

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – SISTEMAS DE POTÊNCIA

Sabrina de Almeida Andrade

**Localização de Falhas Monofásicas em Sistemas de Distribuição utilizando
Algoritmos Genéticos**

Juiz de Fora
2025

Sabrina de Almeida Andrade

**Localização de Falhas Monofásicas em Sistemas de Distribuição utilizando
Algoritmos Genéticos**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado à Faculdade de
Engenharia da Universidade Federal de
Juiz de Fora como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Orientadora: D. Sc. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Juiz de Fora
2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Andrade, Sabrina de Almeida.

Localização de Falhas Monofásicas em Sistemas de Distribuição utilizando Algoritmos Genéticos / Sabrina de Almeida Andrade. -- 2025.

57 p. : il.

Orientadora: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2025.

1. Localização de falhas. 2. Análise de curto-circuitos. 3. Sistemas de Distribuição. 4. Algoritmo Genético. 5. OpenDSS. I. Araujo, Débora Rosana Ribeiro Penido, orient. II. Título.

Sabrina de Almeida Andrade

**Localização de Falhas Monofásicas em Sistemas de Distribuição utilizando
Algoritmos Genéticos**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado à Faculdade de
Engenharia da Universidade Federal de
Juiz de Fora como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Aprovado em 11 de março de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D. Sc. - Orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Leandro Ramos de Araujo, D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

RESUMO

Os sistemas de distribuição compõem uma parte fundamental do Sistema Elétrico de Potência, sendo responsáveis pela entrega de energia elétrica aos consumidores. Devido à complexidade desses sistemas, é necessário que eles apresentem um bom nível de confiabilidade, garantindo o atendimento das cargas na maior parte do tempo possível. Um dos problemas mais comuns que comprometem essa confiabilidade são as faltas, que podem interromper o fornecimento de energia por períodos consideráveis, afetando a rotina dos consumidores. Assim, torna-se importante o desenvolvimento de metodologias para a localização de faltas de maneira rápida, eficiente e precisa. Diante desse contexto, o presente trabalho propõe um método para a localização de faltas utilizando Algoritmos Genéticos. O método baseia-se na simulação de curto-circuitos monofásicos no sistema com a medição das correntes em pontos específicos da rede na situação de falta (chamadas correntes reais). Posteriormente, por meio de função objetivo de Algoritmo Genético, busca-se a partir de simulações de curtos, definidos pelos parâmetros do AG, diminuir o erro entre as correntes reais e calculadas (pelo AG), determinando a barra, a fase e a impedância de falta para cada caso de estudo analisado. As simulações e a obtenção dos resultados foram realizadas com os softwares OpenDSS e MATLAB®, utilizando o sistema IEEE 13 Barras. Os resultados mostraram precisão e eficácia do método proposto.

Palavras-chave: Localização de faltas; Análise de curto-circuitos; Sistemas de Distribuição; Algoritmo Genético; OpenDSS.

ABSTRACT

Distribution systems are a fundamental part of the Electric Power System, being responsible for delivering electrical energy to consumers. Due to the complexity of these systems, they must present a good level of reliability, ensuring the continuous supply of loads for the majority of the time. One of the most common problems that compromise this reliability are faults, which can interrupt the energy supply for considerable periods, affecting consumers's routines. Therefore, developing methodologies for fast, efficient, and accurate fault location is essential. In this context, the present work proposes a method for fault location using Genetic Algorithms. The method is based on the simulation of single-phase short circuits in the system, calculating the currents at specific points in the network under fault conditions (referred to as simulated currents). Subsequently, using the objective function of a Genetic Algorithm, simulations of faults—defined by the GA parameters—are performed to minimize the error between the actual and calculated currents (by the GA), determining the bus, phase, and fault impedance for each analyzed case study. The simulations and result acquisition were carried out using the OpenDSS and MATLAB® software, applying the IEEE 13-Bus system. The results demonstrated the accuracy and effectiveness of the proposed method.

