

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ellen Aranxa Figueredo Duarte Lousada

**MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DE LÓGICA DE DETERMINAÇÃO DE  
OPERAÇÕES DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO NO  
OPENDSS INTEGRADO AO PYTHON**

Betim

2026

ELLEN LOUSADA

**MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DE LÓGICA DE DETERMINAÇÃO DE  
OPERAÇÕES DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO NO  
OPENDSS INTEGRADO AO PYTHON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Welinton La Fontaine Lopes

Betim

**2026**

## FICHA CATALOGRÁFICA

L982m Lousada, Ellen Aranxa Figueredo Duarte

Modelagem e implementação de lógica de determinação de operações de reconfiguração de redes de distribuição no OpenDSS integrado ao Python / Ellen Aranxa Figueredo Duarte Lousada. – 2026.

64 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Welinton La Fontaine Lopes

1. Lógica de programação. 2. Algoritmos. 3. Python (Linguagem de programação de computador). 4. Redes de distribuição. 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Lousada, Ellen Aranxa Figueredo Duarte. II. Título.

CDU: 681.5



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**  
**Campus Betim**  
**Diretoria de Ensino**  
**Docentes Automação Industrial e Tecnologia da Informação**  
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG  
3135976360 - www.ifmg.edu.br

## **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Aos 29 dias do mês de janeiro do ano de 2026, às dezoito horas e trinta minutos, nas dependências do IFMG – *Campus* Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Welinton La Fontaine Lopes e demais membros, Arthur Hermano Rezende Rosa e Alyson Geraldo Guimarães Cardoso. Nesta ocasião a discente **Ellen Aranja Figueredo Duarte Lousada** do curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, com registro acadêmico de número 0066216 do IFMG – *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DE LÓGICA DE DETERMINAÇÃO DE OPERAÇÕES DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO NO OPEXDSS INTEGRADO AO PYTHON” e foi APROVADO, com 92 (noventa e dois) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 20 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às dezenove horas e vinte minutos. Para constar, eu, Welinton La Fontaine Lopes, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Betim, 29 de janeiro de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Welinton La Fontaine Lopes, Professor**, em 31/01/2026, às 19:34, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Alyson Geraldo Guimarães Cardoso, Professor Substituto**, em 01/02/2026, às 22:09, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Hermano Rezende Rosa, Professor**, em 03/02/2026, às 05:53, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2593196** e o código CRC **9C73A985**.

23792.000775/2025-78

2593196v1

A Deus, por iluminar a minha jornada e o meu caminho com sua infinita bondade.

Aos meus familiares, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado em cada passo dessa trajetória. Em especial ao meu pai, que se foi em 2024, seu amor e exemplo de vida continuarão vivos em mim, em cada passo que dou.

Aos meus amigos, que com alegria e companhia tornaram os desafios mais leves.

Aos meus professores, por sua paciência, dedicação e conhecimento.

Sem o apoio de cada um de vocês, este trabalho não teria sido possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, professor Welinton, por aceitar a conduzir o meu trabalho.

A todos os meus professores do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Betim e Campus Ibirité, minha trajetória acadêmica teve início em suas mãos, sendo moldada pela excelência técnica e dedicação de cada um. Cada um de vocês contribuiu de maneira significativa para o meu crescimento e para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, meu irmão e meus amigos que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória.

"Há que se cuidar do broto pra que a vida  
nos dê flor e fruto."  
Milton Nascimento, Coração de Estudante

## RESUMO

A reconfiguração de redes de distribuição é uma estratégia importante para reduzir o impacto de interrupções no fornecimento de energia, sobretudo em sistemas radiais onde a abertura de um único trecho pode desligar uma grande extensão da rede. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implementação de um algoritmo para determinação automática de opções para reconfiguração de uma rede de distribuição baseado na identificação e execução da sequência ótima de manobra, empregando o simulador elétrico OpenDSS integrado à linguagem Python. A metodologia proposta compreende: (i) a modelagem da rede IEEE 123-bus; (ii) a extração da topologia elétrica e construção de um banco de dados SQLite contendo conexões, chaves, cargas e coordenadas; (iii) o desenvolvimento de um algoritmo determinístico capaz de identificar o trecho a ser isolado, selecionar a chave de abertura inicial (NF), determinar a melhor chave de transferência (NA) para restabelecimento de carga, adotando como critério a maximização da carga ativa total restaurada, sem diferenciação de criticidade entre as carga e aplicar a chave de contenção final (NF); e (iv) a validação elétrica das manobras no OpenDSS. Para uso operacional, foi desenvolvida uma plataforma interativa em Streamlit, permitindo ao usuário selecionar o vão desejado e visualizar automaticamente a sequência de recomposição, bem como as cargas interrompidas e restauradas. Os resultados demonstram que a lógica implementada permite isolar trechos de forma consistente, minimizar carga interrompida e restabelecer o fornecimento de maneira estruturada e rastreável, evidenciando o potencial da integração Python–OpenDSS como ferramenta de apoio à decisão em redes de distribuição.

**Palavras-chave:** Reconfiguração de rede de distribuição; Algoritmo; Lógica; Confiabilidade.

## ABSTRACT

Distribution network reconfiguration is an important strategy to reduce the impact of power supply interruptions, especially in radial systems where the opening of a single section may disconnect a large portion of the network. This work presents the development and implementation of an algorithm for the automatic determination of distribution network reconfiguration options, based on the identification and execution of an optimal switching sequence, using the OpenDSS electrical simulator integrated with the Python programming language. The proposed methodology comprises: (i) modeling the IEEE 123-bus test feeder; (ii) extracting the electrical topology and building an SQLite database containing network connections, switches, loads, and spatial coordinates; (iii) developing a deterministic algorithm capable of identifying the section to be isolated, selecting the initial normally closed switch (NC) for isolation, determining the most suitable normally open switch (NO) for load restoration based on maximum load recovery, and applying the final containment switch (NC); and (iv) performing electrical validation of the switching operations using OpenDSS load flow simulations. For operational use, an interactive platform was developed using Streamlit, allowing the user to select the desired network section and automatically visualize the reconfiguration sequence, as well as the interrupted and restored loads. The results demonstrate that the implemented algorithm consistently isolates network sections, minimizes interrupted load, and restores service in a structured and traceable manner, highlighting the potential of Python–OpenDSS integration as a decision-support tool for distribution networks.

**Keywords:** Power network reconfiguration; Automatic reclosers; Automation; Reliability; Energy efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Fluxo Recomposição de RD.....	16
Figura 02 – Sistema Elétrico de Potência .....	20
Figura 03 – Topologia Radial RD .....	21
Figura 04 – Fluxo de Funcionamento da Plataforma Proposta .....	25
Figura 05 – Fluxo de Integração de Ferramentas .....	33
Figura 06 – Topologia Modelo IEEE123BUS .....	35
Figura 07 – Fluxograma da Lógica do Algoritmo.....	37
Figura 08 – Página Inicial Plataforma Desenvolvida .....	38
Figura 09 – Estado da Rede Após Abertura de SW1 .....	44
Figura 10 – Estado da Rede Após Abertura de SW3.....	44
Figura 11 – Retorno do Algoritmo para Validação de Manobras para o vão L70.....	45
Figura 12 – Retorno do Algoritmo para Opções de Manobras para o vão L70 .....	45

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Recuperação de Carga para Cada Chave NF .....	47
Gráfico 02 – Recuperação de Barras Afetadas para Cada Chave NF .....	48
Gráfico 03 – Perfil de Tensão ao Longo da Rede (SW2) .....	50
Gráfico 04 – Perfil de Tensão ao Longo da Rede (SW2-L108-SW5) .....	50
Gráfico 05 – Perfil de Tensão ao Longo da Rede (SW2-L108-SW4) .....	54
Gráfico 06 – Perfil de Tensão ao Longo da Rede (SW1-SW7-SW4) .....	54

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 01 – Parâmetros operacionais adotados no algoritmo .....	39
Tabela 02 – Limites Tensão Nodal por Manobra.....	49
Tabela 03 – Análise de Corrente para Sequências de Manobras .....	51
Tabela 04 – Análise Perdas do Sistema .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional De Energia Elétrica
DAS	Sistemas de Automação de Distribuição
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
EPRI	Electric Power Research Institute
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
GD	Geração Distribuída
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFMG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
NA	Normalmente Aberta
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
NF	Normalmente Fechada
OpenDSS	Open Distribution System Simulator
RD	Redes de Distribuição
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Problematização .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>17</b>
1.3.1.	Objetivo Geral.....	17
1.3.2.	Objetivos Específicos .....	17
<b>1.4</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Redes de Distribuição Elétrica.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Confiabilidade e Continuidade do fornecimento de energia elétrica.</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Principais falhas na rede de distribuição elétrica: impactos e soluções convencionais utilizadas .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4</b>	<b>Reconfiguração de Redes de Distribuição.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5</b>	<b>Integração de Ferramentas Computacionais para Simulação e Operação de Rede de Distribuição .....</b>	<b>25</b>
2.5.1.	OpenDSS – Simulador de Rede de Distribuição .....	25
2.5.2.	Integração Python–OpenDSS .....	26
2.5.3.	Estruturas auxiliares: SQLite, NetworkX e Streamlit.....	26
2.5.3.1.	SQLite – Armazenamento da Topologia.....	26
2.5.3.2.	NetworkX – Análise de Grafos .....	27
2.5.3.3.	Streamlit – Interface Interativa.....	27
<b>2.6.</b>	<b>AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....</b>	<b>27</b>
2.6.1.	Sistemas de Automação de Distribuição (DAS) .....	28
2.6.2.	Automação aplicada à recomposição e planejamento operacional .....	30
2.6.3.	Algoritmos de Otimização para Reconfiguração.....	30
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.</b>	<b>Quanto à Natureza da Pesquisa.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.</b>	<b>Quanto à Abordagem .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.</b>	<b>Quanto aos Objetivos .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4.</b>	<b>Quanto aos Procedimentos de Pesquisa .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5.</b>	<b>Tipo de Análise dos Dados.....</b>	<b>40</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.</b>	<b>Caracterização dos cenários analisados .....</b>	<b>43</b>

<b>4.2.</b>	<b>Resultados da determinação das sequências de manobras</b> .....	<b>43</b>
<b>4.3.</b>	<b>Avaliação do impacto sobre as cargas</b> .....	<b>46</b>
<b>4.4.</b>	<b>Validação elétrica das manobras</b> .....	<b>48</b>
<b>4.5.</b>	<b>Desempenho e consistência do algoritmo</b> .....	<b>51</b>
<b>4.6.</b>	<b>Discussão dos Resultados</b> .....	<b>52</b>
4.6.1.	Impacto da Reconfiguração nas Perdas Técnicas .....	52
4.6.2.	Margem de Segurança dos Níveis de Tensão .....	53
4.6.3.	Análise de Correntes e Restrições de Ampacidade .....	54
4.6.4.	Priorização de Cargas: Volume versus Criticidade.....	55
4.6.5.	Abordagem Determinística versus Meta-heurísticas .....	55
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>57</b>
<b>5.1.</b>	<b>Atendimento aos Objetivos Específicos</b> .....	<b>57</b>
5.1.1.	Modelagem da Rede e Banco de Dados Topológico .....	57
5.1.2.	Desenvolvimento da Lógica Determinística de Manobras (NF–NA–NF) ..	58
5.1.3.	Validação Elétrica por Meio de Fluxo de Carga .....	58
5.1.4.	Desenvolvimento da Interface Interativa .....	59
<b>5.2.</b>	<b>Limitações e Escopo da Solução Proposta</b> .....	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>60</b>

# 1 INTRODUÇÃO

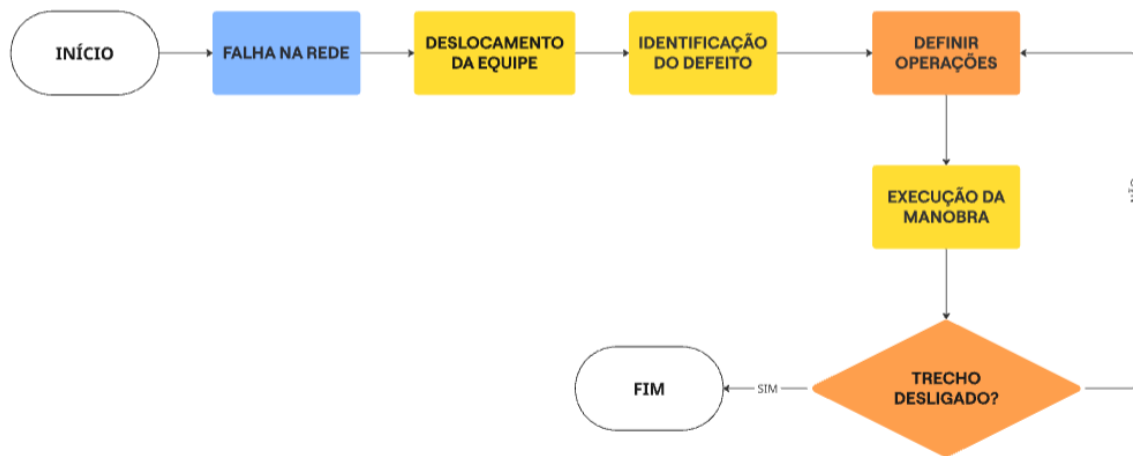
## 1.1 Contextualização

A confiabilidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica são fatores centrais para o desempenho das redes de distribuição, especialmente em sistemas radiais, nos quais a interrupção de um único trecho pode desenergizar grandes áreas. Conforme destacam Guth et al. (2013), Gautam, Bhusal e Benidris (2020) e Cruz (2024), a rápida identificação de pontos de falha, o monitoramento eficiente da qualidade do fornecimento e a capacidade de adaptação às variações de carga ainda representam desafios significativos para concessionárias brasileiras e internacionais.

Nesse contexto, a reconfiguração da rede de distribuição (RD) tem papel fundamental. Trata-se da alteração controlada da topologia da rede por meio da abertura e fechamento seletivo de equipamentos seccionadores, permitindo isolar trechos defeituosos e restabelecer o fornecimento por rotas alternativas. Entretanto, definir a sequência de manobras mais adequada não é trivial: envolve múltiplos dispositivos, diferentes possibilidades topológicas e impactos distintos sobre as cargas alimentadas, demandando decisões rápidas e precisas.

Tradicionalmente, essa análise é realizada manualmente por equipes de operação. A identificação do ponto de falha, a escolha das chaves a serem operadas e a definição da melhor rota de recomposição dependem de experiência operacional, informações transmitidas ao centro de controle e, muitas vezes, inspeção em campo. Essa abordagem está sujeita a atrasos, falhas de comunicação e incertezas, podendo comprometer tanto o tempo de recomposição quanto a assertividade das manobras.

