação pode ser representada de forma geral pela seguinte expressão:

$$A = (P \cdot \text{mult}P) + (FD \cdot \text{mult}FD) + (T \cdot \text{mult}T)$$

em que:

P - representa as perdas elétricas totais do sistema;

FD - corresponde à penalização associada ao fator de desequilíbrio de tensão;

T - representa a penalização associada às violações dos limites de tensão;

multP, multFD e multT são fatores de ponderação que permitem ajustar a importância relativa de cada indicador no processo de avaliação.

Além disso, quando o fluxo de potência não converge para determinada configuração da rede, é atribuída uma penalização extremamente elevada na função objetivo, garantindo que essa solução seja automaticamente descartada no processo de comparação entre as configurações avaliadas.

Dessa forma, a função objetivo permite integrar diferentes aspectos técnicos do sistema de distribuição em um único indicador de desempenho, possibilitando identificar as configurações de rede que apresentam melhor desempenho global em termos de perdas elétricas, qualidade de tensão e equilíbrio entre fases.

3.6 Algoritmo Genético aplicado à reconfiguração

O processo de reconfiguração da rede de distribuição proposto neste trabalho foi conduzido por meio da aplicação de um Algoritmo Genético (AG), escolhido por sua capacidade de lidar com problemas de otimização combinatória, não lineares e com grande espaço de busca, características inerentes ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição.

A avaliação de cada indivíduo no algoritmo genético é realizada por meio da função de fitness, responsável por quantificar a qualidade de cada solução candidata. No contexto deste trabalho, cada indivíduo representa uma sequência de configurações da rede ao longo de um horizonte diário de 24 horas, sendo representado por um vetor:

$$X_i = [c_i, 1, c_i, 2, \dots, c_i, 24]$$

onde:

- X_i representa o indivíduo i da população
- c_i, h representa a configuração da rede utilizada na hora h
- $h=1,2,\dots,24$

Cada configuração corresponde a uma topologia previamente validada da rede de distribuição, garantindo a manutenção da radialidade do sistema.

A avaliação elétrica associada a cada configuração horária é previamente obtida por meio das simulações de fluxo de potência realizadas no OpenDSS. Para cada configuração c e para cada hora h , é calculado um valor de avaliação elétrica definido por:

$$A(c, h) = P(c, h) + FD(c, h) + T(c, h)$$

em que:

- P representa as perdas elétricas do sistema
- FD representa a penalização associada ao fator de desequilíbrio de tensão
- T representa a penalização associada às violações de limites de tensão

Dessa forma, a avaliação elétrica diária de um indivíduo é obtida pela soma das avaliações horárias:

$$F_{elétrico}(X_i) = \sum_{h=1}^{24} \delta(c_{i,h}, h)$$

Além do desempenho elétrico, o modelo também considera o impacto operacional associado ao número de chaveamentos realizados ao longo do dia. O número de chaveamentos é calculado a partir da variação de configurações entre horas consecutivas:

$$N_{chav}(X_i) = \sum_{h=1}^{24} \delta(c_{i,h}, c_{i,h+1})$$

onde:

$$\delta(a, b) = \{1, \text{ se } a \neq b\} \text{ ou } \{0, \text{ se } a = b\}$$

representa a ocorrência de mudança de configuração entre duas horas consecutivas.

Assim, a função de fitness utilizada no algoritmo genético é definida por:

$$Fitness(X_i) = \sum_{h=1}^{24} A(c_{i,h}, h) + \lambda \cdot N_{chav}(X_i)$$

onde:

λ representa o fator de penalização associado ao número de chaveamentos.

Essa formulação permite incorporar simultaneamente critérios de desempenho elétrico e esforço operacional no processo de otimização.

O espaço de busca do algoritmo genético é composto por um conjunto de configurações topológicas previamente avaliadas e validadas. Cada configuração corresponde a um estado específico das chaves da rede de distribuição e é construída de forma a garantir:

- manutenção da radialidade da rede
- inexistência de ilhamento
- continuidade do fornecimento de energia

Esse conjunto de configurações válidas é obtido previamente durante a etapa de preparação dos dados do sistema, reduzindo significativamente o espaço de busca do algoritmo genético. Dessa forma, o algoritmo opera exclusivamente sobre soluções factíveis, aumentando a eficiência do processo de otimização.

O algoritmo genético implementado neste trabalho utiliza uma combinação de operadores de seleção, cruzamento e mutação, projetados para equilibrar exploração e intensificação do espaço de busca.

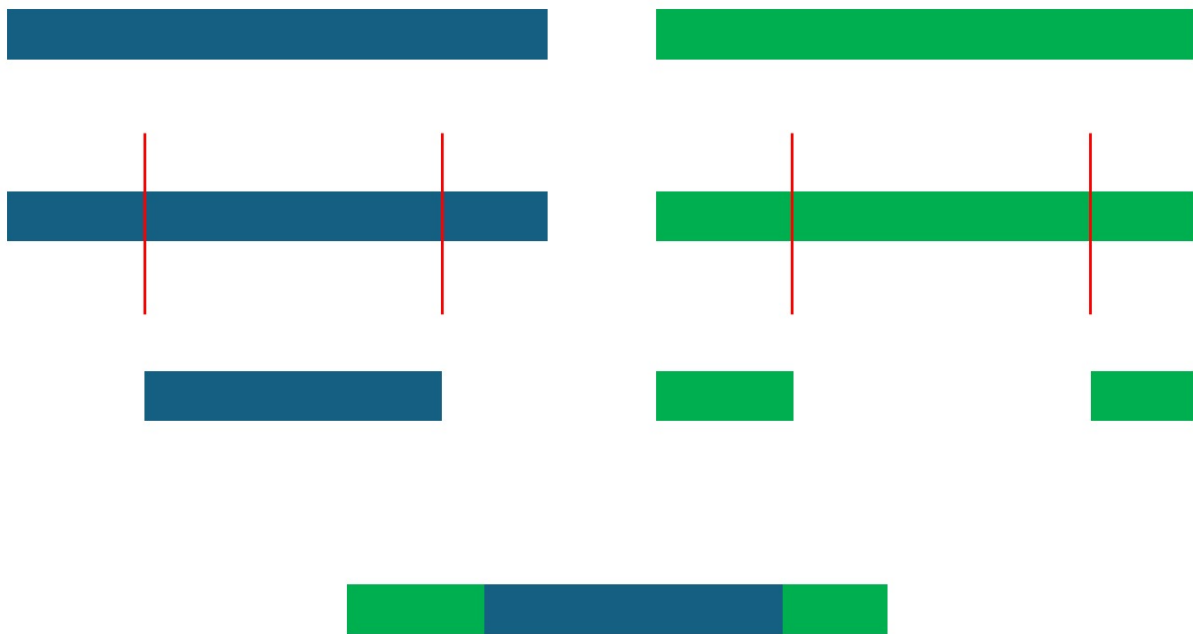


Figura B – Cruzamento de dois pontos . Fonte Autor

O operador de cruzamento é aplicado com taxa de 100%. Para dois indivíduos pais P_1 e P_2 , são selecionados dois pontos aleatórios p_1 e p_2 , gerando um novo indivíduo:

$$Filho = [P_1(1 : p_1), P_2(p_1 : p_2), P_1(p_2 : 24)]$$

Este operador permite a troca de blocos de configurações horárias entre indivíduos distintos.

Na parte da mutação são utilizados diferentes tipos de mutações para trazer maior espaço de busca tendo mais tipos de mutações possíveis. Os três tipos distintos de mutação são utilizados para promover diversidade genética.

- Mutação simples (5%)

$$\text{Taxa de aplicação: } P_{mut} = 0.05$$

Nesse operador, uma única posição horária do indivíduo é selecionada aleatoriamente e substituída por uma nova configuração válida.

$$c_{i,h} \leftarrow \text{random}(\text{config})$$

Esse tipo de mutação promove pequenas perturbações locais na solução.

- Mutação localizada (15%)

$$\text{Taxa de aplicação: } P_{mut} = 0.15$$

Nesse operador, o algoritmo identifica pontos onde ocorrem mudanças de configuração entre horas consecutivas. Um desses pontos é selecionado e ajustado para aproximar-se da configuração das horas vizinhas, reduzindo o número de chaveamentos.

Esse operador atua diretamente na redução do esforço operacional do sistema.

- Mutação em bloco (15%)

$$\text{Taxa de aplicação: } P_{mut} = 0.15$$

Nesse caso, toda a sequência horária do indivíduo é substituída por uma única configuração válida:

$$X_i = [c, c, c, \dots, c]$$

Esse operador permite explorar regiões completamente diferentes do espaço de busca.

A convergência do algoritmo é avaliada com base na variação do melhor valor da função fitness ao longo das gerações. Se a melhoria entre duas gerações consecutivas for inferior a um limite de tolerância ϵ , o algoritmo incrementa um contador de estabilidade.

$$|F_{melhor}^g - F_{melhor}^{g-1}| \leq \epsilon$$

Quando essa condição se repete por um número pré-definido de gerações consecutivas, o algoritmo é considerado convergente.

No presente trabalho foram adotados os seguintes parâmetros:

Parâmetro	Valor
Indivíduos	100
Gerações	400
Tolerância de convergência	10^{-3}
Gerações de estabilidade	50

Tabela 1 - Parâmetros do AG

Cada hora do horizonte diário possui uma avaliação elétrica independente, obtida a partir das simulações do sistema. Entretanto, existe uma dependência indireta entre horas consecutivas devido à penalização associada ao número de chaveamentos, que incentiva sequências de configuração mais estáveis ao longo do dia.