Keywords: Fault location; Short circuit analysis; Distribution systems; Genetic Algorithm; OpenDSS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema Elétrico de Potência (Power System).....	15
Figura 2 - Curva de custo por confiabilidade (elaboração da autora).....	17
Figura 3 - Diagrama unifilar de sistema elétrico de potência (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010).....	21
Figura 4 - Redes de distribuição primária e secundária aéreas (INBRAEP, 2021). ..	22
Figura 5 - Transformador trifásico de distribuição (ENGENHARIA, 2023).	23
Figura 6 - Disjuntor de média tensão (ENGENHARIA, RTT, 2018).....	23
Figura 7 - Chave fusível (ENGENHARIA, 2023).	24
Figura 8 - Chave faca (ENGENHARIA, 2023).....	24
Figura 9 - Chave seccionadora (SIELETRIC).....	24
Figura 10 - Religador (ENGENHARIA, 2023).....	25
Figura 11 - Regulador de tensão (ENGENHARIA, 2023).....	25
Figura 12 - Banco de capacitores (ENGENHARIA, 2023).....	26
Figura 13 - Para-raio (ELÉTRICOS, 2018).....	26
Figura 14 - Transformador de corrente (Catálogo de Transformadores, 2021).....	26
Figura 15 - Transformador de potencial (Catálogo de Transformadores, 2021).....	27
Figura 16 - Logo do OpenDSS.	27
Figura 17 - Estrutura do software OpenDSS (FREITAS, 2015).....	28
Figura 18 - Logo do MATLAB.....	29
Figura 19 - Representação do AG por fluxograma (FILHO, 2023).	31
Figura 20 - Modelo do curto-circuito trifásico (FREITAS, 2017).	33
Figura 21 - Modelo em paralelo do curto-circuito bifásico (FREITAS, 2017).....	34
Figura 22 - Modelo do curto-circuito bifásico - terra (FREITAS, 2017).....	35
Figura 23 - Modelo do curto-circuito monofásico (FREITAS, 2017).	36
Figura 24 - Topologia de uma falta trifásica no OpenDSS (EPRI).....	37
Figura 25 - Falta monofásica na fase 3 (ou fase c) conectada na barra MyBus (EPRI).	37
Figura 26 - Exemplo: Comportamento de Penalidade.....	44
Figura 27 - Diagrama unifilar do Sistema IEEE 13 Barras (TECHNOLOGIES, 2024).	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequências típicas de ocorrência de curto-circuito (SATO e FREITAS, 2015).....	37
Tabela 2 - Casos estudados para a metodologia proposta.	46
Tabela 3 - Resultados do Caso 1.....	46
Tabela 4 - Resultados do Caso 2.....	47
Tabela 5 - Resultados do Caso 3.....	48
Tabela 6 - Resultados do Caso 4.....	48
Tabela 7 - Resultados do Caso 5.....	49
Tabela 8 - Resultados do Caso 6.....	50
Tabela 9 - Resultados do Caso 7.....	50
Tabela 10 - Resultados do Caso 8.....	51
Tabela 11 - Resultados do Caso 9.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
PRODIST	Regras e Procedimentos de Distribuição
DSS	Distribution System Simulator
GD	Geração Distribuída
COM	Component Object Model
MATLAB	MATrix LABoratory
VBA	Visual Basic for Applications
AG	Algoritmo Genético
FOB	Função Objetivo

LISTA DE SÍMBOLOS

V_a	Tensão na fase-terra a
V_b	Tensão na fase-terra b
V_c	Tensão na fase-terra c
I_a	Corrente na fase a
I_b	Corrente na fase b
I_c	Corrente na fase c
V_{a0}	Componente de sequência zero da fase-terra na fase a
V_{a1}	Componente de sequência positiva da fase-terra na fase a
V_{a2}	Componente de sequência negativa da fase-terra na fase a
I_{a0}	Componente de sequência zero da corrente na fase a
I_{a1}	Componente de sequência positiva da corrente na fase a
I_{a2}	Componente de sequência negativa da corrente na fase a
α	Fator rotacional
T	Matriz de transformação das componentes de sequência
E_{a1}	Tensão de Thévenin de sequência positiva
Z_1	Impedância de sequência positiva
Z_2	Impedância de sequência negativa
Z_0	Impedância de sequência zero
Z_f	Impedância de falta
$I_{\text{curto-circuito}}$	Corrente de curto-circuito
f_{ob}	Função objetivo do problema de otimização
ΔI_a	Módulo da diferença entre a corrente em situação de falta calculada e real na fase A
ΔI_b	Módulo da diferença entre a corrente em situação de falta calculada e real na fase B
ΔI_c	Módulo da diferença entre a corrente em situação de falta calculada e real na fase C
$I_{a,AG}$	Corrente em situação de falta calculada na fase A
$I_{a,real}$	Corrente em situação de falta real na fase A
$I_{b,AG}$	Corrente em situação de falta calculada na fase B
$I_{b,real}$	Corrente em situação de falta real na fase B

$I_{C,AG}$	Corrente em situação de falta calculada na fase C
$I_{C,real}$	Corrente em situação de falta real na fase C

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	15
1.2	MOTIVAÇÕES	17
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
1.4	OBJETIVOS	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	PREMISSAS BÁSICAS.....	21
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
2.2	REDES DE DISTRIBUIÇÃO	21
2.2.1	EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	22
2.3	OPENDSS	27
2.4	MATLAB®	28
2.4.1	TOOLBOX GLOBAL OPTIMIZATION	29
2.5	ALGORITMO GENÉTICO	30
2.6	ANÁLISE DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO	31
2.6.1	Componentes Simétricas.....	32
2.6.2	Tipos de Curto-circuito em Sistemas de Distribuição.....	33
2.6.3	Frequência dos Tipos de Curto-circuito	36
2.6.4	Modelagem de Faltas no OpenDSS	37
3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	38
3.1	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	38
3.2	MÉTODO DE SOLUÇÃO	39
3.2.1	Primeira Etapa	39
3.2.2	Segunda Etapa	40
3.2.2.1	Definição dos Indivíduos (Representação das Soluções).....	41
3.2.2.2	Sorteio da População Inicial	42