Figura 01 – Fluxo Recomposição de RD



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A automação surge, portanto, como um recurso estratégico para aprimorar a eficiência desse processo. A integração de ferramentas computacionais — como o OpenDSS, para simulação elétrica, e Python, para processamento lógico — permite modelar a rede, simular cenários de contingência e aplicar algoritmos capazes de determinar automaticamente sequências de manobra. Embora a execução física das manobras permaneça a cargo das equipes de campo, a automação fornece suporte decisório estruturado, reproduzindo o comportamento operacional da rede e indicando a cadeia de operações mais eficiente, segura e tecnicamente justificável.

## 1.2 Problematização

As redes de distribuição operam predominantemente em topologia radial, o que as torna especialmente sensíveis a falhas. Quando um defeito ocorre em determinado vão, é necessário isolar o trecho afetado e restabelecer o fornecimento por caminhos alternativos para minimizar o impacto da falha em trechos associados. Embora esse procedimento faça parte da rotina das concessionárias e empresas privadas que possuem uma rede particular, a decisão sobre quais chaves abrir ou fechar ainda depende, em alguns casos, da experiência dos operadores e da interpretação manual da topologia disponível no momento da ocorrência.

Ao mesmo tempo, mesmo com o avanço de ferramentas computacionais e simuladores elétricos como o OpenDSS, a determinação automática de sequências de manobra ainda não é amplamente utilizada no ambiente operacional.

Diante desse cenário, surge a necessidade de desenvolver uma abordagem simples, objetiva e alinhada à prática das empresas: uma solução capaz de analisar a rede, identificar alternativas de recomposição e propor, de forma clara e determinística, uma sequência de operações que auxilie o operador a restabelecer o serviço de maneira rápida e segura.

Neste contexto, este trabalho busca responder à seguinte questão orientadora: De que forma uma lógica computacional integrada ao OpenDSS pode apoiar a determinação de sequências de manobra em redes de distribuição, tornando o processo de reconfiguração mais ágil, seguro e consistente?

### **1.3 Objetivos**

#### 1.3.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma lógica computacional implementada em Python e integrada ao OpenDSS capaz de apoiar a determinação de sequências de operação para reconfiguração de redes de distribuição para isolar trechos específicos e restabelecer o fornecimento de forma estruturada.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

De modo a alcançar o objetivo geral foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

- Mapear as estratégias de reconfiguração de redes de distribuição empregadas em contextos de manutenção programada e contingências operacionais.
- Compreender o funcionamento e a aplicação de dispositivos de manobra, chaves e religadores para a reconfiguração de redes.
- Simular a rede de distribuição IEEE 123 Bus no simulador OpenDSS, incorporando informações topológicas, elétricas e de dispositivos de manobra.
- Desenvolver um algoritmo em Python para determinação automática de sequências de manobras envolvendo chaves normalmente fechadas e normalmente abertas, visando ao isolamento de trechos e ao restabelecimento de cargas.
- Desenvolver uma interface interativa em Streamlit com apoio de um repositório

público no GitHub para fins acadêmicos, permitindo o controle de versão do código e a reprodutibilidade dos experimentos apresentados, permitindo que o usuário visualize a rede, selecione o vão desejado e obtenha automaticamente a sequência de operações sugerida.

- Analisar o comportamento topológico da rede após as manobras propostas, verificando a preservação da radialidade e a ausência de paralelismos.
- Avaliar o comportamento elétrico das configurações resultantes por meio de fluxo de carga, com ênfase nos níveis de tensão nodais.
- Validar o funcionamento do algoritmo por meio de simulações aplicadas ao alimentador de teste IEEE 123 Bus.

#### **1.4 Justificativa**

Em redes privadas de distribuição — comuns em setores como mineração, siderurgia, plantas industriais e grandes complexos logísticos — a continuidade do fornecimento elétrico está diretamente ligada à produtividade, à segurança operacional e ao custo de indisponibilidade. Qualquer interrupção pode gerar impactos na cadeia produtiva. Nesse ambiente, torna-se essencial o planejamento de desligamentos para reduzir o impacto quanto às cargas afetadas e restabelecer o fornecimento de energia de maneira segura e eficiente.

Apesar disso, muitas dessas redes ainda dependem de procedimentos predominantemente manuais para a definição de manobras de recomposição. A análise da topologia, a escolha das chaves a serem operadas e a avaliação dos impactos sobre as cargas são atividades realizadas pelo operador com base em diagramas estáticos, experiência individual e comunicação entre as equipes locais. Esse processo, embora funcional, está sujeito a atrasos, inconsistências e decisões que podem não representar a melhor alternativa técnica.

Além disso, diferentemente das concessionárias — que possuem estruturas de supervisão complexas, sistemas SCADA integrados e rígidos padrões internos — clientes industriais e mineradores geralmente dispõem de maior flexibilidade para implementar soluções customizadas, adotando tecnologias emergentes e promovendo digitalização de suas redes. Isso abre espaço para ferramentas computacionais capazes de automatizar análises, testar cenários e apoiar diretamente

o operador.

O OpenDSS, software desenvolvido pelo EPRI, permite modelar redes de distribuição com precisão, mas não oferece nativamente um módulo de determinação automática de manobras. Assim, surge a oportunidade de unir seu motor de simulação ao desenvolvimento de algoritmos em Python para preencher essa lacuna: oferecer ao operador uma ferramenta objetiva que indique como isolar determinado trecho com vistas a reduzir o impacto operacional.

Nesse contexto, a implementação de uma lógica determinística para identificação da sequência de manobras traz benefícios diretos aos setores industriais e mineradores, tais como:

- redução do tempo de resposta a falhas.
- padronização operacional.
- diminuição da dependência exclusiva da experiência do operador.
- possibilidade de testar manobras antes de executá-las fisicamente.

Além de sua aplicação prática, a solução desenvolvida contribui do ponto de vista acadêmico e tecnológico ao demonstrar a utilização da integração entre Python e OpenDSS para processos de melhoria e gestão de redes de distribuição. A abordagem adotada permite estruturar e reproduzir o processo de automação da determinação de manobras em redes privadas de distribuição elétrica.

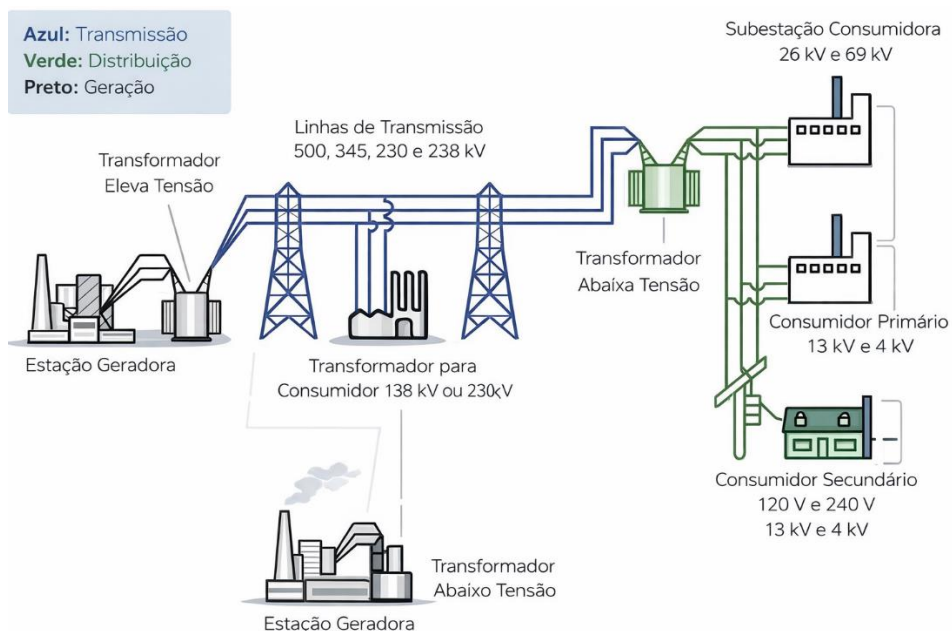
Assim, o trabalho se justifica tanto pela oportunidade de modernizar e digitalizar a operação elétrica de clientes com redes particulares, quanto por propor um modelo computacional aplicável, escalável e adaptável a diferentes topologias e contextos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Redes de Distribuição Elétrica

As redes de distribuição elétrica (RD) constituem a última etapa do sistema elétrico de potência (SEP), sendo responsáveis por transportar energia desde as subestações (SE) de distribuição até consumidores residenciais, industriais e comerciais. As redes de distribuição possuem, em sua maioria, topologia radial, caracterizada por um fluxo unidirecional de potência e por caminhos únicos entre a fonte e os pontos de consumo. No Brasil, essas redes operam tipicamente em níveis de média tensão, entre 1 kV e 69 kV, e em baixa tensão.

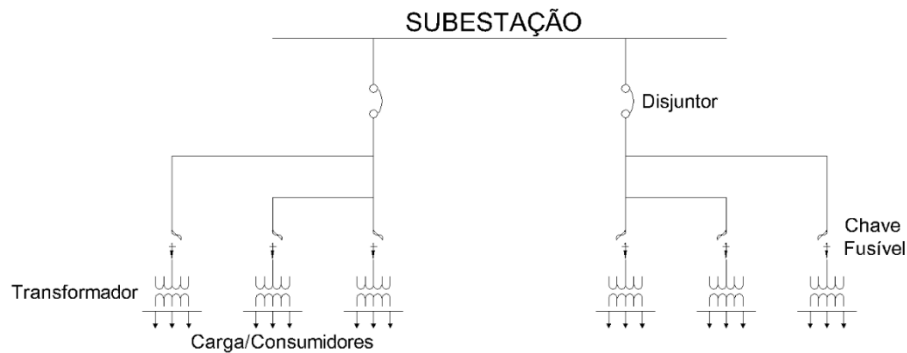
Figura 02 – Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Freitas (2017).

Essa configuração favorece a simplicidade operacional, facilidade de proteção e menor custo de implantação, mas também torna o sistema mais vulnerável a interrupções: a abertura de um único equipamento pode desenergizar toda a porção a jusante do alimentador. Por esse motivo, as redes de distribuição contam com dispositivos de seccionamento — como chaves normalmente fechadas (NF) e normalmente abertas (NA) — instalados ao longo do alimentador para permitir a realização de manobras de isolamento e restabelecimento.

Figura 03 – Topologia Radial RD



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

No contexto de redes privadas, como instalações industriais e mineradoras, a estrutura do sistema tende a ser ainda mais específica e ajustada às necessidades operacionais do cliente. Nessas redes, a instalação de chaves estrategicamente distribuídas permite maior flexibilidade para manutenção, manobras programadas e recomposição após contingências.

A operação dessas redes depende não apenas do conhecimento de sua topologia, mas também da capacidade de avaliar rapidamente como a abertura ou o fechamento de um dispositivo impactará o restante do sistema. A compreensão das relações entre barras, trechos e dispositivos de manobra é essencial para qualquer método de reconfiguração, sendo essa a base conceitual para a lógica automatizada desenvolvida neste trabalho.

## 2.2 Confiabilidade e Continuidade do fornecimento de energia elétrica

A continuidade do fornecimento elétrico é um dos pilares de desempenho das redes de distribuição, por exemplo, em ambientes industriais e mineradores, interrupções podem afetar diretamente a produção, a segurança e os custos operacionais. Conforme discutem Kagan, Oliveira e Robba (2010), a confiabilidade em sistemas de distribuição depende tanto da robustez dos equipamentos quanto da capacidade de manejar interrupções de forma rápida e seletiva.

Embora falhas inesperadas continuem sendo um desafio relevante, os desligamentos programados representam parcela significativa da operação em redes privadas. Intervenções como substituição de componentes, manutenção preventiva, ampliações de rede e inspeções demandam planejamento cuidadoso, de modo a

garantir que o trecho necessário seja desenergizado com o menor impacto possível. Estudos como o de Almeida (2019) destacam que o adequado mapeamento da topologia e a compreensão da conectividade são fundamentais para garantir eficiência e segurança durante intervenções planejadas.

A natureza radial dessas redes, frequentemente apontada na literatura (UFMA, 2017; EPRI, 2017), faz com que a abertura de um único trecho possa desenergizar trechos extensos se a manobra não for corretamente estruturada. Assim, o uso apropriado de dispositivos de manobra — como chaves normalmente fechadas (NF) e normalmente abertas (NA) — é essencial para viabilizar isolações seletivas tanto em contingências quanto em desligamentos programados.

Com a crescente digitalização de plantas industriais e mineradoras, há um movimento em direção ao uso de ferramentas computacionais para apoiar decisões operativas. A literatura aponta que a análise topológica e a simulação elétrica podem reduzir riscos e aumentar a previsibilidade das ações (Machado, 2017; Gerez, 2022). Nesse contexto, soluções que avaliem previamente o impacto das manobras, identifiquem trechos afetados e simulem o comportamento da rede após a operação tornam-se valiosas.

Dessa forma, a confiabilidade em redes privadas não está apenas associada à mitigação de falhas inesperadas, mas também a um planejamento eficiente de desligamentos programados, garantindo continuidade de processos críticos e segurança operacional. A implementação de ferramentas que automatizam ou apoiam esse processo — como a proposta deste trabalho — atende diretamente a essa necessidade.

### **2.3 Principais falhas na rede de distribuição elétrica: impactos e soluções convencionais utilizadas**

As falhas em redes de distribuição podem ocorrer por diversos motivos, incluindo degradação e avaria de componentes, descargas atmosféricas, esforços mecânicos, contato com vegetação, erros operacionais e sobrecargas. Em redes particulares, onde a energia elétrica sustenta processos contínuos e sensíveis, qualquer interrupção pode gerar impactos significativos na produção, no tempo de ciclo e nos custos operacionais. Segundo Kagan, Oliveira e Robba (2010), a

ocorrência de falhas em sistemas radiais tende a provocar a interrupção de todos os pontos a jusante do defeito, tornando essencial a rápida identificação do trecho afetado.

A literatura descreve que, quando um defeito ocorre, o dispositivo de proteção associado abre automaticamente para evitar danos aos equipamentos e garantir a segurança da rede (Machado, 2017). Uma vez interrompido o fornecimento, a recomposição depende da atuação das equipes de operação, que precisam identificar o ponto do defeito, verificar quais cargas foram afetadas e determinar seletivamente chaves de manobra. Em estruturas radiais, como observam Almeida (2019) e Machado (2017), a atuação correta dos dispositivos de seccionamento — especialmente chaves normalmente fechadas (NF) e normalmente abertas (NA) — é determinante para garantir seletividade e restabelecer rapidamente o fornecimento às áreas afetadas.