O algoritmo não utiliza memória explícita de estados anteriores entre gerações, exceto pelo mecanismo de elitismo, que preserva os melhores indivíduos encontrados.

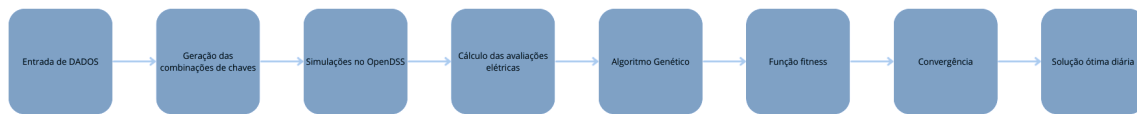


Figura C – Fluxograma do algoritmo . Fonte Autor

A Figura C apresenta o fluxograma geral da metodologia empregada neste trabalho. Inicialmente são definidos os dados de entrada do sistema, incluindo a topologia da rede de distribuição, as combinações válidas de chaveamento, as curvas de carga e os parâmetros associados à avaliação do sistema. A partir dessas informações, são realizadas simulações de fluxo de potência no ambiente OpenDSS para cada configuração válida da rede e para cada ponto da curva de carga diária, permitindo obter os indicadores elétricos utilizados na análise.

Os resultados dessas simulações são então utilizados como base para a construção da função objetivo, que incorpora as perdas elétricas, as penalizações associadas aos desvios de tensão e ao fator de desequilíbrio de tensão, bem como a penalização associada ao número de chaveamentos realizados ao longo do dia. Esses valores são posteriormente utilizados na etapa de otimização conduzida pelo algoritmo genético.

No processo evolutivo do algoritmo, uma população inicial de soluções candidatas é gerada e avaliada por meio da função de fitness. A partir dessa avaliação, são aplicados os operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação, permitindo a geração de novas soluções ao longo das gerações. O processo é repetido até que seja atingido o critério de convergência definido para o algoritmo.

Dessa forma, a metodologia proposta integra as simulações elétricas realizadas no OpenDSS com o processo de otimização conduzido pelo algoritmo genético, permitindo identificar sequências de configurações de chaveamento que minimizam simultaneamente as perdas elétricas, os desvios de tensão, o desequilíbrio de tensão e o esforço operacional associado às manobras de rede.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS E AVALIAÇÃO DO ALGORITMO

Neste capítulo são apresentadas as simulações e análises decorrentes da implementação do algoritmo genético proposto em dois sistemas-teste de distribuição de energia elétrica. A escolha desses sistemas tem como finalidade validar o comportamento do algoritmo em diferentes níveis de complexidade da rede, permitindo avaliar sua capacidade de adaptação frente às modificações dos parâmetros elétricos e topológicos ao longo do processo de otimização.

As análises são conduzidas de forma comparativa, relacionando o comportamento observado em cada sistema com suas características elétricas e estruturais, bem como com as alterações topológicas resultantes da aplicação das penalizações incorporadas à função objetivo. À medida que os níveis de penalização são modificados, especialmente aqueles associados ao chaveamento, observa-se a influência direta dessas restrições na definição das configurações ótimas da rede, refletindo diferentes compromissos entre desempenho elétrico e estabilidade topológica.

Os ensaios realizados são organizados a partir de dois sistemas-teste padronizados pelo IEEE, os quais sofreram adaptações pontuais com o objetivo de ampliar a capacidade de análise e explorar de forma mais aprofundada tanto o comportamento dos sistemas quanto a resposta do algoritmo genético.

4.1 Descrição dos cenários de simulação

Os cenários de simulação adotados neste trabalho foram definidos com o objetivo de avaliar, de forma sistemática, o comportamento do algoritmo genético frente à variação do nível de penalização associada às operações de chaveamento, mantendo constantes as penalizações relacionadas às grandezas elétricas do sistema. Dessa forma, busca-se isolar o impacto do chaveamento no processo de reconfiguração, permitindo uma análise clara e progressiva da influência desse parâmetro nas soluções obtidas.

Foram considerados dois sistemas-teste padronizados pela IEEE: o sistema de 13 barras e o sistema de 123 barras, os quais apresentam características topológicas e elétricas distintas, possibilitando avaliar o desempenho do algoritmo tanto em uma rede de menor porte quanto

em um sistema de maior complexidade. Para cada sistema, foram realizados três estágios de simulação, correspondentes a diferentes níveis de penalização por chaveamento: branda, média e elevada, totalizando seis ensaios computacionais.

Nos três estágios de simulação, os multiplicadores associados ao desvio de tensão, ao desequilíbrio de tensão e às perdas ôhmicas foram mantidas constantes, conforme definido no Capítulo 3. Assim, a única variável ajustada entre os cenários foi o peso atribuído à penalização por chaveamento, permitindo observar de forma direta como o aumento dessa restrição influencia a topologia final da rede, o número de manobras realizadas e o compromisso entre desempenho elétrico e estabilidade operativa.

A Figura D apresenta um esquema ilustrativo dos cenários de simulação adotados neste trabalho, destacando os dois sistemas analisados e os três níveis de penalização por chaveamento considerados em cada um deles. Esse arranjo experimental permite uma análise comparativa tanto entre os diferentes níveis de penalização dentro de um mesmo sistema quanto entre sistemas de portes distintos.

Penalização por Chaveamento

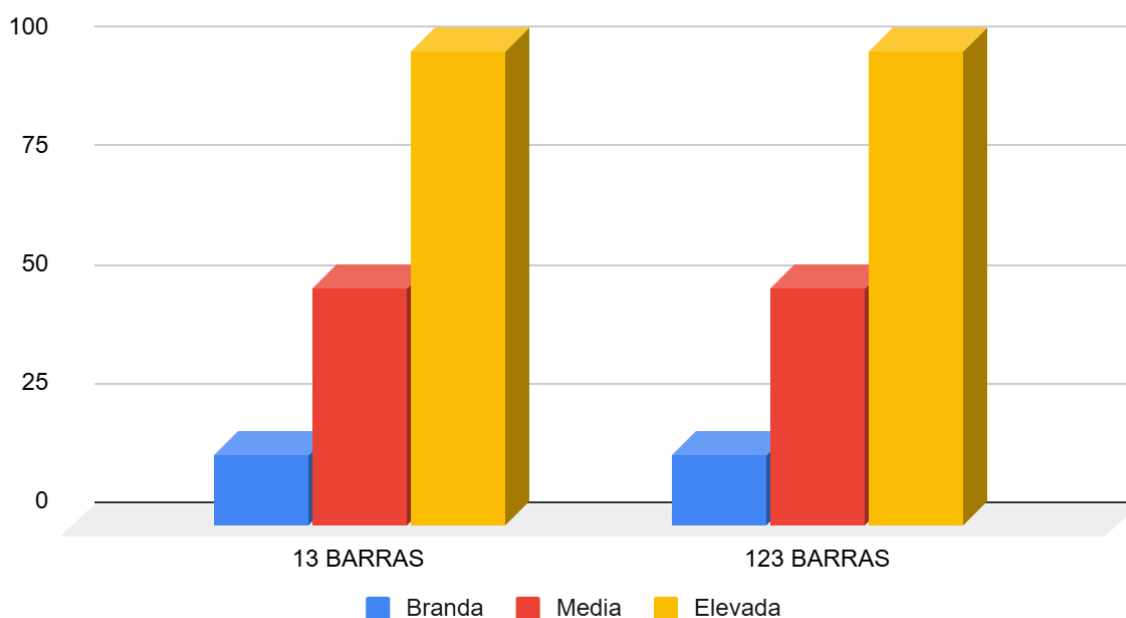


Figura D – Cenário de penalizações por chaveamento. Fonte Autor

Ensaio	Sistema IEEE	Nº de barras	Penalização por chaveamento	Objetivo do cenário
1	13 barras	13	Branda	Avaliar soluções com maior flexibilidade de chaveamento
2	13 barras	13	Média	Analisar compromisso entre desempenho elétrico e manobras
3	13 barras	13	Elevada	Identificar soluções com mínima alteração topológica
4	123 barras	123	Branda	Avaliar flexibilidade em sistema de grande porte
5	123 barras	123	Média	Analisar equilíbrio entre perdas, tensões e chaveamentos
6	123 barras	123	Elevada	Verificar convergência para topologia mais estável

Tabela 2 – Cenários de simulação adotados no estudo

A Tabela 2 resume os seis ensaios realizados, indicando o sistema analisado, o nível de penalização por chaveamento adotado e a finalidade de cada cenário no contexto da avaliação do algoritmo genético.

Essa estrutura de cenários possibilita analisar o comportamento do algoritmo de forma progressiva, evidenciando como soluções mais flexíveis, associadas a penalizações brandas, evoluem para configurações mais conservadoras à medida que o custo de chaveamento é intensificado. Dessa forma, o conjunto de simulações estabelece a base necessária para as análises apresentadas nos tópicos subsequentes, onde são discutidos os impactos diretos dessas escolhas nos resultados obtidos.

4.2 Configuração dos sistemas analisados

Neste tópico são apresentadas as principais características dos sistemas de distribuição empregados nos ensaios computacionais, bem como as adaptações realizadas em suas topologias com o objetivo de viabilizar a aplicação do algoritmo genético de reconfiguração de redes proposto neste trabalho. Foram utilizados dois sistemas testes consagrados na literatura, padronizados pela IEEE, sendo eles o sistema IEEE de 13 barras e o sistema IEEE de 123 barras.