3.2.2.3	Avaliação da Função Objetivo (Fitness Function).....	42
3.2.2.4	Seleção.....	42
3.2.2.5	Cruzamento (Crossover).....	43
3.2.2.6	Mutação.....	43
3.2.2.7	Critério de Parada.....	43
3.2.2.8	Solução Final.....	44
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	45
4.1	SISTEMA TESTE IEEE 13 BARRAS.....	45
4.2	ESTUDOS DE CASO.....	45
4.3	RESULTADOS OBTIDOS.....	46
4.3.1	Resultados do Caso 1: Barra de falta no início do sistema (650), fase de falta A e linha de medição no início do sistema (650-632).....	46
4.3.2	Resultados do Caso 2: Barra de falta no início do sistema (650), fase de falta A e linha de medição no meio do sistema (670-671)	47
4.3.3	Resultados do Caso 3: Barra de falta no início do sistema (650), fase de falta A e linha de medição no fim do sistema (671-680)	48
4.3.4	Resultados do Caso 4: Barra de falta no meio do sistema (692), fase de falta B e linha de medição no início do sistema (650-632).....	48
4.3.5	Resultados do Caso 5: Barra de falta no meio do sistema (692), fase de falta B e linha de medição no meio do sistema (632-670)	49
4.3.6	Resultados do Caso 6: Barra de falta no meio do sistema (692), fase de falta B e linha de medição no fim do sistema (671-680)	50
4.3.7	Resultados do Caso 7: Barra de falta no fim do sistema (680), fase de falta A e linha de medição no início do sistema (650-632).....	50
4.3.8	Resultados do Caso 8: Barra de falta no fim do sistema (680), fase de falta A e linha de medição no meio do sistema (632-670)	51
4.3.9	Resultados do Caso 9: Barra de falta no fim do sistema (680), fase de falta A e linha de medição no fim do sistema (671-680)	52
5	CONCLUSÃO	53

5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	53
	REFERÊNCIAS.....	55

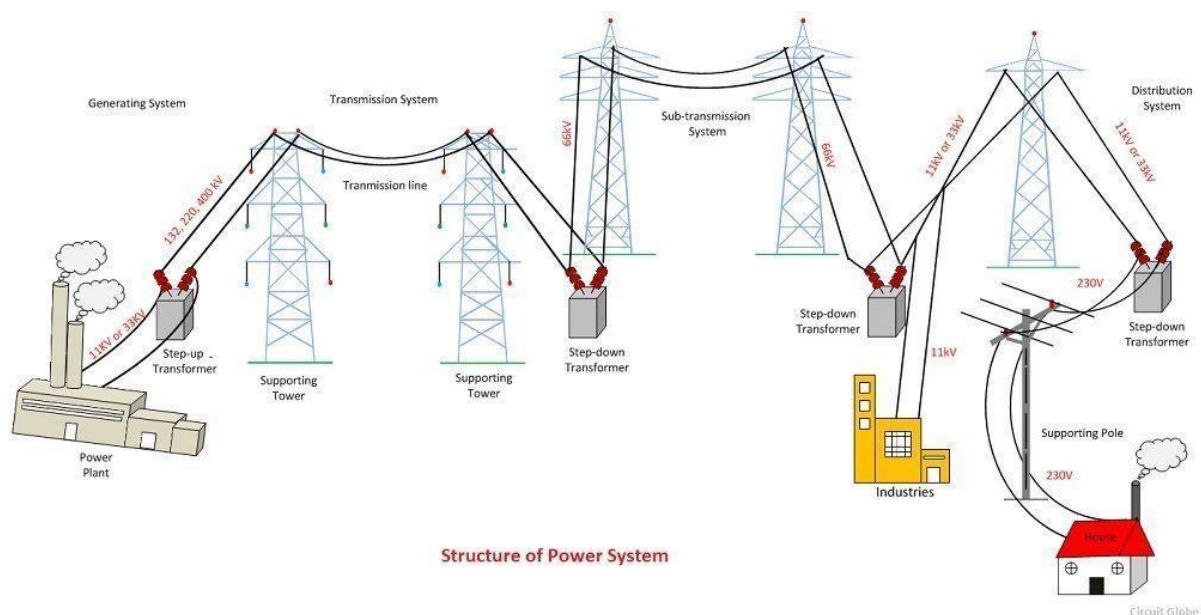
1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O Sistema Elétrico de Potência (SEP), representado na Figura 1, é responsável pela entrega de energia elétrica aos consumidores no instante em que a energia for solicitada, abrange as etapas de geração, transmissão e distribuição.

