



Programa de Pós-Graduação em

Computação Aplicada

Mestrado/Doutorado Acadêmico

Armando Leopoldo Keller

MÉTODO EVOLUTIVO PARA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM FOCO EM REDUÇÃO NOS INDICADORES COLETIVOS DE CONTINUIDADE EM CASOS DE INTERVENÇÃO

São Leopoldo, 2025

Armando Leopoldo Keller

**MÉTODO EVOLUTIVO PARA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM FOCO EM REDUÇÃO NOS
INDICADORES COLETIVOS DE CONTINUIDADE EM CASOS DE INTERVENÇÃO**

Proposta de Tese apresentada como requisito
parcial para a obtenção do título de Doutor
pelo Programa de Pós-Graduação em
Computação Aplicada da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos — UNISINOS

Orientador:
Prof. Dr. Sandro José Rigo

Coorientador:
Prof. Dr. Rodrigo Marques de Figueiredo

São Leopoldo
2024

K29m

Keller, Armando Leopoldo.

Método evolutivo para reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica com foco em redução nos indicadores coletivos de continuidade em casos de intervenção / por Armando Leopoldo Keller. – 2024.

74 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, São Leopoldo, RS, 2024.

Orientador: Dr. Sandro José Rigo.

Coorientador: Dr. Rodrigo Marques de Figueiredo.

1. Reconfiguração de redes. 2. Otimização de posicionamento de chaves. 3. Redes elétricas. 4. Meta-heurísticas. 5. Algoritmos.
I. Título.

CDU: 004.42:621.3

AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio técnico e financeiro da CPFL Energia pelo projeto “Metodologia de Planejamento de Projetos de Redes de Distribuição Otimizando o DEC Programado com a Aplicação de Inteligência Artificial” (PD-00396-3057/2019, desenvolvido no âmbito do programa de P&D/ANEEL).

“Simplicity is a great virtue but it requires hard work to achieve it and education to appreciate it. And to make matters worse: complexity sells better”.
(Edsger Wybe Dijkstra)

RESUMO

Intervenções nas redes elétrica de transmissão e distribuição de energia elétrica são necessárias para a sua manutenção e expansão, sendo que em alguns casos estas ocasionam interrupções no fornecimento de energia elétrica a consumidores. Estas interrupções podem trazer prejuízos ao consumidor e no Brasil são monitoradas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através dos indicadores de continuidade individuais e coletivos. É de interesse das empresas concessionárias e dos clientes que estes índices sejam mantidos com os menores valores possíveis. Uma forma de manter patamares mínimos de interrupções é reconfigurar a rede elétrica de forma que sejam formadas novas rotas que consigam atender uma maior quantidade de consumidores, resultando na diminuição dos valores dos indicadores. Por se tratar de um problema NP-difícil, analisar todas as configurações possíveis é inviável, tornando necessário o uso de outras alternativas como meta-heurísticas e algoritmos genéticos. O estado da arte atualmente aplica meta-heurísticas e algoritmos evolutivos para uma otimização multicritério dos parâmetros de qualidade de energia elétrica e custos de operação. O método tradicional de otimização de redes elétricas utiliza o cálculo do fluxo de potência na função objetivo do otimizador, o que é computacionalmente custoso. Este trabalho apresenta os métodos para modelar as redes elétricas em grafos que podem ser simplificados, descreve o processo de simplificação de grafos de redes elétricas e propõe uma versão modificada do algoritmo genético cuja função objetivo minimiza os indicadores de continuidade propondo novas configurações de rede mantendo as suas características de radialidade. Foram realizados experimentos para comprovar o funcionamento de cada etapa envolvida, além da comparação com outros algoritmos de otimização e com soluções propostas por projetistas experientes. Também é apresentado um algoritmo para posicionamento de novos elementos manobráveis em uma rede e o seu impacto na reconfiguração da rede e nos indicadores de continuidade. Quando comparado com o método tradicional, o método aqui proposto, ao realizar a análise topológica e reduzir a quantidade de execuções do fluxo de potência, pode acelerar o tempo de execução do otimizador em até 138 vezes, o que torna uma a sua aplicação viável para auxílio aos projetistas. Em testes com redes reais com um alimentador, executados em um computador convencional, as soluções foram encontradas em menos de 30 segundos. Na comparação com o projetista experiente a ferramenta encontrou soluções com indicadores iguais ou menores do que o projetista.

Palavras-chave: Reconfiguração de redes. Otimização de posicionamento de chaves. Redes elétricas. Meta-heurísticas.

ABSTRACT

Interventions on power distribution systems are needed for maintenance and expansion, in some cases, interruptions are required causing power outage. Those interruptions could bring losses to the consumers and are monitored by ANEEL through continuity indicators. By the network reconfiguration is possible to achieve new routes that attend a higher number of consumers, reducing the indicators. Being an NP-hard problem, evaluation of all possible configurations is invisible, requiring a metaheuristics approach as genetic algorithms. This thesis presents methods to model the distribution networks using graphs that could be simplified, the graph simplification algorithm, and a modified version of the genetic algorithm that aims the minimization continuity indicators proposing new configurations that maintain the distribution networks radiality characteristics. Experiments were performed to prove the operation of each step, other algorithms were compared, and the results show that it is possible to achieve adequate configurations. Compared with projects designed by an experienced engineer, the configurations proposed by the system result in indicators equal to or smaller than the ones obtained by the engineer. A new algorithm for positioning new maneuverable elements in a network and its impact on network reconfiguration and continuity indicators is also presented. When compared with the traditional method, the method proposed here, by performing topological analysis and reducing the number of power flow runs, it can speed up the optimizer runtime by up to 138 times, making your application viable to assist the designer. In tests with real networks with a feeder, carried out on a conventional computer, solutions were found in less than 30 seconds. In comparison with the experienced designer, the tool found solutions with indicators equal to or less than the designer.

Keywords: Network reconfiguration. Switch placement optimization. Electrical networks. metaheuristics.

LISTA DE FIGURAS

1	Diagrama unifilar de sistema elétrico de potência	17
2	Diagrama unifilar de rede com opções de manobra.	18
3	Exemplo de grafo genérico.	20
4	Exemplo de matriz de adjacência.	21
5	Exemplo de matriz de graus dos vértices.	21
6	Grafo completamente conectado.	22
7	Árvores geradoras do grafo totalmente conectado.	23
8	Matriz laplaciana do grafo de exemplo.	24
9	Fluxograma de etapas do algoritmo genético.	26
10	Etapas de reprodução.	26
11	Modificação para preservar radialidade da rede.	32
12	Otimização de Pareto.	33
13	Resultados dos estudos de caso de SOUIFI; KAHOU LI; Hadj Abdallah (2019).	34
14	Processo de conversão de rede OpenDSS para grafo.	39
15	Fluxograma de simplificação do grafo.	40
16	Rede teste para exemplo de simplificação.	40
17	Simplificação do grafo.	41
18	Fluxograma do algoritmo genético modificado.	43
19	Grafo da rede de exemplo com a nova chave ch5.	47
20	Rede sintética para teste do sistema proposto.	48
21	Curvas de aptidão para a rede sintética.	49
22	Configurações propostas pelo sistema proposto.	50
23	Curva de aptidão para a rede A.	52
24	Curva de aptidão para a rede B.	53
25	Curva de aptidão para a rede C.	53
26	Curvas de aptidão pra diferentes algoritmos.	57
27	Etapas da aplicação de multicritérios.	59
28	Curva de aptidão para a primeira etapa do multicritério.	60
29	Grafo da rede IEEE de 123 barras.	62
30	Grafo da rede IEEE de 123 barras simplificada.	62
31	Grafo da rede IEEE de 123 com destaque para região da obra.	63
32	Grafo da rede IEEE de 123 com nova chave L.	64
33	Grafo da rede IEEE de 123 simplificada com nova chave L.	65

LISTA DE TABELAS

1	Contribuição dos trabalhos.	36
2	Configurações da rede de exemplo.	45
3	Configurações da rede de exemplo simplificada.	46
4	Rankeamento dos vértices da rede de exemplo simplificada.	46
5	Quantidade de consumidores conectados por nó.	49
6	Características das redes elétricas reais.	51
7	Resultados para as redes elétricas reais.	51
8	Quantidade de consumidores desconectados por configuração para redes da região sul.	54
9	Redução da quantidade de consumidores desconectados com o uso da ferramenta.	54
10	Redução da quantidade de consumidores desconectados com o uso da ferramenta para redes da região sudeste.	55
11	Dados estatísticos da aptidão para cada algoritmo.	56
12	Quantidade de soluções únicas propostas por cada algoritmo.	56
13	Tempos de execução dos algoritmos em segundos.	56
14	Tempos de execução dos algoritmos com diferentes funções objetivo.	58
15	Dados estatísticos de menor nível de tensão nas cargas em p.u..	60
16	Características dos grupos de consumidores.	61
17	Rank dos grupos de consumidores.	64

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AE	Algoritmos Evolutivos
AG	Algoritmo Genético
CSA	<i>Cukoo Search Algorithm</i>
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FEC	Frequência equivalente de Interrupção por unidade consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade consumidora
FWA	<i>Fireworks Algorithm</i>
IAICA	<i>Improved Adaptative Imperialist competitive Algorithm</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NA	Normalmente Aberta
NF	Normalmente Fechada
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
VS	<i>Vortex Search</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

GB	Gigabyte
kV	quilovolt
kW	quilowatt
p.u.	por unidade
s	segundos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Questões de pesquisa	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Contribuições da tese	14
1.4	Metodologia	14
1.5	Estrutura do trabalho	15
2	REVISÃO TEÓRICA	16
2.1	Redes elétricas	16
2.1.1	Indicadores de continuidade	18
2.2	Grafos	19
2.2.1	Conceitos básicos	20
2.2.2	Árvores geradoras	22
2.2.3	Medidas de centralidades	24
2.3	Algoritmos evolutivos	25
3	TRABALHOS RELACIONADOS	28
3.1	Reconfiguração e otimização de redes elétricas utilizando algoritmos evolutivos	28
3.2	Reconfiguração e otimização de redes elétricas utilizando algoritmos genéticos	30
3.2.1	<i>Distribution network reconfiguration using feasibility-preserving evolutionary optimization</i>	30
3.2.2	<i>Multi-objective distribution network reconfiguration optimization problem</i>	32
3.3	Análise crítica dos trabalhos relacionados	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	Modelagem	38
4.2	Simplificação da topologia da rede	39
4.3	Otimização utilizando algoritmos genéticos	42
4.3.1	Otimização multicritério	44
4.4	Proposta de novas conexões	44
4.5	Métricas de avaliação	47
5	RESULTADOS	48
5.1	Estudo de caso com rede sintética	48
5.2	Estudo de caso com redes reais	51
5.3	Estudo de caso de comparação com projetista	53
5.4	Estudo de caso de comparação com outros algoritmos	55
5.5	Estudo de caso de comparação de função objetivo.	57
5.6	Estudo de caso de aplicação de multicritério	58
5.7	Estudo de caso de alocação de nova chave	61
5.8	Análise de resultados	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
6.1	Contribuições	68
6.2	Limitações	69
6.3	Trabalhos futuros	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um insumo essencial para o dia-a-dia da vida moderna e a interrupção do seu fornecimento, mesmo que por um curto período de tempo, pode impactar de diversas maneiras diferentes classes de consumidores. Para consumidores residenciais, a interrupção causa desconforto e outras dificuldades por impossibilitar o uso dos equipamentos eletroeletrônicos e o acesso à iluminação. No caso dos consumidores de classe comercial e industrial, pode ocorrer prejuízo por perda de material armazenado ou de material que está sendo utilizado em algum processo que foi eventualmente interrompido (WOCHNIK; SILVA; BELATI, 2020).

No Brasil, o fornecimento de energia é regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e explorado por empresas públicas ou privadas por meio de concessão. Para que as empresas possam explorar os serviços de transmissão e distribuição em território nacional, estas devem prestar contas para a ANEEL, demonstrando que o serviço prestado está de acordo com os indicadores definidos pela ANEEL, sob pena de perder o direito de exploração do serviço de fornecimento de energia caso a qualidade do serviço prestado seja considerada inadequada (MANOEL; HAYASHI; SILVA, 2018).

Os indicadores de qualidade de energia são definidos nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) no módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021). Para a interrupção do fornecimento de energia elétrica, são utilizados os indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica, destacando-se os indicadores coletivos Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). Estes indicadores levam em conta tanto as interrupções por causas externas como quedas de postes por acidente de trânsito, danos nos equipamentos por temporais e outras causas não controláveis, assim como as interrupções programadas para manutenção e expansão da rede. Isto torna necessário realizar a otimização do processo de manutenção e expansão de rede que necessitem de desligamentos, para que a menor quantidade de consumidores sejam impactados e que este impacto seja pelo menor tempo possível. Os indicadores são apresentados com mais detalhes no capítulo 2 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

A rede elétrica pode muitas vezes ser reconfigurada através dos elementos manobráveis, como chaves e religadores, que ao comutar os seus estados, formam um novo caminho na rede, permitindo que um determinado trecho possa ser desenergizado para a manutenção, sem afetar uma grande quantidade de consumidores. No entanto é necessário avaliar as diversas opções de manobras possíveis, pois a estrutura da rede deve suportar a carga requisitada e os equipamentos de proteção devem manter a coordenação e seletividade. Avaliar todas as possibilidades de manobras de forma manual é impraticável devido a grande quantidade de manobras possíveis, a complexidade da análise do fluxo de potência, os custos de operação para realização da manobra em relação ao impacto que terá sobre o indicador, entre outros fatores. Este contexto demonstra a necessidade de implementação de ferramentas de otimização

multi-objetivo, que possam apoiar na atividade de análise de opções mais vantajosas para as manobras, enquanto levam em conta as diversas variáveis que geram impacto no seu resultado. Este assunto vem sendo estudado já há bastante tempo (KAGAN et al., 2009; KAGAN N. E DE OLIVEIRA, 2015), mas ainda demanda avanços e constitui um tema de pesquisa relevante.

O estado da arte em reconfiguração de redes elétricas utilizando algoritmos evolutivos, mais especificamente algoritmos genéticos, apresenta trabalhos visando principalmente a minimização das perdas técnicas nas redes de distribuição e transmissão LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019), SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019). Em alguns casos critérios adicionais às perdas também são inseridos no processo de otimização, tais como o custo de operação e a manutenção do nível de tensão FATIMA; BUTT; LI (2023), PEREIRA; BARBOSA; VASCONCELOS (2023). No entanto, conforme pesquisa apresentada no capítulo 3, não foram encontrados pesquisas sobre reconfiguração de redes elétricas priorizando a minimização dos indicadores de continuidade. Uma reconfiguração da rede, de modo que propicie a redução nos indicadores de continuidade, permite que a concessionária execute mais obras na rede elétrica em um mesmo espaço de tempo. Este fator melhora a possibilidade da operadora manter-se dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL, ampliando a qualidade do serviço fornecido e causando menos impactos por interrupções de fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Desta forma, o presente trabalho explora esta lacuna de pesquisa, propondo uma abordagem geral de reconfiguração e minimização de redes elétricas baseada em dois aspectos principais. O primeiro trata da exploração de possibilidades de simplificação e adição de elementos para uma reconfiguração física da rede de modo. O segundo atua na proposição de abordagens de minimização com meta-heurísticas e algoritmos genéticos.

Este trabalho é parte de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL junto a uma concessionária de energia, no qual está sendo desenvolvida uma ferramenta de auxílio a projetos, com a qual o projetista poderá inserir os pontos que devem ser abertos para execução de uma obra na rede elétrica e a ferramenta. O sistema proposto nesta tese proverá sugestões de configurações da rede que mantenham as características elétricas e causem o menor impacto possível nos indicadores de continuidade, possibilitando que sejam realizadas mais obras em um mesmo período.

1.1 Questões de pesquisa

Com base no material estudado e no contexto descrito, são apresentadas as seguintes questões de pesquisa:

- I. Como representar as redes elétricas a partir de um modelo em grafos e sobre estes aplicar métodos de redução de dimensionalidade para reduzir o tempo de processamento necessário para a otimização da rede elétrica de potência?
- II. Como a otimização com base na análise da topologia permite reduzir o tempo de execução

ao reduzir a quantidade de cálculos de fluxo de potência?

1.2 Objetivos

Dada a necessidade de uma ferramenta para a otimização multi-objetivo das redes elétricas com objetivo de reduzir os indicadores coletivos de continuidade, esta seção apresenta os objetivos gerais e específicos da tese.

O objetivo geral desta tese é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de minimização que apresente novas configurações viáveis para uma rede elétrica de forma que intervenções na rede impactem o mínimo possível nos indicadores de continuidade. Para que este objetivo seja cumprido, os seguintes objetivos específicos devem ser atendidos:

- Desenvolver um modelo computacional otimizável para as redes elétricas.
- Definir um método de otimização multi-critério e critérios de otimização para a reconfiguração da rede.
- Validar soluções propostas pela ferramenta através de simulação.

1.3 Contribuições da tese

Como principais pontos de contribuição da tese destaca-se:

- A modelagem das redes elétricas na forma de grafos e o processo de simplificação destes grafos para redução da dimensionalidade;
- A divisão em etapas da análise multicritério para que, através da análise topológica do grafo simplificado, seja reduzida a quantidade de execuções do cálculo de fluxo de potência;
- Um novo algoritmo baseado em medidas de centralidades de grafos para localização de pontos para inserção de novas chaves que melhorem a manobrabilidade das redes elétricas;
- O desenvolvimento de uma ferramenta computacional que permite a minimização das redes elétricas e que serve de apoio aos projetistas.

1.4 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho inicia com uma revisão bibliográfica não sistemática nas principais bases de dados e literatura de referência para a apresentação dos conceitos fundamentais desta tese. Iniciando com a revisão bibliográfica dos principais conceitos como

redes elétricas, grafos e algoritmos evolutivos, em seguida apresentando os trabalhos relacionados com o tema de pesquisa e uma análise do atual estado da arte e a relação dos trabalhos com esta tese (WAZLAWICK, 2014). A pesquisa apresentada nesta tese tem como natureza a pesquisa aplicada com objetivos de pesquisa exploratória onde utiliza estudos de caso como procedimentos técnicos (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Após a revisão teórica são apresentados os materiais e métodos utilizados, iniciando com a modelagem de redes elétricas em forma de grafos, seguindo para a etapa de simplificação de grafos, apresentando o algoritmo de otimização baseado em algoritmos genéticos, as técnicas para propor novas conexões e as métricas que serão utilizadas para avaliar os resultados dos métodos propostos nesta tese. Com os materiais e métodos definidos, são apresentados os resultados que demonstram a viabilidade de implementação dos métodos propostos nesta tese, levando às considerações finais onde estes resultados são avaliados assim como as contribuições deste trabalho.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, sendo que o primeiro capítulo apresenta a introdução e contextualização do trabalho, seguido pelo capítulo de revisão teórica, que apresenta a fundamentação teórica e trabalhos relacionados. No capítulo de materiais e métodos são apresentados os principais materiais e a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, seguido pelo capítulo de resultados, que apresenta os resultados dos estudos de caso e a discussão sobre eles. O último capítulo apresenta as considerações finais, contribuições da tese para o estado da arte e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos para a fundamentação do trabalho. Iniciando com os conceitos de redes elétricas, passando para a modelagem sistemas em grafos, finalizando com os conceitos de algoritmos genéticos. Para a revisão dos conceitos básicos, foi realizada uma revisão bibliográfica não sistemática da literatura, buscando livros de referência nos assuntos abordados.

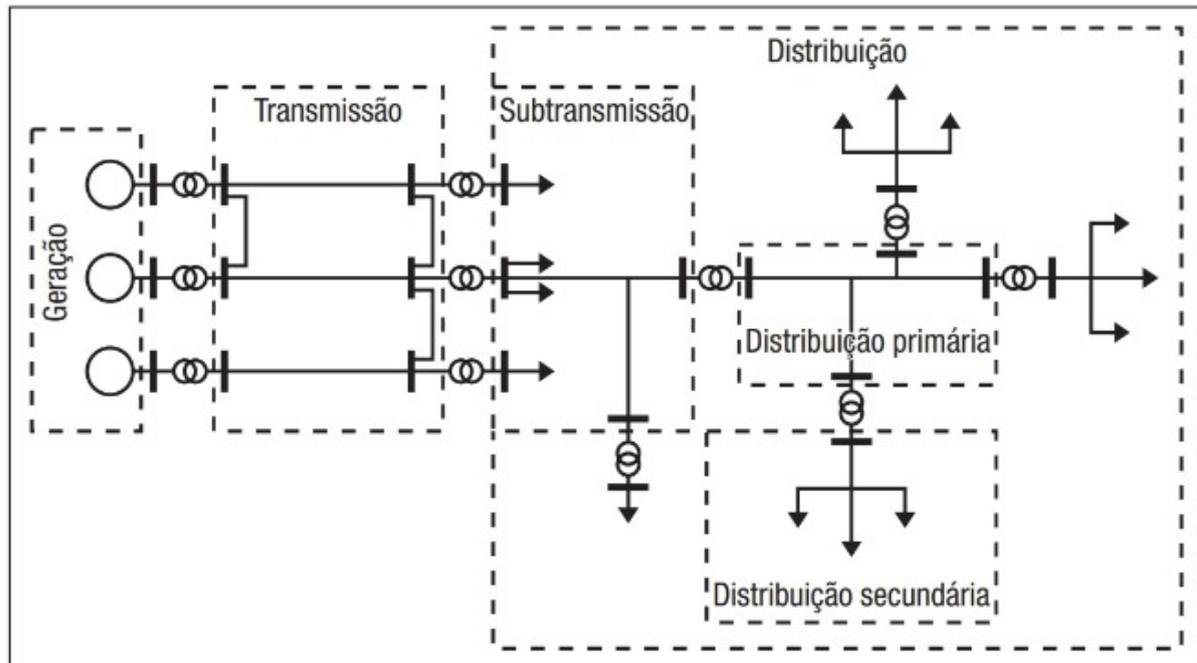
2.1 Redes elétricas

O sistema elétrico de potência tem como função principal fornecer energia elétrica aos consumidores, independente do seu porte, com qualidade adequada, no momento que esta for solicitada, sendo ele responsável por produzir, transformar e distribuir a energia elétrica de maneira adequada. Estas responsabilidades podem ser divididas nas categorias de geração, transmissão e distribuição. A etapa de geração é responsável por converter alguma forma de energia em energia elétrica, como por exemplo uma turbina eólica que converte energia mecânica em energia elétrica. A etapa de transmissão é responsável por transportar a energia dos centros de produção até os centros de consumo, normalmente em tensões bastante elevadas. E a etapa de distribuição é responsável por distribuir esta energia aos diversos consumidores (KAGAN N. E DE OLIVEIRA, 2015).