A prática operacional consolidada em redes de distribuição envolve o isolamento do trecho defeituoso, a transferência de carga por meio de chaves normalmente abertas e a contenção do trecho isolado, conforme descrito na literatura clássica de sistemas de distribuição (Kagan, Oliveira e Robba, 2010).

- Isolamento do trecho defeituoso, por meio da abertura de uma chave NF imediatamente a montante do ponto suspeito;
- Restabelecimento do fornecimento, mediante o fechamento de uma chave NA que conecte o trecho ainda energizado a uma fonte alternativa;
- Abertura de uma NF de contenção, garantindo que o fluxo restabelecido não reenergize o defeito nem gere malhas indesejadas.

Embora esse procedimento pareça simples, sua execução depende de uma compreensão clara da topologia da rede e das cargas conectadas. Como destacam estudos recentes sobre reconfiguração (Gerez, 2022), a escolha equivocada de uma manobra pode ampliar a área desenergizada, criar sobrecargas, comprometer a proteção ou até reenergizar o ponto de falha.

Além das falhas inesperadas, essa mesma lógica é utilizada em desligamentos programados, onde trechos específicos da rede precisam ser isolados para intervenções, sem comprometer o restante do sistema. Em ambientes industriais

e mineradores, essa prática é ainda mais crítica, já que o planejamento de uma manutenção depende de garantir que determinadas cargas estratégicas permaneçam energizadas. Assim, a recomposição deixa de ser apenas uma resposta ao defeito e passa a ser também um instrumento de organização operacional (Machado, 2017).

Nesse contexto, ferramentas que representem a rede de forma computacional, avaliem a conectividade entre barras e simulem manobras tornam-se elementos importantes para evitar erros e acelerar a tomada de decisão. A literatura destaca que simuladores como o OpenDSS oferecem essa capacidade analítica (EPRI, 2017), mas não incorporam, por padrão, rotinas para definição automática de sequências de operação — lacuna que motiva o desenvolvimento de soluções como a proposta neste trabalho.

## **2.4 Reconfiguração de Redes de Distribuição**

A reconfiguração de redes de distribuição consiste na alteração controlada da topologia elétrica por meio da operação de chaves instaladas ao longo do alimentador, permitindo o isolamento de trechos específicos e o restabelecimento do fornecimento por caminhos alternativos. Esse conceito é amplamente aceito na literatura técnica e fundamenta tanto aplicações acadêmicas quanto práticas operacionais (Kagan, Oliveira e Robba, 2010; Gonen, 2014). A operação dessas chaves — normalmente fechadas (NF) e normalmente abertas (NA) — viabiliza ajustes estruturais que preservam a radialidade do sistema e garantem a continuidade do fornecimento de energia.

Em ambientes industriais e mineradores, a reconfiguração desempenha um papel operacional relevante, pois permite executar manutenções programadas, segmentar a rede para intervenções locais e reduzir cargas desligadas durante trabalhos de campo. Conforme discutido por Araújo Junior (2023), a aplicação de manobras planejadas de reconfiguração — baseadas na abertura e fechamento coordenado de chaves — contribui diretamente para a continuidade do fornecimento e para a mitigação de impactos operacionais, constituindo uma prática válida mesmo em contextos com diferentes níveis de automação.

## 2.5 Integração de Ferramentas Computacionais para Simulação e Operação de Rede de Distribuição

A implementação da lógica de reconfiguração proposta neste trabalho depende da integração entre diferentes ferramentas computacionais, capazes de representar a rede elétrica, analisar sua topologia, simular seu comportamento e disponibilizar resultados de forma acessível ao operador. Esta seção apresenta as principais tecnologias adotadas, bem como sua fundamentação na literatura.

Figura 04 – Fluxo de Funcionamento da Plataforma Proposta



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

### 2.5.1. OpenDSS – Simulador de Rede de Distribuição

O OpenDSS é um software de simulação desenvolvido pelo Electric Power Research Institute para estudos de sistemas de distribuição. Sua arquitetura, baseada em um motor de cálculo acessível via interface COM, permite integrar a simulação elétrica a outras aplicações, como Matlab, C#, C++ e Python (EPRI, 2017; Concert Technologies, 2020). Essa característica torna o OpenDSS adequado para automação de análises e para testes de rotinas que exigem múltiplas execuções de fluxo de carga.

Segundo os manuais de uso (UFMA, 2017; UFGRS, 2023), o OpenDSS oferece:

- modelagem detalhada de barras, linhas, cargas, reguladores, transformadores e dispositivos de manobra;
- análise de fluxo de potência;
- simulação de curto-circuito e estudos quasi-dinâmicos;
- fácil adaptação para estudos de reconfiguração e recomposição.

Trabalhos como Souza et al. (2020) demonstram a aplicação do OpenDSS em estudos reais de concessionárias, reforçando sua confiabilidade como ferramenta de análise. Por sua flexibilidade e abertura, ele se mostra também adequado para

redes privadas, que necessitam de simulações rápidas e customizadas sem dependência de plataformas proprietárias.

### 2.5.2. Integração Python–OpenDSS

A automação da lógica de recomposição desenvolvida neste trabalho é feita em Python, utilizando bibliotecas de integração. Essa integração permite:

- enviar comandos de abertura e fechamento de chaves;
- solicitar a execução do fluxo de carga;
- consultar tensões, correntes e estados da rede;
- alterar parâmetros e reexecutar simulações de forma iterativa.

A literatura destaca o uso combinado de Python e OpenDSS como abordagem eficiente para estudos que exigem repetição de cenários, análise de múltiplas topologias ou otimização operacional (IFPE, 2023; UFGRS, 2023). Além disso, Python destaca por sua simplicidade, variedade de bibliotecas e facilidade de manutenção.

A integração proposta neste trabalho permite que o algoritmo de reconfiguração:

1. modele a rede,
2. calcule topologias possíveis,
3. teste manobras de forma virtual,
4. valide eletricamente as operações,
5. retorne o resultado ao usuário em tempo real.

### 2.5.3. Estruturas auxiliares: SQLite, NetworkX e Streamlit

#### 2.5.3.1. SQLite – Armazenamento da Topologia

O banco de dados SQLite foi utilizado para armazenar barras, conexões, chaves e cargas. Sua escolha se deve à leveza, portabilidade e integração nativa com Python, permitindo que:

- a topologia seja consultada rapidamente;
- operações de grafo sejam independentes do OpenDSS;
- o sistema funcione sem necessidade de servidores adicionais.

### 2.5.3.2. NetworkX – Análise de Grafos

O NetworkX permite representar a rede elétrica como um grafo, facilitando operações como:

- identificação de trechos isolados;
- análise de conectividade;
- detecção de ciclos (malhas);
- simulação de efeitos de abertura/fechamento de chaves.

A estrutura de dados adotada em SQLite e a representação topológica construída com a biblioteca NetworkX foram definidas baseadas em componentes essenciais de redes de distribuição (barras, trechos/conexões, chaves NF/NA, cargas e coordenadas). Dessa forma, a lógica pode ser aplicada a outros alimentadores, além do IEEE 123-bus, desde que o sistema elétrico seja modelado no OpenDSS e suas informações sejam importadas para o banco seguindo o mesmo esquema de tabelas e convenções de identificação dos elementos.

### 2.5.3.3. Streamlit – Interface Interativa

O Streamlit foi utilizado para criar uma interface simples, acessível e visual, possibilitando que:

- o usuário selecione o vão desejado;
- visualize o grafo da rede;
- consulte a sequência de manobras recomendada;
- acesse métricas de carga interrompida e restaurada.

Essa camada transforma a lógica computacional em uma ferramenta de apoio à decisão, aproximando o TCC de uma solução aplicável em ambiente privado.

## 2.6. Automação e Otimização em Redes de Distribuição

A automação de redes de distribuição tem evoluído nas últimas décadas, impulsionada por demandas de maior confiabilidade, redução do tempo de recomposição e necessidade de operação mais eficiente. Em redes públicas, essa evolução está associada à implementação de sistemas SCADA, dispositivos

telecomandados e plataformas ADMS. Já em redes privadas, como as de mineração e indústria, a automação tende a ser mais específica, direcionada a processos críticos e adaptada às características locais do sistema elétrico.

Independentemente do ambiente, a automação tem como objetivo principal reduzir a dependência de procedimentos manuais, fornecendo informações em tempo real e permitindo que manobras sejam planejadas e executadas com maior assertividade. De acordo com Oliveira (2023) a automação contribui diretamente para a redução do tempo de resposta às interrupções, melhora a previsibilidade do fornecimento e aumenta a segurança das equipes de operação.

#### 2.6.1. Sistemas de Automação de Distribuição (DAS)

Os Sistemas de Automação de Distribuição (DAS - Distribution Automation Systems) representam um pilar na modernização das redes elétricas, visando aprimorar a confiabilidade, eficiência e qualidade do fornecimento de energia. Conforme a complexidade das redes aumenta, a capacidade de gerenciar e operar esses sistemas de forma otimizada torna-se crucial (Gautam et al., 2020; Cruz, 2024). O DAS integra tecnologias de comunicação, sensoriamento e controle para monitorar, controlar e operar automaticamente os equipamentos da RD.

A funcionalidade central de um DAS reside na sua capacidade de detectar, localizar e isolar falhas de forma autônoma, e subsequentemente, realizar a reconfiguração da rede para restaurar o fornecimento de energia ao maior número possível de consumidores. Isso é feito por meio de dispositivos inteligentes:

- Sensores de Falha: Detectam a ocorrência e a localização de interrupções na rede.
- Chaves Telecomandadas (Seccionadoras e Disjuntores): Permitem o isolamento remoto de trechos defeituosos e a reconfiguração da rede.
- Religadores Automáticos Microprocessados: Conforme Mattos (2016) destaca, são centrais para o DAS. Eles identificam falhas, isolam o trecho afetado e redefinem a rota do fluxo de carga, otimizando a composição da rede para restabelecimento rápido.

As arquiteturas de automação em redes de distribuição podem variar, mas

geralmente envolvem uma hierarquia que interliga os dispositivos de campo com sistemas de controle centralizados ou distribuídos:

- **Nível de Campo:** Compreende os dispositivos inteligentes diretamente conectados à rede elétrica (relatores, chaves telecomandadas, sensores) que coletam dados e executam comandos.
- **Nível de Comunicação:** Garante a troca rápida e confiável de informações entre os dispositivos de campo e os centros de controle. Tecnologias como fibra óptica, rádio, GPRS/3G/4G/5G e redes sem fio mesh são comumente empregadas.
- **Nível de Subestação:** Concentra a automação na subestação, integrando dispositivos de proteção, controle e medição, e servindo como um ponto de agregação de dados antes de enviá-los ao centro de operações.
- **Nível do Centro de Controle (SCADA):** Sistemas como o Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) processam os dados em tempo real, fornecem uma visão abrangente da rede aos operadores e executam algoritmos de otimização para reconfiguração e gestão de falhas.

A integração de Geração Distribuída (GD) adiciona uma camada de complexidade às redes, transformando os fluxos de potência de unidirecionais para bidirecionais e alterando os níveis de corrente de curto-circuito (Zanchetta, 2014). Nesse cenário, a capacidade de reconfiguração dinâmica oferecida pelos DAS é ainda mais crítica, pois as estratégias manuais ou estáticas se tornam ineficazes. Um DAS bem implementado, com seus algoritmos de controle e otimização, pode adaptar a topologia da rede em tempo real, garantindo a seletividade da proteção e a estabilidade do sistema mesmo com a presença de GD, e contribuindo para a redução dos indicadores de interrupção (Melo, 2019).

Em suma, os Sistemas de Automação de Distribuição, através de suas diversas tecnologias e arquiteturas, são essenciais para a evolução das redes elétricas em direção a um modelo mais inteligente e resiliente. Ao automatizar processos críticos de operação e reconfiguração, eles contribuem para a melhoria dos índices de qualidade do serviço e para a otimização da resposta a falhas em um ambiente de rede cada vez mais dinâmico e complexo.

### 2.6.2. Automação aplicada à recomposição e planejamento operacional

A recomposição automática é tradicionalmente associada a tecnologias como religadores automáticos, chaves telecomandadas e sistemas de supervisão. Esses recursos permitem detectar falhas, isolar trechos defeituosos e restabelecer o fornecimento de forma rápida. No entanto, sua implementação depende de infraestrutura robusta, comunicação estável e políticas padronizadas — elementos nem sempre viáveis em redes privadas que operam de maneira descentralizada.

Mesmo sem automação completa, muitas indústrias e mineradoras realizam diariamente manobras programadas para manutenção preventiva, ampliação de rede e substituição de equipamentos. Para essas atividades, a automação não se limita ao comando remoto das chaves, mas abrange também ferramentas de apoio à decisão, capazes de indicar:

- quais chaves devem ser operadas;
- qual será a área impactada pelo desligamento;
- que cargas permanecerão energizadas;
- e quais alternativas de recomposição existem.

Conforme observado por Araújo Júnior (2023), soluções computacionais que antecipam o impacto das manobras trazem ganhos operacionais substanciais, mesmo em ambientes sem automação total.

### 2.6.3. Algoritmos de Otimização para Reconfiguração

A reconfiguração de redes de distribuição elétrica consiste na alteração de sua topologia operacional por meio da abertura e fechamento de dispositivos de manobra. O objetivo principal é otimizar parâmetros de desempenho da rede, como a minimização de perdas ativas, a melhoria do perfil de tensões e o restabelecimento do serviço após a ocorrência de falhas.

A otimização da reconfiguração é frequentemente formulada como um problema de otimização combinatória ou não linear, devido ao grande número de combinações possíveis para o estado das chaves e à natureza não linear do fluxo de potência. Para resolver esses problemas complexos, são empregadas diversas

metodologias e algoritmos, que podem ser classificados em diferentes categorias:

- **Técnicas de Otimização Clássicas:** Incluem métodos de programação linear e não linear. Embora ofereçam soluções ótimas garantidas para certas classes de problemas, sua aplicação em redes de grande porte com múltiplos objetivos e restrições não lineares (como as causadas pela GD) pode ser computacionalmente inviável ou complexa.
- **Meta-heurísticas:** Devido à complexidade e ao tamanho do espaço de busca, as meta-heurísticas são amplamente utilizadas para a reconfiguração de redes. Esses algoritmos, inspirados em fenômenos naturais ou comportamentos sociais, buscam soluções próximas do ótimo em um tempo computacional razoável. Exemplos:
  - **Algoritmos Genéticos (AG):** Inspirados na evolução biológica, utilizam conceitos como seleção, cruzamento e mutação para encontrar soluções.
  - **Otimização por Enxame de Partículas (PSO):** Baseado no comportamento de bandos de pássaros ou cardumes de peixes, onde as partículas ajustam suas posições baseadas nas melhores posições individuais e do grupo.
  - Outras meta-heurísticas como Colônia de Formigas, Simulated Annealing e Busca Harmônica também são aplicadas.