O sistema de geração é composto por unidades geradoras encarregadas de converter a energia existente na natureza em energia elétrica. O sistema de transmissão tem como função conduzir a energia do local onde foi gerada para os locais de consumo. Já o sistema de distribuição é responsável pela redução da tensão para níveis seguros e pela entrega de energia às cargas dos consumidores residenciais, comerciais e industriais.

Figura 1 - Sistema Elétrico de Potência (Power System).



No Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN) é o conjunto de subestações e linhas de transmissão de grande porte que interligam as regiões elétricas do país e conectam as usinas de geração aos centros de consumo. Este sistema está sob a coordenação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A parte da distribuição engloba um vasto conjunto de equipamentos, como disjuntores, fusíveis, transformadores e barramentos, que são fundamentais para a

operação e fornecimento contínuo de energia pelas concessionárias de distribuição em todas as localidades do país. Enel, Light, Energisa e Cemig são exemplos de concessionárias brasileiras.

O serviço prestado pelas distribuidoras está submetido ao monitoramento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cuja função é regular e fiscalizar a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica no Brasil. Entre suas diversas atribuições, a ANEEL assegura que as concessionárias cumpram regras definidas. Nesse contexto, destacam-se os Procedimentos de Distribuição (Prodist), que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e ao desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist), 2022).

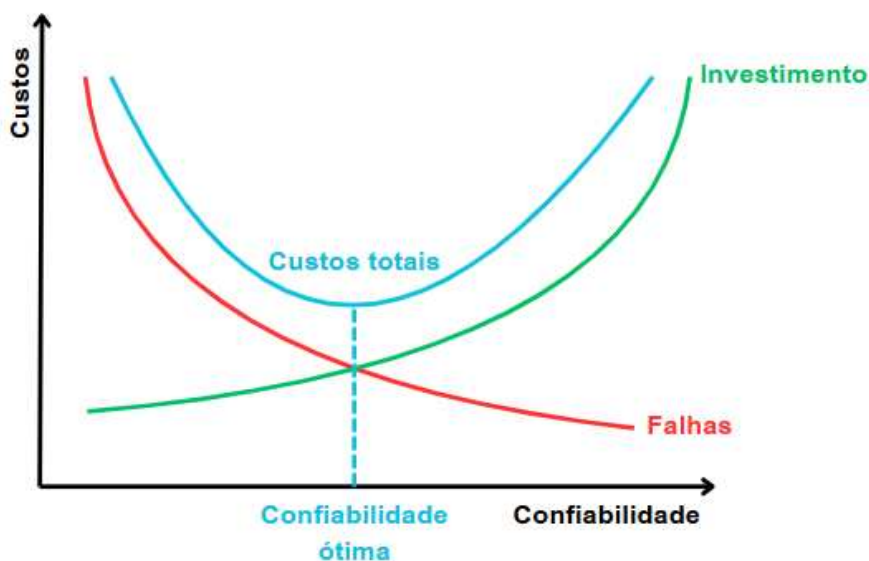
Além disso, a ANEEL avalia a continuidade do fornecimento por meio de indicadores coletivos de continuidade que mensuram a duração e a frequência das interrupções ocorridas: DEC (Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora) e FEC (Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora). Esses indicadores representam, respectivamente, o intervalo de tempo médio que cada consumidor ficou sem energia elétrica durante o período de avaliação e o número médio de interrupções sofridas por unidade consumidora no mesmo período (FERREIRA e NOBREGA, 2017).

A existência desses indicadores destaca a importância de um sistema que garanta a continuidade do serviço prestado, algo essencial não apenas para as concessionárias e para a ANEEL, mas, principalmente, para os consumidores. Assim, torna-se de interesse comum a garantia de um serviço altamente confiável nos sistemas de distribuição.

No entanto, para alcançar esse objetivo, é necessário investir na infraestrutura do sistema, com foco no aumento da segurança e redução de falhas, o que inevitavelmente eleva os custos.

Na análise econômica da confiabilidade em sistemas elétricos, tem-se a curva de custo por confiabilidade demonstrada na Figura 2. Essa curva pode ser aplicada em análises de sistemas de distribuição. Ela ilustra a seguinte relação: custos baixos tendem a resultar em menor confiabilidade, com maior número de falhas e interrupções, enquanto custos elevados tendem a proporcionar sistemas altamente seguros, mas com investimentos significativamente maiores.

Figura 2 - Curva de custo por confiabilidade (elaboração da autora).



Portanto, encontrar o ponto de equilíbrio entre custo e confiabilidade é essencial para otimizar os investimentos na rede elétrica. Atualmente, as distribuidoras investem continuamente em tecnologias, estudos e pesquisas que possibilitem a aplicação de equipamentos e técnicas para reduzir falhas e defeitos por um custo viável, procurando trabalhar perto da confiabilidade ótima (ideal). Essa abordagem não apenas aumenta a eficiência do sistema, como também promove maior satisfação para os consumidores.