A distribuição de energia possui características diferentes que fazem necessária a classificação de suas etapas em mais categorias, sendo estas a subtransmissão, distribuição primária e distribuição secundária. A subtransmissão é responsável por interligar as linhas de transmissão às subestações de distribuição primária, podendo ser conectada ainda a consumidores de grande porte com fornecimento em alta tensão, sendo estas acima de 69 kV e abaixo de 230 kV. Já as redes de distribuição primária são as redes consideradas em média tensão, com níveis de tensão superiores a 1 kV e inferiores a 69 kV, que interligam as subestações com os clientes de média tensão e com os transformadores de distribuição. A rede de distribuição secundária é a última etapa do sistema de distribuição e inicia no secundário dos transformadores de distribuição, normalmente localizados em postes em via pública, e fornece energia aos consumidores de baixa tensão, com níveis de tensão inferiores a 1 kV. Na Figura 1 é apresentado um diagrama unifilar de um sistema elétrico de potência genérico com todas estas etapas (KAGAN N. E DE OLIVEIRA, 2015).

Uma saída de uma subestação de energia pode ser considerada um circuito alimentador, que vai fornecer energia para uma rede de distribuição primária, que por sua vez, pode fornecer energia para uma rede de distribuição secundária. Estas redes estão sujeitas a diversas adversidades como colisão de veículos com postes, roubo de condutores, galhos de árvore em contato com condutores, queda de objetos sobre os condutores, entre outros. Para evitar que estas situações prejudiquem o fornecimento de energia elétrica, estes circuitos são dotados de

Figura 1: Diagrama unifilar de sistema elétrico de potência



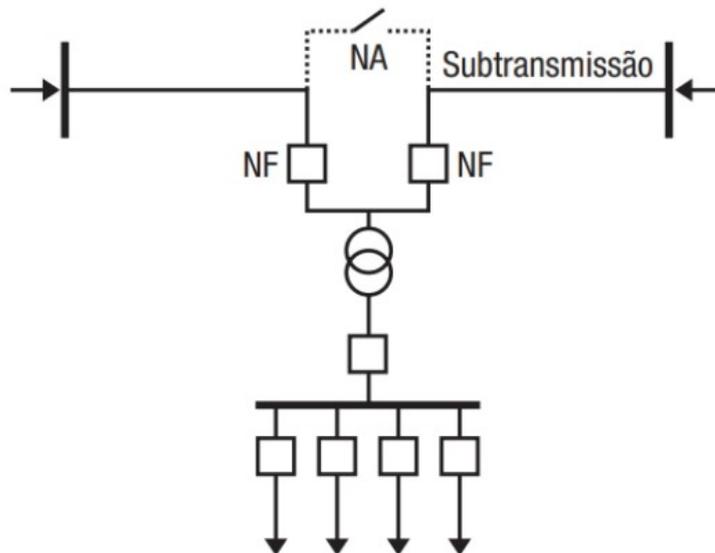
Fonte: KAGAN N. E DE OLIVEIRA (2015, pg. 3)

equipamentos de proteção, que também podem ser utilizados para realizar manobras nas redes elétricas (MAMEDE FILHO J. E MAMEDE, 2016).

As redes elétricas podem sofrer interrupções no fornecimento por diversos motivos, sendo eles eventos não programados ou até mesmo programados. Em DISTRIBUIÇÃO ELETROBRÁS (1982) são apresentadas técnicas para realizar a manutenção das redes elétricas com o menor impacto por desligamentos, tanto para a manutenção preditiva quanto para atendimentos de emergência. Os desligamentos programados devem ser informados a classes específicas de consumidores com antecedência. Um exemplo de manobra possível é apresentado na Figura 2, onde o primário da subestação faz parte do sistema de subtransmissão, sendo ligado por duas chaves normalmente-fechadas (NF) em paralelo com uma chave normalmente-aberta (NA), de forma que se for necessário realizar o desligamento da subestação e dos consumidores a jusante, as chaves NF podem ser abertas e a chave NA pode ser fechada para que o sistema de subtransmissão não sofra impactos. Além disto os circuitos a jusante da subestação podem ser desconectados através dos seus dispositivos de seccionamento, representados pelos quadros, de forma que os demais consumidores atendidos pela mesma subestação não tenham o seu fornecimento de energia elétrica interrompido, impactando menos nos indicadores coletivos de continuidade.

Segundo KAGAN N. E DE OLIVEIRA (2015), as redes podem ser configuradas em diferentes arranjos, dotados de elementos manobráveis como chaves, que permitem reconfigurar a rede, podendo transferir carga para outros trechos e operar em situações de contingência. Considerando uma rede elétrica completa, a avaliação de como esta será reconfigurada pode ser

Figura 2: Diagrama unifilar de rede com opções de manobra.



Fonte: KAGAN N. E DE OLIVEIRA (2015, pg. 9)

uma tarefa bastante complexa na qual o uso de ferramentas computacionais é adequado. As estruturas de grafos permitem gerar uma representação adequada para a modelagem da rede, estas são apresentadas na seção 2.2.

2.1.1 Indicadores de continuidade

A distribuição de energia elétrica é explorada pelas concessionárias de energia mediante contrato de concessão e é regulada pela ANEEL, para acompanhamento da qualidade do serviço são utilizados os indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica. Dentre os indicadores utilizados, destacam-se os indicadores de continuidade de conjunto de unidades consumidoras DEC e FEC que avaliam o tempo de duração das interrupções e a frequência com a qual estas ocorrem. Os limites anuais para estes indicadores são estabelecidos pela ANEEL e disponibilizados para consulta em meio eletrônico. São consideradas interrupções todos os casos onde a tensão nominal é igual ou menor a 70% da tensão nominal (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

Os indicadores coletivos DEC e FEC são calculados com base nos indicadores individuais Duração de Interrupção Individual Por Unidade Consumidora (DIC) e Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC). O FIC é a quantidade de interrupções do fornecimento de energia, dado pela Equação 2.1 onde n representa a quantidade de interrupções. Já o DIC é calculado pela Equação 2.2, onde t representa o tempo de cada uma das n interrupções ocorridas. Com os indicadores individuais apurados, é possível calcular os indicadores coletivos DEC e FEC para cada conjunto de consumidores. O DEC é calculado conforme Equação 2.3

onde C_c representa a quantidade de consumidores pertencentes ao conjunto analisado. O FEC é calculado conforme Equação 2.4, representando a média de ocorrências no conjunto analisado (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

$$FIC = n \quad (2.1)$$

$$DIC = \sum_{i=0}^n t(i) \quad (2.2)$$

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c} \quad (2.3)$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} FIC(i)}{C_c} \quad (2.4)$$

Os indicadores de continuidade coletiva ainda podem ser separados conforme a sua origem, programação e se ocorreu em situação de emergência ou dia crítico. A origem pode ser interna ou externa ao sistema de distribuição, a sua programação pode ser programada ou não programada. No caso de interrupções programadas, estas devem ser comunicadas com antecedência com prazos estipulados de acordo com a categoria de fornecimento de energia. No caso do não cumprimento dos limites estabelecidos pela ANEEL, é prevista compensação financeira aos consumidores, proporcional aos indicadores que ultrapassaram os limites. O impacto gerado pela ultrapassagem dos indicadores de continuidade é percebido diretamente na receita das concessionárias, tornando necessário o estudo de técnicas para a minimização destes indicadores.

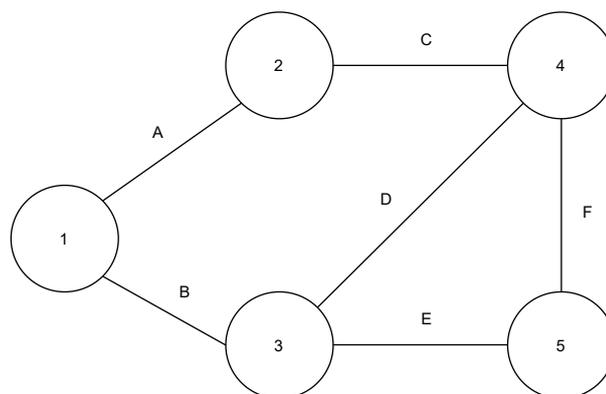
Para poder realizar as simulações é necessário que a rede elétrica seja modelada computacionalmente, de forma que interações possam ser realizadas e os indicadores calculados para cada configuração avaliada. Os grafos são uma forma adequada de modelar as redes elétricas e ainda trazem a vantagem de possuir técnicas já conceituadas para avaliar a topologia da rede.

2.2 Grafos

Um grafo $G = (V, A)$ é um par de arestas (A) e vértices (V), onde os vértices são os pontos de conexão das arestas, e as arestas estão conectadas entre dois vértices. Um exemplo de grafo pode ser visualizado na Figura 3, onde os vértices estão nomeados com números e as arestas com letras. A teoria de grafos teve seu início no século XVII quando Leonard Euler tentava solucionar o problema das pontes de *Königsberg*, que consistia em percorrer em uma única volta um trajeto com sete pontes, passando apenas uma vez por cada ponte. Desde então os grafos são utilizados para modelagem de problemas onde informações podem ser adicionadas aos seus vértices e arestas, podendo ser utilizadas como peso em análises (JUNGNICKEL, 2014).

Os grafos permitem analisar caminhos, ciclos, conectividade, centralidades, estruturas de

Figura 3: Exemplo de grafo genérico.



Fonte: O autor.

árvores e outros parâmetros. Existem algoritmos validados como por exemplo o algoritmo de Dijkstra para encontrar o menor caminho entre dois pontos, ou o algoritmo de Kruskal para encontrar uma árvore geradora de custo mínimo (JUNGNICKEL, 2014).

As aplicações da modelagem por grafos são diversas, como é demonstrado em GOLDBARG; GOLDBARG (2012) e ZVEROVICH (2021), onde exemplos de aplicação em distribuição de jogos em um campeonato, rotas em um mapa e circuitos elétricos são modelados através de grafos. Para as redes elétricas não é diferente, sendo possível modelar cada trecho de rede como uma aresta e cada ponto de conexão, ou uma barra do diagrama unifilar, como vértices.

A teoria de grafos pode ser bastante extensa, no entanto a maioria dos problemas podem ser resolvidos com grafos finitos, onde os conjuntos de vértices e arestas são finitos, e grafos simples, onde não existem laços e não existem duas arestas que ligam os mesmos dois nós (BONDY; MURTY, 1976). Alguns conceitos básicos de grafos são necessários para entender os processos de simplificação, redução de dimensionalidade e otimização, dentre eles destacam-se o estudo de árvores, bastante aplicado em algoritmos de forma geral (WU; CHAO, 2004).

2.2.1 Conceitos básicos

Considerando um grafo $G = (V, A)$, este pode formar diversos subgrafos, ou seja grafos menores compostos por parte dos conjuntos V e A . Se H é um subgrafo de G , isto pode ser escrito como $H \subseteq G$, e G é dito como um supergrafo de H (BONDY; MURTY, 1976).

Subconjuntos de A onde o início e o fim de todas as arestas estão contidos em conjuntos não vazios de V , formam subgrafos chamados de componentes de G . Caso um grafo possua somente um componente ele é dito conectado, caso contrário é dito como desconectado (BONDY; MURTY, 1976). Caso o grafo possua exatamente uma aresta entre cada par de vértices distintos, o grafo é dito como completamente conectado, ou completo (ROSEN, 2019).

Outra forma de representar e analisar os grafos é pela forma de matrizes, destacando-se a matriz de adjacência e a matriz de graus dos vértices. A matriz de incidência possui o conjunto de vértices representando os valores das suas colunas e linhas, e tem os seus valores dados pela quantidade de arestas que ligam os nós relacionados as linhas e colunas (BONDY; MURTY, 1976). Um exemplo pode ser visto na Figura 4, que apresenta a matriz de incidência do grafo apresentado na Figura 3.

A matriz de adjacência permite realizar análises sobre a estrutura do grafo, como por exemplo a diagonal principal preenchida com zeros, mostra que o grafo não possui arestas com o final igual ao início, ou laço em um único nó. Como nenhuma linha ou coluna está preenchida totalmente com zeros, significa que todos os nós do grafo estão conectados. E como a valor máximo é um, o grafo é considerado simples pois não possui duas arestas ligadas ao mesmo nó (JUNGNICKEL, 2014).

Figura 4: Exemplo de matriz de adjacência.

Vértices	1	2	3	4	5
1	0	1	1	0	0
2	1	0	0	1	0
3	1	0	0	1	1
4	0	1	1	0	1
5	0	0	1	1	0

Fonte: O autor.

Já o grau dos vértices é dado pela quantidade de arestas conectadas a este vértice, com isto forma-se a matriz de graus do grafo, onde a diagonal principal é preenchida com o grau de cada vértice. A Figura 5 apresenta a matriz de graus para o grafo da Figura 3.

Figura 5: Exemplo de matriz de graus dos vértices.

Vértices	1	2	3	4	5
1	2	0	0	0	0
2	0	2	0	0	0
3	0	0	3	0	0
4	0	0	0	3	0
5	0	0	0	0	2

Fonte: O autor.

A partir da diferença da matriz de graus dos vértices $Gr(G)$ com a matriz de adjacência $Adj(G)$, obtém-se a matriz laplaciana $Lap(G)$ de um grafo G , como é demonstrado na Equação 2.5.

$$Lap(G) = Gr(G) - Adj(G) \quad (2.5)$$

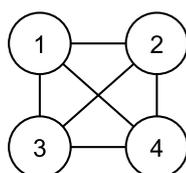
2.2.2 Árvores geradoras

Um tipo particular de grafos, chamado de árvore, árvore geradora ou também conhecida pelo termo em inglês *spanning tree*, possui bastante destaque na computação. Uma árvore é um grafo conectado que não possui circuitos fechados, ou seja, todos os vértices estão conectados entre si por apenas um caminho. As árvores recebem este nome devido a sua semelhança com os galhos de uma árvore, que partem do tronco e vão se ramificando, tendo nas suas pontas as folhas (ROSEN, 2019).

Grafos conectados podem ser chamados de florestas, pois cada componente do grafo é uma árvore. Estas árvores vão possuir todos os vértices do grafo original e $n - 1$ arestas, sendo n a quantidade de vértices (ROSEN, 2019).

A formula de Cayley diz que um grafo completamente conectado com n vértices possui n^{n-2} árvores geradoras. Um exemplo pode ser visto com o grafo apresentado na Figura 6 que possui quatro vértices e seis arestas, logo, deve possuir 4^{4-2} , ou 16, árvores geradoras. As árvores geradoras para este exemplo são demonstradas na Figura 7 (ROSEN, 2019; WU; CHAO, 2004).

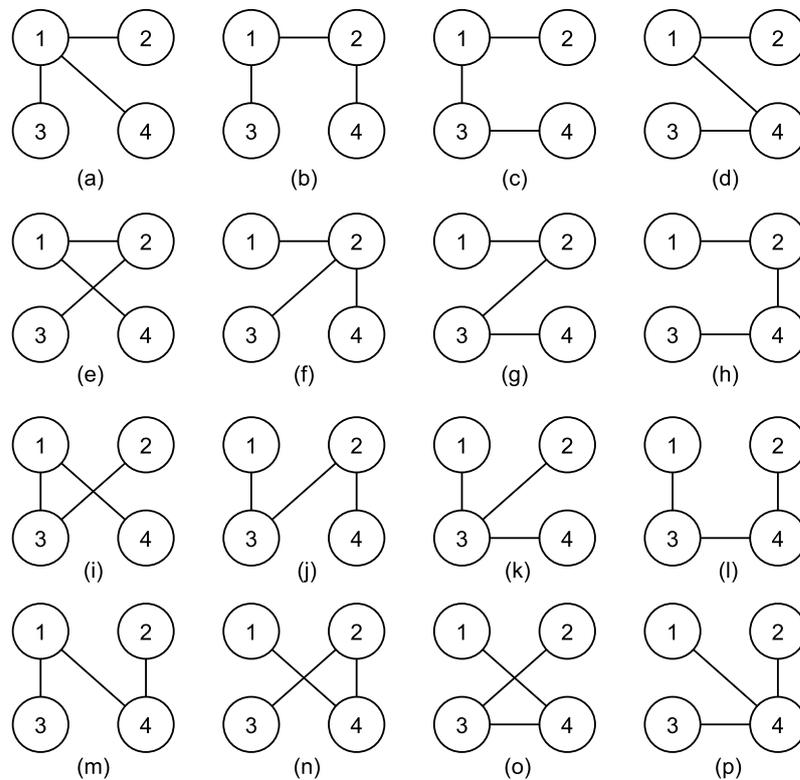
Figura 6: Grafo completamente conectado.



Fonte: O autor.

O número de árvores geradoras de um grafo que não é totalmente conectado não pode ser determinado pela formula de Cayley, para isto pode ser utilizado o teorema das matrizes de árvores de Kirchhoff, como é demonstrado em CHAIKEN; KLEITMAN (1978) baseado na demonstração de Kirchhoff apresentada em KIRCHHOFF (1847). O teorema diz que para um grafo conectado com n vértices, a quantidade de árvores é dada pela Equação 2.6 onde λ_n são os autovalores não nulos da matriz laplaciana. Este valor também pode ser obtido calculando um cofator da matriz laplaciana, que consiste em eliminar uma linha e uma coluna da matriz e obter o seu determinante.

Figura 7: Árvores geradoras do grafo totalmente conectado.



Fonte: Adaptado de WU; CHAO (2004).

$$t(G) = \frac{1}{n} \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} \quad (2.6)$$

Como exemplo, aplicando o teorema das matrizes de árvores de Kirchhoff, tem-se a matriz laplaciana apresentada na Figura 8, onde calculando os cofatores, obtém-se o total de 11 árvores. Considerando que existem dois estados possíveis para cada aresta, sendo eles existir e não existir, o total de combinações possíveis para este grafo é de 2^n , sendo n a quantidade de arestas, logo existem 64 combinações possíveis e somente 11 delas mantêm todos os vértices conectados sem a formação de ciclos.

Para grafos com pesos em suas arestas, existem algoritmos que buscam uma árvore mínima, que é a árvore onde a soma dos pesos das suas arestas é mínima. Alguns destes algoritmos são o algoritmo de Borůvka, algoritmo de Prim e o algoritmo de Kruskal (WU; CHAO, 2004).

Figura 8: Matriz laplaciana do grafo de exemplo.

Vértices	1	2	3	4	5
1	2	-1	-1	0	0
2	-1	2	0	-1	0
3	-1	0	3	-1	-1
4	0	-1	-1	3	-1
5	0	0	-1	-1	2

Fonte: O autor.

2.2.3 Medidas de centralidades

Ainda dentro da teoria de grafos, existem medidas que permitem realizar análises sobre as características topológicas de uma rede complexa, ou grafo, como é o caso das medidas de centralidades. As medidas de centralidade capturam a significância topológica de um vértice ou aresta de um grafo em relação a um ou mais critérios, e ainda podem ser classificadas por medidas de vizinhança e medidas de caminho curto (MEGHANATHAN, 2018).

Uma das medidas de centralidade que recebe destaque é a medida de centralidade por intermediação, que é classificada como uma medida de centralidade de caminho curto. A medida de centralidade de intermediação de um vértice v é a soma das frações de todos os pares de menores caminhos que passam por v . Uma forma de representar o cálculo da centralidade de intermediação Bc é apresentada na Equação 2.7, onde para um conjunto de vértices V , $\sigma(s, t)$ é a quantidade de menores caminhos e $\sigma(s, t|v)$ é a quantidade destes caminhos que passam por algum nó v diferente de s, t (BRANDES, 2008).

$$Bc(v) = \sum_{s, t \in V} \frac{\sigma(s, t|v)}{\sigma(s, t)} \quad (2.7)$$

Bibliotecas para manipulação de grafos, como a Networkx para a linguagem de programação python, já fornecem a implementação das principais medidas de centralidades (HAGBERG; SCHULT; SWART, 2008).

Com a rede modelada na forma de grafos, os algoritmos de otimização podem ser aplicados. Como os estados da rede elétrica dependem da comutação dos elementos manobráveis, a quantidade de configurações possíveis é de 2^n , sendo n a quantidade de elementos manobráveis. Segundo JUNGnickel (2014) e PAPADIMITRIOU (1994), problemas de otimização em grafos são considerados NP-completos e exigem uma abordagem que utilize meta-heurísticas adequadas para a sua solução dentro de um tempo viável, como por exemplo os algoritmos evolutivos, apresentados na seção a seguir.

2.3 Algoritmos evolutivos

Assim como as redes neurais tiveram a sua origem baseada em analogia com processos biológicos, os algoritmos evolutivos (AE) são modelos de aprendizado de máquina que simulam o modelo de evolução de formas de vida de plantas e animais descrito por Charles Darwin, onde os indivíduos mais adaptados em uma determinada população possuem mais chances de sobreviver e perpetuar a espécie. Um dos AE mais conhecidos e mais aplicado são os algoritmos genéticos, que possuem dois critérios chave, sendo eles a variação da reprodução e a seleção de populações superiores, ou melhor adaptadas (LUGER, 2009).

Apesar de não existir um critério rigoroso para o uso ou não dos algoritmos genéticos, é recomendado que o espaço de busca e a função de avaliação sejam analisados na tomada de decisão. Caso o espaço de busca seja pequeno, uma busca exaustiva pode ser utilizada, caso contrário algoritmos evolutivos podem ser considerados. Ao escolher uma meta-heurística para a otimização é importante lembrar que a garantia de encontrar a melhor solução global é sacrificada e é esperado encontrar uma solução considerada como suficientemente boa em troca do tempo de execução. (MITCHELL, 1998)

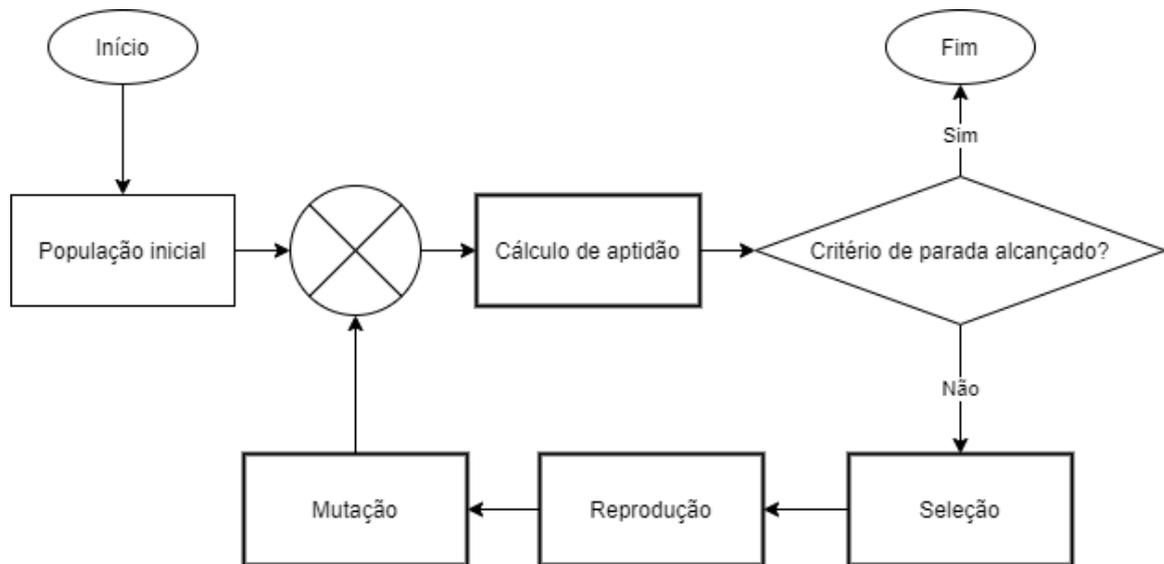
Os AE de forma geral, segundo ZHOU; YU; QIAN (2019), podem ser separados em quatro etapas:

1. Gerar um conjunto inicial de soluções, chamado de população;
2. Reproduzir novas soluções baseadas na população atual;
3. Descartar as soluções menos adaptadas, ou mais fracas;
4. Repetir o processo a partir do passo 2 até atingir um critério de parada.