A aplicação dessas técnicas de otimização considera a alocação de chaves (definindo quais chaves são abertas ou fechadas para formar a nova topologia) sem comprometer a estabilidade e a proteção da rede. Os algoritmos são projetados para lidar com as restrições operacionais do sistema, como limites de tensão, capacidade de corrente dos condutores e a condição de operação radial da rede, além da necessidade de seletividade da proteção.

A reconfiguração automatizada, impulsionada por esses algoritmos, permite que a operação da rede seja realizada de forma dinâmica, respondendo às mudanças de carga, geração e falhas de forma eficiente, o que se traduz em melhoria contínua da qualidade e confiabilidade do fornecimento.

### **3. METODOLOGIA**

Na condução desta pesquisa, o foco está na avaliação e implementação de uma lógica computacional capaz de apoiar a reconfiguração de redes de distribuição, especialmente em ambientes com redes particulares, como comércios, indústrias e mineradoras. Em vez de depender exclusivamente de dispositivos automatizados em campo, o estudo utiliza simulação computacional no OpenDSS integrada a rotinas desenvolvidas em Python, permitindo analisar a topologia da rede, testar cenários de manobra e identificar sequências operacionais adequadas para isolamento e restabelecimento do fornecimento.

Dessa forma, este capítulo apresenta a metodologia adotada, descrevendo a natureza da pesquisa, a abordagem utilizada, os objetivos metodológicos, os procedimentos empregados na construção do modelo computacional e o tipo de análise aplicada aos dados gerados pelas simulações e pelo algoritmo de reconfiguração.

#### **3.1. Quanto à Natureza da Pesquisa**

A presente pesquisa possui caráter aplicado, uma vez que busca desenvolver uma solução computacional voltada à melhoria de processos operativos em redes privadas de distribuição. Segundo Gil (2019), pesquisas aplicadas têm como objetivo gerar conhecimento com finalidade prática e imediata, o que se alinha diretamente à proposta deste trabalho: criar uma ferramenta capaz de apoiar decisões de recomposição e planejamento de desligamentos.

#### **3.2. Quanto à Abordagem**

A pesquisa aqui delineada contará com uma abordagem quantitativa, visto que será amparada em dados numéricos advindos de simulações computacionais realizadas. A proposta é seguir os procedimentos aqui expostos para a simulação computacional:

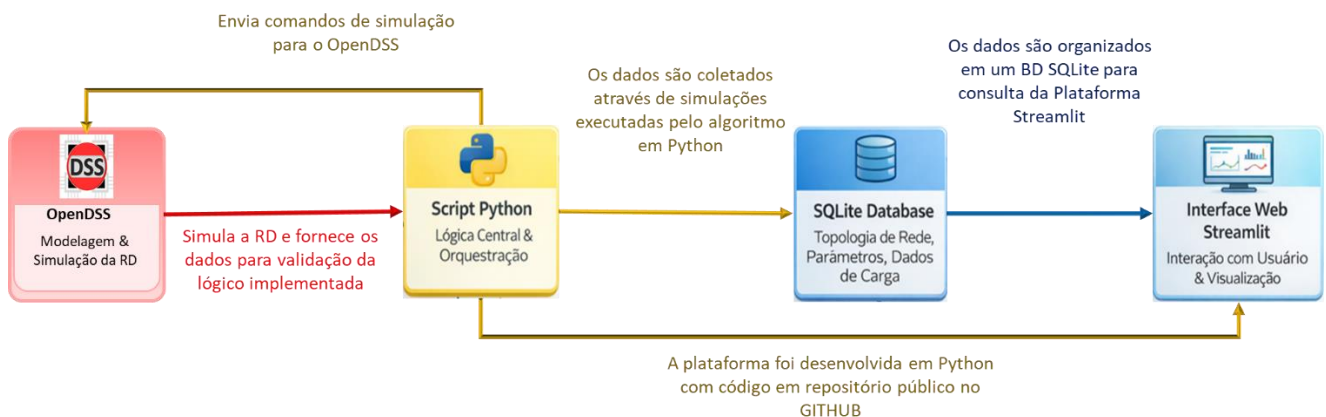
- Simular a rede de distribuição elétrica em ambiente computacional, contemplando a inclusão dos principais componentes, tais como alimentadores, cargas, transformadores e dispositivos de manobra, incluindo chaves normalmente abertas e normalmente fechadas;

- Desenvolver, em linguagem Python, um algoritmo para determinação automática de sequências de manobras operativas, integrada ao ambiente de simulação OpenDSS, baseada em análise topológica da rede, verificação da radialidade e resultados de fluxo de carga, com o objetivo de apoiar o processo de operação e reconfiguração da RD;
- Simular a ocorrência de contingências em diferentes trechos da rede por meio do isolamento de vãos específicos, avaliando a capacidade da lógica desenvolvida em identificar sequências de manobras que permitam o restabelecimento do fornecimento de energia aos trechos não afetados.

Baseando-se no que expõe Creswell (2014), a abordagem quantitativa irá possibilitar a análise estatística dos resultados alcançados, permitindo conclusões amparadas em evidências numéricas e mensuráveis. A coleta e interpretação dos dados irão seguir uma lógica objetiva e estruturada, de modo a permitir a avaliação da eficiência do sistema proposto baseando-se nos indicadores tais como tempo de resposta e melhoria da qualidade do fornecimento de energia.

A pesquisa possui ainda elementos de abordagem sistêmica, pois integra diferentes ferramentas (Python, SQLite, NetworkX, OpenDSS e Streamlit) para compreender o comportamento do sistema como um todo.

Figura 05 – Fluxo de Integração de Ferramentas



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

### 3.3. Quanto aos Objetivos

A pesquisa caracteriza-se como de natureza exploratória e descritiva. Conforme Vergara (2016), a pesquisa exploratória visa ampliar o conhecimento sobre

determinado tema, enquanto a pesquisa descritiva tem como objetivo caracterizar fenômenos e identificar relações entre variáveis.

A metodologia foi estruturada para atingir os seguintes objetivos operacionais:

1. Simular a rede IEEE 123-bus no OpenDSS.
2. Extrair e organizar a topologia em um banco SQLite, permitindo acesso rápido e manipulação por algoritmos.
3. Desenvolver um algoritmo determinístico de reconfiguração, composto pelas etapas NF – NA – NF, coerente com práticas operacionais reais.
4. Integrar o algoritmo ao OpenDSS para validar eletricamente cada operação sugerida.
5. Construir uma interface interativa em Streamlit para visualização das manobras e suporte à tomada de decisão.
6. Avaliar os resultados por meio de análise de conectividade, carga interrompida/restaurada e consistência da recomposição.

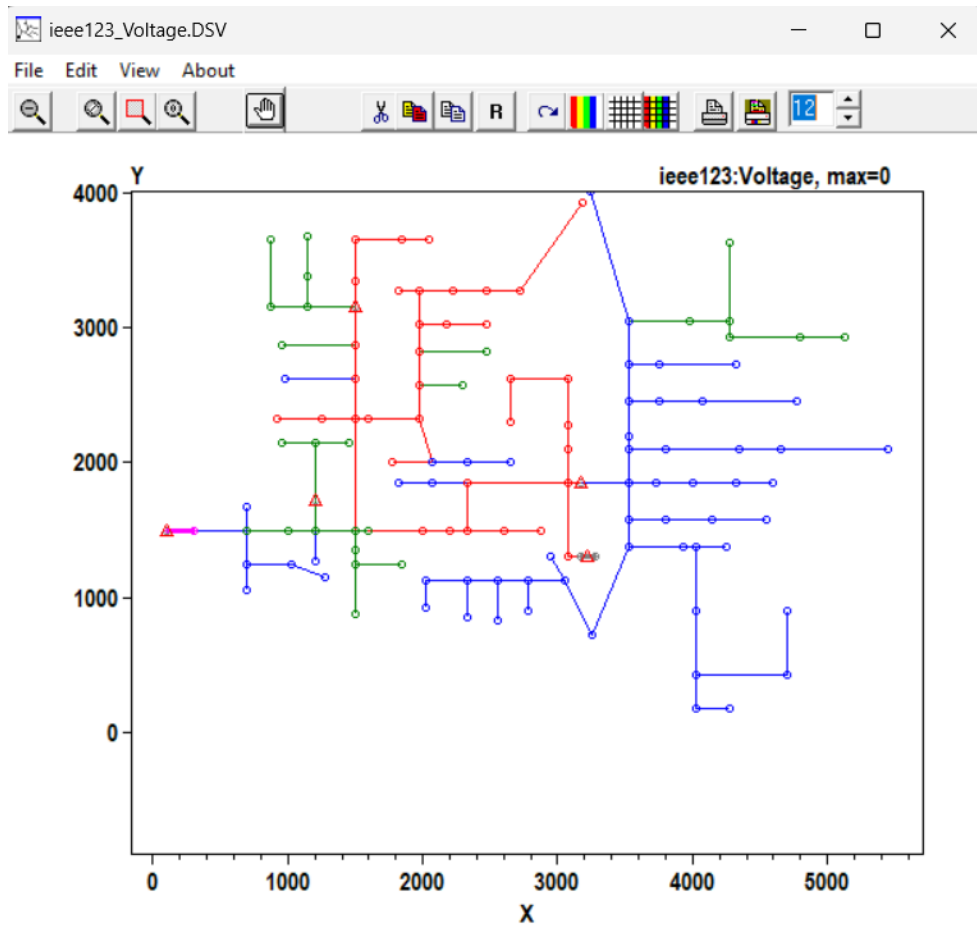
### **3.4. Quanto aos Procedimentos de Pesquisa**

O desenvolvimento deste trabalho seguiu um conjunto de procedimentos organizados de forma progressiva, integrando revisão teórica, modelagem computacional e experimentação. Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico sobre reconfiguração de redes de distribuição, automação operacional e métodos computacionais aplicados a sistemas elétricos. Esse estudo incluiu tanto referências clássicas quanto trabalhos recentes, além dos manuais e guias oficiais do OpenDSS. O objetivo dessa etapa foi compreender como a recomposição é tratada na literatura e identificar lacunas entre abordagens acadêmicas e práticas operacionais, especialmente no contexto de redes privadas industriais.

Com base nesse referencial, avançou-se para a construção do modelo elétrico utilizado nos experimentos. A rede IEEE 123-bus foi selecionada como estudo de caso por sua estrutura complexa e por ser amplamente documentada, o que favorece a validação dos resultados. A modelagem foi realizada no OpenDSS, onde foram configurados os elementos da rede — linhas, transformadores, cargas e dispositivos de manobra — garantindo a representação da topologia e das condições operacionais do sistema. Após a configuração inicial, foram executados testes de fluxo de carga

para assegurar a consistência do modelo.

Figura 06 – Topologia Modelo IEEE123BUS



Fonte: Adaptado de OpenDSS, 2026.

Com o modelo topológico consolidado, iniciou-se o desenvolvimento do algoritmo de reconfiguração. A implementação apresentada neste trabalho considera apenas um trecho (vão) por vez como entrada para o algoritmo de determinação das manobras. A lógica implementada buscou reproduzir a prática operacional comum em redes radiais — abrir uma chave para isolar um trecho, fechar outra para restabelecer a alimentação e abrir uma chave de contenção — formalizando essa sequência em uma abordagem determinística. Cada alternativa de manobra foi submetida a uma análise topológica, realizada por meio da representação da rede como um grafo, com o objetivo de verificar a manutenção da radialidade, a inexistência de ciclos e a não reenergização do trecho isolado. As configurações que violaram qualquer uma dessas restrições foram automaticamente descartadas. As alternativas topologicamente válidas foram então submetidas à validação elétrica no OpenDSS, por meio da

execução de fluxos de carga após cada manobra simulada.

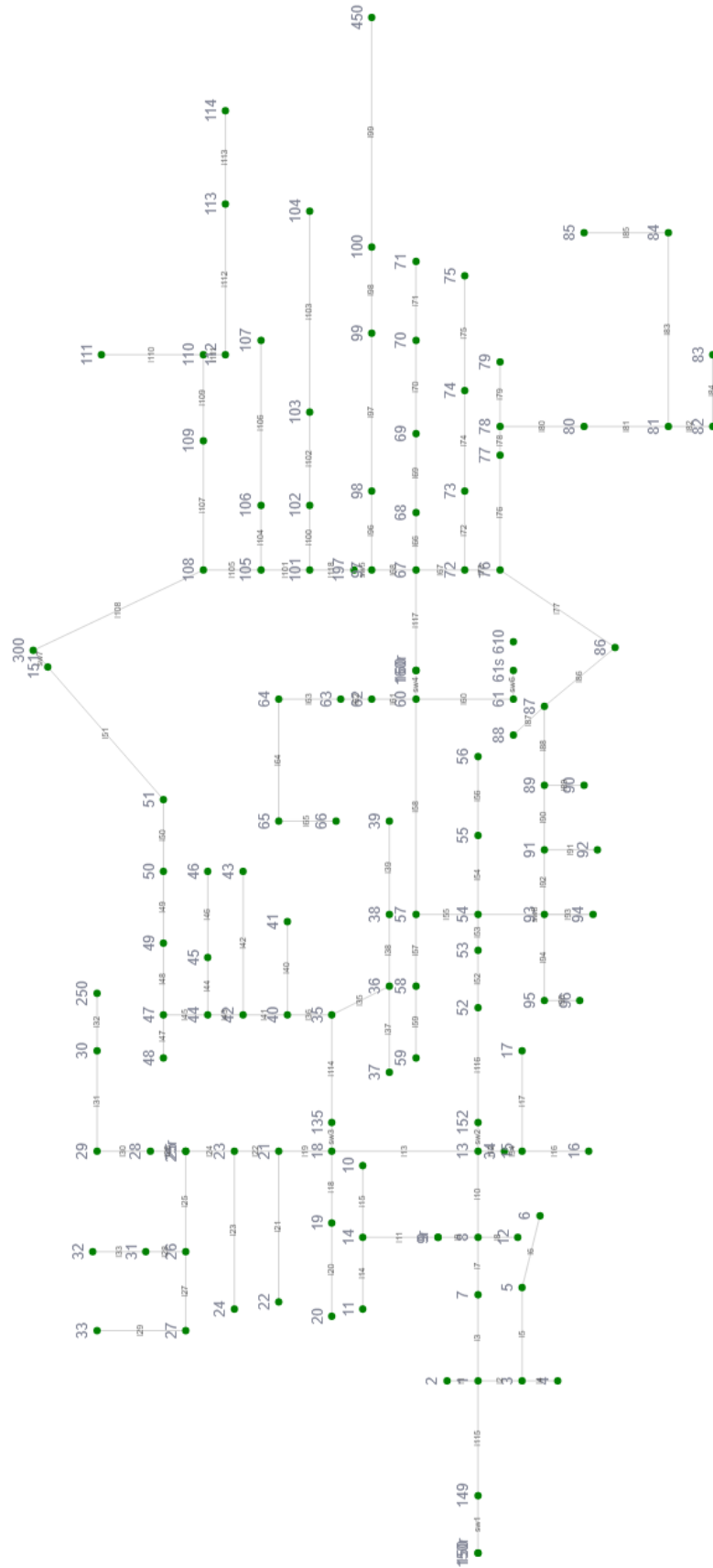
Após a definição das manobras, cada operação sugerida foi submetida à validação elétrica no OpenDSS. Essa integração entre Python e OpenDSS permitiu avaliar o comportamento elétrico da rede após cada etapa da recomposição, por meio da análise das tensões nas barras, das correntes nos trechos e da quantidade de cargas efetivamente energizadas. As sequências de manobra foram consideradas válidas apenas quando atenderam simultaneamente aos seguintes critérios operacionais: preservação da topologia radial da rede, ausência de paralelismos entre fontes, não reenergização do trecho isolado e manutenção das grandezas elétricas dentro de limites operacionais aceitáveis.