1.2 MOTIVAÇÕES

A partir da compreensão da importância da confiabilidade, é necessário definir as motivações para a pesquisa de detecção, localização e solução de faltas.

As faltas podem ser causadas por ações naturais ou externas, como descargas atmosféricas, quedas de árvores, acidentes, equipamentos desgastados e danificados, ou falhas humanas decorrentes de manutenções ou operações inadequadas.

O estudo de curto-circuito visa, principalmente, a obtenção de correntes e tensões em um sistema elétrico de potência durante a ocorrência de um defeito em um de seus pontos. Determinar as sobrecorrentes e variações de tensão é de grande importância para:

- Reduzir o tempo das interrupções no fornecimento de energia.

- Proteger os componentes do sistema, como transformadores e linhas, contra sobrecorrentes.
- Especificar adequadamente os equipamentos de proteção utilizados no sistema.
- Proteger os usuários.

Conforme descrito em KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA (2010), essas análises são fundamentais para garantir a eficiência e segurança do sistema elétrico.

A localização rápida e eficiente das faltas, aliada à análise dos impactos dos curtos-circuitos na rede, reduz o tempo de interrupção e as perdas econômicas associadas, além de aumentar a segurança e a confiabilidade dos sistemas de distribuição. Essa necessidade se torna uma das principais motivações para o desenvolvimento deste trabalho.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para este trabalho, o campo de estudo de maior interesse está relacionado com métodos de localização de faltas em sistemas de distribuição. Assim, as seguintes pesquisas foram utilizadas como referência para o desenvolvimento deste trabalho:

Em RODRIGUES (2021) o autor aborda a crescente complexidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica e ressalta a importância de práticas de manutenção e operação adequadas, com foco na detecção e localização de faltas. A pesquisa apresentada utiliza componentes de sequência zero para identificar faltas de alta impedância (HIFs). Por meio de medições fasoriais e simulações realizadas no software PSCAD®, o estudo avalia as características específicas das redes e propõe um método eficiente para a localização de faltas monofásicas, destacando a precisão e a robustez dos resultados obtidos.

No artigo proposto por FREITAS, ZVIETCOVICH, *et al.* (2021), é proposta uma metodologia baseada em meta-heurísticas, especificamente a Otimização por Nuvem de Partículas, para localizar faltas em sistemas de distribuição. A abordagem utiliza informações dos medidores instalados nas redes para avaliar diferentes tipos de curtos-circuitos, além de considerar variações na impedância de falta. As simulações realizadas nas redes de 33 e 202 barras indicaram que o método proposto é eficiente, apresentando elevada precisão e baixo tempo de processamento, abrindo campo para a aplicabilidade da técnica para redes de distribuição complexas.

No estudo de OU, FENG, *et al.* (2022), é proposto um método para localização de faltas em redes de distribuição com geração distribuída, utilizando um algoritmo genético de múltiplas populações. A metodologia busca superar as limitações de convergência prematura e lenta associadas aos algoritmos genéticos tradicionais. Por meio de populações múltiplas e conservação de álgebra individual, o algoritmo garante a localização precisa da zona de falta, mesmo em cenários complexos. Simulações numéricas demonstraram a validade e precisão do modelo, destacando sua aplicação em sistemas com geração distribuída e sua capacidade de melhorar significativamente a velocidade de solução.

1.4 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um método de localização de faltas em sistemas de distribuição. O sistema teste IEEE 13 barras será utilizado para testar a eficácia do método.

A metodologia consiste em utilizar um método heurístico para estimar o local, a fase e o valor da resistência de falta em um sistema de distribuição, utilizando valores de corrente simulados como se fossem oriundos de medidores reais (amostrados durante a falta). Os valores de corrente calculados pelo método heurístico para cada situação de falta simulada serão comparados com os valores de corrente reais (emulados), amostrados durante o momento da falta. Será considerada uma solução do problema quando a diferença das grandezas associadas a falta calculada e a real atingirem um valor próximo de zero.

Além disso, o trabalho visa analisar o impacto da variação da resistência de falta sobre as correntes medidas, considerando o local da barra de ocorrência da falta e a posição do medidor no sistema.

Para atingir esses objetivos, foram utilizados os softwares OpenDSS e MATLAB® no desenvolvimento do trabalho.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 5 capítulos, organizados da seguinte forma:

O capítulo 1 aborda conceitos abrangentes sobre o SEP, apresentando temas essenciais e motivações para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 2, são introduzidas as premissas básicas que fundamentam os capítulos seguintes, incluindo as características de redes de distribuição, as faltas em sistemas de distribuição, bem como definições sobre os softwares e métodos de otimização utilizados.

O capítulo 3 apresenta as formulações matemáticas e o método de solução utilizado no estudo.

O capítulo 4 exhibe os resultados coletados durante as simulações realizadas.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões e considerações finais do trabalho.