Para os algoritmos genéticos, mais especificamente, as etapas são separadas em geração da população inicial, cálculo de aptidão, seleção, reprodução e mutação. O fluxo das etapas é apresentado na Figura 9, onde o processo inicia com a criação da população inicial e entra em um laço de repetição que passa pelas etapas de cálculo de aptidão, seleção, reprodução e mutação até que o critério de parada seja alcançado. (ZHOU; YU; QIAN, 2019)

Realizando a analogia com o processo da evolução das espécies, as populações são compostas por indivíduos que possuem características únicas que é o seu genoma, o qual é composto por uma determinada quantidade de genes e pode ser representado como um vetor. A etapa de cálculo de aptidão possui uma função objetivo que utiliza o valor destes genes para avaliar a aptidão do indivíduo, ou o quão próximo ele está do melhor resultado para a função objetivo. Na etapa de seleção, diferentes critérios podem ser adotados para selecionar os indivíduos mais adaptados. O elitismo é um dos critérios mais utilizados, onde uma determinada quantidade dos melhores indivíduos é selecionada para participar da reprodução e assim propagar os seus genes. Já na etapa de reprodução, são escolhidos pares de indivíduos da população atual e então

Figura 9: Fluxograma de etapas do algoritmo genético.

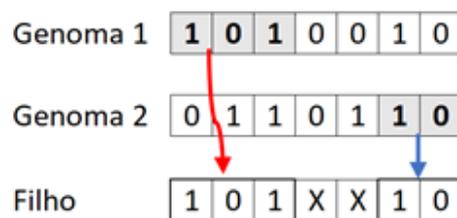


Fonte: O autor.

é realizado o cruzamento da sua carga genética, gerando um novo indivíduo que compartilha os genes dos pais. Na etapa de mutação, alguns genes dos novos indivíduos sofrem mutações aleatórias a uma taxa determinada, de forma que ocorra uma maior variabilidade no conjunto de soluções de cada geração.(ZHOU; YU; QIAN, 2019)

A Figura 10 apresenta uma representação gráfica da etapa de reprodução onde o filho recebe os três primeiros genes do indivíduo 1, representado pela seta vermelha, e os últimos dois, do indivíduo 2, representado pela seta azul. Os genes representados pela letra X são gerados de forma aleatória para garantir uma maior variedade de soluções. A mutação pode ocorrer em qualquer um destes genes, onde estes são escolhidos aleatoriamente e possuem o seu valor alterado.

Figura 10: Etapa de reprodução.



Fonte: O autor.

Como critério de parada, pode ser definido um valor limite para a função objetivo na etapa de aptidão, ou pode ser determinada uma quantidade máxima de gerações que devem ser executadas. No primeiro caso, existe a possibilidade do algoritmo não convergir a uma solução que

atenda o critério, enquanto no segundo caso existe a possibilidade do algoritmo ser interrompido antes de chegar em uma solução ótima. Para cada problema e implementação, deve ser avaliado o critério de parada mais adequado.

A aplicação de algoritmos genéticos (AG) para solucionar problemas de otimização em redes elétricas é demonstrado em KAGAN et al. (2009). A possibilidade da utilização em sistemas de otimização multicritério é apresentado em DEB (2001), assim como é aplicado em trabalhos diretamente relacionados com esta tese, conforme apresentado no capítulo 3.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo traz uma revisão bibliográfica dos principais artigos relacionados com a temática da tese, iniciando com a aplicação de reconfiguração e otimização de redes elétricas utilizando algoritmos evolutivos, identificando as principais técnicas, aplicações e resultados obtidos. Em seguida são destacados os trabalhos que utilizam algoritmos genéticos e representam o atual estado da arte em otimização de redes elétricas através de algoritmos evolutivos. A revisão foi realizada nas bases IEEEExplore, Elsevier e demais bases agregadas na ferramenta de pesquisa do Mendeley. Como critério de seleção foi utilizada a data de publicação, visando trabalhos publicados a partir de 2015, bem como a presença de assuntos relacionados com a temática desta tese. Incluindo os termos de busca "*network reconfiguration*", "*Evolutionary or Genetic Algorithm*" e "*multiobjective optimization*". Ao final da revisão é apresentada uma análise crítica dos trabalhos relacionados, destacando os principais elementos do atual estado da arte, lacunas de pesquisa e a relação dos trabalhos com a tese.

A seguir são analisados os pontos principais dos artigos selecionados para estudo, organizados em uma seção discorrendo sobre abordagens gerais de reconfiguração e otimização com base em algoritmos evolutivos e uma seção tratando do uso de algoritmos genéticos para esta tarefa. Ao final é apresentada uma análise geral que permite identificar as lacunas de pesquisa observadas e abordadas nesta tese.

3.1 Reconfiguração e otimização de redes elétricas utilizando algoritmos evolutivos

A reconfiguração de redes elétricas é um tema bastante pesquisado, normalmente voltado para a redução de perdas técnicas, que podem ser reduzidas alterando a configuração da rede, ou modificando os elementos presentes. Dentre os métodos utilizados para a reconfiguração das redes, destacam-se o uso de alguns métodos de otimização como algoritmos genéticos, enxame de partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*), busca tabu e programação não-linear. Outros métodos de otimização baseados em inteligência artificial, como redes neurais artificiais, segundo Van Der Mei; DOOMERNIK (2017), ainda não são adequados para serem utilizados neste tipo de problemas quando comparado com as meta-heurísticas. Algumas abordagens envolvendo aprendizado por reforço estão sendo estudadas com bons resultados, como pode ser visto em GHOLIZADEH; KAZEMI; MUSILEK (2023), no entanto necessitam um conhecimento prévio da rede e um longo tempo de treinamento, o que para uma rede real ainda é bastante limitante, pois cada alteração de consumidor altera as características da rede. Em VESSELINOVA et al. (2020) diversos métodos de aprendizado de máquina são comparados para análise combinatória de grafos, mas fatores como escalabilidade, adaptabilidade e generalização ainda são destacados como limitantes e alvos de estudos futuros.

O enxame de partículas é um dos algoritmos utilizados para otimização e reconfiguração de redes elétricas, conforme apresentado em REDDY; REDDY (2016), onde o algoritmo foi

implementado visando a redução das perdas e testado com as redes de teste IEEE de 33 e de 69 barras. O tempo de execução não foi apresentado. Para a rede de 33 barras foi obtida uma redução de 33,47% nas perdas, resultando em uma perda de 238,28 kW. Já para a rede de 69 barras foi obtida uma redução de 55,72% resultando em uma perda de 99,62 kW. Uma versão modificada do algoritmo de enxame de partículas, apresentada em EL-MAKSOU; AHMED; HASAN (2023), busca simultaneamente reconfigurar a rede e posicionar fontes de geração distribuída. Outra versão modificada do algoritmo de enxame de partículas, apresentada em WU et al. (2023), busca evitar a convergência prematura. Isto demonstra a aplicabilidade dos algoritmos evolutivos a este tipo de problemas.

Em FANG; ZHANG (2016) é apresentado um algoritmo híbrido de enxame de partículas com busca tabu, com o objetivo de minimizar as perdas em uma rede elétrica. Para o estudo de caso, foram utilizadas as redes de testes IEEE de 33 e 118 barras. Para a rede de 33 barras o algoritmo foi executado em 17,12 segundos e obteve perdas abaixo de 134 kW para mais de 86% dos casos. Para a rede de 118 barras, não foi informado o tempo de execução, no entanto, foi realizada uma comparação entre o algoritmo híbrido e somente o de enxame de partículas, com 100 execuções de 50 iterações, onde o algoritmo híbrido obteve perdas abaixo 115 kW para 67% dos casos enquanto o enxame de partículas sozinho obteve o mesmo resultado apenas para 14% dos casos. O resultado para a rede de 33 barras pode ser comparado com o apresentado em REDDY; REDDY (2016), demonstrando que o algoritmo híbrido proposto apresenta melhores resultados do que somente o enxame de partículas, além de que os parâmetros utilizados no algoritmo possuem impacto direto no resultado da otimização, pois a implementação do enxame de partículas também obteve resultado superior na comparação.

Diferentes implementações do enxame de partículas são apresentadas em PEGADO; RODRIGUEZ (2018), onde além do enxame de partículas seletivo, é apresentada uma variação do método que altera a função de ativação para o comportamento da função sigmoide. Ambos algoritmos são testados nas redes de teste IEEE de 33 e 69 barras. Além da contribuição da modificação do método, os autores utilizam o software OpenDSS para a execução do cálculo do fluxo de potência, destacando que isto permite a aplicação dos algoritmos a sistemas reais de médio e grande porte. Para a comparação dos resultados, os autores realizaram a execução dos algoritmos 100 vezes, onde o algoritmo modificado apresentou 100% de repetitividade enquanto o enxame de partículas original apresentou somente 89%. Para o sistema de 33 barras, foi obtida uma redução de 32,4% nas perdas, resultando em 137,08 kW, já no sistema de 69 barras foi obtida uma redução de 56,31% resultando em uma perda de 98,28 kW com o tempo de execução total de 59 segundos.

Além das soluções utilizando enxames de partículas, também são apresentadas soluções utilizando algoritmos genéticos, como em BABU; PASUNURU; VAISHNAVI (2018) que propõe a reconfiguração de redes elétricas utilizando algoritmos genéticos, visando a minimização de perdas em sistemas de distribuição radial. Para os testes do algoritmo foi utilizada a rede de testes IEEE de 33 barras, que possui ao todo 37 chaves. No estudo de caso foi obtida uma

redução de 26,01% nas perdas, resultando em perdas de 185,98 kW. Como parâmetros do algoritmo genético foi utilizada uma taxa de cruzamento de 50%, taxa de mutação de 16,67%, já outras informações como tamanho da população e quantidade de gerações utilizadas não foram fornecidas.

Além da reconfiguração de redes utilizando algoritmos genéticos visando diminuição de perdas em energia ativa, os algoritmos evolutivos também são utilizados em outras aplicações. A aplicação no planejamento de expansão de redes é demonstrado em KILYENI et al. (2014) e LIU (2021), assim como a aplicação para redução de energia reativa é apresentado em ZHANG; HUANG; ZHANG (2005). A utilização em sistemas de otimização multicritério pode ser vista em KOUZOU; MOHAMMEDI (2015) que leva em conta o perfil de tensão além das perdas.

É destacado em FATIMA; BUTT; LI (2023) a possibilidade de atender diferentes grupos de consumidores através de alimentadores diferentes para atender os critérios desejados como por exemplo a operação mais econômica do sistema, ou melhor distribuição de potência. Em LI et al. (2023) a quantidade de árvores geradoras é apresentada como métrica para a quantidade de reconfigurabilidade de uma rede modelada por grafos.

Com a pesquisa realizada pode-se dizer que o atual estado da arte está dividido em duas partes, a otimização de redes elétricas utilizando algoritmos evolutivos e também na otimização multicritério utilizando algoritmos evolutivos, que leva em conta mais de um critério. Em LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) é apresentado um método de otimização baseado em algoritmos genéticos que mantém a viabilidade das configurações propostas garantido que as soluções propostas sejam calculadas somente para os casos onde a rede mantém as suas características de radialidade, reduzindo assim o custo computacional da otimização. Já em SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019) é proposta a otimização multicritério utilizando algoritmos genéticos para reduzir as perdas de energia ativa com o menor custo, utilizando a eficiência de Pareto para encontrar uma solução que atenda os dois critérios. Estes trabalhos são melhor discutidos na seção 3.2.

3.2 Reconfiguração e otimização de redes elétricas utilizando algoritmos genéticos

Nesta seção os principais trabalhos que definem o atual estado da arte em reconfiguração de redes elétricas utilizando algoritmos genéticos, e otimização multicritério são melhor detalhados. Estes trabalhos foram escolhidos pela sua aderência ao tema de pesquisa, suas recentes datas de publicação, e principais contribuições em comparação com demais artigos pesquisados.

3.2.1 Distribution network reconfiguration using feasibility-preserving evolutionary optimization

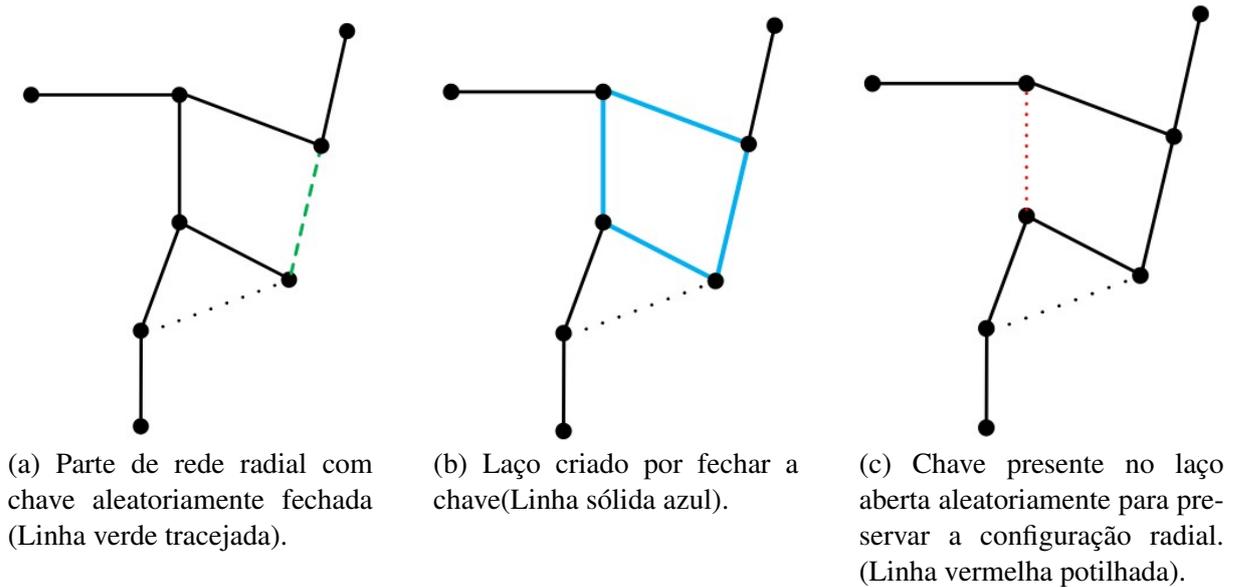
Em LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) os autores identificam que a reconfiguração de redes elétricas é um problema de complexidade elevada devido a combinações

não lineares dos estados dos elemento manobráveis e que a solução deste tipo de problema demanda um custo computacional elevado. Com o intuito de reduzir o custo computacional na proposta de reconfiguração para redução de perdas de energia ativa, os autores apresentam uma proposta de algoritmo evolutivo modificado que mantém as características radiais da rede elétrica, evitando soluções não viáveis e consequentemente reduzindo o espaço de busca e o custo computacional necessário para realizar a otimização. Para a etapa de cálculo de fluxo de potência, os autores utilizaram o software OpenDSS, assim como foi realizado em PEGADO; RODRIGUEZ (2018), através da integração com o software Matlab. Para validar o método proposto, os autores realizaram a comparação com trabalhos que definiam o estado da arte no momento da publicação, realizando testes com as redes de teste IEEE de 33, 69 e 119 barras e comparando com os resultados obtidos por trabalhos que utilizam busca cuco (CSA, do inglês *Cuckoo Search Algorithm*), Algoritmo dos Fogos de Artifício (FWA, do inglês *Fireworks Algorithm*), algoritmos genéticos, algoritmos genéticos refinados, busca tabu melhorada, algoritmo de busca harmônica, colônia de formigas e algoritmo adaptativo imperialista competitivo melhorado (IAICA, do inglês *improved adaptive imperialist competitive algorithm*). Todos estes trabalhos tinham o mesmo objetivo de reduzir as perdas de energia ativa, o que possibilitou a comparação quantitativa dos resultados, sendo que foi utilizado somente o resultado da redução das perdas e a quantidade de iterações, não sendo levado em conta o tempo de execução de cada implementação. Além de apresentar estes resultados, os autores ainda apresentam a comparação do perfil de tensão para cada uma das redes analisadas antes e depois da otimização.

A principal contribuição do trabalho de LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) está na modificação da etapa de reprodução do algoritmo genético, onde é inserida uma etapa para remover caminhos fechados da topologia da rede proposta, o que mantém a radialidade do sistema e evita que o cálculo do fluxo de potência seja realizado para uma configuração que não seja viável, reduzindo assim o custo computacional. O processo é mais bem apresentado na Figura 11, onde um trecho da rede tem a sugestão de fechar uma chave demonstrada pela linha verde tracejada no item a, o que leva a um caminho fechado apresentado pelas linhas em azul no item b. O método propõe que uma das chaves que compõem este ciclo fechado seja aleatoriamente escolhida e aberta, o que preserva as características de radialidade da rede.

Ao comparar os resultados com os demais trabalhos pesquisados, LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) comprovam que o método consegue obter os resultados considerados ótimos com 500 gerações para a rede de 33 barras, 1000 épocas para a rede de 69 barras e 5000 épocas para a rede de 119 barras. O que comprova que o algoritmo consegue realizar a otimização proposta, no entanto não foi apresentada a comparação com o algoritmo genético sem a etapa de modificação proposta, o que comprovaria a redução do espaço de busca. Não é possível determinar de forma geral qual é a redução do espaço de busca que pode ser obtida com a aplicação da técnica proposta pois cada rede possui uma topologia diferente, mas é claramente perceptível que o foi evitado calcular o fluxo de potência para casos de implementação inviável. Como trabalhos futuros, os autores propõem expandir o estudo para a otimização multi-objetivo

Figura 11: Modificação para preservar radialidade da rede.



Fonte: Traduzido de LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019).

onde mais de um parâmetro é otimizado ao mesmo tempo, o que é realizado por SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019) que é detalhado na subseção a seguir.

3.2.2 Multi-objective distribution network reconfiguration optimization problem

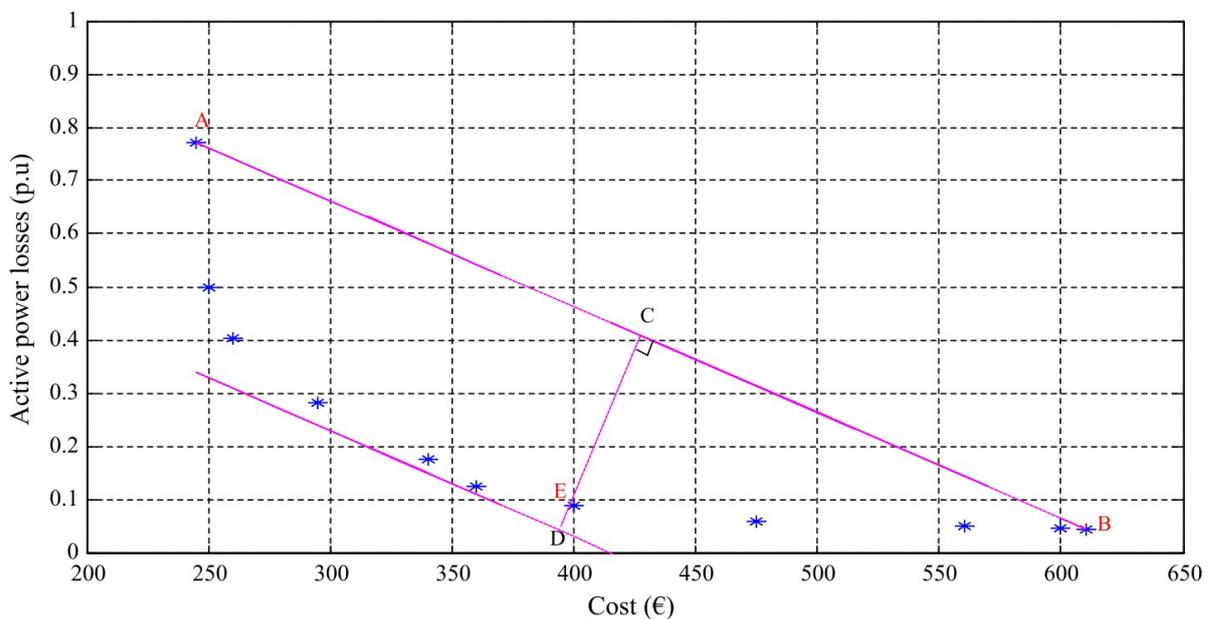
Em SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019), os autores identificam que na grande maioria dos casos de otimização de redes elétricas por reconfiguração o principal objetivo é a busca pela redução das perdas de energia ativa. No entanto, outros assuntos como balanceamento de carga, melhoras na confiabilidade e estabilidade de níveis de tensão também tem recebido bastante atenção nas pesquisas mais recentes. Os autores propõem uma solução para reduzir as perdas de energia ativa mantendo o menor custo de operação possível, mantendo restrições como radialidade da rede e estabilidade de tensão. Para isto, foram realizadas implementações do algoritmo genético com modificações para manter radialidade e estabilidade de tensão, que descarta as gerações que não atendem as restrições impostas. Tendo implementado os otimizadores para cada um dos critérios, os autores reduziram o problema multicritério a um problema monocritério ao realizar uma combinação linear das funções objetivos, descrita pela Equação 3.1 onde ϵ_1 representa um peso atribuído a função objetivo do primeiro critério (f_{obj1}), assim como ϵ_2 é o peso atribuído a função objetivo do segundo critério (f_{obj2}), resultando em uma única função objetivo multicritério f_{mult} . Os valores de cada um dos pesos podem ser escolhidos aleatoriamente desde que respeitem a restrição da Equação 3.2. Caso estes pesos sejam diferentes, um critério receberá maior importância na avaliação geral.

$$f_{mult} = \epsilon_1 \times f_{obj1} + \epsilon_2 \times f_{obj2} \quad (3.1)$$

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 = 1 \quad (3.2)$$

Além da proposta do método de otimização, SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019) apresentam um novo método para avaliação do fluxo de potência, embora não tenham comparado os resultados com outros métodos convencionais. Para a comprovação do funcionamento do sistema de otimização, os autores realizaram testes com a rede IEEE de 10 barras em diferentes estudos de caso, onde o primeiro prioriza os custos de investimento, o segundo prioriza a redução de perdas de energia ativa e o último busca um equilíbrio entre os dois critérios. Os pontos obtidos nas simulações são apresentados na Figura 12 pelos asteriscos azuis.