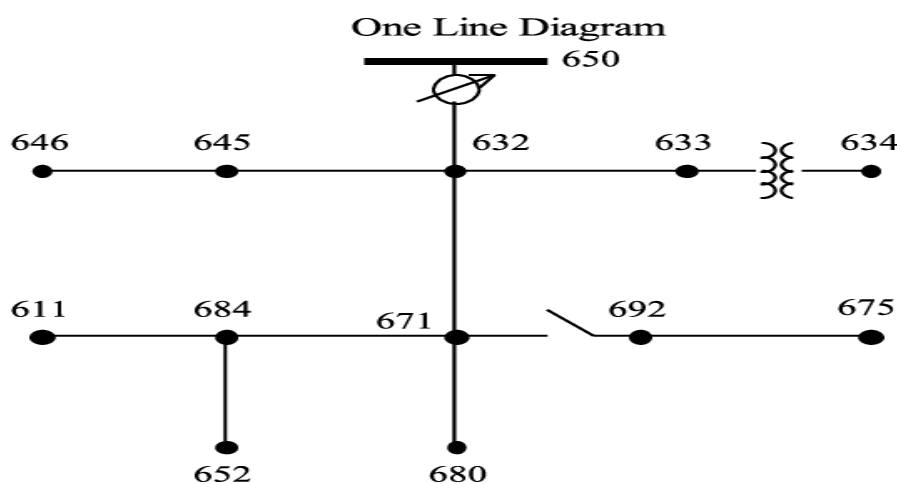


Figura E – Diagrama unifilar do sistema IEEE 13-barras. Fonte: adaptado de IEEE 13 bus test feeder.

A Figura E apresenta o diagrama unifilar do sistema IEEE de 13 barras utilizado neste trabalho. A topologia original foi adaptada com a inserção de chaves seccionadoras adicionais, com o objetivo de permitir a aplicação do algoritmo genético para a reconfiguração dinâmica da rede ao longo do horizonte diário de operação. Essas chaves ampliam o espaço de busca do algoritmo, possibilitando a abertura e o fechamento controlado de ramos específicos da rede, sem comprometer a radialidade do sistema.

Foram inseridas quatro chaves de manobra, todas modeladas no OpenDSS como linhas do tipo switch, inicialmente desabilitadas, conectando pares estratégicos de barras. A chave Sw1 conecta as barras 671 e 692, criando uma alternativa de alimentação para o ramo inferior do sistema. A chave Sw2 estabelece a conexão entre a barra fictícia 671s e a barra 671, sendo

utilizada para permitir a abertura e o fechamento controlado do ramo principal associado a essa barra. A chave Sw3 interliga as barras 646 e 684, criando um caminho alternativo entre ramos laterais da rede. Por fim, a chave Sw4 conecta as barras 633 e 692, oferecendo uma rota adicional de suprimento para cargas localizadas na extremidade do sistema.

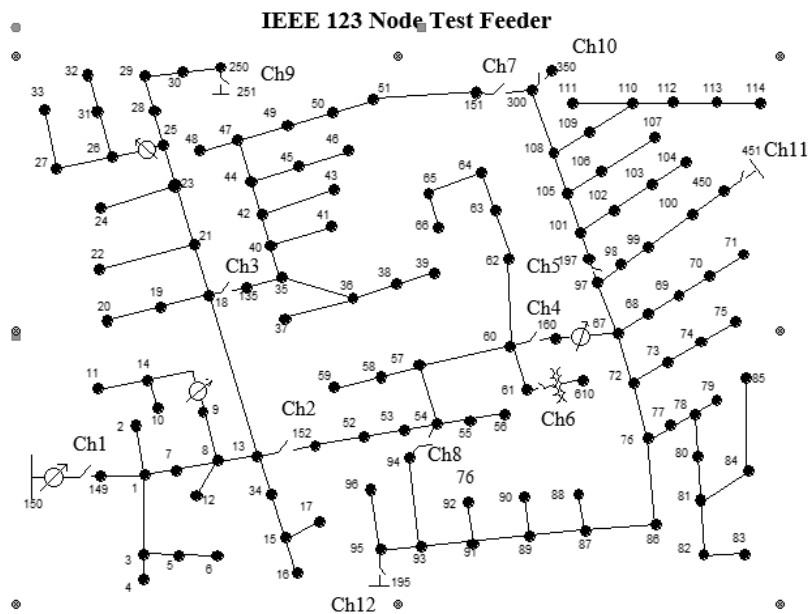


Figura F – Topologia do sistema IEEE 123-barras. Fonte: adaptado de IEEE 123 bus distribution test feeder.

A Figura F apresenta o diagrama unifilar do sistema IEEE de 123 barras adotado neste trabalho. Assim como no sistema IEEE 13 barras, a topologia original foi adaptada por meio da inserção de chaves seccionadoras adicionais, com o objetivo de viabilizar a aplicação do algoritmo genético na reconfiguração dinâmica da rede de distribuição. Devido à maior complexidade estrutural do sistema de 123 barras, as modificações realizadas permitem uma análise mais representativa de cenários operativos reais, nos quais coexistem chaves normalmente fechadas e normalmente abertas.

As chaves normalmente fechadas foram modeladas de forma a preservar a topologia radial original do sistema, mantendo-se inicialmente habilitadas. Essas chaves conectam pares específicos de barras, como, por exemplo, as conexões entre as barras 150r–149, 13–152,

18–135, 60–160, 97–197 e 61–61s. A presença dessas chaves possibilita que determinados ramos da rede sejam abertos durante o processo de otimização, permitindo ao algoritmo genético explorar diferentes configurações topológicas sem alterar as condições iniciais de operação do sistema base

Adicionalmente, foram inseridas chaves normalmente abertas, inicialmente desabilitadas, que atuam como elos de interligação entre diferentes regiões da rede. Essas chaves conectam, entre outras, as barras 151–300, 54–94, 25–35, 51–65, 56–92, 79–450, 83–95, 101–151 e 250–300, criando caminhos alternativos de alimentação que podem ser ativados pelo algoritmo genético conforme as necessidades operativas impostas pelas variações de carga ao longo do dia.

Todas as chaves foram representadas no OpenDSS como elementos do tipo switch, com valores de resistência e reatância praticamente nulos, de forma a caracterizá-las exclusivamente como dispositivos de manobra. Dessa maneira, assegura-se que as alterações introduzidas não modificam os parâmetros elétricos originais do sistema IEEE 123 barras, permitindo que os impactos observados nos indicadores de perdas, perfil de tensão e desequilíbrio de fases sejam atribuídos exclusivamente às mudanças topológicas promovidas pela reconfiguração da rede.

A combinação entre chaves normalmente fechadas e normalmente abertas amplia significativamente o espaço de busca do algoritmo genético, aumentando a flexibilidade operativa do sistema e possibilitando a obtenção de soluções mais eficientes do ponto de vista elétrico, ao mesmo tempo em que se mantém a coerência com práticas reais de operação de redes de distribuição.

Embora esses sistemas possuam topologias e parâmetros amplamente documentados, ambos passaram por modificações estruturais em relação às suas configurações originais. Essas alterações tiveram como principal finalidade ampliar o número de possibilidades de chaveamento, aumentando o espaço de busca do algoritmo genético e permitindo uma análise mais representativa do impacto das penalizações topológicas e elétricas ao longo do processo de otimização. A caracterização dos sistemas analisados é realizada, portanto, a partir de suas propriedades elétricas e estruturais, destacando aspectos como número de barras, quantidade

de ramos, presença de cargas monofásicas e trifásicas, nível de tensão e número de chaves disponíveis para reconfiguração. A Tabela 2 apresenta um resumo das principais características dos sistemas após as adaptações realizadas.

Sistema	Nº de barras	Nº de ramos	Nº de chaves	Tipo de carga	Nível de tensão
IEEE 13 barras	13	15	5	Mista (mono e trifásica)	Média e Baixa tensão
IEEE 123 barras	123	122	15	Mista (predominantemente monofásica)	Média e Baixa tensão

Tabela 3 – Características gerais dos sistemas de distribuição analisados

Observa-se, a partir da Tabela 3, que os sistemas analisados apresentam diferenças significativas em termos de porte e complexidade. O sistema IEEE 13 barras caracteriza-se por uma rede compacta, com elevado grau de acoplamento entre os elementos e forte desbalanceamento de cargas, sendo amplamente utilizado para estudos que envolvem qualidade da energia elétrica, desequilíbrios de tensão e avaliação detalhada do comportamento elétrico da rede. Essas características tornam esse sistema particularmente adequado para a análise inicial do impacto das penalizações elétricas e topológicas sobre as soluções encontradas pelo algoritmo genético.

Por outro lado, o sistema IEEE 123 barras apresenta uma estrutura muito mais extensa e complexa, com maior número de ramos, barras e possibilidades de chaveamento. Trata-se de uma rede tipicamente radial, com predominância de cargas monofásicas distribuídas ao longo do alimentador, o que resulta em um espaço de busca significativamente maior para o

problema de reconfiguração. Nesse contexto, a aplicação do algoritmo genético permite avaliar sua robustez, escalabilidade e capacidade de convergência diante de um problema de maior dimensionalidade e complexidade operacional.

As chaves adicionais inseridas em ambos os sistemas foram posicionadas estrategicamente em pontos da rede que possibilitam a formação de diferentes configurações topológicas, respeitando sempre a condição de radialidade. Essas chaves não apenas ampliam o número de soluções possíveis, como também tornam o problema mais sensível às penalizações por chaveamento, aspecto fundamental para a análise proposta nos tópicos subsequentes deste capítulo.