2 PREMISSAS BÁSICAS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem como objetivo apresentar fundamentos teóricos essenciais para a compreensão do método proposto utilizado para a localização de faltas em sistemas de distribuição.

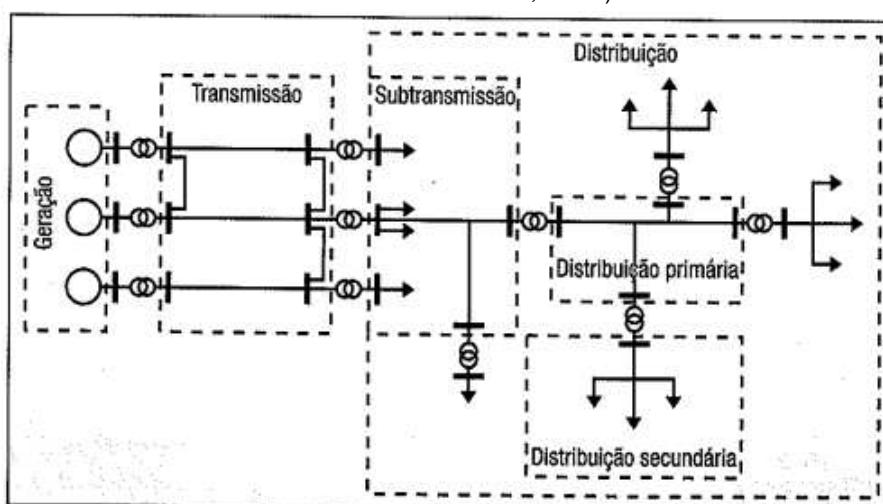
Inicialmente, são discutidos aspectos e características das redes de distribuição, seguidos pelos softwares e o método de otimização utilizados.

Por fim, são apresentadas algumas definições sobre faltas em sistemas de distribuição, destacando sua importância no contexto deste trabalho.

2.2 REDES DE DISTRIBUIÇÃO

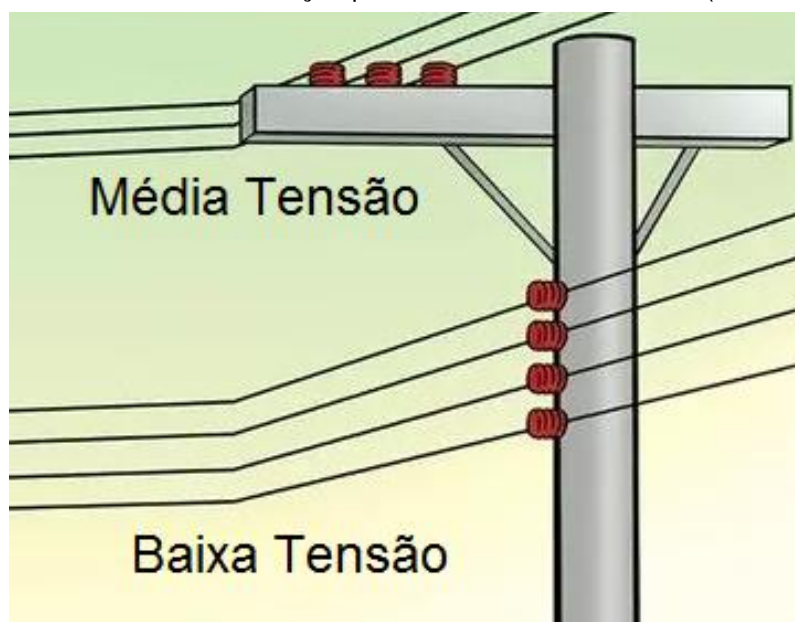
As redes de distribuição são o segmento do SEP responsável por receber a energia proveniente do sistema de transmissão e, por meio de subestações, reduzir os níveis de tensão para entregar a energia aos consumidores. Essas redes podem ser do tipo aérea, sustentadas por postes, ou subterrânea, com cabos e fios localizados no subsolo, instalados dentro de dutos subterrâneos. Segundo a ANEEL, as redes de distribuição podem operar em diferentes níveis de tensão: baixa tensão (igual ou inferior a 2,3kV), média tensão (acima de 2,3kV e abaixo de 69kV) e alta tensão (acima de 69kV e abaixo de 230kV). Na Figura 3, tem-se um diagrama do SEP com destaque para a rede de distribuição.

Figura 3 - Diagrama unifilar de sistema elétrico de potência (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010).



Os sistemas de distribuição podem ser divididos em dois escopos principais: distribuição primária e distribuição secundária. A distribuição primária, geralmente realizada em média tensão (por exemplo, 13,8kV), é responsável por atender os consumidores primários, como indústrias de médio porte, conjuntos comerciais e instalações de iluminação pública, além de alimentar os transformadores de distribuição que suprem a rede secundária ou de baixa tensão. Por sua vez, a distribuição secundária recebe a energia da rede primária e atende os consumidores residenciais, pequenos comércios e indústrias na rede de baixa tensão, com níveis de tensão em 127/220V ou 220/380V (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010). A Figura 4 apresenta uma representação de redes primárias e secundárias.