Figura 12: Otimização de Pareto.

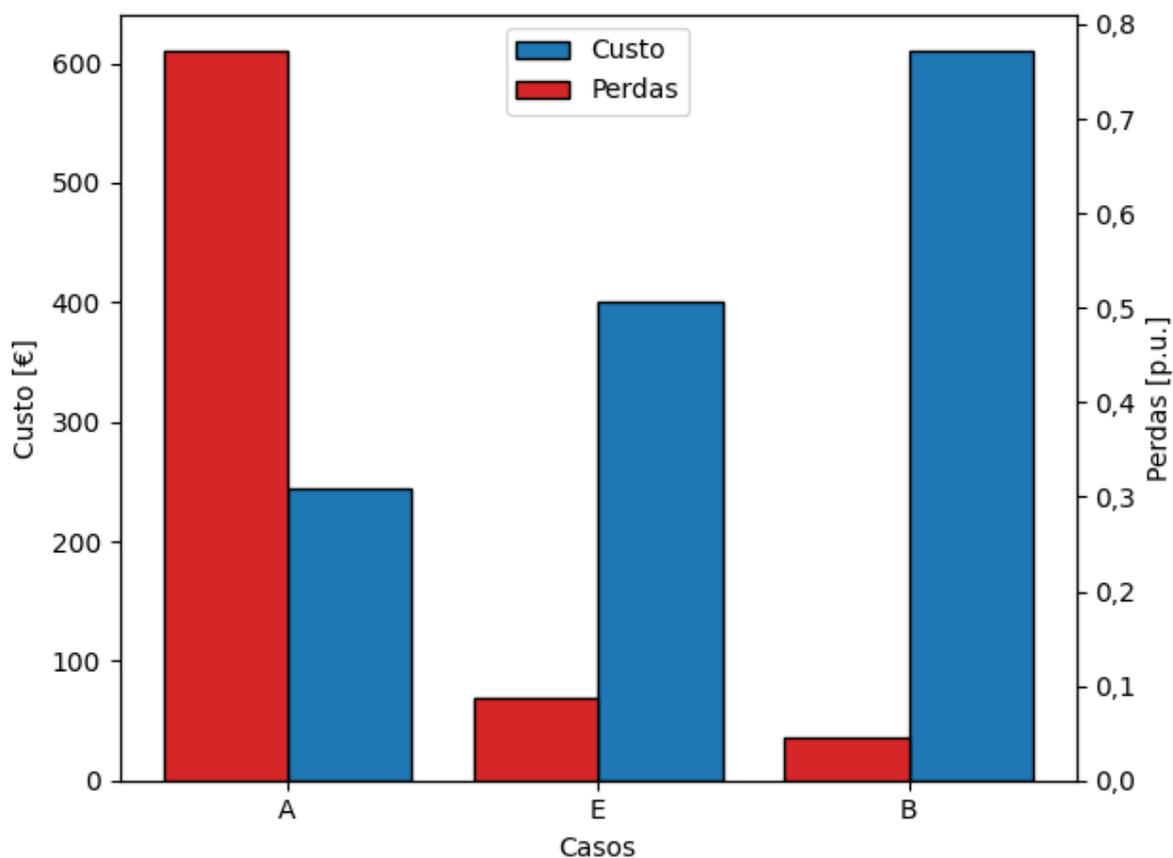


Fonte: SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019).

Para o primeiro estudo de caso, os custos de investimento e operação possuem um peso maior do que a redução das perdas. Este resultado está identificado pelo ponto A na Figura 12, onde o custo de operação foi de 245 euros com as perdas em 0,7714 p.u. (Por unidade). Já no segundo caso, onde a prioridade da otimização foi o critério da redução das perdas de energia ativa, o resultado é indicado pelo ponto B na Figura 12 com um custo de investimento de 610 euros e perdas de 0,0445 p.u. No ultimo estudo de caso foi buscado um equilíbrio entre os dois critérios, para isto, foi traçada uma linha que liga os dois pontos extremos da fronteira de Pareto, que são os pontos A e B identificados nos casos anteriores. A partir do centro desta linha foi traçada uma reta bissetriz a primeira, ligando os pontos C e D. O ponto E é o mais próximo desta reta, e é a solução que possui o compromisso mais equilibrado entre os objetivos da otimização, resultando em um custo de 400 euros com perdas de 0,0873 p.u. Os resultados dos estudos de caso realizados pelos autores é apresentado na Figura 13, onde as colunas em

vermelho representam as perdas de energia ativa e as colunas em azul representam o custo em euros.

Figura 13: Resultados dos estudos de caso de SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019).



Fonte: O autor.

Com os resultados dos estudos de caso apresentados por SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019), é possível confirmar que um problema de otimização multicritério pode ser reduzido a um problema monocritério a partir da combinação linear das funções objetivo e do uso do princípio da eficiência de Pareto. Sendo que este método ainda permite atribuir pesos diferentes para cada critério e adicionar outros critérios, de forma que possa ser realizada a priorização dos critérios de acordo com o seu impacto no objetivo final. Como trabalhos futuros, os autores propõem a implementação do sistema de otimização apresentado a uma rede elétrica real, visto que a validação foi realizada com um sistema com apenas 10 barras.

Esta revisão permitiu identificar os pontos mais relevantes na área de pesquisa sobre otimização de redes elétricas por reconfiguração, destacando as abordagens e métodos utilizados, assim como o presente estado da arte. Estas informações estão compiladas na seção a seguir.

3.3 Análise crítica dos trabalhos relacionados

A pesquisa pelos trabalhos relacionados buscou identificar na literatura o atual estado da pesquisa na área de otimização de redes elétricas por reconfiguração, assim como as técnicas e métodos utilizados. A seguir são comentados o atual estado da arte e os pontos que carecem de pesquisa, a partir dos quais o trabalho realizado nesta tese pretende contribuir com o avanço do estado da arte.

Todos os trabalhos pesquisados apresentaram a otimização de redes elétricas por reconfiguração, utilizando algoritmos evolutivos visando a redução das perdas de energia ativa. Entre as técnicas de algoritmos evolutivos utilizadas, destacam-se as modificações do algoritmo genético apresentadas nos trabalhos de LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) e SOUIFI; KAHOU LI; Hadj Abdallah (2019). O uso do software OpenDSS como ferramenta para cálculo do fluxo de potência é explorado por PEGADO; RODRIGUEZ (2018) e LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019), no qual a comunicação com o software é realizada através de interface via Matlab. A aplicação da análise multicritério para otimização baseada em algoritmos genéticos é apresentada por SOUIFI; KAHOU LI; Hadj Abdallah (2019). A necessidade de considerar reconfigurações com suporte a múltiplos alimentadores é apresentada em FATIMA; BUTT; LI (2023). Assim como a métrica para avaliar a quantidade de soluções possíveis, a partir de uma modelagem em forma de grafos é apresentada por LI et al. (2023). As contribuições dos trabalhos estão resumidas na Tabela 1, onde é apresentada a lista de trabalhos estudados ordenados pelo ano de publicação, com a sua principal contribuição para esta tese.

O atual estado da arte contempla a otimização de redes elétricas por reconfiguração utilizando versões modificadas do algoritmo genético que reduzem o custo computacional da análise ao descartar as opções que não preservam as características da radialidade da rede. Esta otimização pode ser realizada considerando tanto um único critério quanto múltiplos critérios combinados através de combinação linear. Os principais trabalhos realizaram testes apenas com redes de teste com poucas barras, carecendo ainda de testes com redes maiores e com diferentes características como redes urbanas, rurais e mistas. Destaca-se também a necessidade de suportar a reconfiguração suportando múltiplos alimentadores, mantendo a radialidade, como apresentado em FATIMA; BUTT; LI (2023). Como comentado em PEREIRA; BARBOSA; VASCONCELOS (2023), as métricas de comparação entre algoritmos de otimização para a rede elétrica devem ser vistas com cuidado para não tender a algo que dependa do hardware utilizado, sugerindo a comparação da quantidade de cálculos de fluxo de potência necessários.

Na pesquisa realizada, não foram encontrados trabalhos que visam a redução dos indicadores coletivos de continuidade durante a execução de obras, concedendo a característica do ineditismo desta tese e contribuição para o estado da arte. As redes elétricas são modeladas através de grafos e diferentes algoritmos evolutivos são utilizados para a otimização dos parâmetros de qualidade de energia. Para a obtenção destes parâmetros elétricos, o cálculo de fluxo de potência é utilizado, podendo ser implementado dentro do otimizador ou sendo calculado

Tabela 1: Contribuição dos trabalhos.

Trabalho	Contribuição
<ul style="list-style-type: none"> • REDDY; REDDY (2016) • FANG; ZHANG (2016) • Van Der Mei; DOOMERNIK (2017) • PEGADO; RODRIGUEZ (2018) • BABU; PASUNURU; VAISHNAVI (2018) • LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) • SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019) • PEREIRA; BARBOSA; VASCONCELOS (2023) • EL-MAKSOUUD; AHMED; HASAN (2023) • WU et al. (2023) 	<p>Uso de algoritmos evolutivos para reconfiguração da rede elétrica.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • BABU; PASUNURU; VAISHNAVI (2018) • LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) • SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019) • EL-MAKSOUUD; AHMED; HASAN (2023) 	<p>Utilização de grafos para modelagem da rede elétrica.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) • SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019) 	<p>Modificação do algoritmo genético para preservar radialidade e reduzir custo computacional.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • PEGADO; RODRIGUEZ (2018) • LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) 	<p>Uso do software OpenDSS para cálculo do fluxo de potência.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • FATIMA; BUTT; LI (2023) 	<p>Reconfiguração com múltiplos alimentadores.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • LI et al. (2023) 	<p>Métrica para quantidade de soluções possíveis</p>

Fonte: Elaborada pelo autor.

por ferramenta externa. Para soluções reais é necessário que o algoritmo permita a reconfiguração considerando múltiplos alimentadores, de forma que em uma situação de intervenção um trecho possa ser temporariamente atendido por outro alimentador. Isto demanda a verificação das características de radialidade da rede elétrica, que pode ser realizada através dos grafos. Apesar das meta-heurísticas com a correta parametrização conseguirem resolver problemas de reconfiguração, o espaço de busca ainda é bastante grande e cresce exponencialmente com a quantidade de elementos manobráveis como chaves. Com isto, a redução e simplificação do modelo, assim como a análise topológica para calcular os parâmetros elétricos somente para as configurações viáveis, trazem grandes possibilidades de ganho de performance para os algoritmos de reconfiguração.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base na pesquisa realizada, este capítulo apresenta a metodologia utilizada nesta tese, assim como os materiais necessários para a sua implementação e validação. Inicialmente é apresentada a metodologia de modelagem das redes elétricas em grafos, seguida da técnica de simplificação de redes que visa reduzir a complexidade e o custo computacional envolvido na otimização. As técnicas de otimização utilizando algoritmos genéticos também são abordadas, incluindo a otimização multicritério. Ao final são apresentadas as métricas para avaliação dos resultados obtidos nos estudos de caso. As etapas foram separadas conforme as suas contribuições para o estado da arte, onde destaca-se a simplificação das redes modeladas em grafos e a proposta de modificação na implementação do algoritmo genético.

4.1 Modelagem

As redes elétricas podem ser modeladas através de grafos, conforme foi realizado nos trabalhos de BABU; PASUNURU; VAISHNAVI (2018), LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) e SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019). Para isto é necessário estabelecer o que são os vértices o que são as arestas destes grafos, assim como quais informações serão utilizadas como pesos. Esta seção apresenta uma proposta de modelagem que realiza a conversão de uma rede elétrica modelada em OpenDSS em um grafo.

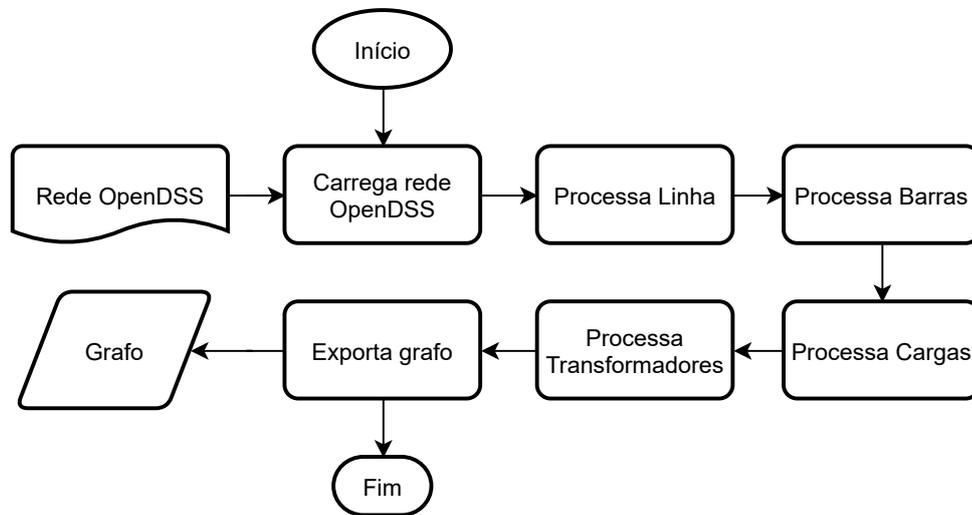
A seguir é descrito em detalhes o processo desenvolvido nesta tese. O processo de modelagem em grafos recebe como entrada uma rede em OpenDSS (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (2020)) e tem como saída um modelo de grafo implementado na biblioteca NetworkX (HAGBERG; SCHULT; SWART (2008)) na linguagem de programação python. As etapas de conversão são apresentadas na Figura 14, onde a etapa carrega redes OpenDSS utilizando a biblioteca OpenDSSDirect para realizar a importação do modelo da rede diretamente do arquivo de texto da rede, sem a necessidade de ter o software OpenDSS instalado.

A partir da Figura 14 podem ser observados os detalhes do processo. Na etapa "Processa Linha", o programa itera sobre todos objetos do tipo Line. Estes objetos podem representar um trecho de rede ou os elementos manobráveis, sendo estes distinguidos pelo parâmetro IsSwitch. Estes elementos são armazenados em listas que serão utilizadas para gerar as arestas do grafo.

Na etapa "Processa Barras", o programa itera sobre todos os objetos do tipo Bus, uma vez que o OpenDSS utiliza barras para interligar os elementos. Neste processo são armazenadas informações como nome, coordenadas geográficas, quantidade de consumidores, potência ativa e potência reativa. Estes dados das barras serão utilizados para gerar os vértices do grafo. Na etapa "Processa Cargas" é realizada a iteração sobre todas as cargas, agregando as informações de potência ativa e reativa e quantidade de consumidores na barra a qual esta carga está conectada, agrupando assim os consumidores da rede secundária de distribuição. Por fim, na etapa "Processa Transformadores", estes são convertidos em arestas do grafo. Com todas estas

informações o grafo é construído e pode então ser manipulado.

Figura 14: Processo de conversão de rede OpenDSS para grafo.



Fonte: O autor.

O grafo resultante da conversão possui as barras com as informações das suas cargas agrupadas como vértices e os demais elementos representados como arestas, sendo que estes seriam transformadores, trechos de rede, ou elementos manobráveis. Com este grafo já é possível realizar alterações na rede, tais como comutar determinadas chaves e verificar as alterações na topologia da rede calculando a partir disso quantos consumidores foram desconectados com esta modificação, bem como qual é a potência ativa e reativa que deixou de ser demandada.

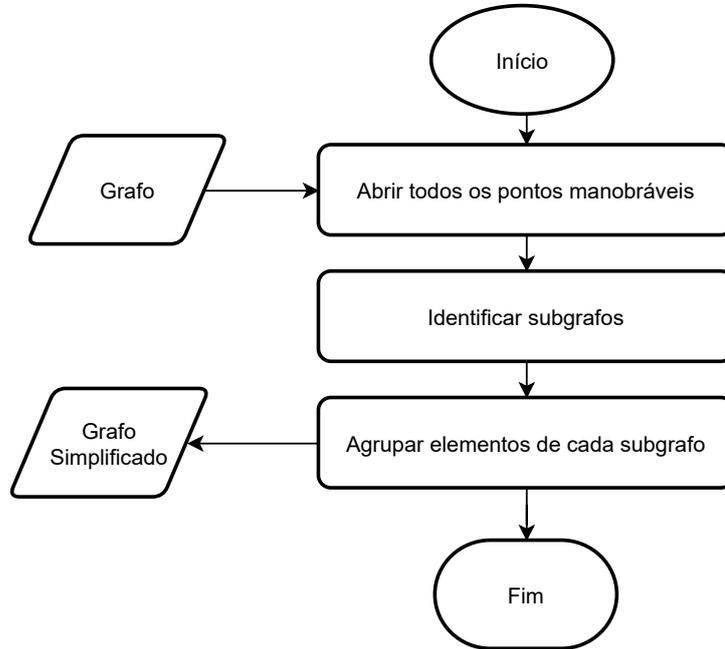
Como o modelo realizado no OpenDSS possui uma grande quantidade de detalhes da rede, este pode possuir dezenas de milhares de linhas e barras, o que aumenta o tempo de análise da rede. Este contexto gera um problema para o uso de algoritmos de otimização, tendo em vista que este grande número de elementos eleva o custo computacional necessário para sua execução. Para resolver este problema é proposto um algoritmo para a simplificação da rede.

4.2 Simplificação da topologia da rede

Para reduzir o tempo de processamento na análise da topologia da rede, se fez necessária a implementação de um algoritmo para a simplificação do grafo que a representa. Para encaminhar esta etapa, deve ser destacado que a topologia da rede só é alterada quando algum elemento manobrável tem seu estado modificado. Portanto, todos elementos de rede não manobráveis que se encontram entre dois elementos manobráveis podem ser agrupados. As etapas do processo de simplificação são apresentadas na Figura 15. Estas etapas foram definidas de forma a serem implementadas em um processo de iteração, tendo como ponto de parada a análise do conjunto total de elementos que compõe a rede elétrica representada pelo grafo. A partir da observação de interesse de análise considerando os pontos contendo elementos manobráveis e

os subconjuntos de elementos não manobráveis entre eles.

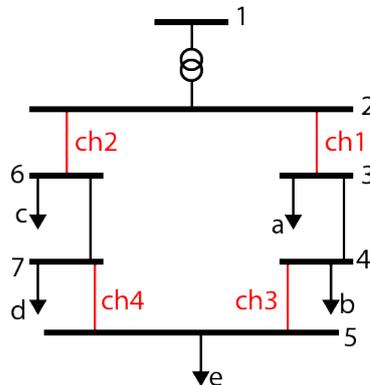
Figura 15: Fluxograma de simplificação do grafo.



Fonte: O autor.

Para demonstração do processo efetuado pelo algoritmo, a rede elétrica apresentada na Figura 16 será utilizada como exemplo. Nesta rede existem 7 barras identificadas por números, 5 cargas identificadas por letras e oito linhas interligando os elementos e as barras, das quais 4 são elementos manobráveis identificados pelo prefixo ch e destacadas em vermelho.

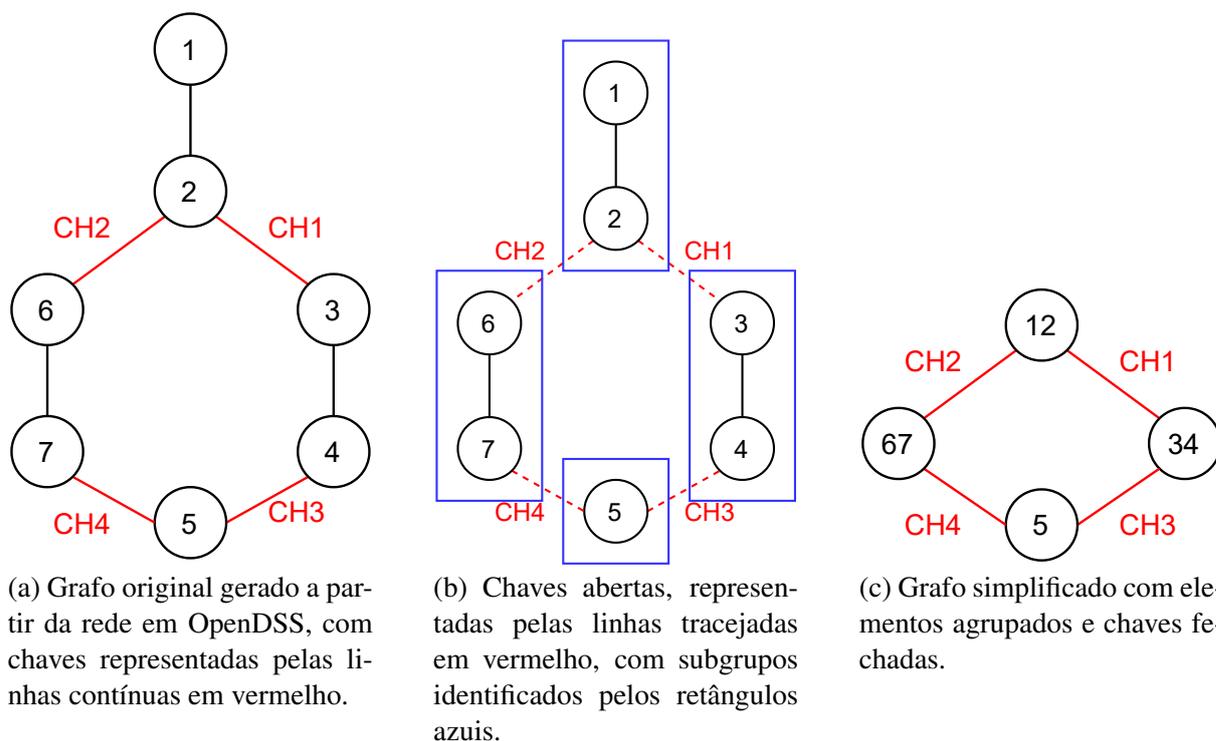
Figura 16: Rede teste para exemplo de simplificação.



Fonte: O autor.

O algoritmo recebe o grafo com as arestas que representam os elementos manobráveis identificadas como chaves, que para a rede de exemplo é demonstrado na Figura 17a onde os círculos representam as barras, as linhas pretas contínuas representam os trechos de rede não manobráveis.

Figura 17: Simplificação do grafo.