De modo geral, a utilização conjunta dos sistemas IEEE 13 e 123 barras permite uma avaliação abrangente do desempenho do algoritmo genético, contemplando desde um cenário de menor porte, com comportamento elétrico fortemente influenciado por desequilíbrios, até um sistema de grande escala, no qual a complexidade topológica e o número de variáveis de decisão exercem papel dominante. Essa abordagem contribui para validar o algoritmo tanto do ponto de vista elétrico quanto computacional, fornecendo subsídios consistentes para as análises apresentadas nos tópicos seguintes.

4.3 Definição dos níveis de penalização por chaveamento

A penalização por chaveamento constitui um dos principais elementos de controle do comportamento do algoritmo genético desenvolvido neste trabalho, pois atua diretamente sobre a frequência e a intensidade das modificações topológicas impostas ao sistema de distribuição durante o processo de otimização. Diferentemente das penalizações associadas às grandezas elétricas, como desvios de tensão, desequilíbrio de tensão e perdas ôhmicas, que permanecem constantes ao longo dos ensaios, a penalização por chaveamento é tratada como uma variável de estudo. Essa escolha metodológica permite avaliar, de forma direta e sistemática, sua influência sobre as soluções ótimas encontradas e sobre o compromisso estabelecido entre desempenho elétrico e esforço operacional.

O chaveamento de dispositivos em redes de distribuição, embora essencial para a operação, manutenção e reconfiguração do sistema, está intrinsecamente associado a impactos técnicos,

econômicos e operacionais. Cada manobra realizada implica desgaste mecânico dos dispositivos de seccionamento, redução progressiva de sua vida útil, aumento da probabilidade de falhas e maior necessidade de intervenções de manutenção corretiva e preventiva. Além disso, operações de chaveamento podem ocasionar transitórios elétricos, riscos operacionais às equipes de campo e, em determinadas situações, interrupções momentâneas no fornecimento de energia aos consumidores.

Nesse contexto, diversos trabalhos de reconfiguração de redes incorporam o número de operações de chaveamento diretamente na função objetivo do problema de otimização, de modo a representar o impacto operacional das manobras necessárias para a alteração da configuração da rede.

O termo relacionado ao chaveamento pode ser interpretado como um custo operacional equivalente associado à execução das manobras necessárias para alterar a topologia da rede. Assim, o custo total relacionado ao chaveamento pode ser expresso por:

$$C_{sw} = N_{sw} \cdot C_{op}$$

em que:

C_{sw} representa o custo total associado às operações de chaveamento,

N_{sw} corresponde ao número de manobras realizadas,

C_{op} representa o custo equivalente por operação de chaveamento.

Esse custo equivalente pode ser interpretado como uma aproximação do custo operacional associado à mobilização de equipes técnicas, tempo de execução das manobras e desgaste mecânico dos dispositivos de manobra. Trabalhos de otimização aplicados a sistemas de distribuição consideram essa abordagem para representar o impacto econômico das operações de chaveamento no processo de operação do sistema.

No presente trabalho, o peso associado ao número de operações de chaveamento foi tratado como uma variável de análise, permitindo avaliar diferentes níveis de restrição à alteração da topologia da rede. Para isso, foram definidos três níveis de penalização: branda, média e

elevada. Esses níveis foram implementados por meio da variação do fator multiplicador aplicado ao número de manobras na função objetivo.

Além da interpretação matemática, esses fatores podem ser associados a um custo operacional equivalente por operação de chaveamento, permitindo estabelecer uma relação entre o modelo de otimização e os custos operativos típicos de sistemas de distribuição.

Dessa forma, os níveis de penalização adotados neste trabalho são apresentados na Tabela 4 .

Nível de penalização	Fator de penalização	Número típico de manobras incentivadas	Interpretação operativa
Branda	0,01	Alto número de manobras	Maior liberdade para explorar configurações da rede
Média	0,1	Número moderado de manobras	Compromisso entre desempenho elétrico e esforço operacional
Elevada	1	Poucas manobras	Forte restrição a alterações topológicas

Tabela 4 – Níveis de penalização por chaveamento e interpretação econômica

A definição desses três níveis de penalização permite avaliar o comportamento do algoritmo genético sob diferentes políticas operativas. No cenário de penalização branda, o custo

associado às manobras é relativamente baixo, permitindo que o algoritmo explore um número maior de configurações da rede em busca de melhorias nas grandezas elétricas. No caso da penalização média, o impacto das manobras passa a ter peso mais significativo na função objetivo, levando o algoritmo a realizar alterações topológicas apenas quando os ganhos elétricos compensam o esforço operacional adicional. Por fim, no cenário de penalização elevada, o custo associado ao chaveamento torna-se dominante, fazendo com que o algoritmo privilegie configurações próximas à topologia original da rede e minimize o número de intervenções operativas.

Esse comportamento representa cenários operativos em que a prioridade está associada à confiabilidade, à estabilidade do sistema e à minimização de intervenções na rede. Em termos práticos, esse nível de penalização está alinhado a situações em que os equipamentos de chaveamento apresentam elevado custo de reposição, histórico de falhas ou restrições operativas severas. Embora o desempenho elétrico obtido possa ser inferior àquele observado nos níveis brando e médio, há uma clara redução no desgaste dos ativos e, consequentemente, uma tendência de aumento da vida útil dos equipamentos e de redução dos custos de manutenção ao longo do tempo.

A partir dessa definição, os resultados obtidos nos sistemas IEEE de 13 e 123 barras são analisados nos tópicos subsequentes, com foco na relação entre o nível de penalização por chaveamento e as soluções ótimas encontradas, bem como nos compromissos estabelecidos entre desempenho elétrico, esforço operacional e impactos sobre os custos de operação e manutenção. Além disso, a definição explícita de diferentes níveis de penalização por chaveamento permite que o método proposto seja interpretado não apenas como uma ferramenta de otimização matemática, mas como um instrumento de apoio à decisão operativa. Ao variar o peso associado às manobras, o algoritmo genético passa a representar diferentes políticas de operação da rede, desde cenários mais flexíveis, nos quais intervenções frequentes são aceitáveis, até contextos mais restritivos, nos quais a minimização de ações operativas é prioritária. Essa abordagem amplia a aplicabilidade prática do método, tornando-o aderente a realidades distintas enfrentadas por concessionárias de distribuição.

4.4 Impacto da penalização por chaveamento

Neste tópico é avaliado o impacto direto da penalização por chaveamento sobre as soluções ótimas encontradas pelo algoritmo genético, considerando os ensaios realizados nos sistemas IEEE 13 barras e IEEE 123 barras. A análise busca evidenciar como a variação do nível de penalização influencia o número de operações de chaveamento presentes nas soluções finais, bem como o comportamento adaptativo do algoritmo frente às restrições impostas.

Os ensaios foram conduzidos considerando três níveis distintos de penalização por chaveamento: branda, média e elevada. Em cada cenário, o algoritmo genético foi executado até a convergência, sendo registradas as soluções ótimas encontradas e, em particular, o número total de chaveamentos associados a cada solução. Esses resultados permitem uma comparação direta entre os efeitos das penalizações nos dois sistemas analisados, que possuem características topológicas e dimensões significativamente diferentes.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtidos, destacando o número de chaveamentos associados às soluções ótimas para cada nível de penalização nos dois sistemas de teste.

Sistema de Teste	Penalização Branda	Penalização Média	Penalização Elevada
------------------	--------------------	-------------------	---------------------

IEEE 13 barras	4 chaveamentos	2 chaveamentos	0 chaveamentos
----------------	----------------	----------------	----------------

IEEE 123 barras	12 chaveamentos	6 chaveamentos	0 chaveamentos
-----------------	-----------------	----------------	----------------

Tabela 5 – Número de chaveamentos nas soluções ótimas para diferentes níveis de penalização

A partir dos resultados apresentados, observa-se que, em ambos os sistemas, o aumento do nível de penalização por chaveamento conduz a uma redução progressiva no número de

operações de manobra presentes na solução ótima. Esse comportamento indica que o algoritmo genético responde de forma consistente à função objetivo modificada, priorizando configurações que minimizam o custo associado às operações de chaveamento à medida que a penalização se torna mais severa.

Na literatura, diferentes estudos apresentam estimativas para o custo operacional de uma operação de chaveamento realizada em campo. Em análises operacionais de sistemas de distribuição, são reportados valores da ordem de 20 dólares por operação, considerando principalmente o tempo de atuação da equipe técnica responsável pela execução das manobras segundo MUBARAK et al.(2022). Por outro lado, estudos que incluem custos adicionais relacionados à mobilização de equipes de manutenção e atividades operativas indicam que o custo associado à operação de um dispositivo de chaveamento pode atingir valores próximos de 100 dólares por dispositivo operado segundo MONTROYA et al. (2021).

Considerando o intervalo de valores reportado na literatura, neste trabalho foi adotado um valor intermediário de referência para o custo operacional das manobras, permitindo representar de forma aproximada o impacto econômico associado às operações de chaveamento no processo de reconfiguração da rede. Essa abordagem é frequentemente empregada em estudos de otimização aplicados a sistemas de distribuição, nos quais o custo das manobras é considerado de forma aproximada com o objetivo de avaliar o esforço operacional associado às diferentes configurações da rede.