Figura 4 - Redes de distribuição primária e secundária aéreas (INBRAEP, 2021).



2.2.1 EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Além dos cabos presentes na rede, há diversos outros equipamentos fundamentais para a operação, proteção e medição do sistema de distribuição. Entre eles, destacam-se:

- **Transformadores:** apresentados na Figura 5, são utilizados para adequar os níveis de tensão entre a alimentação e a rede, ou entre a rede e as cargas.

Figura 5 - Transformador trifásico de distribuição (ENGENHARIA, 2023).



Trifásico

- **Disjuntores:** apresentados na Figura 6, são responsáveis por estabelecer e interromper correntes de carga e de curto-circuito no sistema.

Figura 6 - Disjuntor de média tensão (ENGENHARIA, RTT, 2018).



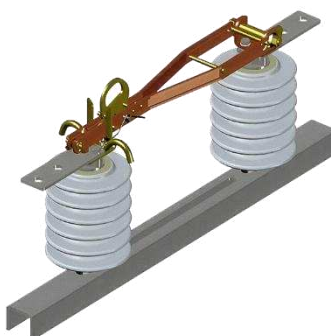
- **Chaves fusíveis:** apresentadas na Figura 7, são utilizadas para realizar manobras sem carga na rede e para proteger o circuito em caso de faltas.

Figura 7 - Chave fusível (ENGENHARIA, 2023).



- **Chaves faca:** apresentadas na Figura 8, são projetadas para seccionar o circuito sem carga.

Figura 8 - Chave faca (ENGENHARIA, 2023).



- **Chaves seccionadoras:** apresentadas na Figura 9, são empregadas para realizar manobras em carga.

Figura 9 - Chave seccionadora (SIELETRIC).



- **Religadores:** apresentados na Figura 10, são utilizados para estabelecer e interromper correntes em condições de carga e curto-circuito.

Figura 10 - Religador (ENGENHARIA, 2023).



- **Reguladores de tensão:** apresentados na Figura 11, são utilizados para regular a tensão e melhorar o perfil da tensão ao longo da rede.

Figura 11 - Regulador de tensão (ENGENHARIA, 2023).



- **Bancos de capacitores:** apresentados na Figura 12, são usados para compensação de energia reativa, com o objetivo de melhorar o nível de tensão e o fator de potência.

Figura 12 - Banco de capacitores (ENGENHARIA, 2023).



- **Para-raios:** apresentados na Figura 13, eles protegem a rede contra sobretensões provenientes de descargas atmosféricas de curta duração e manobras no sistema elétrico de longa duração.

Figura 13 - Para-raio (ELÉTRICOS, 2018).



- **Transformadores de corrente:** apresentados na Figura 14, eles reduzem a corrente de níveis elevados para níveis adequados à realização de medições por instrumentos específicos.

Figura 14 - Transformador de corrente (Catálogo de Transformadores, 2021).



- **Transformadores de potencial:** apresentados na Figura 15, eles reduzem a tensão de altos valores para níveis adequados à realização de medições por instrumentos específicos.

Figura 15 - Transformador de potencial (Catálogo de Transformadores, 2021).

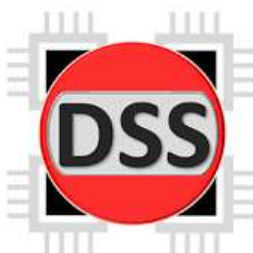


Além de toda a complexidade do sistema, ainda existem problemas que afetam diariamente as redes de distribuição, como o desequilíbrio de cargas, a variação de tensão, as perdas e a, já mencionada, ocorrência de faltas.

2.3 OPENDSS

O Open Distribution System Simulator (OpenDSS) é um software voltado para a simulação de sistemas elétricos de distribuição de energia. Ele suporta a maior parte das análises em regime permanente senoidal (RMS) realizadas para o planejamento e estudos de sistemas de distribuição. Além disso, ele é capaz de realizar novos tipos de análises necessárias para atender às demandas futuras, especialmente relacionadas às Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grids*). Muitos dos recursos do programa foram desenvolvidos com foco na análise de geração distribuída (GD), bem como na eficiência energética e na análise harmônica (RADATZ, ROCHA e SEXAUER, 2016). A Figura 16 apresenta o logotipo do OpenDSS.

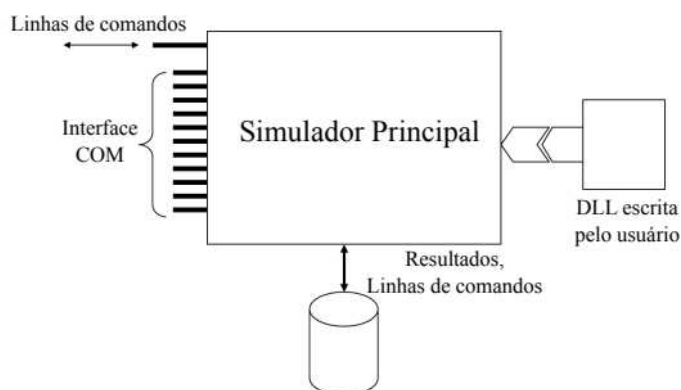
Figura 16 - Logo do OpenDSS.