Fonte: O autor.

veis e as linhas em contínuas em vermelho representam os elementos manobráveis. Na primeira etapa do processo de simplificação todos os elementos manobráveis, neste exemplo chamados de chaves, são abertos formando subgrafos. As chaves abertas são representadas pelas linhas vermelhas tracejadas na Figura 17b, assim como os subgrafos são destacados pelos retângulos azuis. Para cada subgrafo identificado, os dados de cada vértice, como quantidade de consumidores conectados e potências ativa e reativa são agrupados em um único vértice em um novo grafo. Também são armazenados os nomes dos elementos manobráveis que são conectados a todos os elementos destes subgrafos, para que as arestas do grafo simplificado conectem aos elementos corretos. O grafo simplificado é apresentado na Figura 17c, onde os novos vértices tem o nome composto pela concatenação dos nomes dos vértices agrupados, como por exemplo o vértice 12 é o resultado do agrupamento dos vértices 1 e 2. O vértice 5 não é agrupado pois não havia nenhum outro vértice no seu subgrupo.

Neste exemplo a rede original com 7 vértices e 7 arestas foi reduzida a uma rede com 4 vértices e 4 arestas, tendo uma redução de 42,85% na quantidade de vértices e arestas. Como cada rede possui as suas próprias características de topologia, não é possível determinar o percentual de redução de elementos que ocorrerá desta simplificação, apenas que o grafo resultante terá a mesma quantidade de vértices e arestas que a quantidade de elementos manobráveis presentes na rede. Com esta redução a avaliação das diferentes configurações da rede pode ser executada com menor custo computacional, uma vez que a quantidade de elementos que devem ser iterados pode reduzir significativamente. Com esta simplificação do grafo, o algoritmo de

otimização, detalhado a seguir, pode ser aplicado.

4.3 Otimização utilizando algoritmos genéticos

Conforme revisão apresentada no capítulo 3 o atual estado da arte na otimização de redes elétricas por reconfiguração utiliza algoritmos genéticos com modificações para encontrar as configurações que melhor atendem uma determinada função objetivo. No entanto a maioria dos estudos nesta área visam a redução das perdas de potência ativa, enquanto o objetivo desta tese é reduzir os indicadores coletivos de continuidade. Com isto uma das principais mudanças na implementação do algoritmo genético consiste em não precisar executar o cálculo de fluxo de potência para cada geração.

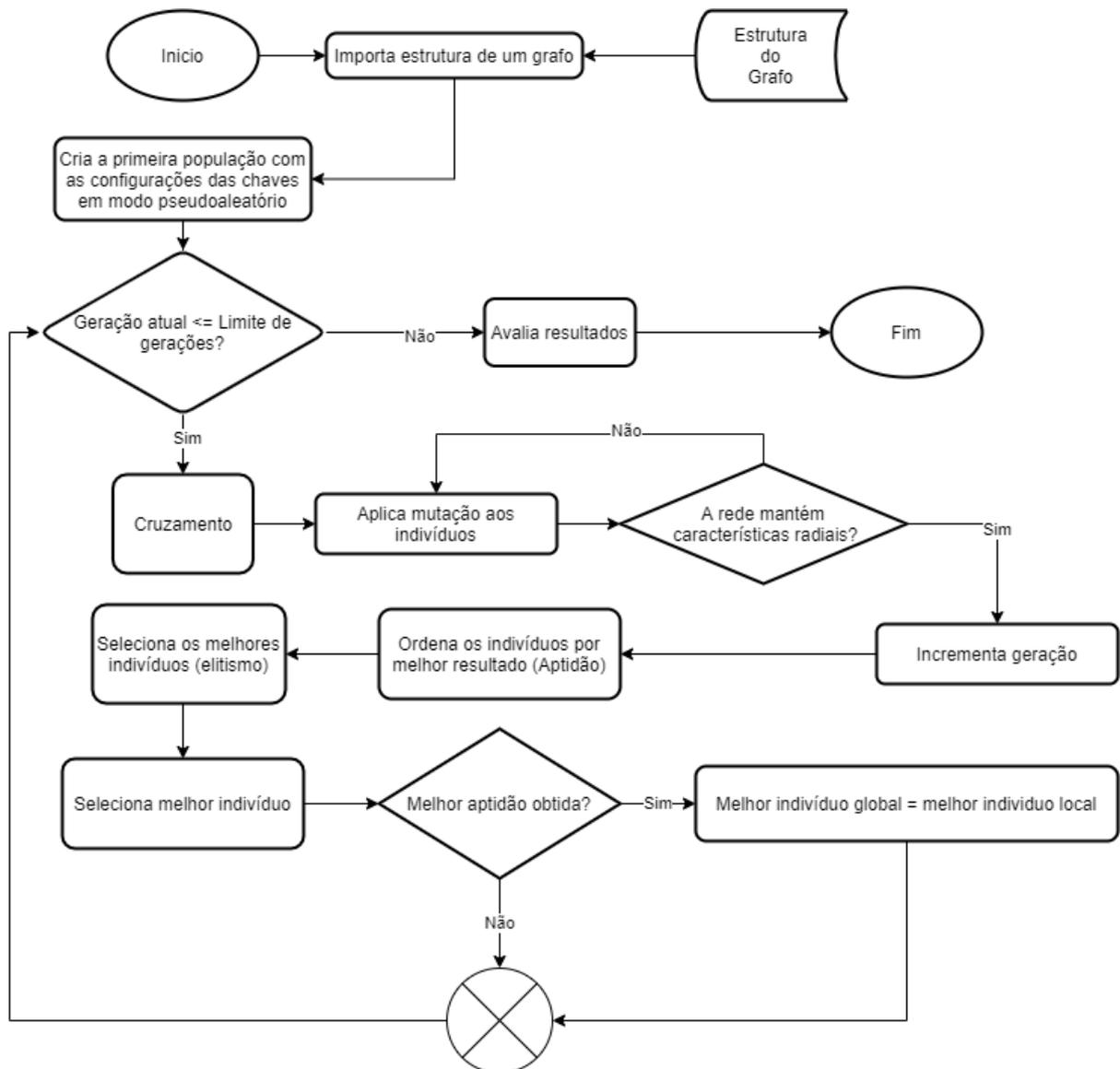
Conforme identificado na pesquisa realizada, o atual estado da arte em otimização de redes elétricas por reconfiguração avalia principalmente os parâmetros elétricos da rede visando a minimização das perdas técnicas e a manutenção do nível de tensão, não avaliando o impacto nos indicadores de continuidade.

Para atender o objetivo da otimização pretendida, a função objetivo visa minimizar a quantidade de consumidores desconectados e conseqüentemente otimizar os indicadores de continuidade no caso de necessidade de realização de obras em que interrupções do fornecimento de energia elétrica sejam necessárias. Para isto a etapa de avaliação da aptidão dos indivíduos foi customizada para retornar a quantidade de consumidores desconectados. Com a configuração dos elementos manobráveis aplicada ao grafo, são identificados os subgrafos, tal como realizado na etapa de simplificação do grafo. Destes subgrafos são identificados quais possuem algum vértice que atua como fonte, representando uma subestação. Todos os subgrafos que não possuírem conexão com as fontes, tem os parâmetros dos seus vértices somados, retornando, além de outros dados, a quantidade total de consumidores desconectados. Esta função de avaliação de aptidão é utilizada no algoritmo genético modificado que tem o seu fluxo apresentado na Figura 18.

O algoritmo recebe como entrada um grafo simplificado e gera uma primeira população com as configurações dos elementos manobráveis de forma randômica, atribuindo os estados aberto ou fechado para os elementos manobráveis. Em seguida o algoritmo entra em um laço de repetição que será executado até que o critério de parada seja atingido, que neste caso é a quantidade de gerações. A primeira etapa dentro do laço de repetição é a etapa de cruzamento, que vai gerar uma nova geração de indivíduos, os quais vão sofrer mutações de acordo com a taxa de mutação definida como parâmetro.

Caso algum ciclo fechado seja encontrado na configuração proposta, é forçada a aplicação da mutação até que a solução seja radial, ou um limite de tentativas seja excedido. Após a mutação o contador de gerações é incrementado e os novos indivíduos são ordenados pela avaliação da função de avaliação de aptidão. Destes indivíduos ordenados, uma quantidade determinada por parâmetros, dos melhores indivíduos é selecionada para que estes indivíduos façam parte da

Figura 18: Fluxograma do algoritmo genético modificado.



Fonte: O autor.

etapa de cruzamento na próxima geração. Caso o melhor indivíduo gerado nesta geração tenha o melhor resultado global, a configuração proposta é armazenada como melhor solução global. Após encerrar o laço de repetição, o algoritmo terá uma lista com os melhores resultados globais, sendo que dependendo da função objetivo, podem existir diversos resultados que sejam considerados ótimos. Como por exemplo diversas configurações onde todos os consumidores estejam conectados. Para determinar qual destes resultados é o mais viável, uma seleção das melhores configurações passa por um processo de avaliação do fluxo de potência, para verificar se é viável realizar a manobra, garantindo que o nível de tensão vai se manter adequado para todos os elementos da rede. Esta verificação é realizada através da biblioteca OpenDSSDirect, passando a o estado desejado das chaves e avaliando o nível de tensão em todas as barras.

Um dos principais diferenciais desta implementação é que o cálculo do fluxo de potência, que possui um elevado custo computacional, só é realizado após passar por todas as gerações, sendo executado somente para um determinado conjunto de soluções que atendam um critério mínimo, como por exemplo os 10 melhores resultados, o que reduz de forma significativa a quantidade de execuções necessárias e conseqüentemente o tempo despendido para o processo de otimização como um todo. Mesmo após a otimização visando a diminuição da quantidade de consumidores desconectados e avaliando se a solução é eletricamente viável através da análise do fluxo de potência, mais de uma solução pode ser considerada ótima, logo, para determinar qual será a melhor solução geral, mais uma dimensão de otimização deve ser incluída, conforme foi realizado em SOUFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019). Algumas das possibilidades de otimização multicritério para este problema são abordadas na subseção a seguir.

4.3.1 Otimização multicritério

A otimização visando a minimização da quantidade de consumidores desconectados pode fornecer diversas configurações viáveis, tanto em quantidade de consumidores quanto em seus parâmetros elétricos. Para escolher a configuração mais viável alguns outros parâmetros podem ser levados em conta, fazendo-se necessária a otimização multicritério. Os parâmetros elétricos, como nível de tensão e sobrecarga de condutores devem obrigatoriamente ser atendidos para que a configuração seja considerada viável de implementação, e podem ser verificados através da análise de fluxo de potência realizada no OpenDSS.

Como demais parâmetros a serem considerados, devem ser citados o tempo e custo financeiro das manobras. Cada tipo de equipamento manobrável possui características diferentes. Por exemplo, chaves manuais necessitam do deslocamento de uma equipe até o local, que pode não ser de fácil acesso, resultando em um custo operacional elevado. Já uma chave telecommandada necessita apenas de um comando remoto para a comutação do seu estado, sem a necessidade do deslocamento de uma equipe até o local.

Como a etapa do algoritmo genético selecionou as configurações que podem ser mais viáveis em questão de consumidores desconectados, os demais critérios não necessitam necessariamente de um algoritmo de otimização para serem aplicados, pois basta aplicar a função objetivo do critério desejado para cada uma das melhores soluções fornecidas pelo algoritmo genético. Com isto, utilizando a eficiência de Pareto é possível determinar qual é a solução mais equilibrada para todos os critérios envolvidos.

4.4 Proposta de novas conexões

Com o intuito de tornar a rede mais manobrável, a ferramenta, além de propor configurações, também indica trechos de rede que seriam bons candidatos para instalação de novos elementos manobráveis. A adição de uma nova chave na rede dobra a quantidade de possibilidades de

configurações possíveis. Para isto foi elaborado um algoritmo que busca o local que pode ter mais impacto na rede com a instalação de um equipamento manobrável.

O método aqui apresentado difere da ideia apresentada em LI et al. (2023), pois utiliza um trecho de rede já existente, que em uma situação prática seria mais viável de ser implementado. A proposta de LI et al. (2023) é válida, no entanto deve-se cuidar com a viabilidade de inserir um novo trecho de rede, algo que na prática deve levar em conta principalmente características geográficas e custos da expansão de rede.

O algoritmo proposto nesta tese utiliza inicialmente a rede simplificada e sobre esta atribui um peso para cada vértice, cujo valor representa o agrupamento das informações de cada grupo de consumidores entre chaves. Este peso utiliza como base a centralidade de intermediação, a potência ativa e a quantidade de consumidores, sendo os valores de potência e quantidade de consumidores normalizados para uma melhor comparação. A função de ranqueamento é dada pela Equação 4.1 onde existem k vértices, Pw_v representa a potência ativa do vértice, $Cust_v$ a quantidade de consumidores do vértice, e o ultimo elemento da soma é a centralidade de intermediação.

$$r(v) = \frac{Pw_v}{\sum_{i=0}^k Pw_k} + \frac{Cust_v}{\sum_{i=0}^k Cust_k} + \sum_{s,t \in V} \frac{\sigma(s, t|v)}{\sigma(s, t)} \quad (4.1)$$

Com a lista de vértices ranqueados, o algoritmo seleciona o subgrafo que possui o maior ranqueamento, ou seja, a maior relevância para possíveis manobras na rede. A próxima etapa do algoritmo utiliza o subgrafo da rede original, composto pelos vértices que formam o agrupamento selecionado. Deste subgrafo é executado o algoritmo que itera sobre cada trecho deste subgrafo, procurando o trecho que no caso de ser removido vai formar dois subgrafos com a menor diferença de consumidores e potência ativa. Para isto, em cada iteração o subgrafo original tem um trecho removido e é calculada a diferença entre a soma da quantidade de consumidores normalizada e potência ativa normalizada de cada um dos dois novos subgrafos. O trecho que retornar a menor diferença, é o trecho candidato a receber a nova chave.

Para uma melhor visualização do procedimento deste algoritmo, será utilizada a rede apresentada na Figura 16, que tem o seu grafo simplificado apresentado na Figura 17c. Os valores de quantidade de consumidores e potência ativa para cada carga é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Configurações da rede de exemplo.

Carga	Quantidade de consumidores	Potência ativa [kW]
a	3	35
b	4	50
c	1	20
d	8	90
e	6	75

Como demonstrado na Figura 17, as barras 6 e 7 são agrupadas no novo vértice 67, assim como as barras 3 e 4 são agrupadas formando o vértice 34. Desta forma as quantidades de consumidores conectados e potência ativa por vértice são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Configurações da rede de exemplo simplificada.

Vértice	Quantidade de consumidores	Potência ativa [kW]
12	0	0
34	7	85
67	9	110
5	6	75

Aplicando a etapa de ranqueamento para cada um dos nós, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 4, onde o vértice 67 apresenta o maior valor, ou seja, é o vértice candidato a receber uma nova chave. Como só existe um trecho dentro do subgrafo composto pelos vértices 6 e 7 da rede original, a chave deve ser instalada neste trecho.

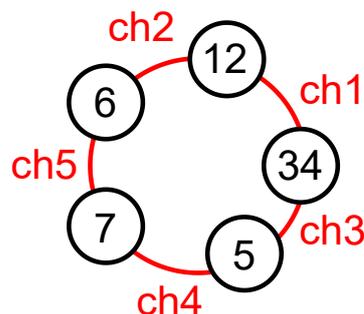
Tabela 4: Ranqueamento dos vértices da rede de exemplo simplificada.

Vértice	Rank
67	1.053
34	0.613
5	0.242
12	0.166

A nova chave, chamada de ch5 é inserida entre os vértices 6 e 7, conforme apresentado na Figura 19. Com a inserção desta nova chave é possível isolar as barras 6 e 7 individualmente e seus respectivos grupos de cargas, evitando assim o desligamento desnecessário do grupo de consumidores associados a outra barra.

O algoritmo pode ser repetido até que todos os grupos de cargas sejam separados por algum elemento manobrável, ou seja, se todos os elementos manobráveis forem abertos não deve haver conexão entre dois grupos de cargas associados a barras diferentes. No caso deste exemplo, ainda poderia ser executado mais uma vez, sugerindo a inserção de uma chave entre a barra 3 e a barra 4.

Figura 19: Grafo da rede de exemplo com a nova chave ch5.



Fonte: O autor.

4.5 Métricas de avaliação

Para avaliar os resultados com o que é proposto nesta tese, é importante que as métricas de avaliação sejam claramente definidas para cada etapa do desenvolvimento. São realizados três estudos de caso para contemplar redes elétricas com diferentes características, urbana, rural e mista. Garantido assim a variabilidade nas características das redes. Para cada estudo de caso, cada etapa é avaliada separadamente, iniciando com a simplificação da rede, com a qual é avaliada a quantidade de vértices, arestas e elementos manobráveis na rede original e as mesmas quantidades após a simplificação da rede, assim como o tempo necessário para a simplificação, o que permite verificar o potencial de redução no tamanho do grafo a ser analisado.

Para a etapa de otimização, são avaliadas as quantidades de configurações diferentes propostas, a quantidade de configurações que atendem os limites de nível de tensão e tempo de execução. A fim de verificar o desempenho da ferramenta, também é realizada uma comparação de propostas de manobras geradas pelo sistema e por um projetista experiente, comparando a quantidade de consumidores desconectados para cada caso. Esta comparação também é realizada em três redes elétricas com diferentes características. Outro estudo de caso é realizado com uma rede de distribuição real, para comparação com outros algoritmos de otimização. Neste estudo é avaliada a convergência do algoritmo, o tempo de execução assim como é feito nos principais trabalhos relacionados como LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019); SOUIFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019), além da quantidade de soluções propostas, fato que não é explorado nos trabalhos pesquisados.

Outro estudo de caso, utilizando a rede IEEE de 123 barras é realizado para demonstrar a aplicação da sugestão de novas conexões. O impacto da inserção da nova chave na quantidade de combinações viáveis é apresentado, assim como é feito em LI et al. (2023). Neste caso foi proposta uma situação de manutenção na rede e foi avaliada a redução na quantidade de potência ativa e consumidores desconectados antes e depois da inserção da nova chave.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados de cada estudo de caso, iniciando com um estudo de uma rede sintética para que as etapas do algoritmo genético possam ser acompanhadas visualmente. Em seguida é realizado o estudo de caso com três redes elétricas reais com diferentes características, seguido do estudo de comparação com projetista experiente, continuando com a comparação entre mais algoritmos de otimização binária. Também é apresentado um estudo de caso comparando o desempenho com o algoritmo genético que utiliza o fluxo de potência em sua função de aptidão. Em seguida é apresentado um estudo de caso para a demonstração da aplicação de multicritérios, continuando com a validação da proposta de alocação de chaves e finalizando com a análise dos resultados obtidos nestes estudos de caso.

5.1 Estudo de caso com rede sintética

Para validar os procedimentos realizados pelo algoritmo genético proposto, foi criada uma rede elétrica sintética, já representada em forma de um grafo simplificado, onde a sua estrutura é apresentada na Figura 20, onde os vértices, ou nós, são identificados por números e os elementos manobráveis são representados por letras. O nó 0 representa a subestação considerada como fonte, logo, se não houver algum caminho entre um determinado vértice e a fonte, os consumidores associados a este vértice são considerados desconectados. A quantidade de consumidores associados a cada vértice é apresentada na Tabela 5. Como parâmetros do algoritmo genético foi utilizada uma população com 30 indivíduos, elite com tamanho 2, taxa de mutação de 0,03 e 50 gerações.

Figura 20: Rede sintética para teste do sistema proposto.

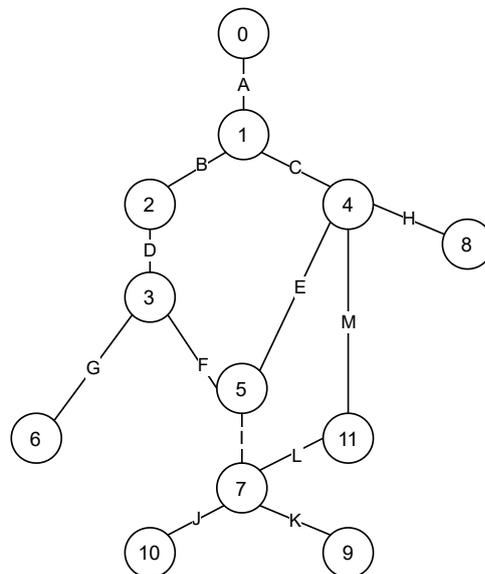
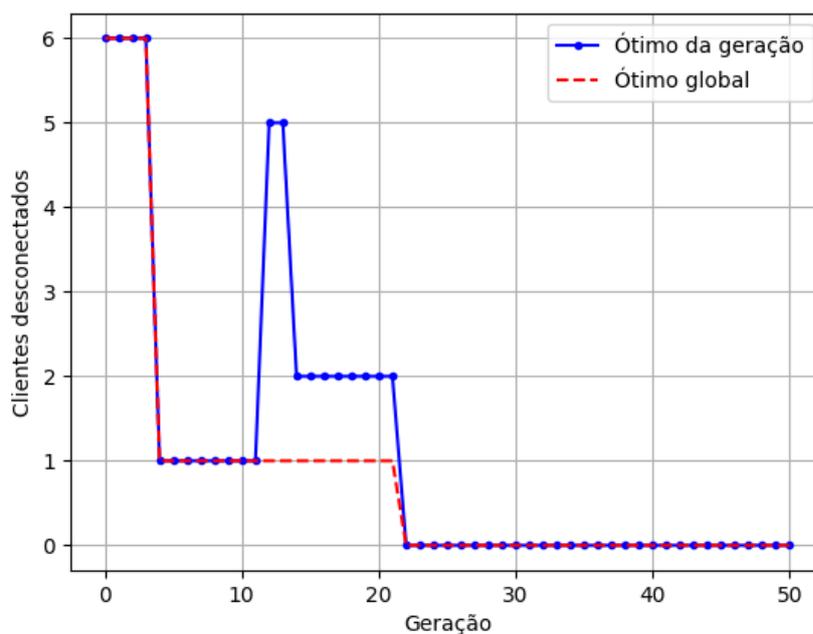


Tabela 5: Quantidade de consumidores conectados por nó.

Nó	Quantidade de consumidores conectados
0 (Fonte)	0
1	10
2	15
3	7
4	8
5	6
6	1
7	3
8	4
9	2
10	1
11	6

Ao executar o algoritmo genético proposto nesta rede sintética, foi gerado um total de 6 configurações diferentes consideradas como melhores resultados da geração, sendo que dois destes podem ser considerados como resultados ótimos, pois mantém todos os consumidores conectados. As curvas de aptidão podem ser vistas na Figura 21 onde a linha azul representa o ótimo de cada geração, e a linha vermelha representa o ótimo global. As configurações do estado propostos pelo algoritmo podem ser visualizadas na Figura 22.

Figura 21: Curvas de aptidão para a rede sintética.