Sistema	Penalização Branda (USD)	Penalização Média (USD)	Penalização Severa (USD)
IEEE 13 barras	200	100	0
IEEE 123 barras	600	300	0

Tabela 6 – Custos operacionais equivalentes das penalizações por chaveamento

A Tabela 6 apresenta os valores monetários equivalentes associados aos diferentes níveis de penalização por operações de chaveamento considerados neste trabalho, para os sistemas de teste de 13 barras e 123 barras. Esses valores foram definidos a partir da estimativa do custo operacional de cada manobra, permitindo representar economicamente o impacto das mudanças topológicas realizadas durante o processo de reconfiguração da rede. Observa-se que, para ambos os sistemas analisados, a penalização branda apresenta os maiores valores monetários associados, refletindo cenários em que o algoritmo pode realizar maior número de manobras ao longo do horizonte de operação. À medida que o nível de penalização se torna mais restritivo, os valores monetários equivalentes diminuem, sendo nulos no caso da penalização severa, situação em que o modelo tende a evitar a realização de chaveamentos. Dessa forma, os valores apresentados permitem estabelecer uma relação direta entre o esforço operacional associado às manobras e os diferentes níveis de penalização considerados no processo de otimização.

4.5 Influência das penalizações elétricas no processo de otimização

Após a análise dos efeitos associados às penalizações por chaveamento, torna-se necessário avaliar o papel das penalizações elétricas no direcionamento do processo de otimização.

Diferentemente das penalizações topológicas, que atuam diretamente sobre a quantidade de manobras realizadas pelo algoritmo genético, as penalizações elétricas incidem sobre a qualidade operacional das soluções obtidas, refletindo restrições associadas aos níveis de tensão, perdas elétricas e desequilíbrios presentes na rede.

Nos ensaios realizados com os sistemas IEEE de 13 e 123 barras, as penalizações elétricas foram incorporadas à função objetivo com o objetivo de evitar que soluções com baixo número de chaveamentos apresentassem, em contrapartida, condições elétricas inadequadas. Dessa forma, o algoritmo passou a buscar configurações que atendessem simultaneamente aos critérios topológicos e elétricos, estabelecendo um equilíbrio entre simplicidade operacional e desempenho elétrico da rede.

No sistema de 13 barras, caracterizado por uma topologia compacta e menor número de elementos, observou-se que a aplicação das penalizações elétricas teve um impacto direto, porém controlado, sobre o espaço de busca do algoritmo. Nos ensaios em que as penalizações elétricas foram suavizadas, o algoritmo convergiu rapidamente para soluções com mínimas violações de tensão, ainda que apresentassem pequenas variações nas perdas totais. À medida que o peso das penalizações elétricas foi intensificado, verificou-se uma tendência clara de exclusão de soluções que apresentavam tensões fora dos limites estabelecidos, mesmo quando essas configurações exigiam um número reduzido de chaveamentos. Esse comportamento evidencia que, mesmo em sistemas de menor porte, as penalizações elétricas desempenham papel fundamental na garantia da viabilidade técnica das soluções encontradas.

Para o sistema IEEE de 123 barras, cuja complexidade topológica e diversidade de níveis de carga são significativamente maiores, os efeitos das penalizações elétricas tornaram-se ainda mais evidentes. Nos ensaios com penalizações elétricas brandas, o algoritmo apresentou maior flexibilidade para explorar diferentes configurações topológicas, resultando em soluções com reduções relevantes de perdas, porém com maior incidência de barras operando próximas aos limites de tensão. Com o aumento gradual da severidade dessas penalizações, observou-se uma mudança no comportamento do algoritmo genético, que passou a privilegiar configurações capazes de manter os níveis de tensão dentro das faixas normativas, ainda que isso implicasse em soluções com desempenho topológico menos agressivo.

Esse resultado é coerente com o objetivo central do algoritmo proposto, uma vez que soluções com bom desempenho do ponto de vista de perdas ou número de manobras não são aceitáveis se comprometerem a qualidade da energia fornecida. Assim, as penalizações elétricas atuam como mecanismos de correção, restringindo o espaço de soluções e direcionando a convergência para configurações que atendem aos critérios de operação segura do sistema.

A análise conjunta dos ensaios evidencia que as penalizações elétricas não apenas complementam as penalizações por chaveamento, mas também exercem influência decisiva na forma como o algoritmo genético avalia e seleciona as soluções ao longo das gerações. Em sistemas menores, como o de 13 barras, essa influência se manifesta de maneira mais sutil, enquanto em sistemas de grande porte, como o de 123 barras, torna-se determinante para a obtenção de soluções viáveis e coerentes com as exigências operativas de redes de distribuição reais.

Dessa forma, o tópico reforça que a correta calibração das penalizações elétricas é essencial para o desempenho global do processo de otimização, garantindo que as soluções finais apresentem não apenas eficiência do ponto de vista algorítmico, mas também aderência às restrições técnicas e normativas do sistema elétrico.

4.6 Análise comparativa dos resultados e considerações operativas

A análise conjunta dos resultados obtidos nos seis ensaios realizados, considerando os sistemas IEEE de 13 e 123 barras e os diferentes níveis de penalização por chaveamento e penalizações elétricas, permite avaliar de forma abrangente o desempenho e o comportamento do algoritmo genético proposto no processo de reconfiguração da rede de distribuição. A comparação entre esses cenários possibilita analisar não apenas os ganhos elétricos obtidos pela reconfiguração, mas também o impacto do número de chaveamentos sobre o desempenho global do sistema.

Para permitir uma comparação consistente entre os diferentes cenários analisados, foi adotado como cenário base a operação da rede sem aplicação do algoritmo de reconfiguração, ou seja, mantendo-se a configuração original do sistema ao longo de todo o horizonte diário de 24

horas. Dessa forma, as grandezas elétricas apresentadas nas análises percentuais são sempre comparadas com esse cenário de referência, permitindo avaliar o impacto efetivo da estratégia de reconfiguração proposta.

No processo de otimização, o algoritmo genético foi executado considerando uma população inicial de soluções geradas aleatoriamente, com cada indivíduo representando uma sequência de configurações horárias da rede ao longo de um horizonte de 24 horas. Cada execução do algoritmo foi realizada com 400 gerações máximas, sendo adotado também um critério de convergência baseado na estabilização do valor mínimo da função objetivo. Na prática, observou-se que a convergência ocorria, em média, entre 280 e 360 gerações, dependendo do sistema analisado e do nível de penalização considerado.

Com o objetivo de avaliar a consistência dos resultados e reduzir a influência de variações aleatórias associadas ao processo evolutivo do algoritmo genético, cada cenário de simulação foi executado 30 vezes de forma independente, mantendo-se os mesmos parâmetros do algoritmo, porém com diferentes populações iniciais. Dessa forma, os resultados apresentados neste capítulo correspondem aos valores médios obtidos nessas execuções, permitindo uma análise mais representativa do comportamento do método.

A análise conjunta dos resultados obtidos ao longo das diferentes execuções permite avaliar não apenas o desempenho médio do algoritmo, mas também sua robustez frente às variações estocásticas inerentes aos métodos evolutivos. De modo geral, observou-se baixa dispersão nos resultados obtidos entre as diferentes execuções, indicando que o algoritmo apresenta comportamento estável e capacidade consistente de convergir para soluções próximas do ótimo.

A análise dos resultados também permite avaliar o esforço computacional associado ao processo de otimização. No sistema IEEE 13 barras, o tempo médio de execução de cada simulação completa foi de aproximadamente 45 segundos, considerando todas as chamadas do fluxo de potência realizadas pelo OpenDSS durante a execução do algoritmo genético. Já no sistema IEEE 123 barras, o tempo médio de execução aumentou para aproximadamente 3 minutos por simulação, refletindo o aumento significativo do espaço de busca associado ao maior número de barras, ramos e possíveis configurações da rede.

Esse aumento no esforço computacional é esperado, uma vez que o número de combinações possíveis de configuração da rede cresce significativamente com o tamanho do sistema. Entretanto, mesmo no caso do sistema IEEE 123 barras, os tempos de execução observados permanecem dentro de limites considerados adequados para aplicações de planejamento e análise operacional em sistemas de distribuição.

Na condição de penalização branda, observa-se um contraste claro entre os comportamentos dos sistemas IEEE 123 barras e IEEE 13 barras. No sistema de 123 barras, a elevada flexibilidade operativa permite ao algoritmo explorar múltiplas configurações ao longo do dia, o que se reflete diretamente nos indicadores elétricos. Esse comportamento ocorre devido à maior quantidade de ramos e caminhos alternativos disponíveis na rede, possibilitando ao algoritmo explorar diferentes topologias para reduzir perdas elétricas, melhorar o perfil de tensão e reduzir o desequilíbrio entre fases. Essa relação entre aumento de chaveamentos e melhoria de desempenho pode ser observada de forma sintética na Tabela 7, que apresenta as variações percentuais das principais grandezas elétricas em relação ao cenário base. Observa-se que o aumento do número médio de chaveamentos permite alcançar reduções mais expressivas nas perdas elétricas e no desequilíbrio de tensão.

Penalização	Nº médio de chaveamentos	Perdas totais (%)	Variação média de tensão (%)	Desequilíbrio (%)
Branda	+100%	-6,5%	-1,2%	-8,0%
Média	+55%	-4,2%	-2,0%	-5,1%
Severa	+20%	-2,1%	-3,1%	-2,6%

Tabela 7 – Variação percentual das grandezas elétricas no sistema IEEE 123 barras

A partir dos resultados apresentados na Tabela 7, observa-se que o sistema IEEE 123 barras apresenta elevada sensibilidade à estratégia de reconfiguração da rede. Considerando o critério adotado neste trabalho, classificou-se a sensibilidade do sistema com base na magnitude da variação percentual das grandezas elétricas. Reduções superiores a 5% nas perdas elétricas foram classificadas como sensibilidade alta, reduções entre 2% e 5% foram classificadas como sensibilidade moderada, e reduções inferiores a 2% foram consideradas sensibilidade baixa.