Para fins de padronização metodológica, os parâmetros operacionais adotados no algoritmo foram definidos de forma consistente ao longo de todos os cenários analisados. Esses parâmetros incluíram: (i) a faixa de tensão nodal entre 0,95 e 1,05 pu; (ii) preservação dos limites de corrente – nominais, emergenciais e preexistentes; (iii) a preservação da topologia radial da rede, sem formação de ciclos; (iv) a inexistência de paralelismos entre fontes; e (v) a não reenergização do trecho isolado. Esses critérios foram aplicados de forma determinística em todas as etapas da análise.

Caso alguma manobra resultasse em paralelismo indesejado, reenergização do trecho isolado a solução era automaticamente descartada, e o algoritmo prosseguia com a avaliação de alternativas até identificar uma configuração tecnicamente consistente e operacionalmente segura. Entre as alternativas válidas, a solução selecionada foi aquela que proporcionou o maior restabelecimento de carga, refletindo um critério operacional típico de redes privadas de distribuição. O algoritmo desenvolvido foi implementado conforme mostrado na Figura 07 – Fluxograma da Lógica do Algoritmo.



Figura 08 – Página Inicial Plataforma Desenvolvida



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Com o objetivo de sistematizar os critérios utilizados ao longo da metodologia e facilitar a compreensão dos critérios operacionais impostos ao algoritmo de reconfiguração, a Tabela 01 apresenta uma síntese dos principais parâmetros e restrições adotados no estudo. Esses critérios foram aplicados de forma consistente em todos os cenários analisados, orientando tanto a etapa de determinação das manobras quanto a validação das soluções propostas.

Tabela 01 – Parâmetros operacionais adotados no algoritmo

<b>Critério</b>	<b>Natureza</b>	<b>Descrição</b>
Faixa admissível de tensão	Elétrica	As tensões nodais foram calculadas após cada sequência de manobras por meio do fluxo de carga no OpenDSS. A faixa de 0,95 a 1,05 pu foi adotada como referência para análise do comportamento elétrico, sendo utilizada em caráter indicativo, com registro e apresentação de alertas quando os valores ultrapassassem os limites, sem, por si só, bloquear automaticamente a alternativa.
Limite de corrente em linhas energizadas	Elétrica	As correntes nas linhas que permaneceram energizadas após a manobra foram avaliadas por meio do fluxo de carga. Sequências que introduzissem novas violações dos limites de corrente nominal ou emergencial definidos no modelo OpenDSS foram automaticamente descartadas. Manobras que não agravassem condições de sobrecarga pré-existentes foram consideradas válidas.

Preservação da Radialidade	Topológica	A topologia resultante após cada manobra foi representada como um grafo, sendo automaticamente descartadas configurações que resultassem em ciclos ou malhas na rede.
Paralelismo entre fontes	Operacional	Configurações que resultassem em paralelismo indesejado entre fontes de alimentação foram identificadas por análise topológica e rejeitadas pelo algoritmo.
Reenergização do trecho isolado	Operacional	O algoritmo impediu a seleção de manobras que resultassem na reenergização do trecho previamente isolado, assegurando a contenção adequada do vão analisado.
Função objetivo	Operacional	Entre as alternativas consideradas válidas do ponto de vista topológico e elétrico, foi selecionada a sequência de manobras que proporcionou o maior restabelecimento de carga.
Casos sem possibilidade de recomposição	Operacional	Cenários nos quais não existiam alternativas topológicas viáveis para recomposição foram corretamente identificados e descartados, sem geração de soluções artificiais.

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

### 3.5. Tipo de Análise dos Dados

A análise dos dados nesta pesquisa foi conduzida de forma integrada, combinando informações topológicas, elétricas e operacionais geradas a partir do algoritmo desenvolvido em Python, o qual realiza simulações no OpenDSS por meio

da biblioteca *opendssdirect*. Considerando que a proposta do trabalho consiste na formalização e automatização da determinação de sequências de manobras em redes de distribuição, a avaliação dos resultados incorporou critérios de validação operacional e elétrica, conforme sintetizado na Tabela 01. Dessa forma, a análise adotada buscou garantir que as soluções propostas fossem coerentes com as práticas operacionais e com o comportamento esperado de redes reais de distribuição.

A primeira etapa da análise foi de natureza topológica, fundamentada na representação da rede como um grafo. A partir da modelagem no OpenDSS e da manipulação da estrutura da rede via linguagem Python, foi possível identificar a conectividade entre barras, os caminhos elétricos existentes, os efeitos da abertura e do fechamento de chaves e a preservação da condição de radialidade. Essa análise foi essencial para verificar a capacidade da lógica desenvolvida em isolar corretamente os trechos indicados para intervenção, identificar as chaves normalmente fechadas responsáveis pelo isolamento, selecionar chaves normalmente abertas candidatas à recomposição e determinar chaves de contenção adequadas, assegurando a consistência estrutural da rede após cada sequência de manobras.

Na sequência, procedeu-se à análise elétrica, realizada por meio da integração direta do algoritmo com o simulador OpenDSS. Para cada configuração resultante das manobras propostas, foram analisadas automaticamente as tensões nodais e as correntes nos trechos energizados, com base nos resultados do fluxo de carga. Adotou-se como critério indicativo a manutenção das tensões nas barras dentro da faixa operacional de  $0,95$  a  $1,05 pu$ , ou seja, permitindo qualificar a solução quanto à margem de operação e ao nível de estresse elétrico imposto pela nova topologia, sem, por si só, eliminar alternativas.

No que se refere à análise de correntes, o presente trabalho incorporou um critério de verificação de sobrecorrente nos elementos da rede que permanecem energizados após a aplicação das manobras propostas. Para cada cenário avaliado, as correntes máximas nas linhas foram obtidas diretamente a partir do fluxo de carga resolvido pelo OpenDSS e comparadas com os limites nominais de corrente (*NormAmps*), e, quando aplicável, com os limites de emergência (*EmergAmps*) definidos no modelo da rede.

Violações previamente existentes no estado base, que não fossem agravadas pela manobra, não constituíram critério de rejeição, uma vez que não decorrem da reconfiguração proposta. Esse procedimento permitiu garantir que as sequências de manobra sugeridas não introduzissem condições adicionais de sobrecarga nos condutores, mitigando o risco de violação de limites operacionais associados à capacidade de corrente da rede.

Adicionalmente, foram impostas restrições operacionais de natureza topológica, incluindo a preservação da radialidade da rede, a inexistência de paralelismos, dupla alimentação para um mesmo trecho, entre fontes e a garantia de que o trecho isolado não fosse reenergizado indevidamente durante o processo de recomposição.

Por fim, foi conduzida uma análise operacional, com foco na quantificação da carga interrompida e da carga restaurada após a aplicação de cada sequência de manobras do tipo NF–NA–NF. Esses valores foram obtidos a partir das cargas associadas às barras isoladas e posteriormente reenergizadas, permitindo a comparação entre diferentes alternativas de manobra e a avaliação da eficiência da recomposição do fornecimento. Essa abordagem aproxima os resultados do contexto prático de redes privadas, nas quais a minimização do impacto sobre processos produtivos constitui um critério relevante para a tomada de decisão operacional.

Os dados gerados ao longo das simulações e das sequências de manobra foram posteriormente organizados em um banco de dados relacional e integrados a uma plataforma computacional, com o objetivo de facilitar a visualização, o armazenamento e a exploração dos resultados, sem interferir na lógica principal de determinação das manobras.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Caracterização dos cenários analisados**

Os resultados apresentados neste capítulo referem-se à aplicação da lógica computacional de reconfiguração desenvolvida neste trabalho sobre todos os vãos únicos da rede IEEE 123-bus. A avaliação integral dos vãos permitiu analisar o comportamento do algoritmo de forma abrangente, contemplando diferentes posições topológicas, níveis de ramificação e graus de criticidade das cargas atendidas.

Cada vão foi considerado individualmente como um possível trecho a ser isolado, simulando situações de desligamento planejado. Para cada caso, o algoritmo recebeu como entrada a identificação do trecho e executou automaticamente a sequência completa de análise topológica, determinação das manobras e validação elétrica no OpenDSS.

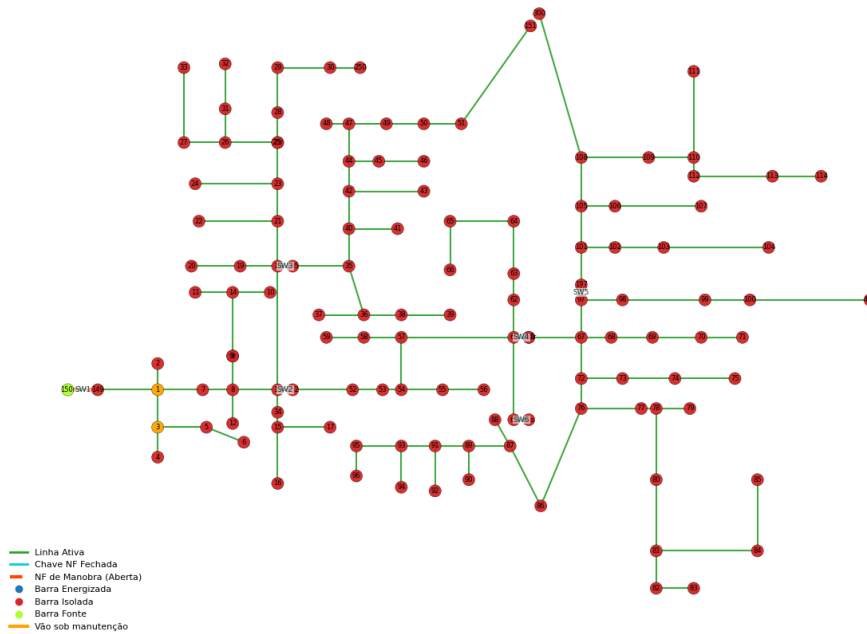
A escolha por avaliar todos os vãos da rede teve como objetivo verificar a robustez, consistência e generalidade da solução. Dessa forma, os resultados obtidos refletem o comportamento do sistema frente a diferentes configurações estruturais da rede, incluindo trechos principais do alimentador e ramais laterais.

### **4.2. Resultados da determinação das sequências de manobras**

A aplicação do algoritmo aos vãos da rede resultou, para cada cenário analisado, na determinação automática de uma sequência estruturada de manobras seguindo a lógica NF-NA-NF. Em todos os casos em que existiam alternativas topológicas viáveis, o sistema foi capaz de identificar uma combinação de chaves que permitiu isolar o trecho selecionado e restabelecer o fornecimento a parte do restante da rede sem violar a radialidade.

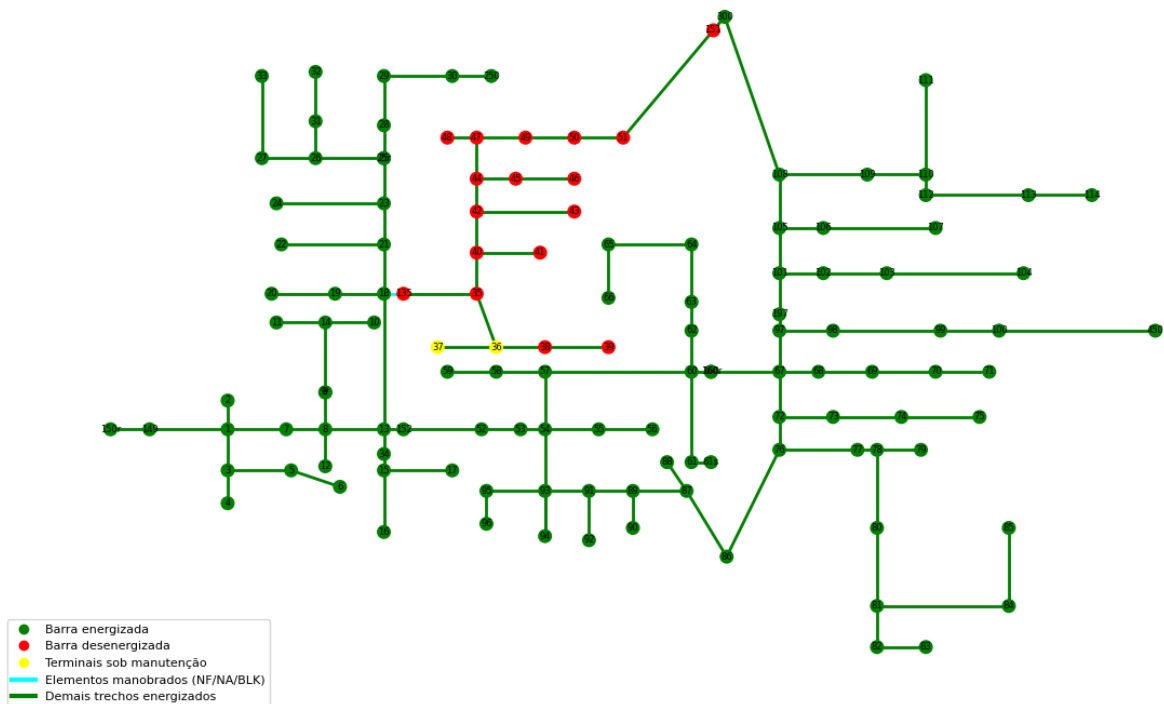
Observou-se que a escolha da chave NF inicial variou conforme a posição do vão em relação à subestação e à estrutura do alimentador. Em trechos mais próximos à fonte, a abertura da NF inicial resultou em um maior impacto inicial sobre as cargas, exigindo maior atenção na etapa de recomposição, conforme mostrado na Figura 09. Já em ramais laterais, a isolação do trecho ocorreu de forma mais localizada, com menor extensão de cargas desligadas, por exemplo, nos trechos desenergizados pela abertura das chaves NFs SW3 e SW5, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 09 – Estado da Rede Após Abertura de SW1



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Figura 10 – Estado da Rede Após Abertura de SW3



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Na etapa de recomposição, o algoritmo avaliou de forma sistemática todas as chaves normalmente abertas (NA) disponíveis na rede como potenciais alternativas de restabelecimento. Para cada NA candidata, foi simulada sua atuação, analisando-se a topologia resultante e descartando automaticamente as configurações que

ocasionassem paralelismos indesejados, reenergização do trecho isolado ou inconsistências na estrutura radial da rede.