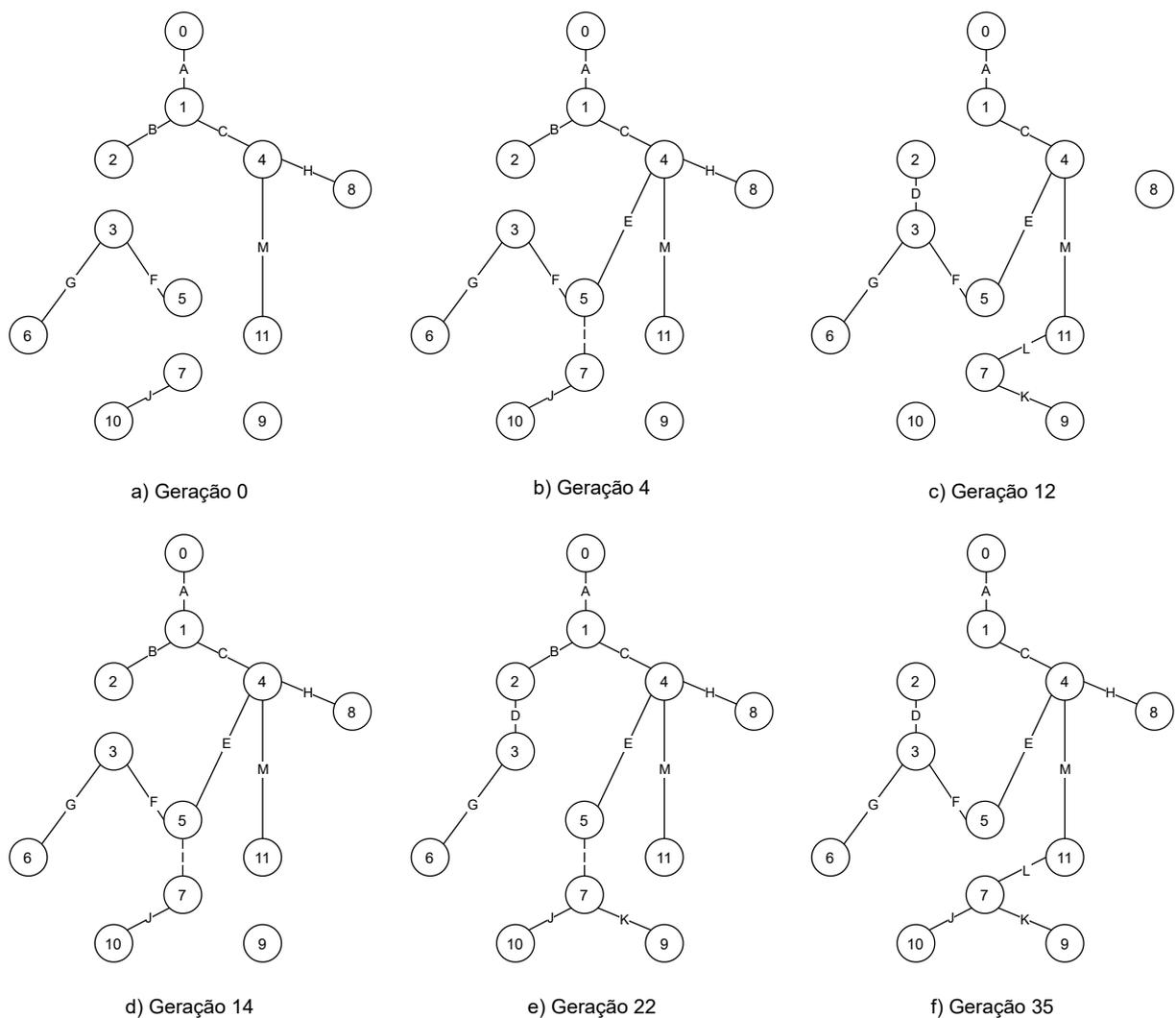


Fonte: O autor.

Das configurações propostas, inicialmente na geração 0 três grupos de consumidores fica-

ram isolados da rede totalizando 6 consumidores desconectados. Na geração 4 apenas o vértice 9 ficou isolado, resultando em 2 consumidores desconectados. Na geração 12 os vértices 8 e 10 ficaram isolados, representando 5 consumidores desconectados. Na geração 14 o algoritmo propôs a mesma configuração que já havia sido proposta na geração 4 com 2 consumidores desconectados. Uma configuração com todos os consumidores conectados, que pode ser considerada como um resultado ótimo, é vista na geração 22. Sendo que podem existir outras configurações que satisfaçam a condição de conectar todos os consumidores mantendo a radialidade da rede elétrica, como é o caso da geração 35.

Figura 22: Configurações propostas pelo sistema proposto.



Fonte: O autor.

Com este estudo de caso foi possível verificar de forma visual a evolução das configurações propostas pelo algoritmo genético, assim como a possibilidade de existir mais de uma configuração que pode ser considerada como ótima para o critério de consumidores desconectados. Com o algoritmo genético validado é possível realizar o estudo em redes elétricas reais.

5.2 Estudo de caso com redes reais

O presente estudo de caso tem por objetivo verificar o tempo necessário para realizar a otimização de redes elétricas reais, considerando o critério minimização da quantidade de consumidores desconectados, assim como a quantidade de configurações únicas propostas pelo algoritmo. Para isto foram realizadas simulações com três redes elétricas reais de diferentes regiões do Brasil, e com características diferentes sendo uma rede rural, uma urbana e uma rede mista. Todos os dados destas redes foram fornecidos pela concessionária de energia em formato OpenDSS. As redes foram chamadas de rede A, B e C, e possuem suas principais características apresentadas na Tabela 6, como quantidade de barras, equipamentos manobráveis e quantidade de consumidores. O algoritmo foi implementado na linguagem de programação Python em sua versão 3.8 e executado em um computador com processador Intel® i7-10750H, com 16 GB de memória RAM. Como parâmetros do algoritmo genético, foi utilizada uma população de 10 indivíduos, com uma elite de tamanho 2, taxa de mutação de 0,05 e 1000 gerações.

Tabela 6: Características das redes elétricas reais.

Rede	Barras	Equipamentos manobráveis	Consumidores
A	302	40	3102
B	578	74	1644
C	85	7	273

O tempo de execução compreende as etapas de conversão da rede para grafo, simplificação do grafo e execução do algoritmo genético. Na Tabela 7 são apresentados os tempos de execução em segundos para cada uma das redes, assim como a quantidade de configurações únicas propostas pelo algoritmo. Destes resultados, pode-se perceber que quanto maior a quantidade de barras e de elementos manobráveis presentes na rede elétrica, maior será o tempo de execução, mas também a quantidade de configurações únicas propostas também será maior, como é o caso da rede B. E o contrário também se verifica para a rede C, que possui poucos elementos e teve um tempo de execução bastante rápido e com poucas configurações únicas.

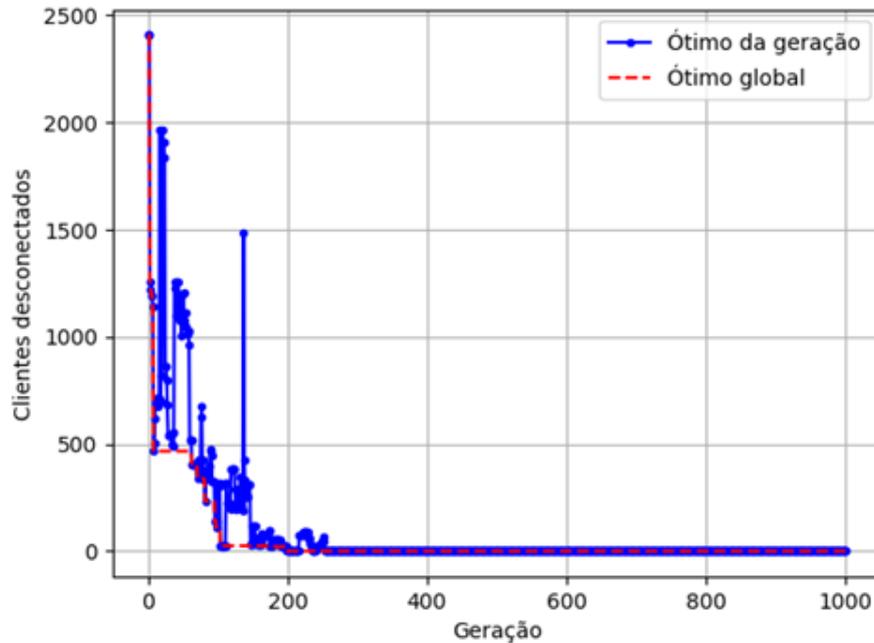
Tabela 7: Resultados para as redes elétricas reais.

Rede	Tempo de execução [s]	Configurações propostas únicas
A	11,518254	61
B	20,407573	107
C	4,217329	8

As curvas de aptidão são apresentadas nas figuras 23, 24 e 25, onde a linha em azul representa a quantidade de consumidores desconectados para a melhor configuração da geração, e a

linha em vermelho representa a melhor configuração global. Para a rede A, a melhor configuração global foi obtida com menos de 300 gerações, enquanto para a rede B foram necessárias menos de 500 gerações e para a rede C apenas 20 gerações.

Figura 23: Curva de aptidão para a rede A.

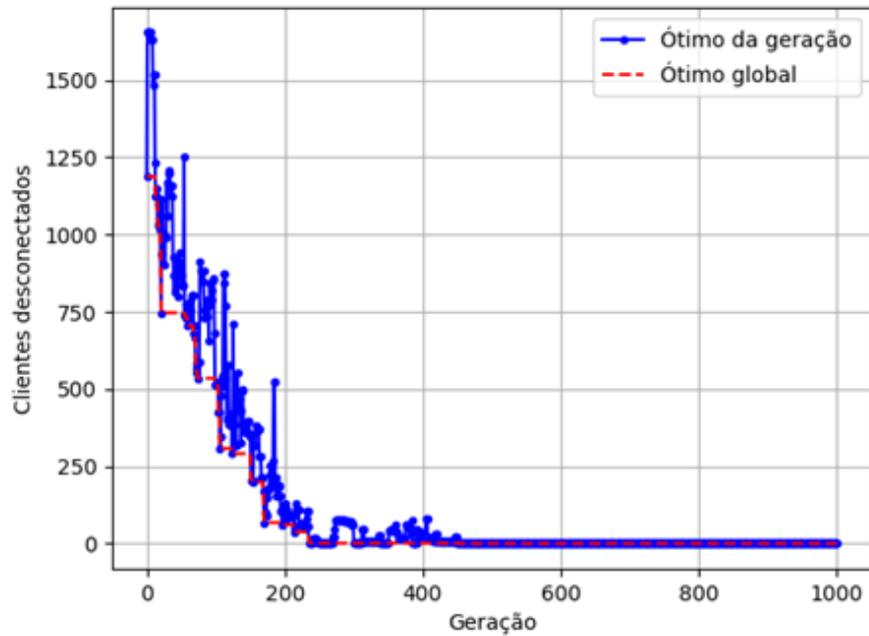


Fonte: O autor.

Com as simulações realizada, foi possível perceber que a otimização das redes elétricas são realizadas em tempos relativamente curtos, sendo que a rede mais complexa com 578 barras e 74 elementos manobráveis levou menos de 21 segundos para ser convertida em grafo, ser simplificada e encontrar uma solução ótima. É importante destacar que com esta quantidade de elementos manobráveis existem 2^{74} possibilidades de conexões diferentes, uma quantidade inviável de ser avaliada em tempo hábil por uma pessoa, e o algoritmo conseguiu encontrar uma que conecte todos os consumidores em menos de 500 gerações. Das 107 configurações propostas as melhores podem ser selecionadas para serem comparadas mediante outros critérios, tornando uma ferramenta eficiente para o auxílio no desenvolvimento de projetos com intervenção em redes elétricas.

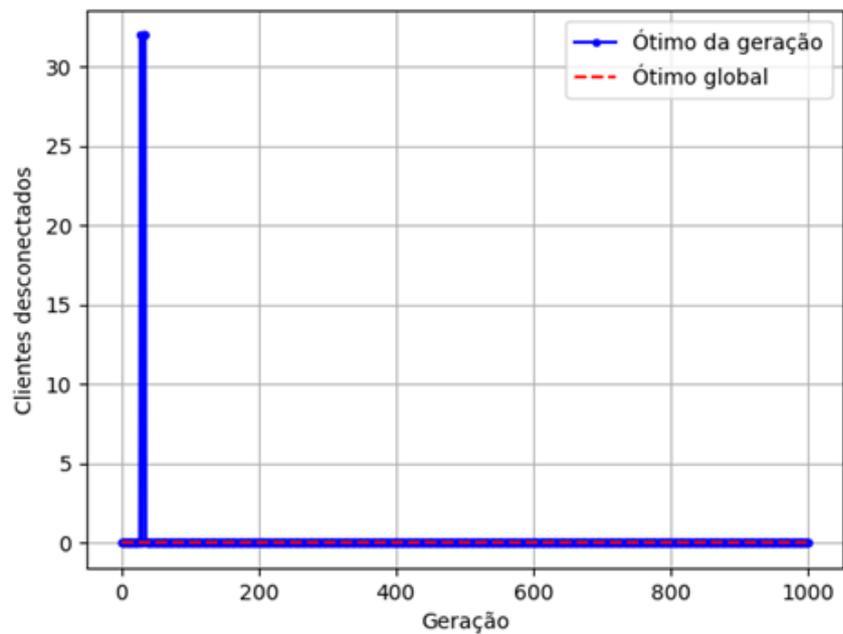
A rápida execução do algoritmo para redes elétricas reais, permite a aplicabilidade como uma ferramenta de auxílio ao projetista na hora de realizar o planejamento de uma intervenção na rede elétrica. Ainda devendo ser verificada a qualidade das soluções de reconfigurações propostas, o que é apresentado no estudo de caso a seguir.

Figura 24: Curva de aptidão para a rede B.



Fonte: O autor.

Figura 25: Curva de aptidão para a rede C.



Fonte: O autor.

5.3 Estudo de caso de comparação com projetista

Como o sistema proposto nesta tese resultará em uma ferramenta de suporte aos projetistas, foi realizado um estudo de caso para verificar as configurações propostas pelo sistema compa-

radas com as configurações propostas por um projetista experiente, analisando a minimização da quantidade de consumidores desligados no caso de obra com necessidade de desligamentos. Para isto foram escolhidas três redes elétricas do estado do Rio Grande do Sul, sendo a rede D uma rede mista de rural com urbana, a rede E uma rede predominantemente rural e a rede F uma rede urbana. Todas estas redes possuem características em comum como a necessidade de desligamento de consumidores, possuir 3 casos, sendo o caso 1 a necessidade de troca de postes, o caso 2 a necessidade de recondução de trechos, e o caso 3 a troca de transformadores.

Na Tabela 8, são apresentadas as quantidades de consumidores desconectados pelo projeto proposto pelo projetista em obras já realizada no ano de 2019 e a quantidade obtida pelo sistema proposto, segmentados nos três casos. Já a redução percentual da quantidade de consumidores desconectados pode ser visualizada na Tabela 9. Com estes dados é possível perceber que tanto para a rede D quanto para a rede F, com características urbanas e mista de urbana com rural, houve redução significativa de até 8,67% na quantidade de consumidores desconectados. Já para a rede E, com características predominantemente rurais, o sistema obteve exatamente a mesma quantidade de consumidores desconectados do que a solução proposta pelo projetista.

Tabela 8: Quantidade de consumidores desconectados por configuração para redes da região sul.

Rede	Projetista			Sistema proposto		
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
D	82	384	692	82	361	637
E	35	122	187	35	122	187
F	94	403	703	94	387	642

Tabela 9: Redução da quantidade de consumidores desconectados com o uso da ferramenta.

Rede	Caso 1	Caso 2	Caso 3
D	0,0%	5,99%	7,95%
E	0,00%	0,00%	0,00%
F	0,00%	3,97%	8,67%

Além destas redes, foram escolhidas mais 3 redes da região sudeste do país, todas com características predominantemente urbanas. Destas redes é possível verificar a quantidade de consumidores desconectados para a intervenção na rede, mas não foi especificado o tipo de obra que foi realizada. Estas redes foram denominadas de G, H e I e possuem as quantidades de consumidores desconectados pela solução proposta pelo projetista e pelo sistema proposto, assim como a redução obtida com o uso da ferramenta, apresentadas na Tabela 10. Neste caso, todas as redes tiveram redução significativa na quantidade de consumidores desconectados, tendo uma

redução mínima de 2,15% que representa 45 consumidores que não tiveram o seu fornecimento de energia elétrica interrompido e máxima de 13,34% totalizando 322 consumidores.

Tabela 10: Redução da quantidade de consumidores desconectados com o uso da ferramenta para redes da região sudeste.

Rede	Projetista	Sistema Proposto	Redução
G	2090	2045	2,15 %
H	2555	2214	13,34%
I	2775	2453	11,60%

Com os dados obtidos com este estudo de caso, comprova-se que a ferramenta possui real potencial de otimização na proposta de reconfiguração de redes elétricas visando a minimização da quantidade de consumidores desconectados, pois em todos os casos obteve resultados no mínimo iguais aos propostos por projetistas experientes. Destaca-se que para redes mais complexas e de maior porte a redução percentual obtida com o uso da ferramenta é maior, justamente pelo fato de conseguir analisar uma quantidade maior de configurações possíveis.

5.4 Estudo de caso de comparação com outros algoritmos

Com o intuito de avaliar o desempenho do algoritmo proposto em relação a outros algoritmos, este estudo de caso apresenta a aplicação de uma rede de distribuição real com dois alimentadores, e 377 elementos manobráveis e conseqüentemente 2^{377} possibilidades de configurações possíveis. Os algoritmos escolhidos para a comparação foram o PSO em sua forma binária, o Vortex Search apresentado em DOĞAN; ÖLMEZ (2015) e uma forma adaptada do Vortex Search com a inserção do operador de mutação, chamada de Vortex Search Mutado, baseado em ASLAN; PAVONE (2023).

Os algoritmos recebem inicialmente a mesma rede, com todos os consumidores desconectados e é buscada a configuração que mantenha a menor quantidade de consumidores desconectados, mantendo as características de radialidade da rede. Para realizar um levantamento estatístico da performance de cada algoritmo, foram realizadas dez execuções de cada algoritmo, com 10000 iterações. Para cada execução foram registrados o tempo de execução e a melhor solução (aptidão), onde suas informações de valores mínimos, máximos, médias, mediana e desvio padrão são apresentados na Tabela 11. Destes dados destaca-se que o algoritmo genético aqui proposto apresenta o menor valor mínimo e menor mediana, indicando que obteve o melhor desempenho em encontrar a configuração com a menor quantidade de consumidores desconectados na maioria das vezes.

Para cada algoritmo, a execução que apresentou o menor valor de aptidão, ou seja, menor quantidade de consumidores desconectados, foi registrada a quantidade de soluções únicas sugeridas, apresentadas na Tabela 12. Estas execuções também possuem as suas curvas de aptidão

Tabela 11: Dados estatísticos da aptidão para cada algoritmo.

Algoritmo	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desvio padrão
Genético	0,00	3729,93	1630,00	38760,00	7113,53
Vortex Search	31240,00	31254,02	31240,00	36247,50	246,66
Vortex Search Mutado	3352,00	8936,54	4580,00	38987,50	7446,76
PSO	30352,00	30888,57	30352,50	38462,00	916,61

apresentadas na Figura 26 para comparação. É perceptível que a operação de mutação, presente nos algoritmos genético e Vortex Search Mutado, acaba sugerindo uma quantidade maior de soluções possíveis, o que reflete no maior desvio padrão entre as soluções. No entanto esta característica evita a convergência prematura para um ótimo local, como é o caso que ocorreu com o PSO e com o Vortex Search tradicional.

Tabela 12: Quantidade de soluções únicas propostas por cada algoritmo.

Algoritmo	Soluções únicas
Genético	4606
Vortex Search	9
Vortex Search Mutado	89
PSO	9

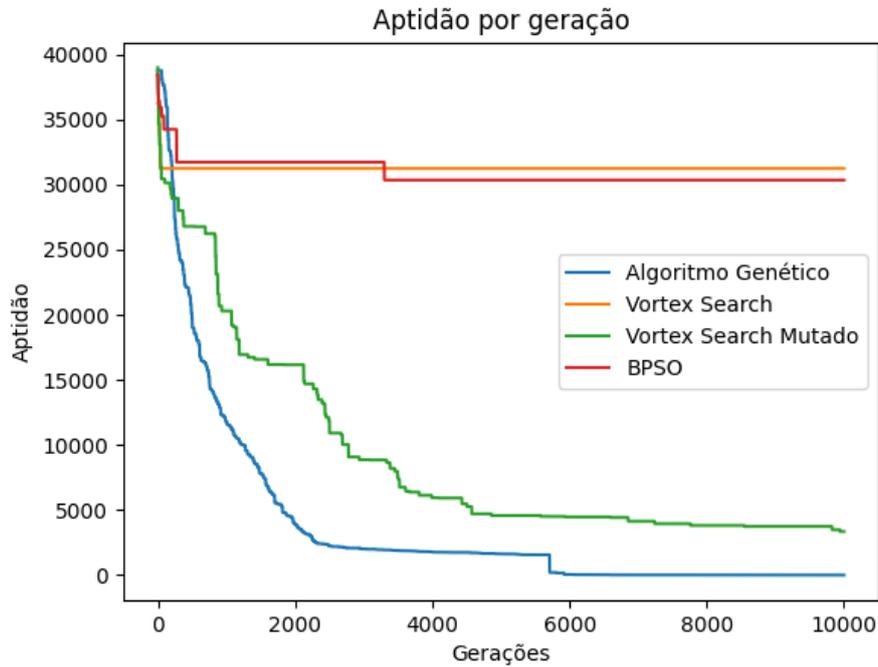
Para a comparação de tempo de execução, os testes foram executados em um computador com processador intel i7-10750H, 32 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11. As implementações foram realizadas na linguagem de programação python, em sua versão 3.11.4. Os dados de tempo de execução em segundos, e as suas informações estatísticas, são apresentados na Tabela 13. É possível perceber que o algoritmo genético teve o menor tempo de execução em relação aos demais algoritmos. De forma geral os tempos de cada execução foram consistentes, apresentando um baixo desvio padrão.

Tabela 13: Tempos de execução dos algoritmos em segundos.

Algoritmo	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desvio padrão
Genético	608,26	667,43	666,75	721,05	41,90
Vortex Search	900,44	926,86	932,01	946,10	14,30
Vortex Search Mutado	802,26	824,21	824,33	842,68	12,14
PSO	974,64	980,44	979,92	987,24	3,53

Com isto é possível perceber que diferentes algoritmos evolutivos podem ser utilizados para a reconfiguração de redes elétricas. E que a característica de explorar diferentes regiões do

Figura 26: Curvas de aptidão pra diferentes algoritmos.



Fonte: O autor.

espaço de busca, que neste caso é realizado com o operador de mutação, permite obter boas soluções, evitando a convergência prematura. No entanto, o método de avaliação da função de aptidão ainda utiliza o cálculo de fluxo de potência, que por suas características iterativas, pode ser computacionalmente custoso para redes reais de médio e grande porte. Para melhorar o desempenho do otimizador, o estudo de caso apresentado a seguir apresenta uma alternativa de avaliação da função objetivo, diminuindo a quantidade de execuções do cálculo de fluxo de potência.