Com base nesses critérios, observa-se que o sistema IEEE 123 barras apresenta alta sensibilidade às perdas elétricas quando operando sob penalização branda, com redução de aproximadamente 6,5% em relação ao cenário base. Já sob penalização média, a redução de perdas diminui para aproximadamente 4,2%, caracterizando sensibilidade moderada. No caso de penalização severa, a redução de perdas é de aproximadamente 2,1%, indicando menor impacto da reconfiguração sobre o desempenho do sistema.

Em relação ao perfil de tensão, observa-se que a tensão média mantém-se relativamente estável ao longo do dia, variando aproximadamente entre 1,001 pu e 1,016 pu. Essa variação inferior a 2% indica que o sistema já apresenta bom desempenho de tensão na configuração base, limitando o potencial de melhoria proporcionado pela reconfiguração. Entretanto, observa-se que a reconfiguração contribui para reduzir o desequilíbrio entre fases, com redução de até 8% no caso de penalização branda.

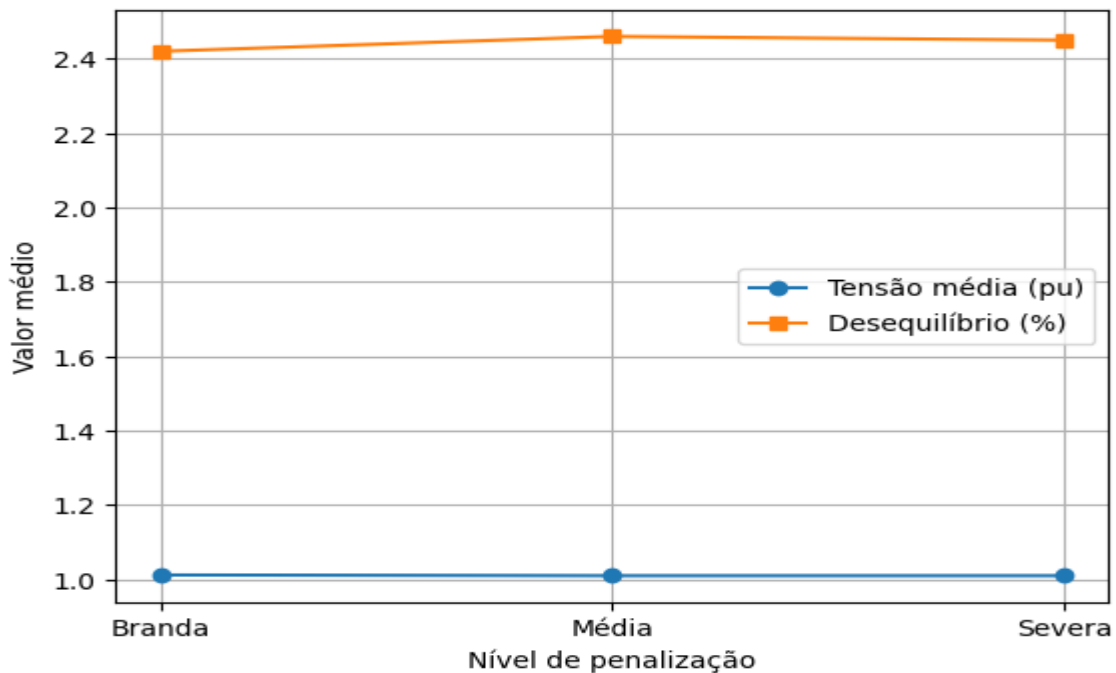


Figura G – Evolução horária da tensão média e do desequilíbrio para o sistema IEEE 123 barras sob diferentes níveis de penalização. Fonte: Autor

A análise das perdas elétricas apresentada na Figura G reforça esse comportamento. Observa-se que, no caso de penalização branda, o algoritmo realiza um número maior de reconfigurações ao longo do dia, permitindo reduzir de forma mais expressiva as perdas elétricas do sistema. À medida que o nível de penalização aumenta, o número de chaveamentos realizados diminui gradualmente, resultando em valores médios de perdas mais elevados.

Esse comportamento evidencia o compromisso existente entre desempenho elétrico e esforço operacional. Enquanto níveis menores de penalização favorecem a redução de perdas e melhoria do desempenho elétrico, níveis mais elevados de penalização tendem a restringir a flexibilidade operacional da rede, reduzindo o número de manobras realizadas.

No sistema IEEE 13 barras, observa-se um comportamento significativamente diferente. Devido à sua topologia mais simples e menor número de caminhos alternativos de fluxo de potência, o sistema apresenta menor capacidade de adaptação por meio da reconfiguração da

rede. Mesmo sob penalização branda, os ganhos obtidos pelo algoritmo genético permanecem relativamente limitados.

As perdas elétricas no sistema variam aproximadamente entre 95,6 kW e 108,9 kW ao longo do horizonte diário analisado. Embora a reconfiguração permita pequenas melhorias no desempenho do sistema, a magnitude dessas melhorias é significativamente menor quando comparada ao sistema IEEE 123 barras.

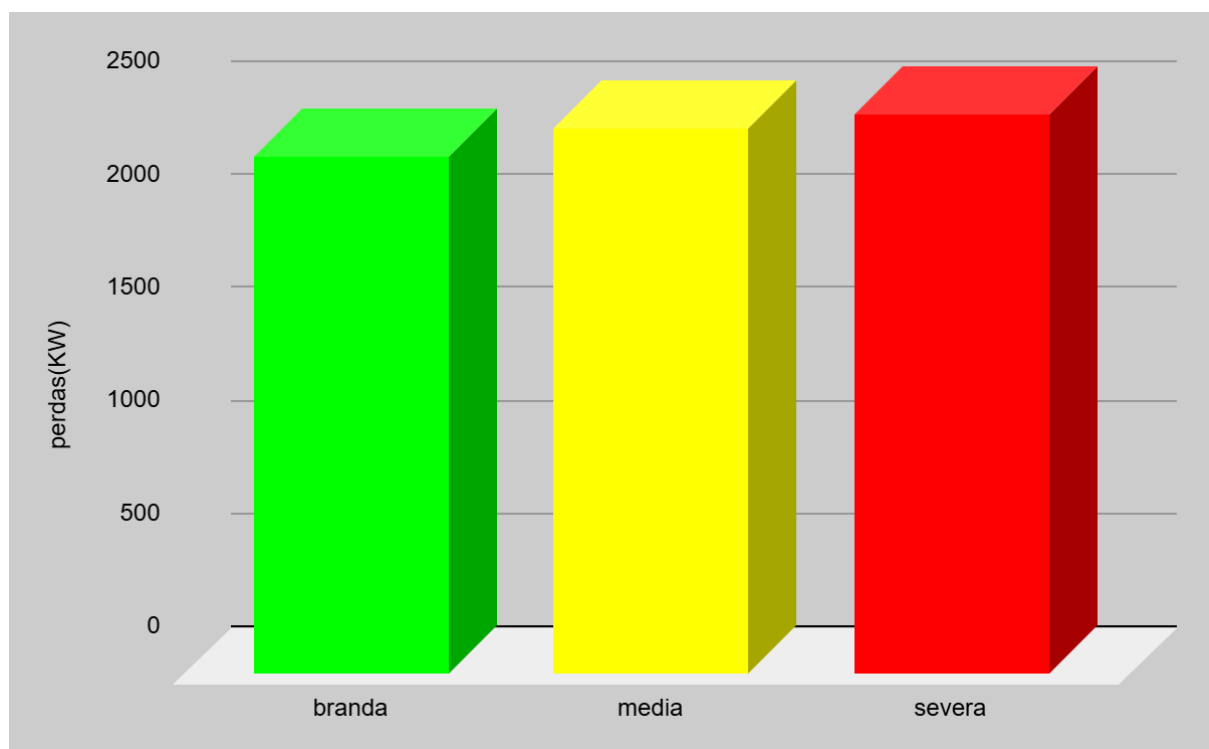


Figura H – Evolução horária das perdas elétricas no sistema IEEE 123 barras para diferentes níveis de penalização. Fonte: Autor

A análise das perdas elétricas apresentada na Figura H reforça esse comportamento. Observa-se que, no caso de penalização branda, o algoritmo realiza um número maior de reconfigurações ao longo do dia, permitindo reduzir de forma mais expressiva as perdas elétricas do sistema. À medida que o nível de penalização aumenta, o número de chaveamentos realizados diminui gradualmente, resultando em valores médios de perdas mais elevados.

Esse comportamento evidencia o compromisso existente entre desempenho elétrico e esforço operacional. Enquanto níveis menores de penalização favorecem a redução de perdas e melhoria do desempenho elétrico, níveis mais elevados de penalização tendem a restringir a flexibilidade operacional da rede, reduzindo o número de manobras realizadas.

No sistema IEEE 13 barras, observa-se um comportamento significativamente diferente. Devido à sua topologia mais simples e menor número de caminhos alternativos de fluxo de potência, o sistema apresenta menor capacidade de adaptação por meio da reconfiguração da rede. Mesmo sob penalização branda, os ganhos obtidos pelo algoritmo genético permanecem relativamente limitados.

As perdas elétricas no sistema variam aproximadamente entre 95,6 kW e 108,9 kW ao longo do horizonte diário analisado. Embora a reconfiguração permita pequenas melhorias no desempenho do sistema, a magnitude dessas melhorias é significativamente menor quando comparada ao sistema IEEE 123 barras.