Figura 11 – Retorno do Algoritmo para Validação de Manobras para o vão L70

```

Manobras IEEE-123 Bus
Digite as LINHAS (ex.: L52,L80,L100): l70
Linhas sob manutenção e seus terminais: - line.l70 : 69 ↔ 70
DEBUG: Modo R1 = ZERO_EXATO DEBUG (base): line.l70 lmax=27.290182A | OK_manutenção=False DEBUG: Nº violações no BASE = 4
DEBUG: Candidatas para line.l70: ['line.sw1', 'line.sw2', 'line.sw4']
DEBUG: TOP-3 NFs para line.l70: ['line.sw4', 'line.sw2', 'line.sw1']
REJEITADO (nova sobrecorrente): line.l51 lmax=409.25A lim=400.00A ratio=1.02 | NF=['line.sw4'] NA=line.sw7 BLK=line.sw1
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.165705A | NF=['line.sw4'] NA=line.l108 BLK=None
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.165705A | NF=['line.sw4'] NA=line.l108 BLK=line.sw1
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.165705A | NF=['line.sw4'] NA=line.l108 BLK=line.sw2
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.165705A | NF=['line.sw4'] NA=line.l108 BLK=line.sw3
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.165705A | NF=['line.sw4'] NA=line.l108 BLK=line.sw6
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.324300A | NF=['line.sw2'] NA=line.l108 BLK=None
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.324264A | NF=['line.sw2'] NA=line.l108 BLK=line.sw1
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.324300A | NF=['line.sw2'] NA=line.l108 BLK=line.sw3
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.165705A | NF=['line.sw2'] NA=line.l108 BLK=line.sw4
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.324300A | NF=['line.sw2'] NA=line.l108 BLK=line.sw6
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.793168A | NF=['line.sw1'] NA=line.sw7 BLK=None
REJEITADO (nova sobrecorrente): line.l51 lmax=409.25A lim=400.00A ratio=1.02 | NF=['line.sw1'] NA=line.sw7 BLK=line.sw4
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=27.982511A | NF=['line.sw1'] NA=line.sw7 BLK=line.sw5
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.793168A | NF=['line.sw1'] NA=line.sw7 BLK=line.sw6
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.748454A | NF=['line.sw1'] NA=line.l108 BLK=None
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.324264A | NF=['line.sw1'] NA=line.l108 BLK=line.sw2
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.554901A | NF=['line.sw1'] NA=line.l108 BLK=line.sw3
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.165705A | NF=['line.sw1'] NA=line.l108 BLK=line.sw4
REJEITADO (manutenção - ZERO_EXATO): line.l70 lmax=28.748454A | NF=['line.sw1'] NA=line.l108 BLK=line.sw6

```

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Entre as alternativas consideradas válidas, a maximização da carga restabelecida foi adotada como critério principal de decisão entre alternativas operacionais válidas, refletindo uma prioridade típica de redes privadas industriais, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Retorno do Algoritmo para Opções de Manobras para o vão L70

```

Opção 1 [NA + bloqueio]
NF isolamento (abrir): ['line.sw4'] (pode ter 2+ NFs)
NA (fechar): line.l108
NF bloqueio (abrir): line.sw5
kW desligado: 1105.00
Manobras: 3
kW base: 1425.00
✅ Tensão: sem violações em barras energizadas (0.95-1.05 pu)

Opção 2 [BASE (NFs por linha + redução)]
NF isolamento (abrir): ['line.sw4'] (pode ter 2+ NFs)
NA (fechar): -
NF bloqueio (abrir): -
kW desligado: 1425.00
Manobras: 1425.00
kW base:
✅ Tensão: sem violações em barras energizadas (0.95-1.05 pu)

```

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A etapa final de contenção, correspondente à abertura da segunda NF, mostrou-se essencial para garantir a manutenção da configuração radial após o fechamento da NA. Essa etapa foi necessária principalmente em cenários nos quais a recomposição envolvia caminhos alternativos próximos ao trecho isolado.

De forma geral, os resultados indicam que o algoritmo foi capaz de gerar sequências de manobra coerentes, consistentes e operacionalmente plausíveis para a totalidade dos vãos analisados, demonstrando sua aplicabilidade em diferentes situações topológicas.

### **4.3. Avaliação do impacto sobre as cargas**

A avaliação do impacto das manobras foi realizada a partir dos valores médios de carga inicial desligada, carga final interrompida e carga restabelecida, calculados para cada vão analisado.

A análise dos resultados apresentados nos Gráficos 01 e 02 evidencia que ocorre variação na taxa de recomposição de carga para a abertura das chaves SW1 a SW5, refletindo diretamente as características topológicas da rede IEEE-123 e a posição relativa de cada chave no alimentador. Os percentuais de carga restaurada observados decorrem da capacidade estrutural da rede em permitir caminhos alternativos de suprimento após o isolamento de cada setor.

As recomposições propostas para a abertura da chave SW2 apresentaram o melhor desempenho de recomposição, com aproximadamente 72% da carga restaurada. Esse resultado está associado à posição estratégica dessa chave na rede, uma vez que a chave normalmente aberta utilizada na recomposição conecta o setor isolado a um trecho eletricamente mais robusto do alimentador. Dessa forma, uma parcela significativa das barras a jusante pode ser reenergizada por um caminho alternativo sem violar as restrições operacionais impostas, como a preservação da radialidade e a ausência de paralelismo entre fontes. Em termos práticos, a abertura de SW2 isola um setor com elevada capacidade de atendimento alternativo.

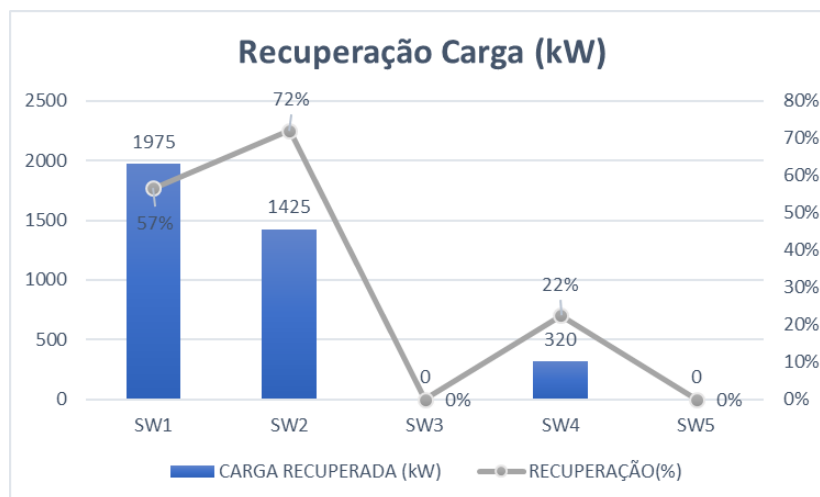
As recomposições propostas para a abertura da chave SW1 apresentaram uma taxa intermediária de recomposição, da ordem de 57% da carga. Esse comportamento indica que, embora exista uma alternativa de suprimento para parte do setor isolado,

a topologia local limita a recomposição total. Parte significativa das cargas não são bloqueadas sem causar reenergização do vão indicado pelo usuário e que será isolado por SW1.

Em contraste, as recomposições propostas para a abertura da chave SW4 resultaram em uma recomposição significativamente menor, em torno de 22% da carga interrompida. Esse desempenho reduzido caracteriza uma situação típica de ponta de ramal, na qual a alternativa de recomposição disponível atende apenas um subconjunto restrito do setor isolado. A maior parte das cargas encontra-se em regiões sem conectividade alternativa adequada, o que limita a transferência de carga e reduz a eficácia da recomposição.

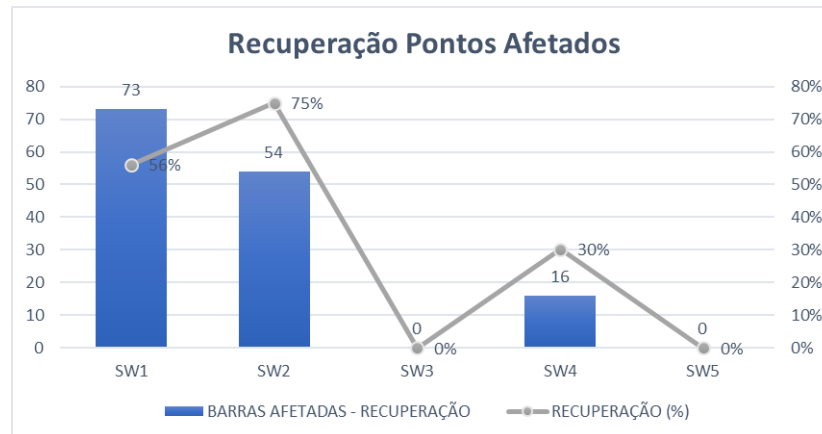
Por sua vez, as chaves SW3 e SW5 não apresentaram qualquer opção para recomposição de carga, com 0% de restauração nos cenários analisados. Esse resultado indica que os setores isolados por essas chaves não dispõem de caminhos alternativos viáveis para suprimento, seja pela inexistência de chaves normalmente abertas conectadas a esses trechos, seja por restrições topológicas que impedem a reenergização sem reconectar o trecho isolado ou criar paralelismos indesejados entre fontes.

Gráfico 01 – Recuperação de Carga para Cada Chave NF



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Gráfico 02 – Recuperação de Barras Afetadas para Cada Chave NF



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

De forma geral, os resultados demonstram que a lógica proposta atua de maneira consistente na minimização do impacto dos desligamentos, explorando adequadamente as possibilidades de recomposição oferecidas pela topologia da rede e respeitando as restrições operacionais impostas pela configuração dos dispositivos de manobra. As restrições observadas decorrem diretamente da configuração física e lógica dos dispositivos de manobra, incluindo a posição fixa de chaves normalmente abertas, a inexistência de caminhos alternativos em determinados ramais e a necessidade de utilização de chaves normalmente fechadas como pontos de isolamento e contenção.

#### 4.4. Validação elétrica das manobras

Além da análise topológica e da quantificação do impacto sobre as cargas, todas as sequências de manobra sugeridas pelo algoritmo foram submetidas à validação elétrica por meio de simulações no OpenDSS. Para cada alternativa considerada viável do ponto de vista topológico, foram executados fluxos de carga a fim de avaliar o comportamento elétrico da rede após a aplicação das manobras.

No presente trabalho, a verificação de correntes foi incorporada como critério operacional restritivo, realizando a análise de correntes nos elementos que permaneceram energizados após a reconfiguração da rede. Para cada sequência de manobra avaliada, o algoritmo verificou automaticamente as correntes máximas nas linhas, comparando-as com os limites nominais de corrente definidos no modelo da rede (*NormAmps*) e, quando aplicável, com os limites de emergência (*EmergAmps*). O critério adotado baseou-se em uma análise incremental em relação ao estado base

da rede, de modo que uma sequência de manobras era rejeitada caso resultasse na criação de novas violações de corrente ou no agravamento de violações preexistentes.

Em relação à tensão nodal, adotou-se como referência a faixa de 0,95 a 1,05 pu para qualificar o desempenho elétrico das soluções obtidas. Diferentemente da corrente, essa análise foi utilizada em caráter indicativo, com o objetivo de demonstrar o comportamento do perfil de tensão após a recomposição e evidenciar a margem de operação do sistema, conforme mostrado na Tabela 02.

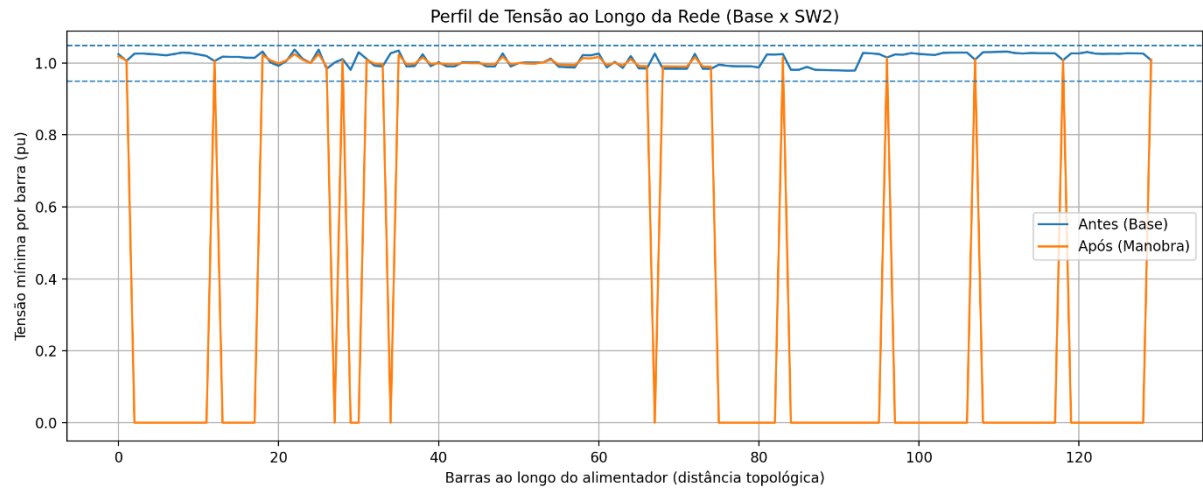
Tabela 02 – Limites Tensão Nodal por Manobra

SEQUÊNCIA	Vmin Base (pu)	Vmax Base (pu)	Vmin Após (pu)	Vmax Após (pu)	Limite Inferior Violado?	Limite Superior Violado?
SW1-SW7-SW4	0,98	1,04	0,95	1,01	NÃO	NÃO
SW1-L108-SW2	0,98	1,04	0,90	1,01	SIM	NÃO
SW1-L108-SW4	0,98	1,04	0,91	1,01	SIM	NÃO
SW1-SW7-SW3	0,98	1,04	0,99	1,01	NÃO	NÃO
SW2-L108-SW4	0,98	1,04	0,91	1,03	SIM	NÃO
SW2-L108-SW5	0,98	1,04	0,99	1,03	NÃO	NÃO
SW4-L108-SW5	0,98	1,04	0,99	1,04	NÃO	NÃO
SW2	0,98	1,04	0,99	1,03	NÃO	NÃO
SW3	0,98	1,04	0,99	1,05	NÃO	NÃO
SW4	0,98	1,04	1,00	1,04	NÃO	NÃO
SW5	0,98	1,04	0,99	1,04	NÃO	NÃO

Fonte: Adaptado de OpenDSS, 2026.