5.5 Estudo de caso de comparação de função objetivo.

Como é descrito em PEREIRA; BARBOSA; VASCONCELOS (2023), muitas vezes a comparação entre trabalhos de otimização pode ser difícil por depender do hardware utilizado e recomenda como métrica avaliar a quantidade de cálculos de fluxo de potência. O método proposto nesta tese permite, através da análise multicritério e da otimização pela topologia, limitar a quantidade de execuções do fluxo de potência. Para demonstrar a diferença de tempo entre o método convencional com o fluxo de potência sendo calculado na função objetivo e o método que analisa a topologia, este estudo de caso realiza a reconfiguração da rede IEEE de 123 barras com os dois casos.

Este estudo de caso realiza a reconfiguração da rede IEEE de 123 barras, com o objetivo

de manter a menor quantidade de consumidores desconectados. Para isso foram utilizados dois métodos, o primeiro é o método tradicional que calcula o fluxo de potência na sua função objetivo e utiliza a tensão como critério para definir se o consumidor está conectado ou não. O segundo método avalia a topologia da rede através do grafo simplificado, conforme apresentado em 4. Ambos os métodos foram executados com os mesmos parâmetros, sendo 100 gerações, população de 10 elementos, elite com tamanho 2, e taxa de mutação de 1%. Cada teste foi repetido 1000 vezes e os seus resultados estatísticos quanto ao tempo de execução são apresentados na Tabela 14. Os testes foram realizados em uma instância Nanode 1 GB da empresa Akamai.

Tabela 14: Tempos de execução dos algoritmos com diferentes funções objetivo.

Método	Mínimo [s]	Máximo [s]	Tempo médio [s]	Desvio padrão [s]
Fluxo de potência	30,971533	44,230270	33,405202	1,900490
Grafo simplificado	0,197010	0,372645	0,223608	0,022263

Os tempos de execução apresentados na Tabela 14 podem ser comparáveis uma vez que foram baseados no mesmo código fonte, tendo somente a função objetivo alterada, e foram executados no mesmo hardware. É expressiva a diferença de tempo entre os dois métodos, sendo que o tempo máximo do método com o grafo simplificado é 138 vezes mais rápido do que o método convencional que utiliza o fluxo de potência.

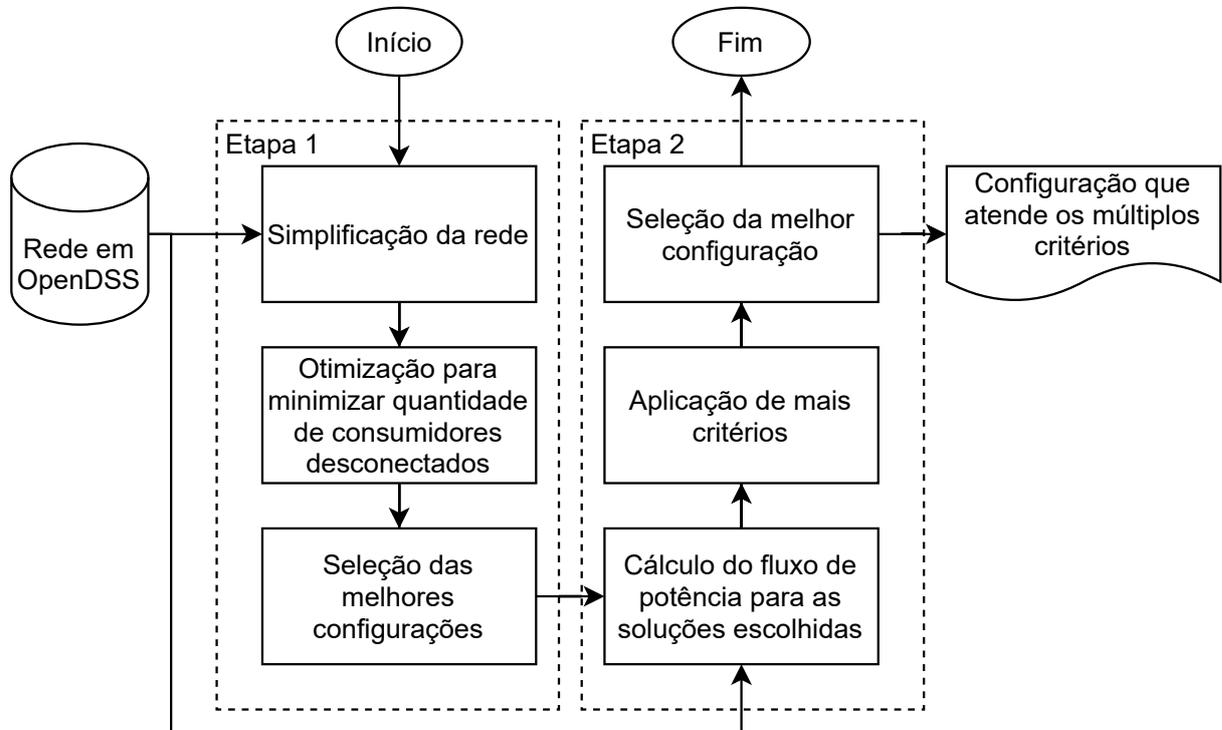
5.6 Estudo de caso de aplicação de multicritério

Este estudo de caso, que utiliza uma rede real com 589 barras e 29 chaves, demonstra a aplicação de multicritérios na reconfiguração de redes. A rede deve ser reconfigurada de forma que a menor quantidade de consumidores fique desconectada, e dentro das soluções de configurações propostas, seja escolhida a que mantenha um equilíbrio entre o nível de tensão e a quantidade de consumidores atendidos. Do total de 2^{29} combinações possíveis, apenas 1139 mantêm a radialidade, o que representa apenas 0,000212% das opções de reconfiguração.

O fluxo de aplicação da análise multicritérios é apresentado na Figura 27, onde a etapa 1 recebe como entrada a rede completa no formato OpenDSS, e após o processo de representação em grafo e simplificação da rede, otimiza para obter as soluções que minimizem a quantidade de consumidores desconectados, que é o primeiro critério. A segunda seleciona os melhores resultados da primeira etapa e aplica as configurações na rede completa. O cálculo do fluxo de potência é executado somente para estas melhores soluções, limitando assim a quantidade de execuções do fluxo de potência. Após o cálculo do fluxo de potência os demais critérios podem ser aplicados, sejam eles a diminuição das perdas de potência ativa, redução de energia reativa, melhoria nos níveis de tensão ou até mesmo a combinação de critérios. Neste estudo de caso, será utilizado como segundo critério o nível de tensão, onde para a seleção da melhor

configuração, na etapa 2, será escolhida a configuração que obtiver o maior valor de tensão mínima nas cargas.

Figura 27: Etapas da aplicação de multicritérios.



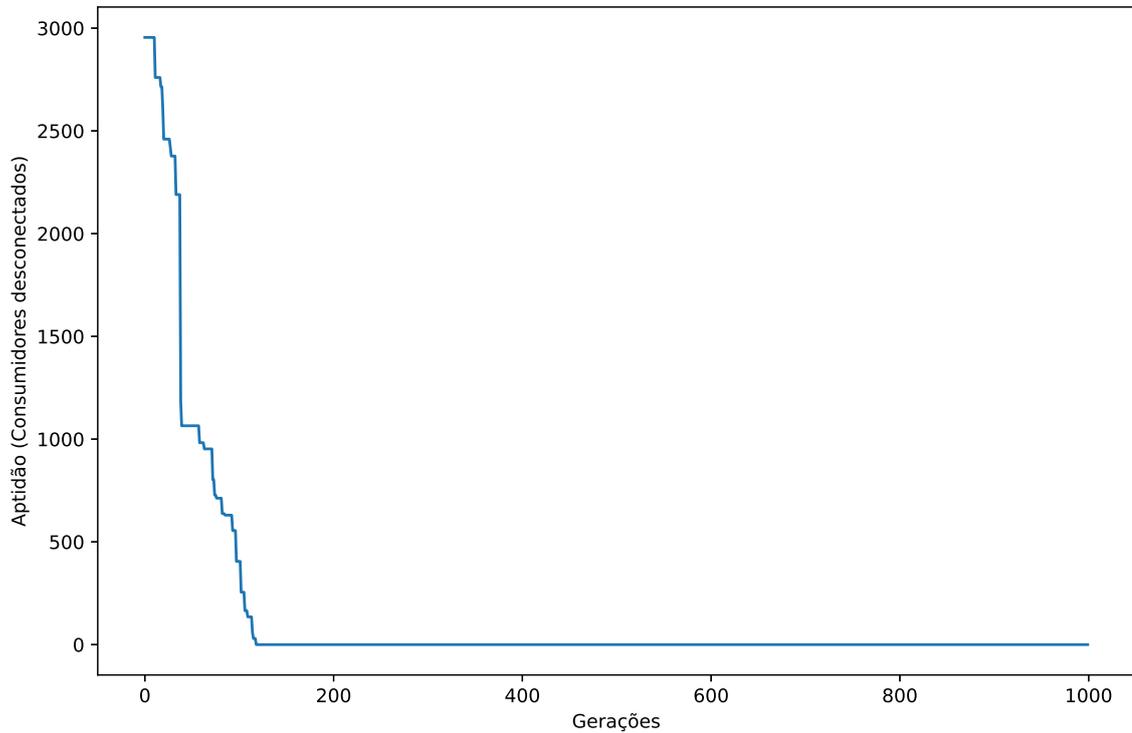
Fonte: O autor.

A otimização é realizada inicialmente considerando apenas a menor quantidade de consumidores desconectados, para isto foi executado o algoritmo genético modificado apresentado em 4 com 1000 gerações, taxa de mutação de 1%, população de 5 indivíduos, e elite com tamanho 2. Busca-se a minimização da função objetivo que é a contagem de consumidores desconectados. A curva de aptidão desta primeira etapa é apresentada em 28, onde é possível perceber a rápida convergência do algoritmo.

Das 1000 gerações, o algoritmo encontrou um total de 424 soluções únicas. Deste total, 35 delas mantêm todos os consumidores conectados, que seria o melhor resultado possível da reconfiguração. Fato que é possível devido as características de mutação do algoritmo genético. Estas 35 opções de reconfiguração serão utilizadas na segunda etapa da análise multicritério, onde deve-se encontrar qual destas mantêm o melhor nível de tensão. Para isto foi executado o cálculo de fluxo de potência para cada uma das soluções e foi registrada a menor tensão em p.u. para cada caso. Os valores estatísticos das tensões encontradas são apresentados na Tabela 15 e a solução escolhida considerando este segundo critério seria a que obteve o maior nível mínimo de tensão.

A aplicação de mais critérios, na etapa 2, pode utilizar diferentes critérios oriundos do fluxo de potência, como o nível de tensão ou perdas de energia ativa, ou oriundos de fontes externas

Figura 28: Curva de aptidão para a primeira etapa do multicritério.



Fonte: O autor.

Tabela 15: Dados estatísticos de menor nível de tensão nas cargas em p.u..

Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
0,94775	0,95261	0,95042	0,00139

como quantidade de manobras a serem realizadas, custo de operação, entre outros. Inclusive é possível utilizar múltiplos critérios utilizando técnicas como a fronteira de Pareto. Como neste estudo, o primeiro critério atingiu o valor ótimo e retornou mais de uma opção de configuração para este valor, foi possível escolher a melhor solução por uma simples ordenação dos níveis de tensão, sem a necessidade de métodos mais complexos.

Com este estudo de caso foi possível encontrar 35 das 1139 configurações que mantêm todos os consumidores conectados, com apenas 1000 iterações do algoritmo genético. O particionamento em etapas permitiu que o algoritmo executasse o cálculo do fluxo de potência somente para 35 soluções. Caso o algoritmo genético utilizasse o fluxo de potência em sua função de aptidão, para uma população de 5 indivíduos e 1000 iterações, seria necessário executar o cálculo do fluxo de potência 5000 vezes. Como observado em PEREIRA; BARBOSA; VASCONCELOS (2023), esta redução na quantidade de cálculos do fluxo de potência pode ser utilizada como métrica de avaliação de performance, sem a influência da forma de implementação, lin-

guagem de programação ou hardware no qual o algoritmo foi executado.

5.7 Estudo de caso de alocação de nova chave

A manobrabilidade da rede depende da quantidade de chaves disponíveis, ao adicionar uma nova chave dobra-se a quantidade de configurações possíveis para esta rede. O incremento da quantidade de elementos manobráveis aumenta também a quantidade de árvores geradoras, e com isso as opções de configurações viáveis, como apresentado em LI et al. (2023). Idealmente cada grupo de consumidores deveria poder ser isolado individualmente, no entanto isto é praticamente inviável, tanto economicamente quanto operacionalmente. Desta forma torna-se necessário priorizar a alocação de novas chaves, de forma que no caso de intervenções na rede de distribuição, seja possível desligar um trecho de rede menor, impactando uma quantidade menor de consumidores. Para isto será utilizado o algoritmo apresentado em 4.4, aplicado a rede IEEE de 123 barras apresentada em KERSTING (2001). Como a descrição da rede não fornece a quantidade de consumidores, foi considerado um consumidor para cada 1 kW de potência ativa. O grafo da rede completa pode ser visto na Figura 29, onde as fontes são representadas pelos vértices em verde escuro, as chaves fechadas são representadas pelas arestas vermelhas, e as abertas pelas arestas em azul claro.

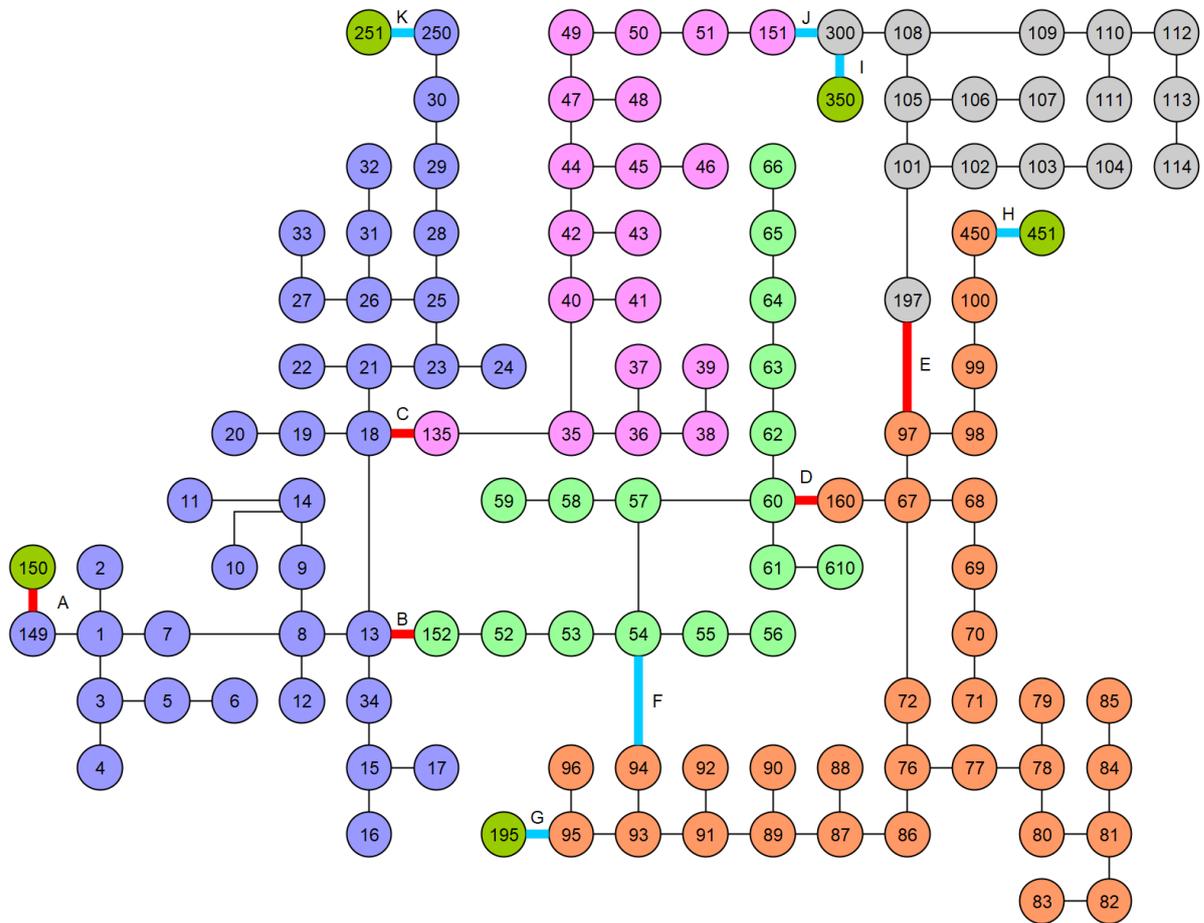
Os grupos de consumidores agrupáveis, ou seja, os vértices que permanecem conectados quando todos os elementos manobráveis são abertos, foram agrupados e identificados por cores diferentes. A rede simplificada pode ser vista na Figura 30 com os grupos de consumidores identificados de G1 a G5, mantendo as mesmas cores utilizadas na representação da rede completa da Figura 29. As informações sobre quantidade de consumidores e potência ativa de cada grupo são apresentadas na Tabela 16. Na descrição original da rede não foi informada a quantidade de consumidores, atribuiu-se 1 consumidor para cada 1 kW de potência ativa. Caso seja necessário realizar alguma intervenção na rede que necessite o desligamento de um trecho que pertença a algum destes grupos, o grupo todo sofre a interrupção do fornecimento e isto impacta diretamente nos indicadores de continuidade.

Tabela 16: Características dos grupos de consumidores.

Grupo	Quantidade de consumidores	Potência ativa [kW]
G1	760	760
G2	755	755
G3	320	320
G4	550	550
G5	1105	1105

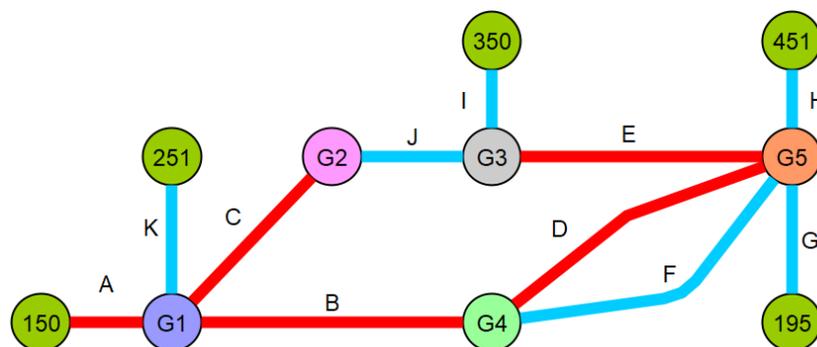
Para este estudo de caso considera-se que será realizada uma obra que afete as barras 77 até a 85, região destacada no canto inferior direito da Figura 31. Na situação original da rede,

Figura 29: Grafo da rede IEEE de 123 barras.



Fonte: O autor.

Figura 30: Grafo da rede IEEE de 123 barras simplificada.



Fonte: O autor.

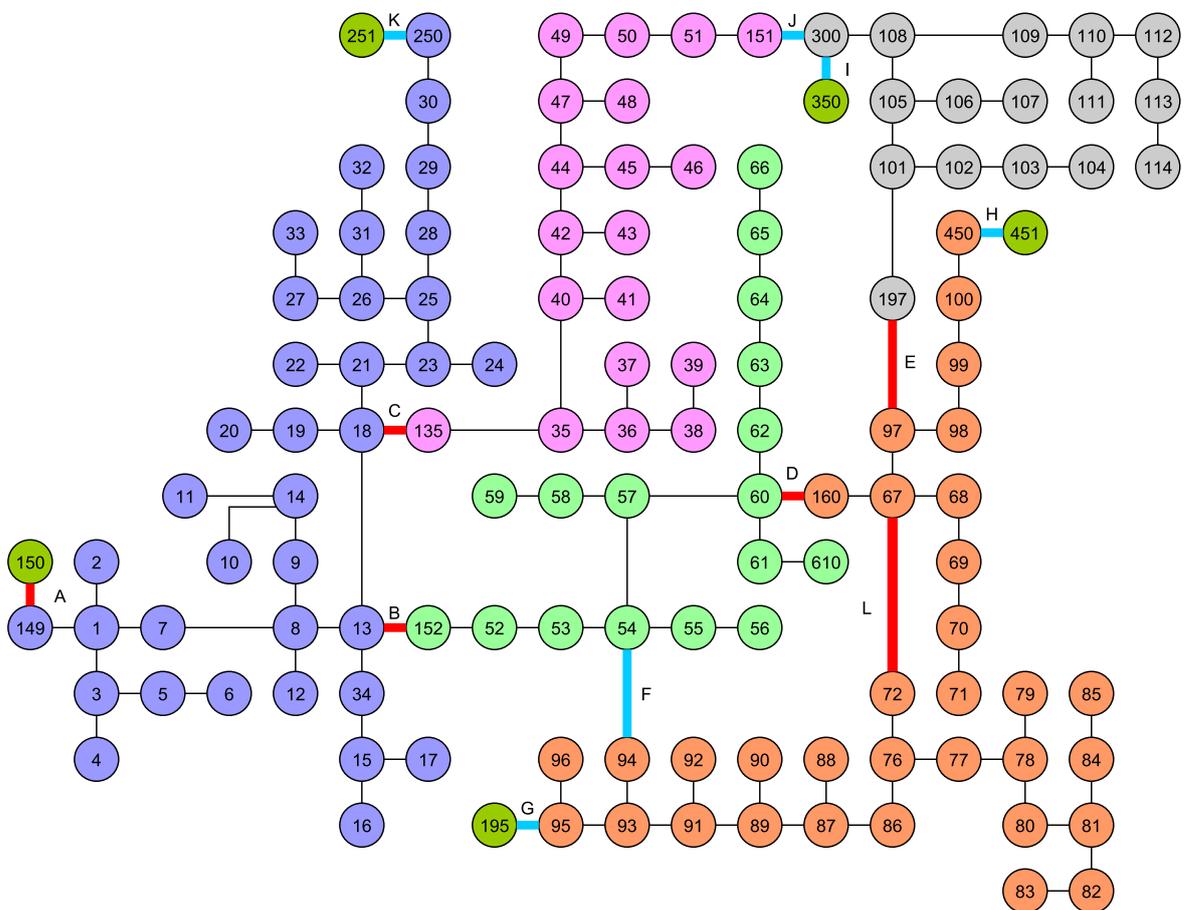
deveriam ficar abertas as chaves D,E,F,F e H para isolar todo o grupo G5, desligando assim 1105 consumidores.

Aplicando o algoritmo de alocação de chaves para esta rede, o ranqueamento dos grupos, calculado pela Equação 4.1, é apresentado na Tabela 17, onde o grupo G5 possui o maior valor,

Tabela 17: Rank dos grupos de consumidores.