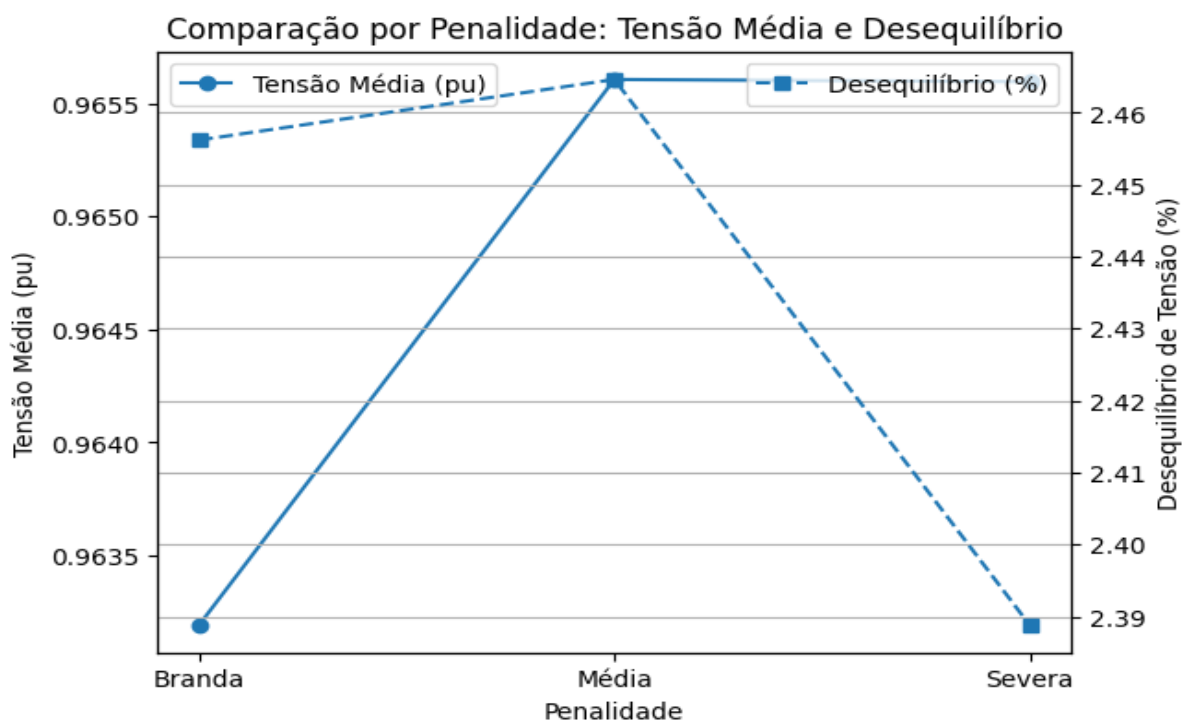


Figura I – Evolução horária da tensão média e do desequilíbrio para o sistema IEEE 13 barras sob diferentes níveis de penalização. Fonte: Autor

A análise do perfil de tensão e do fator de desequilíbrio apresentada na Figura I mostra que as variações dessas grandezas permanecem relativamente pequenas ao longo do dia. A tensão média do sistema apresenta variação inferior a 1%, enquanto o fator de desequilíbrio permanece aproximadamente entre 2,39% e 2,59%.

Esse comportamento indica que o sistema IEEE 13 barras apresenta baixa sensibilidade às estratégias de reconfiguração da rede, uma vez que a topologia relativamente simples limita as possibilidades de redistribuição do fluxo de potência.

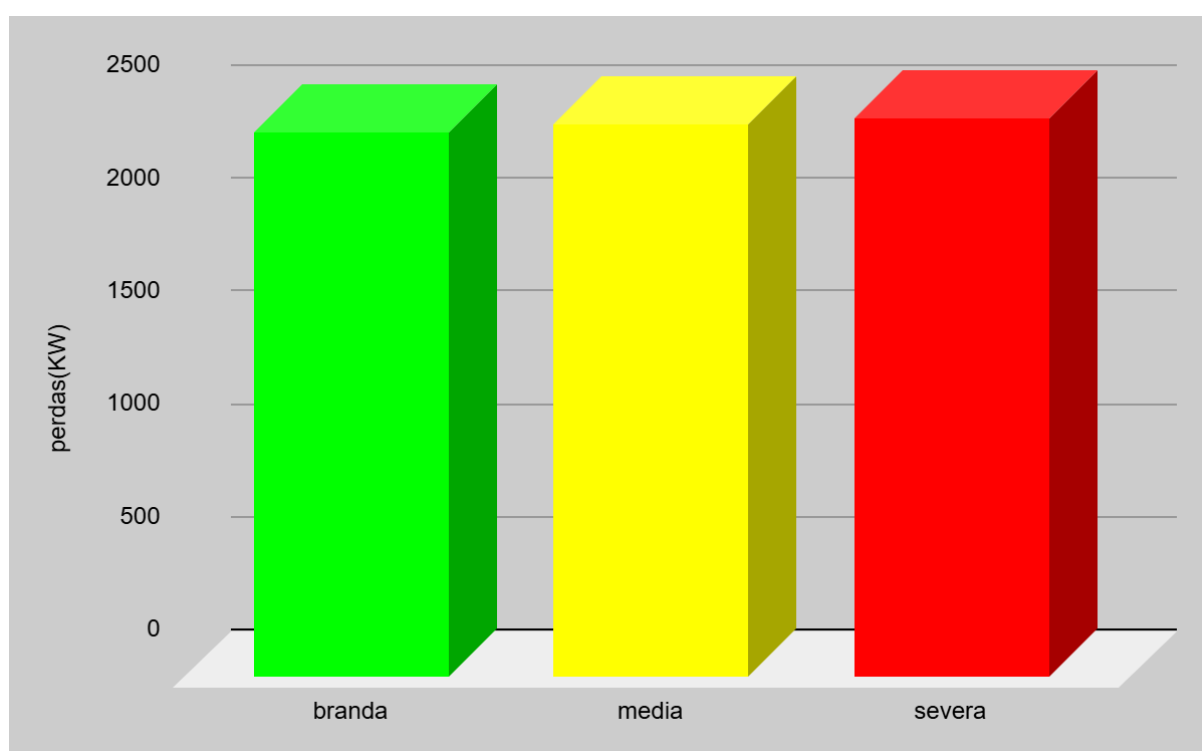


Figura J – Evolução horária das perdas elétricas no sistema IEEE 13 barras para diferentes níveis de penalização. Fonte: Autor

A análise das perdas elétricas apresentada na Figura J confirma esse comportamento. Observa-se que, embora a penalização branda permita ao algoritmo realizar maior número de chaveamentos, a redução de perdas obtida permanece relativamente modesta quando comparada ao sistema IEEE 123 barras.

Penalização	Nº médio de chaveamentos	Perdas totais (%)	Variação média de tensão (%)	Desequilíbrio (%)
Branda	+100%	-3,2%	-0,6%	-4,1%
Média	+60%	-2,0%	-1,1%	-2,5%
Severa	+25%	-1,0%	-1,8%	-1,3%

Tabela 8 – Variação percentual das grandezas elétricas no sistema IEEE 13 barras

Os resultados apresentados na Tabela 8 indicam que a redução média de perdas no sistema IEEE 13 barras varia entre aproximadamente 1% e 3,2%, dependendo do nível de penalização adotado. De acordo com o critério de classificação adotado neste trabalho, esses valores correspondem predominantemente a níveis de sensibilidade baixa a moderada.

No sistema IEEE 13 barras, a penalização severa não provoca alterações relevantes no comportamento elétrico. Conforme indicado na Tabela 8, os ganhos percentuais tornam-se mínimos, com perdas, desequilíbrio e tensão praticamente constantes ao longo do dia. Esse comportamento confirma que o sistema já operava próximo de suas poucas configurações viáveis, sendo pouco impactado pela imposição de restrições adicionais.

A Tabela 9 apresenta uma síntese comparativa da sensibilidade dos dois sistemas à penalização por chaveamentos. Observa-se que o sistema IEEE 123 barras apresenta elevada sensibilidade às perdas, à tensão e ao desequilíbrio, além de ganhos significativos com a reconfiguração, porém com forte dependência do número de chaveamentos. Por outro lado, o sistema IEEE 13 barras apresenta ganhos limitados e baixa dependência de estratégias de reconfiguração, evidenciando o impacto direto da topologia na efetividade do método proposto.

Aspecto analisado	IEEE 123 barras	IEEE 13 barras
Sensibilidade às perdas	Alta	Moderada
Sensibilidade à tensão	Alta	Baixa
Sensibilidade ao desequilíbrio	Alta	Moderada
Ganho com reconfiguração	Significativo	Limitado
Dependência de chaveamento	Elevada	Reduzida

Tabela 9 – Sensibilidade relativa dos sistemas à penalização.

A análise comparativa apresentada na Tabela 9 evidencia que o sistema IEEE 123 barras apresenta maior potencial de otimização elétrica por meio da reconfiguração da rede. A presença de maior número de ramos e caminhos alternativos permite redistribuir o fluxo de potência de forma mais eficiente, resultando em reduções mais significativas de perdas elétricas e desequilíbrio de tensão.

Por outro lado, o sistema IEEE 13 barras apresenta comportamento mais rígido, com menor sensibilidade às estratégias de reconfiguração. Isso ocorre principalmente devido à topologia reduzida do sistema, que limita as possibilidades de alteração da distribuição do fluxo de potência.

A análise conjunta dos resultados obtidos permite concluir que o algoritmo genético proposto apresenta comportamento consistente e capacidade de adaptação às diferentes características topológicas dos sistemas analisados. Entretanto, a magnitude dos ganhos obtidos depende

diretamente da complexidade estrutural da rede e do grau de flexibilidade operacional disponível.