No que se refere aos níveis de tensão, os resultados das simulações indicaram que, nos cenários em que não houve recomposição de carga, as tensões nodais permaneceram dentro da faixa operacional adotada neste estudo, compreendida entre 0,95 e 1,05 pu. Como exemplo, podemos verificar o perfil de tensão ao longo do alimentador para caso de abertura de SW2, mostrado no Gráfico 03.

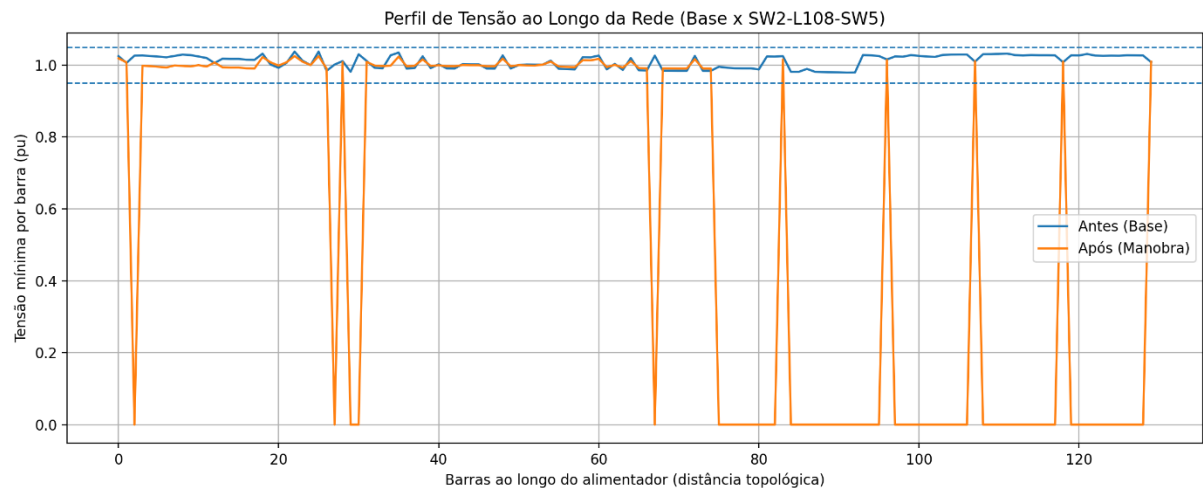
Gráfico 03 – Perfil de Tensão ao Longo da Rede (SW2)



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

O Gráfico 04 apresenta o perfil de tensão ao longo do alimentador para a sequência de manobra SW2–L108–SW5, evidenciando que em algumas situações, embora a recomposição implique a alimentação de cargas por caminhos alternativos não foram observadas violações dos limites mínimos ou máximos de tensão.

Gráfico 04 – Perfil de Tensão ao Longo da Rede (SW2-L108-SW5)



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Adicionalmente, foi realizada a análise de correntes nos elementos que permaneceram energizados após a reconfiguração da rede. Para cada sequência de manobra avaliada, o algoritmo verificou automaticamente as correntes máximas nas linhas, comparando-as com os limites nominais de corrente definidos no modelo da rede (*NormAmps*) e, quando aplicável, com os limites de emergência (*EmergAmps*). O critério adotado baseou-se em uma análise incremental em relação ao estado base da rede, de modo que uma sequência de manobras era rejeitada caso resultasse na

criação de novas violações de corrente ou no agravamento de violações preexistentes.

Os resultados obtidos demonstraram que, embora algumas manobras tenham provocado aumentos de corrente em determinados trechos — em função da transferência de carga entre alimentadores ou da alteração da topologia de suprimento — os valores observados permaneceram dentro da capacidade nominal dos condutores analisados. Dessa forma, não foram identificados carregamentos excessivos nos trechos energizados após a recomposição, conforme ilustrado pelos dados quantitativos apresentados na tabela 03.

Tabela 03 – Análise de Corrente para Sequências de Manobras

MANOBRA	LINHA ATIVA	I NOMINAL (A) $I_{nom}$	I EMERGÊNCIA (A) $I_{emer}$	I ANTES (A)	I APÓS (A)	SUPERIOR À $I_{nom}$ ?	SUPERIOR À $I_{emer}$ ?	SUPERIOR À CORRENTE INICIAL?	MANOBRA VÁLIDA?
SW1-SW7-SW4	L49	400	600	18,61	399,85	NÃO	NÃO	SIM	SIM
SW1-L108-SW2	L101	400	600	64,83	251,87	NÃO	NÃO	SIM	SIM
SW1-L108-SW4	L105	400	600	64,83	188,49	NÃO	NÃO	SIM	SIM
SW1-SW7-SW3	L49	400	600	18,61	136,38	NÃO	NÃO	SIM	SIM
SW2-L108-SW4	L115	400	600	630,67	303,12	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
SW2-L108-SW5	L115	400	600	630,67	303,12	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
SW4-L108-SW5	L115	400	600	630,67	402,28	SIM	NÃO	NÃO	SIM
SW2	L115	400	600	630,67	303,12	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
SW3	L115	400	600	630,67	494,52	SIM	NÃO	NÃO	SIM
SW4	L115	400	600	630,67	402,28	SIM	NÃO	NÃO	SIM
SW5	L115	400	600	630,67	560,10	NÃO	NÃO	NÃO	SIM

Fonte: Adaptado de OpenDSS, 2026.

Essa validação elétrica evidencia que a lógica de reconfiguração desenvolvida ao integrar, de forma sistemática, a simulação de fluxo de carga e critérios explícitos de tensão e corrente ao processo decisório, o sistema assegura que as manobras recomendadas sejam não apenas topologicamente viáveis, mas também eletricamente consistentes e aderentes às condições operacionais do sistema elétrico analisado.

#### 4.5. Desempenho e consistência do algoritmo

A aplicação do algoritmo a todos os vãos únicos da rede evidenciou um comportamento estável e previsível. Por se tratar de uma abordagem determinística,

o sistema apresentou consistência nos resultados, produzindo sempre a mesma sequência de manobras para um dado cenário, independentemente da ordem de execução ou do número de repetições do teste.

O tempo de execução, inferior a um minuto, mostrou-se compatível com aplicações práticas de planejamento e apoio à operação, mesmo considerando a avaliação exaustiva de todos os vãos da rede. Esse desempenho é resultado da separação entre análise topológica e validação elétrica, que reduz o número de simulações necessárias e otimiza o uso do simulador.

#### 4.6. Discussão dos Resultados

##### 4.6.1. Impacto da Reconfiguração nas Perdas Técnicas

Embora o foco principal do algoritmo seja a maximização da carga restaurada após a execução das manobras, a reconfiguração da rede altera os fluxos de potência, impactando diretamente as perdas técnicas por efeito Joule ( $I^2R$ ) nos condutores. A análise das perdas ativas totais do sistema, obtidas por meio do simulador OpenDSS e organizadas na Tabela 04, permitiu comparar o estado base da rede com os cenários após a aplicação das sequências de manobra.

Tabela 04 – Análise Perdas do Sistema

MANOBRA	PERDAS BASE (kW)	PERDAS APÓS (kW)	DIFERENÇA (kW)
SW1-SW7-SW5	95,779	124,481	28,702
SW1-SW7-SW4	95,779	46,33	-49,449
SW4-L108-SW5	95,779	34,636	-61,143
SW2-L108-SW4	95,779	30,948	-64,831
SW2-L108-SW5	95,779	21,626	-74,153
SW1-L108-SW2	95,779	18,495	-77,284
SW1-L108-SW4	95,779	11,075	-84,704
SW1-SW7-SW3	95,779	3,384	-92,395
SW2	95,779	19,873	-75,906
SW3	95,779	66,802	-28,977
SW4	95,779	33,247	-62,532
SW5	95,779	74,734	-21,045

Fonte: Adaptado de OpenDSS, 2026.

Observa-se que, nas situações em que houve isolamento mais amplo da rede, como na abertura isolada da chave SW1, as perdas técnicas foram reduzidas de forma significativa, chegando a valores nulos em função da desenergização de grande parte do sistema.

Nos cenários de recomposição do fornecimento por caminhos alternativos, verificou-se, de modo geral, uma redução das perdas técnicas em relação ao estado base. Esse resultado está associado à redistribuição do fluxo de potência e à desenergização de determinados trechos da rede, que reduz a circulação de corrente em parte dos condutores. Contudo, destaca-se que determinadas sequências, como a manobra SW1–SW7–SW5, resultaram em aumento das perdas técnicas totais do sistema, evidenciando que a reconfiguração pode, em alguns casos, introduzir trajetos elétricos menos eficientes e maior carregamento em trechos específicos.

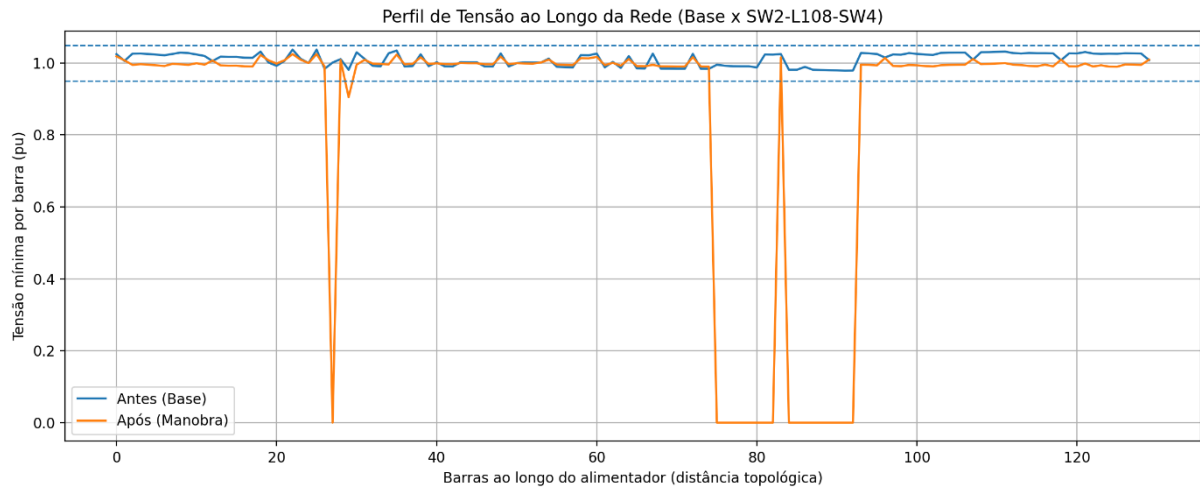
Esses resultados reforçam que a reconfiguração da rede envolve compromissos entre confiabilidade, eficiência e seletividade das manobras. Embora a restauração de carga constitua o principal critério adotado neste trabalho, a análise das perdas técnicas permite compreender os efeitos colaterais associados às diferentes soluções, caracterizando o aumento das perdas como um possível “custo operacional” da melhoria da continuidade do fornecimento.

Ressalta-se, por fim, que a minimização das perdas técnicas não foi considerada como objetivo do algoritmo desenvolvido. Ainda assim, a quantificação desse impacto amplia a análise dos resultados e aponta para a possibilidade de trabalhos futuros explorarem estratégias de otimização, integrando critérios de restauração de carga, perdas técnicas e limites operacionais de forma simultânea.

#### 4.6.2. Margem de Segurança dos Níveis de Tensão

A validação elétrica das manobras adotou como critério indicativo a manutenção das tensões nodais dentro da faixa de 0,95 a 1,05 pu. A análise dos perfis de tensão ao longo do alimentador demonstrou que em determinados cenários de recomposição foram observadas violações formais desses limites, conforme mostrado no Gráfico 05 – Perfil de Tensão ao Longo da Rede (SW2-L108-SW4).

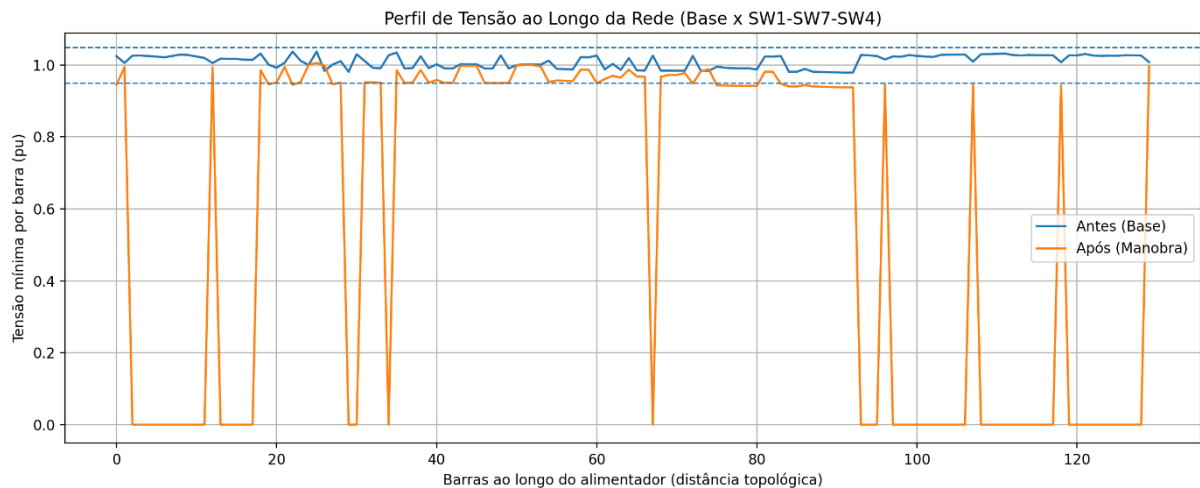
Gráfico 05 – Perfil de Tensão ao Longo da Rede (SW2-L108-SW4)



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A discussão dos resultados revela que algumas manobras, como a SW1-SW7-SW4 mostrada no Gráfico 06, conduziram a tensões mais próximas do limite inferior admissível, especialmente em barras localizadas em regiões distantes da fonte principal ou alimentadas por caminhos alternativos mais extensos. Tais situações indicam um estado de operação mais estressado, com menor margem para absorver variações abruptas de carga.