Grupo	Rank
G1	0.879
G2	0.599
G3	0.488
G4	0.565
G5	1.105

Figura 32: Grafo da rede IEEE de 123 com nova chave L.

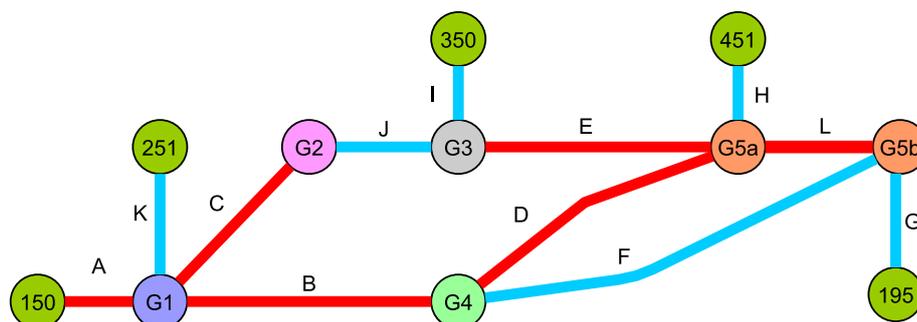


Fonte: O autor.

pertencentes ao novo grupo G5a.

Antes da inserção da nova chave, a rede em seu estado simplificado contava com 11 elementos manobráveis e conseqüentemente 2^{11} combinações possíveis de configuração. Ainda em seu estado original, existiam 9 opções de árvores geradoras, ou seja, menos de 0,439% das configurações possíveis mantiveriam todos os consumidores conectados. Com a adição da nova chave, quantidade de combinações possíveis cresceu para 2^{12} e a quantidade de árvores gera-

Figura 33: Grafo da rede IEEE de 123 simplificada com nova chave L.



Fonte: O autor.

doras aumentou para 14 opções, representando 0,341% das possibilidades. Com estes dados é possível perceber que aumentando a quantidade de elementos manobráveis, além de aumentar a quantidade de combinações possíveis, a quantidade de árvores geradoras, e consequentemente soluções viáveis, também aumenta. Mesmo assim, existe uma grande diferença na quantidade de árvores geradoras para a quantidade de soluções possíveis.

Com isto é possível não só reconfigurar as redes elétricas, de modo a atender os diferentes critérios de otimização, como também é possível indicar pontos candidatos a receberem novos elementos manobráveis, e com isso aumentar a capacidade de manobrabilidade da rede elétrica. A seção a seguir avalia e relaciona os resultados obtidos nos estudos de caso aqui apresentados.

5.8 Análise de resultados

Os principais trabalhos relacionados, LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019) e SOUFI; KAHOULI; Hadj Abdallah (2019) demonstram que as redes elétricas podem ser modeladas na forma de grafos, para então serem otimizadas de acordo com o critério escolhido, ou até mesmo utilizando múltiplos critérios. O estudo de caso apresentado em 5.1 demonstra a aplicabilidade do algoritmo genético em propor soluções de reconfiguração da rede elétrica sem a utilização do cálculo do fluxo de potência. Destaca-se que a variabilidade que o operador de mutação insere no algoritmo permite que sejam propostas mais de uma configurações diferentes, fato que pode levar o algoritmo a evitar uma otimização prematura. O efeito disto pode ser visto no estudo de caso apresentado em 5.4 onde os algoritmos genético e *Vortex Search* Mutado obtiveram melhores resultados e uma quantidade maior de soluções propostas em relação aos algoritmos *Vortex Search* tradicional e PSO que apresentaram convergência prematura.

O estudo de caso apresentado em 5.5 demonstra que a análise das soluções viáveis, sem calcular o fluxo de potência durante a primeira etapa da otimização possui um grande ganho em relação a tempo de processamento. Isto junto com o estudo de caso 5.4, demonstra que as redes elétricas de distribuição podem ser modeladas através de grafos e estes podem ter

a sua dimensão e conseqüentemente sua complexidade reduzidas impactando diretamente na redução de tempo necessário para o processo de otimização, o que traz subsídios no sentido de corroborar questão de pesquisa I proposta neste trabalho.

A aplicação do algoritmo em redes elétricas com diferentes características e tamanhos é demonstrada nos estudos de caso apresentados em 5.2 e 5.3, nos quais foi verificada a capacidade e tempo de solução da reconfiguração de três redes de distribuição reais. Os resultados obtidos pelo algoritmo também foram validados com as soluções propostas por um projetista experiente, como seriam realizadas em um caso real. Para uma rede com 578 barras o tempo de solução foi menor do que 30 segundos, isto viabiliza a utilização do algoritmo como uma ferramenta de apoio a tomada de decisões para os projetistas. Destaca-se ainda que nos testes realizados com o projetista em 5.3 a ferramenta demonstrou-se consistente, uma vez que obteve resultados no mínimo iguais a soluções propostas por projetistas experientes e com reduções de até 13,34% de consumidores desconectados, o que viabiliza a realização de mais obras respeitando o limite dos indicadores coletivos de continuidade.

A quantidade de combinações possíveis para a configuração de uma rede cresce exponencialmente com a quantidade de elementos manobráveis. Mesmo que a quantidade de árvores geradoras também dependa da quantidade de elementos manobráveis, a diferença entre a quantidade de árvores geradoras e as combinações possíveis é muito grande. Desta forma, ao executar cálculos computacionalmente custosos, como o fluxo de potência, para soluções inviáveis comprometeria o tempo de execução sem gerar benefícios. Ao aplicar o algoritmo de otimização para encontrar as configurações viáveis do ponto de vista topológico e depois utilizar estas soluções em uma análise multicritério, reduz-se a quantidade de execuções destes algoritmos de maior complexidade, tornando a solução geral mais rápida. Desta forma indo ao encontro do critério de comparação de algoritmos proposto em PEREIRA; BARBOSA; VASCONCELOS (2023) onde é recomendado quantificar as execuções de cálculos de fluxo de potência ao invés de comparar tempos. Com o método proposto neste trabalho, a quantidade de execuções será limitada a quantidade de soluções candidatas utilizadas na segunda etapa da análise multicritério. Estes aspectos contribuem para a aceitação da questão de pesquisa II proposta neste trabalho.

Outros algoritmos de otimização binária podem ser utilizados para a otimização multicritério buscando as configurações topologicamente mais viáveis. Como a meta-heurística abre mão do compromisso de obter a melhor solução possível, e muitas vezes depende muito dos parâmetros utilizados e do espaço de busca, no estudo de caso apresentado em 5.4, alguns algoritmos podem ficar presos em ótimos locais e ter uma solução única, como foi o caso do PSO e do *Vortex Search* que apresentaram uma convergência prematura. Já os algoritmos que possuem o operador de mutação, permitem a exploração de outras soluções, podendo encontrar mais de uma solução viável, mesmo que o valor da função de aptidão já seja o ótimo, como é demonstrado no estudo de caso apresentado em 5.1.

Com a divisão da otimização multicritério em etapas, onde primeiramente são analisadas as características topológicas e a viabilidade das configurações, que possui um custo computacio-

nal baixo, é possível limitar a quantidade de execuções do fluxo de potência como é apresentado em 5.6. Esta redução na quantidade de execuções pode ser vista como bastante benéfica para a performance do algoritmo, de acordo com a sugestão de critério de avaliação apresentada em PEREIRA; BARBOSA; VASCONCELOS (2023).

A inserção de novos elementos manobráveis permite aumentar a quantidade de combinações possíveis para a reconfiguração da rede, conforme demonstrado em 5.7 e LI et al. (2023). A escolha da posição mais adequada considerando as questões topológicas, através das medidas de centralidade, e as características que impactam nos indicadores de continuidade, como a quantidade de consumidores atendidos, permite que intervenções sejam realizadas na rede elétrica impactando uma menor quantidade de consumidores. No estudo de caso realizado, ao adicionar a quantidade de soluções viáveis houve um aumento de 1,5 vezes, indo de 9 opções para 14 opções. É importante ressaltar que o método proposto neste trabalho difere do método apresentado em LI et al. (2023), pois é proposto inserir uma chave ou elemento manobrável em um trecho já existente da rede e não a criação de um novo caminho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As intervenções nas redes elétricas são necessárias para a sua manutenção e expansão. Em alguns casos estas intervenções podem exigir a abertura de trechos da rede, cessando temporariamente o fornecimento de energia elétrica a alguns consumidores. Tanto o tempo quanto a frequência destas interrupções são mensurados e resumidos em indicadores de continuidade individuais e coletivos, os quais devem respeitar os limites estabelecidos pela ANEEL para cada conjunto de consumidores.

A reconfiguração das redes elétricas ocorre pela abertura ou fechamento de elementos manobráveis e a análise da combinação de todas as configurações possíveis é um problema NP-Completo. Para realizar a otimização neste tipo de problemas, é necessário utilizar meta-heurísticas como algoritmos evolutivos, que não vão testar todas as configurações possíveis, mas buscam uma solução viável em um curto espaço de tempo.

Algumas variações destes algoritmos, que hoje definem o estado da arte LANDEROS; KOZIEL; ABDEL-FATTAH (2019); SOUIFI; KAHOU LI; Hadj Abdallah (2019), reduzem o espaço de busca ao descartar as configurações que não respeitam as características de radialidade da rede, o que reduz o custo computacional do processo de otimização. O principal foco da reconfiguração de redes elétricas nestes trabalhos é a redução das perdas técnicas e em alguns casos outros parâmetros como custos de operação também são alvos da minimização. Na revisão de literatura realizada, não foram encontrados trabalhos que apliquem algoritmos genéticos para minimizar os indicadores de continuidade relacionados com o apoio na realização de obras, de forma que esta tese tem o objetivo de preencher esta lacuna de pesquisa. Além disso, ao longo do trabalho, foram desenvolvidas contribuições adicionais, descritas a seguir.

6.1 Contribuições

Os métodos apresentados no sistema proposto nesta tese contribuem para o avanço do estado da arte em diferentes formas. A modificação do algoritmo genético para reduzir os indicadores de continuidade e auxiliar no planejamento de obras com necessidade de intervenção nas redes elétricas é a principal contribuição, pois viabilizará a execução de uma quantidade maior de obras em um menor período de tempo trazendo ganhos para a qualidade do serviço prestado pela concessionária de energia elétrica. Isto será alcançado com outras contribuições como a simplificação de redes elétricas modeladas em grafos, que permite analisar diversas configurações da rede elétrica mantendo as suas características de topologia. Os experimentos realizados demonstraram sugestões de configurações que apresentam desempenho igual ou superior a um projetista experiente devido ao fato de analisar diversas configurações num curto período de tempo.

Por não terem sido localizados trabalhos com o mesmo objetivo e contexto de experimentação, a comparação direta de resultados não pode ser realizada. A metodologia adotada buscou

atuar neste ponto ao propor os estudos de caso de modo a comparar os resultados obtidos com redes reais não apenas com valores de redução mas também com a comparação empírica com projetos executados por projetistas experientes nestes mesmos estudos de caso. Desta forma a viabilidade do sistema proposto pode ser comprovada com os resultados positivos obtidos nos estudos de caso e na comparação com os especialistas.

Além das contribuições na otimização da reconfiguração das redes elétricas, este trabalho também apresenta um método para localização da melhor posição para a instalação de novas chaves, de forma que a rede tenha a sua manobrabilidade ampliada. Com a inserção de novas chaves, aumentam as possibilidades de reconfiguração da rede e as intervenções podem afetar quantidades menores de consumidores. Desta forma impactam diretamente os indicadores de continuidade.

Por este trabalho estar vinculado a um projeto P&D ANEEL a implementação dos algoritmos aqui apresentados assim como as redes reais utilizadas nos exemplos não podem ser disponibilizados publicamente. A implementação do algoritmo de posicionamento de chaves, entretanto, está fora do escopo do projeto e tem a sua implementação disponível no repositório disponível em <https://github.com/armandokeller/artigo-switch-placement>.

6.2 Limitações

Algumas limitações foram encontradas no desenvolvimento deste trabalho, e são descritas nos tópicos a seguir:

- **Dataset disponível:** Grande parte dos trabalhos pesquisados utilizam as redes de teste da IEEE, que apesar de terem as suas características documentadas, muitas vezes apresentam variações na implementação. Estas redes também são bastante pequenas comparadas com uma rede de distribuição real com diversos alimentadores. O tamanho diminuto das redes não permite a devida demonstração da quantidade de soluções possíveis e da necessidade de aplicação de meta-heurísticas. Apesar de ter sido realizado o estudo com redes reais, estas não podem ter seus modelos disponibilizados publicamente sem prévia autorização da concessionária de energia, o que limita a questão de comparação com outros trabalhos;
- **Falta de estudos de reconfiguração que avaliem intervenções programadas na rede de distribuição:** Não foram encontrados estudos que apresentem opções de reconfiguração de redes elétricas na presença de intervenções programadas, para reduzir os indicadores de continuidade. Desta forma, não havia disponível um cenário padronizado de comparação e para isto foi proposto um caso utilizando a rede IEEE-123 barras;

6.3 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros estão previstas as seguintes atividades:

- Aplicar o método de simplificação e avaliação topológica, proposto neste trabalho com diferentes algoritmos de otimização além dos já apresentados e comparar o seu desempenho;
- A comparação dos algoritmos de otimização com os algoritmos de busca de menores árvores geradoras como os algoritmos de Borůvka , Prim e Kruskal. Verificando o desempenho para diferentes tamanhos de redes, incluindo múltiplos alimentadores, para verificar as limitações da aplicação de cada método;
- O desenvolvimento de um dicionário de manobras que indique os custos da manobra de diferentes equipamentos, para que possa ser utilizado na análise multicritério. Esta abordagem permitirá que o algoritmo possa sugerir as manobras mais viáveis para a manutenção do sistema de distribuição;
- Verificar o impacto no desempenho do algoritmo ao considerar diferentes formas de verificar a radialidade, com apresentado em SUN et al. (2023) onde a radialidade é verificada através das matrizes que representam o grafo;
- Verificar a aplicabilidade e possíveis ganhos da implementação de versões que utilizem múltiplos processos. Como o algoritmo evolutivo depende das etapas anteriores, nem todas as etapas podem ser paralelizadas, no entanto o cálculo de aptidão de cada indivíduo de uma população pode ser calculado em paralelo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – prodist: módulo 8 - qualidade de energia**. 2021.
- ASLAN, M.; PAVONE, M. MBVS: a modified binary vortex search algorithm for solving uncapacitated facility location problem. **Neural Computing and Applications**, [S.l.], v. 9, 2023.
- BABU, P. R.; PASUNURU, S.; VAISHNAVI, G. Genetic algorithm and reconfiguration for loss minimization in radial distribution system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART GRIDS, POWER AND ADVANCED CONTROL ENGINEERING, ICSPACE 2017, 2017., 2018. **Anais...** IEEE, 2018. v. 2018-Janua, p. 294–297.
- BONDY, J.; MURTY, U. **Graph theory with applications**. [S.l.]: American Elsevier Publishing Company, 1976.
- BRANDES, U. On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation. **Social Networks**, [S.l.], v. 30, n. 2, p. 136–145, 2008.
- CHAIKEN, S.; KLEITMAN, D. Matrix tree theorems. **Journal of Combinatorial Theory, Series A**, [S.l.], v. 24, n. 3, p. 377–381, 1978.
- DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. [S.l.]: Wiley, 2001. (Wiley Interscience Series in Systems and Optimization).
- ELETROBRÁS (Ed.). **Manutenção e operação de sistemas de distribuição**. [S.l.: s.n.], 1982. v. 4.
- DOĞAN, B.; ÖLMEZ, T. A new metaheuristic for numerical function optimization: vortex search algorithm. **Information Sciences**, [S.l.], v. 293, p. 125–145, 2015.
- EL-MAKSOUUD, A. R.; AHMED, A. H.; HASAN, S. Simultaneous optimal network reconfiguration and allocation of four different distributed generation types in radial distribution networks using a graph theory-based mpsa algorithm. **International Journal of Intelligent Engineering and Systems**, [S.l.], v. 16, p. 291–306, 2023.
- DUGAN, R. C.; MONTENEGRO, D. **Reference guide: the open distribution system simulatorTM (openss)**. [S.l.: s.n.], 2020.
- FANG, S.; ZHANG, X. A Hybrid Algorithm of Particle Swarm Optimization and Tabu Search for Distribution Network Reconfiguration. **Mathematical Problems in Engineering**, [S.l.], v. 2016, 2016.
- FATIMA, R.; BUTT, H. Z.; LI, X. Optimal dynamic reconfiguration of distribution networks. In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM (NAPS), 2023., 2023. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6.
- GHOLIZADEH, N.; KAZEMI, N.; MUSILEK, P. A comparative study of reinforcement learning algorithms for distribution network reconfiguration with deep q-learning-based action sampling. **IEEE Access**, [S.l.], v. 11, p. 13714–13723, 2023.

- GOLDBARG, M.; GOLDBARG, E. **Grafos: conceitos, algoritmos e aplicações**. [S.l.]: Elsevier, 2012.
- HAGBERG, A. A.; SCHULT, D. A.; SWART, P. J. Exploring network structure, dynamics, and function using networkx. In: PYTHON IN SCIENCE CONFERENCE, 7., 2008, Pasadena, CA USA. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2008. p. 11 – 15.
- JUNGNICKEL, D. **Graphs, networks and algorithms**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2014. (Algorithms and Computation in Mathematics).
- KAGAN N. E DE OLIVEIRA, C. e. R. E. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. [S.l.]: Editora Blucher, 2015.
- KAGAN, N. et al. **Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência**. [S.l.]: Blucher, 2009.
- KERSTING, W. Radial distribution test feeders. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING. CONFERENCE PROCEEDINGS (CAT. NO.01CH37194), 2001., 2001. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2001. v. 2, p. 908–912 vol.2.
- KILYENI, S. et al. Genetic algorithm based distribution network expansion planning. In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC), 2014., 2014. **Anais...** IEEE, 2014. p. 1–6.
- KIRCHHOFF, G. R. Über die auflösung der gleichungen, auf welche man bei der untersuchung der linearen vertheilung galvanischer ströme geführt wird. **Annalen der Physik**, [S.l.], v. 148, p. 497–508, 1847.
- KOUZOU, A.; MOHAMMEDI, R. D. Optimal reconfiguration of a radial power distribution network based on Meta-heuristic optimization algorithms. **2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS 2015**, [S.l.], p. 1–6, 2015.
- LANDEROS, A.; KOZIEL, S.; ABDEL-FATTAH, M. F. Distribution network reconfiguration using feasibility-preserving evolutionary optimization. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, [S.l.], v. 7, n. 3, p. 589–598, may 2019.
- LI, Q. et al. Reconfiguration capability evaluation and optimization for distribution network based on spanning tree metrics. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CYBER-ENERGY SYSTEMS AND INTELLIGENT ENERGY (ICCSIE), 2022., 2023. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6.
- LIU, Y. Distribution Network Optimization Planning Based on Genetic Algorithms. **Journal of Physics: Conference Series**, [S.l.], v. 1881, n. 3, p. 032094, apr 2021.
- LUGER, G. **Artificial intelligence: structures and strategies for complex problem solving**. [S.l.]: Pearson Addison-Wesley, 2009.
- MAMEDE FILHO J. E MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. [S.l.]: LTC, 2016.
- MANOEL, C. A. S.; HAYASHI, C.; SILVA, L. H. d. A. e. A importância da ANEEL na prestação dos serviços de energia elétrica no Brasil. **Research, Society and Development**, [S.l.], v. 7, n. 7, p. e377276, mar 2018.

- MEGHANATHAN, N. **Centrality metrics for complex network analysis: emerging research and opportunities: emerging research and opportunities.** [S.l.]: IGI Global, 2018. (Advances in Wireless Technologies and Telecommunication (2327-3305)).
- MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms.** [S.l.]: MIT Press, 1998. (Complex Adaptive Systems).
- PAPADIMITRIOU, C. **Computational complexity.** [S.l.]: Addison-Wesley, 1994. (Theoretical computer science).
- PEGADO, R. A.; RODRIGUEZ, Y. P. M. Distribution Network Reconfiguration with the OpenDSS using Improved Binary Particle Swarm Optimization. **IEEE Latin America Transactions**, [S.l.], v. 16, n. 6, p. 1677–1683, jun 2018.
- PEREIRA, E. C.; BARBOSA, C. H.; VASCONCELOS, J. A. Distribution network reconfiguration using iterative branch exchange and clustering technique. **Energies**, [S.l.], v. 16, 3 2023.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do Trabalho Científico - 2ª Edição.** Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2013. 277 p.
- REDDY, A. S.; REDDY, M. D. Optimization of network reconfiguration by using Particle swarm optimization. In: IEEE 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, INTELLIGENT CONTROL AND ENERGY SYSTEMS (ICPEICES), 2016., 2016. **Anais...** IEEE, 2016. p. 1–6.
- ROSEN, K. **Discrete mathematics and its applications.** [S.l.]: McGraw-Hill, 2019.
- SOUIFI, H.; KAHOUALI, O.; Hadj Abdallah, H. Multi-objective distribution network reconfiguration optimization problem. **Electrical Engineering**, [S.l.], v. 101, n. 1, p. 45–55, apr 2019.
- SUN, S. et al. A novel formulation of radiality constraints for resilient reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 1337–1340, 2023.
- Van Der Mei, A.; DOOMERNIK, J. P. Artificial intelligence potential in power distribution system planning. In: CIRED - OPEN ACCESS PROCEEDINGS JOURNAL, 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. v. 2017, n. 1, p. 2115–2117.
- VESSELINOVA, N. et al. Learning combinatorial optimization on graphs: a survey with applications to networking. **IEEE Access**, [S.l.], v. 8, p. 120388–120416, 2020.
- WAZLAWICK, R. **Metodologia de pesquisa para ciência da computação.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- WOCHNIK, L. L.; SILVA, F. A. T.; BELATI, E. A. Valoração da Interrupção de Energia Elétrica Pela Perspectiva do Consumidor. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS 2020, 2020. **Anais...** SBA, 2020.
- WU, B.; CHAO, K. **Spanning trees and optimization problems.** [S.l.]: CRC Press, 2004. (Discrete Mathematics and Its Applications).

WU, X. et al. Distribution network reconfiguration based on improved particle swarm optimization algorithm. In: IEEE 7TH INFORMATION TECHNOLOGY AND MECHATRONICS ENGINEERING CONFERENCE (ITOEC), 2023., 2023. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2023. v. 7, p. 971–975.

ZHANG, J.; HUANG, T.; ZHANG, H. The reactive power optimization of distribution network based on an improved genetic algorithm. **Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference**, [S.l.], v. 2005, p. 1–4, 2005.

ZHOU, Z.; YU, Y.; QIAN, C. **Evolutionary learning**: advances in theories and algorithms. [S.l.]: Springer Singapore, 2019.

ZVEROVICH, V. **Modern applications of graph theory**. [S.l.]: Oxford University Press, 2021.