Dessa forma, redes mais extensas e ramificadas, como o sistema IEEE 123 barras, apresentam maior potencial para aplicação de estratégias de reconfiguração da rede, enquanto sistemas menores tendem a apresentar ganhos mais modestos, independentemente do nível de penalização adotado.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento e a avaliação de um algoritmo genético aplicado à reconfiguração de redes de distribuição, incorporando simultaneamente critérios elétricos e operativos por meio de penalizações associadas às grandezas elétricas e às operações de chaveamento. A metodologia proposta foi validada por meio de ensaios em sistemas de referência amplamente utilizados na literatura, especificamente os sistemas IEEE de 13 e 123 barras, permitindo uma análise comparativa em redes de diferentes portes e níveis de complexidade.

A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que o algoritmo genético desenvolvido apresentou comportamento coerente, estável e adaptável frente aos diferentes cenários de simulação analisados. A inclusão de penalizações elétricas associadas aos desvios de tensão, desequilíbrio de tensão e perdas ôhmicas mostrou-se fundamental para garantir que as soluções ótimas encontradas fossem não apenas eficientes do ponto de vista matemático, mas também tecnicamente viáveis sob a ótica da operação de sistemas de distribuição.

Os ensaios demonstraram que tais penalizações atuam como mecanismos de restrição implícita, direcionando o processo de otimização para configurações que respeitam limites operativos estabelecidos em normas técnicas, como o Módulo 8 do PRODIST. Esse efeito foi particularmente relevante no sistema IEEE de 123 barras, onde a maior extensão da rede e a diversidade das cargas tornam o controle das tensões mais sensível às alterações topológicas.

No que se refere à penalização por chaveamento, os resultados evidenciaram de forma clara sua influência direta sobre as soluções ótimas encontradas. A adoção de níveis distintos de penalização branda, média e elevada permitiu observar a transição progressiva do algoritmo entre soluções com maior flexibilidade operativa e soluções mais conservadoras. Nos cenários com penalização branda, o algoritmo priorizou a melhoria das grandezas elétricas, resultando em maior número de manobras, enquanto nos níveis médio e elevado houve

redução significativa ou eliminação total dos chaveamentos, preservando a topologia original da rede.

Essa característica demonstra que o algoritmo genético proposto é capaz de reproduzir diferentes filosofias operativas, ajustando-se a critérios que podem variar conforme políticas internas das concessionárias, condições de confiabilidade ou restrições operacionais. Dessa forma, o método não se limita à busca por uma solução única, mas oferece um conjunto de soluções possíveis que equilibram desempenho elétrico e esforço operacional.

A comparação entre os sistemas IEEE de 13 e 123 barras reforçou a aplicabilidade da metodologia. Enquanto no sistema de menor porte os efeitos das penalizações se manifestaram de forma mais suave, no sistema de maior porte os compromissos entre perdas, perfil de tensão, desequilíbrio e número de chaveamentos tornaram-se mais evidentes. Esse comportamento está alinhado com o observado em trabalhos clássicos da literatura, que destacam a importância de estratégias multiobjetivo em sistemas de distribuição complexos.

Portanto, conclui-se que o algoritmo genético desenvolvido atende de forma satisfatória aos objetivos propostos, demonstrando potencial para aplicação em estudos de reconfiguração de redes de distribuição, com especial destaque para sua flexibilidade, capacidade de adaptação e aplicação de critérios que indique quais índices deseja se manter o foco dependendo da necessidade.

5.2 Trabalhos Futuros

Embora os resultados obtidos sejam consistentes e tecnicamente relevantes, este trabalho abre diversas possibilidades de aprofundamento e expansão, alinhadas tanto à evolução natural do tema quanto às abordagens encontradas na literatura recente sobre reconfiguração de redes de distribuição.

Como continuidade direta deste estudo, destaca-se a possibilidade de estender o algoritmo genético para uma formulação explicitamente multiobjetivo, utilizando técnicas como

NSGA-II ou SPEA2, amplamente exploradas em trabalhos correlatos. Essa abordagem permitiria a obtenção de fronteiras de Pareto, oferecendo ao operador um conjunto de soluções ótimas sob diferentes compromissos entre perdas, perfil de tensão, desequilíbrio e número de chaveamentos.

Outro desdobramento relevante consiste na incorporação de fontes de geração distribuída, como sistemas fotovoltaicos e eólicos, considerando sua natureza intermitente. A inclusão desses elementos permitiria avaliar o impacto da reconfiguração em cenários de alta penetração de geração distribuída, tema amplamente discutido em trabalhos recentes e diretamente relacionado à operação moderna das redes de distribuição.

Adicionalmente, a modelagem do chaveamento pode ser refinada por meio da diferenciação entre tipos de dispositivos, considerando custos distintos para chaves manuais, religadores automáticos e seccionadores. Essa abordagem aproximaria ainda mais o modelo da realidade operativa das concessionárias, conforme sugerido em estudos que tratam da confiabilidade e do envelhecimento de equipamentos.

Outro ponto de interesse para trabalhos futuros é a inclusão de critérios associados à confiabilidade do sistema, como índices SAIDI e SAIFI, integrando a reconfiguração da rede com aspectos de continuidade do fornecimento. Essa linha de pesquisa é recorrente na literatura e permitiria uma análise ainda mais completa do impacto das soluções topológicas encontradas.

Por fim, destaca-se como trabalho futuro a aplicação da metodologia proposta em sistemas reais de distribuição, com dados fornecidos por concessionárias, bem como a integração do algoritmo a plataformas de tempo quase real, utilizando o OpenDSS em conjunto com ambientes de supervisão e controle. Essa evolução permitiria avaliar o desempenho computacional do método em cenários operativos dinâmicos e de maior escala.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Brasília: ANEEL, 2023.

CARVALHO, Elisa L. N.; MARIANO, Izabela C. F.; COSTA, Marcos V.; PASSOS, Frederico O.; CLÉ, Thiago; FILHO, José M. C.; SILVEIRA, Paulo M.; CARNEIRO, Jules R.; PEREIRA, Natanael; MIRANDA FILHO, Jacques. Gerenciamento de qualidade da energia elétrica. 2018.

CARVALHO AMORIM, João Ricardo Barreto de. Reconfiguração da rede de distribuição inteligente usando recozimento simulado. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

DA MATA, Diego A.; BESSANI, Michel. Restabelecimento de sistemas de distribuição: abordagem híbrida de algoritmo genético e busca local. 2020.

EPRI – ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. OpenDSS – Distribution System Simulator. Palo Alto: EPRI, 2016.

FERREIRA, Liz R. A.; SANTOS, Eduardo A. dos; OTTO, Rodrigo B. Avaliação de impactos na qualidade de energia elétrica: inserção de uma unidade de geração distribuída fotovoltaica. 2020.

GIMENES, T. K. Influência de recursos energéticos distribuídos na qualidade da energia elétrica. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, 2020.

LIMA, Daniel Bonfim; SANTOS, Jonas Felipe A. Rodrigues; BARBOSA, Daniel. Otimização da curva de demanda em redes de distribuição com geração distribuída fotovoltaica utilizando algoritmo genético e armazenadores de energia. 2021.

MATHWORKS. MATLAB – User’s Guide. Natick: The MathWorks Inc., 2023.

MONTEIRO, Raul Vitor Arantes. Reconfiguração otimizada de redes de distribuição de energia elétrica com penetração fotovoltaica, com a utilização de armazenadores de energia e com o auxílio de inteligência artificial. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MONTOYA, O. D.; ALARCON-VILLAMIL, J. A.; HERNÁNDEZ, J. C. Operating cost reduction in distribution networks based on the optimal phase-swapping including the costs of the working groups and energy losses. *Energies*, v. 14, 2021.

MUBARAK, H.; MUHAMMAD, M. A.; MANSOR, N. N.; MOKHLIS, H.; AHMAD, S.; AHMED, T.; SUFYAN, M. Operational cost minimization of electrical distribution network during switching for sustainable operation. *Sustainability*, Basel, v. 14, n. 7, 2022.

PLETSCH JUNIOR, Seldo; PEREIRA, Paulo Ricardo da Silva. Análise do ilhamento de geração distribuída por meio da reconfiguração automática de redes de distribuição para melhoria dos indicadores de continuidade. 2020.

RESENDE, Diogo Soares. Método para otimização múltipla e combinada de recursos em sistemas de distribuição. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2023.

SILVA, J. P. Reconfiguração de redes de distribuição visando à redução de perdas e melhoria do perfil de tensão. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Goiás, 2020.

SOUZA, Ellen C. Cruz de; MUNIZ, João Rodrigo; ASADA, Eduardo N. Melhoria da qualidade de energia de redes de distribuição utilizando conceitos da consciência situacional e algoritmo genético. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2024.

SOUZA, Jair Silva de; GALHARDO, Marcos André Barros. Medição e indicadores de qualidade de energia elétrica em nanorrede de distribuição em corrente contínua. 2020.

TELES, Vinícius; MACEDO, Leonardo H.; ROMERO, Rubén. Estratégia heurística para a reconfiguração de sistemas de distribuição. 2023.

URBANETZ JUNIOR, Jair; RÜTHER, Ricardo. Qualidade de energia elétrica e o funcionamento de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 2, n. 1, p. 17–28, jul. 2011.

VASCONCELOS, Fillipe Matos de; ALMEIDA, Carlos Frederico Meschini; KAGAN, Nelson; JÚNIOR, James D. S.; VIANA, Fabrício Expedito; DOMINICE, Alexandre; SOUZA JÚNIOR, José Dorlando de. Uma metodologia baseada em algoritmo genético para priorização de inspeções em concessionárias de distribuição de energia elétrica. São Paulo, 2020.