Gráfico 06 – Perfil de Tensão ao Longo da Rede (SW1-SW7-SW4)



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

#### 4.6.3. Análise de Correntes e Restrições de Ampacidade

Além da análise de tensão, o algoritmo também adota um critério de restrição de corrente, bloqueando automaticamente sequências de manobra que resultassem em sobrecorrente em linhas que permanecem energizadas após a reconfiguração. Para

essa verificação, foram utilizados os parâmetros *NormAmps* e *EmergAmps* definidos no modelo OpenDSS.

Os resultados indicaram que algumas manobras provocaram aumentos de corrente em determinados trechos, mesmo quando os limites nominais não foram ultrapassados. A análise comparativa das correntes antes e após as manobras evidenciou que a ausência de sobrecarga não implica ausência de impacto elétrico, reforçando a importância de avaliar quantitativamente esse parâmetro.

O critério adotado foi conservador no sentido de não permitir a criação de novas violações de fluxo de corrente em relação ao estado base. Assim, manobras que resultaram na desenergização de grandes porções da rede foram consideradas válidas, mesmo quando o sistema apresentava sobrecargas pré-existentes, desde que tais manobras não agravassem a condição dos elementos remanescentes.

#### 4.6.4. Priorização de Cargas: Volume versus Criticidade

O algoritmo desenvolvido também adota como critério a maximização da carga restaurada, medida em termos de potência ativa total (kW). Essa abordagem é adequada para avaliar o impacto global da recomposição, porém trata todas as cargas de forma equivalente, independentemente de sua criticidade operacional.

Em alguns clientes essa simplificação representa uma limitação. A restauração de uma carga de menor potência associada a um processo produtivo crítico pode ser mais importante do que a recomposição de cargas maiores, porém menos estratégicas, como iluminação externa ou serviços auxiliares.

A ausência de um critério de ponderação de criticidade limita a aplicação direta da ferramenta em cenários reais. Essa observação aponta para a necessidade de extensões futuras que permitam integrar critérios de prioridade operacional à lógica de decisão.

#### 4.6.5. Abordagem Determinística versus Meta-heurísticas

A fundamentação teórica deste trabalho apresentou métodos baseados em algoritmos genéticos e outras técnicas meta-heurísticas, empregados em problemas de reconfiguração de redes de distribuição. Tais abordagens são reconhecidas por

sua capacidade de explorar grandes espaços de busca, porém geralmente demandam maior esforço computacional e dependem do ajuste fino de parâmetros para chegarem em uma solução operacionalmente viável.

Em contraste, a metodologia adotada neste trabalho baseou-se em uma abordagem determinística, estruturada a partir da análise explícita da topologia da rede, da avaliação sistemática das chaves disponíveis e da validação elétrica por meio de simulações sucessivas de fluxo de carga no OpenDSS. Os resultados obtidos para a rede IEEE 123-bus demonstraram que essa abordagem apresentou vantagens relevantes, como a garantia de identificação de uma solução factível sempre que existente, a rejeição de cenários inviáveis e o baixo tempo computacional, inferior a um minuto para a análise completa dos vãos considerados.

Essa previsibilidade do comportamento do algoritmo constitui um aspecto particularmente importante em aplicações operacionais, nas quais a tomada de decisão deve ser rápida, transparente e tecnicamente justificável. Diferentemente de métodos estocásticos, a abordagem determinística permite rastrear claramente os motivos pelos quais uma determinada sequência foi aceita ou rejeitada, como violações de radialidade, paralelismo entre fontes, reenergização do trecho isolado ou introdução de novas sobrecorrentes.

Entretanto, a análise dos resultados também evidencia que a escalabilidade da solução constitui um ponto de atenção. Embora o desempenho tenha sido satisfatório para a rede IEEE 123-bus, a dependência de simulações iterativas de fluxo de carga para cada alternativa de recomposição pode se tornar um fator limitante em redes de maior porte, como sistemas reais de concessionárias com centenas ou milhares de barras. Nesses cenários, o tempo total de processamento tende a crescer de forma proporcional ao número de chaves e combinações avaliadas.

Dessa forma, a aplicação da metodologia em sistemas de grande escala pode exigir estratégias complementares, tais como filtragens topológicas mais rigorosas para reduzir o espaço de busca, paralelização das simulações elétricas ou a divisão da rede em zonas operacionais independentes. Essa reflexão reforça a necessidade de equilibrar precisão elétrica, robustez operacional e desempenho computacional em soluções de automação para reconfiguração de redes de distribuição.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu seu objetivo geral ao desenvolver, implementar e validar um algoritmo capaz de apoiar a determinação de sequências de manobra para reconfiguração de redes de distribuição, integrando a linguagem Python ao simulador OpenDSS. A solução proposta automatizou um processo tradicionalmente manual e dependente da experiência do operador, demonstrando que a combinação entre análise topológica e simulação elétrica constitui uma abordagem viável e eficiente para apoio à tomada de decisão operacional.

A integração entre Python e OpenDSS mostrou-se eficaz ao permitir a execução automática de múltiplos cenários de manobra, avaliando de forma sistemática tanto a viabilidade topológica quanto o comportamento elétrico da rede após cada operação. A aplicação do algoritmo em todos os vãos da rede IEEE 123-bus resultou na identificação consistente de sequências do tipo NF–NA–NF, bem como na correta detecção de cenários sem possibilidade operacional de recomposição, evidenciando a robustez da lógica desenvolvida.

Dessa forma, o trabalho demonstra a viabilidade do uso de algoritmos determinísticos integrados a simuladores elétricos e interfaces computacionais como apoio à tomada de decisão operacional em redes de distribuição.

### 5.1. Atendimento aos Objetivos Específicos

No que se refere aos objetivos específicos definidos na Seção 1.3.2, estes foram atendidos conforme descrito a seguir.

#### 5.1.1. Modelagem da Rede e Banco de Dados Topológico

O objetivo de modelar a rede de distribuição no OpenDSS e estruturar suas informações topológicas em um banco de dados relacional foi alcançado. A rede IEEE 123-bus foi corretamente representada no simulador, incluindo linhas, chaves e barras, conforme apresentado na Figura 05. A extração dessas informações para um banco de dados SQLite permitiu a manipulação eficiente da topologia da rede, viabilizando análises baseadas em grafos sem a necessidade de chamadas constantes ao simulador para verificações estruturais.

### 5.1.2. Desenvolvimento da Lógica Determinística de Manobras (NF–NA–NF)

O desenvolvimento de uma lógica determinística para isolar trechos sob manutenção, transferir cargas e conter paralelismos foi implementado com sucesso. O algoritmo identificou corretamente as chaves normalmente fechadas necessárias para o isolamento, as chaves normalmente abertas candidatas à recomposição e, quando necessário, as chaves de bloqueio.

Além disso, a lógica foi capaz de reconhecer cenários nos quais não existe possibilidade de recomposição segura. Nesses casos, o algoritmo corretamente retornou apenas a alternativa de isolamento, evitando a proposição de manobras inviáveis do ponto de vista topológico ou elétrico, o que reforça seu alinhamento com práticas operacionais reais.

Ressalta-se que a disponibilização pública do repositório tem caráter acadêmico e didático, não sendo destinada à aplicação direta em ambientes operacionais sem as devidas adaptações, validações adicionais e análises específicas de cada rede real. O repositório do projeto está disponível em: <https://github.com/ellenaranxa6/TCCV5>.

### 5.1.3. Validação Elétrica por Meio de Fluxo de Carga

O objetivo de validar eletricamente as manobras por meio de simulações de fluxo de carga foi igualmente cumprido. Para os cenários de recomposição considerados válidos, as tensões nodais permaneceram, de modo geral, dentro da faixa de 0,95 a 1,05 pu, adotada como referência para a análise do comportamento elétrico da rede. Essa verificação teve caráter indicativo, permitindo qualificar o perfil de tensão resultante e avaliar a margem operacional após a reconfiguração.

Adicionalmente, o algoritmo incorporou um critério de verificação de correntes em linhas que permanecem energizadas após a reconfiguração, utilizando os limites *NormAmps* e *EmergAmps* disponíveis no modelo. Esse mecanismo bloqueou automaticamente manobras que introduziriam novas violações aos limites de corrente, elevando o nível de segurança operacional da ferramenta e aproximando-a das exigências de aplicação prática.

#### 5.1.4. Desenvolvimento da Interface Interativa

O objetivo de desenvolver uma interface gráfica interativa foi atendido por meio da implementação da plataforma em Streamlit. A interface permitiu que a ferramenta deixasse de ser apenas um script computacional para se tornar um sistema de apoio à decisão, capaz de apresentar ao usuário as sequências de manobra, os impactos sobre a carga, os mapas da rede e os principais indicadores elétricos.

### 5.2. Limitações e Escopo da Solução Proposta

Apesar dos resultados positivos, é importante reconhecer as limitações do escopo adotado. A ferramenta desenvolvida tem como objetivo apoiar a determinação de sequências de manobra, e não atuar como um sistema autônomo de controle. Embora tenha sido implementado um critério de verificação de corrente baseado nos parâmetros disponíveis no modelo, não foi realizada uma modelagem térmica detalhada dos condutores nem a consideração explícita de efeitos dinâmicos associados à temperatura ambiente ou ao tempo de sobrecarga. Além disso, a solução desenvolvida não contempla a análise de falhas simultâneas em diferentes pontos da rede. A ferramenta foi desenvolvida para receber um único vão por execução, refletindo o foco em contingências isoladas e desligamentos programados.

Dessa forma, a solução proposta deve ser compreendida como um instrumento de apoio à decisão, cujo uso deve ser acompanhado da avaliação técnica do operador, especialmente em cenários com elevada criticidade operacional.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 1 – Introdução**. Brasília: ANEEL, 2018. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2018842\\_prodist\\_modulo\\_1\\_v10.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2018842_prodist_modulo_1_v10.pdf). Acesso em: 1 fev. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição**. Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021931\\_2.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021931_2.pdf). Acesso em: 1 fev. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888\\_prodist\\_modulo\\_8\\_v11.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888_prodist_modulo_8_v11.pdf). Acesso em: 2 fev. 2025.
- ALMEIDA, George Gomes de. **Estudo do software OpenDSS com modelagem e análise de uma rede de distribuição real**. 2019. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.
- CRESWELL, J. W. **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches**. 4. ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2014.
- CRUZ, Vagner Antonio de Moraes da. **Coordenação ótima de relés de sobrecorrente em redes de distribuição de energia elétrica usando o método do gradiente reduzido generalizado**. UNESP. 2024.
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **OpenDSS: Open Distribution System Simulator – User’s Guide**. Palo Alto, CA: EPRI, [s.d.].
- GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- GAUTAM, Mukesh; BHUSAL, Narayan; BENIDRIS, Mohammed; LOUIS, Sushil J. **A spanning tree-based genetic algorithm for distribution network reconfiguration**. *arXiv preprint arXiv:2008.07908*, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2008.07908>. Acesso em: 4 fev. 2025.
- GAUTAM, Mukesh; BHUSAL, Narayan; BENIDRIS, Mohammed. **Deep Q-Learning-based distribution network reconfiguration for reliability improvement**. *arXiv preprint arXiv:2305.01180*, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2305.01180>. Acesso em: 4 fev. 2025.
- GÖNEN, Turan. **Electric power distribution system engineering**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

GUTH, Thiago Freire et al. **Avaliação da implantação de sistemas de recomposição automática em redes de distribuição de energia elétrica.** UFS: 2013.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos Cesar Barioni de; ROBBA, Ernesto João. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica.** 2. ed. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

MACHADO, Marcos Fellipe Santana Oliveira. **Tutorial para aplicação do software OpenDSS na análise de redes de distribuição de energia elétrica.** 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.

MARQUES, Vinícius de Oliveira. **Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica com e sem a presença de geração distribuída.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

MATTOS, Marcel Souza. **Uma contribuição para a parametrização da proteção em sistemas de distribuição considerando custo de interrupções.** UFRGS: 2016.

MELO, Lucas S. et al. Sistema de Recomposição Automática para Rede de Distribuição de Energia Desenvolvido em JADE. **UFC UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ,** 2019.

MOURA, Guilherme Braga. **Coordenação e seletividade em redes de distribuição de energia elétrica através da integração do OpenDSS com algoritmo desenvolvido em Python.** 2022. Projeto de Diplomação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

PEREIRA, J. L. R.; GÓMEZ, J. C.; CONTRERAS, J.; MONTICELLI, A. **Reconfiguração de sistemas de distribuição para redução de perdas ativas baseada no comportamento de colônia de formigas.** Revista Controle & Automação, v. 17, n. 1, p. 11-19, 2006.

SEXAUER, Jason. **Introdução ao OpenDSS.** Tradução e edição: Paulo Radatz; Celso Rocha. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute (EPRI), 2016.

SOUZA, B. A.; MENDES, A. S.; SOUZA, L. F. W. **Reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando algoritmos genéticos.** Revista IEEE América Latina, v. 6, n. 1, p. 126-132, 2018.

SOUZA, João Paulo Assunção de; FERREIRA, João Pedro Klock; CAMPOS, Guilherme Esteves Mendes. **Uso do OpenDSS em aplicações reais para distribuidoras de energia.** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Automática, 2020.

SOUSA, Thúlio Francisco. **Automação da Distribuição de Energia: Recomposição Automática das Redes de distribuição**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Pitágoras, como requisito parcial para a obtenção do título em Engenharia Elétrica. DIVINÓPOLIS, 2022.

SOUZA, Arthur Gomes de. **Coordenação da proteção de um sistema de distribuição de energia elétrica em Uberlândia-MG usando BDGD, QGIS e OpenDSS**. 2021.

VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

ZANCHETTA, Lucas Parmigiani. **Reconfiguração de redes de distribuição de energia com geração distribuída empregando conceitos de redes elétricas inteligentes**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2014.