Os principais modos de solução do OpenDSS incluem: fluxo de potência instantâneo (SnapShot), fluxo de potência diário, fluxo de potência anual, análise harmônica, análise dinâmica e estudos de curto-circuito (RADATZ, ROCHA e SEXAUER, 2016).

O OpenDSS está disponível em duas versões principais: uma versão autônoma e uma com servidor COM (Component Object Model). Na versão autônoma, o OpenDSS oferece uma interface de usuário que possibilita a descrição de circuitos, a execução de soluções e a visualização de resultados. Já na versão COM, o software pode ser controlado por diferentes plataformas, oferecendo maior flexibilidade e integração com outras ferramentas, como MATLAB® (MATrix LABoratory), Python e até aplicativos do pacote Microsoft Office, como o Visual Basic for Applications (VBA), ampliando sua aplicação em diferentes contextos (RADATZ, ROCHA e SEXAUER, 2016). A configuração do OpenDSS está apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Estrutura do software OpenDSS (FREITAS, 2015).



2.4 MATLAB®

O MATLAB® (MATrix LABoratory) é uma linguagem de programação interativa amplamente utilizada para cálculos numéricos e análises de dados. Ele oferece um ambiente de desenvolvimento integrado (Integrated Development Environment - IDE) e um extenso conjunto de bibliotecas (toolboxes). Essas bibliotecas são aplicáveis em diversas áreas, como solução de equações diferenciais, estatística, processamento de sinais, otimização, finanças, entre outras (MATLAB: O que é e para que serve, 2022). A Figura 18 apresenta o logotipo do OpenDSS.

Figura 18 - Logo do MATLAB.



Um dos principais diferenciais do MATLAB® é sua base orientada a matrizes, que elimina a necessidade de dimensionamento prévio. Essa característica possibilita o uso de funções avançadas de forma mais ágil, reduzindo significativamente o tempo necessário para o desenvolvimento, quando comparado a outras linguagens de programação.

O software foi desenvolvido inicialmente para atender às demandas de engenheiros e cientistas, mas sua facilidade de uso ampliou seu alcance. Devido à sua estrutura versátil, capacidade de expansão e flexibilidade, o MATLAB® também suporta ferramentas voltadas para elementos finitos, inteligência artificial, depuração de processamento em tempo real e muitas outras aplicações. Além disso, a simplicidade dos recursos visuais do MATLAB® é uma vantagem significativa para usuários que necessitam de resultados rápidos e eficientes.

Portanto, por meio do programa, é possível: desenvolver matrizes, construir gráficos em até três dimensões, manipular funções específicas e variáveis simbólicas, trabalhar com números reais e complexos, analisar e visualizar dados, implementar e projetar algoritmos, criar interfaces e aplicativos de programação, entre outras funcionalidades.

2.4.1 TOOLBOX GLOBAL OPTIMIZATION

A *Global Optimization Toolbox* é uma ferramenta que oferece métodos avançados para a busca de soluções globais em problemas que apresentam múltiplos máximos e mínimos. Entre os solucionadores disponíveis estão: substituição (*surrogate*), busca por padrões (*pattern search*), algoritmo genético (*genetic algorithm*), enxame de partículas (*particle swarm*), recozimento simulado (*simulated annealing*), *multistart* e *global search* (Global Optimization Toolbox, 2017).

Esses solucionadores são projetados para resolver problemas de otimização cujas funções objetivo ou de restrição podem ser contínuas, descontínuas, estocásticas, não possuir derivadas, ou até mesmo envolver simulações ou funções do tipo caixa-preta (black-box), nas quais determinados parâmetros podem apresentar valores indefinidos.

Os solucionadores do tipo algoritmo genético e busca por padrões oferecem a possibilidade de personalização algorítmica. Por exemplo, é possível criar variantes personalizadas do algoritmo genético ao modificar a população inicial e as opções de escala de aptidão ou definir funções específicas para seleção de pais, cruzamento e mutação. Essa flexibilidade permite adaptar os métodos às características específicas de cada problema de otimização (Global Optimization Toolbox, 2016).

2.5 ALGORITMO GENÉTICO

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são métodos de otimização baseados nos princípios da evolução natural, inspirados na teoria de seleção natural de Charles Darwin. Introduzidos por John Holland em 1975, os AGs formalizam e aplicam rigorosamente processos adaptativos observados em sistemas naturais para resolver problemas artificiais simulados computacionalmente. Esses algoritmos combinam mecanismos de busca direcionada e aleatória para encontrar o ponto ótimo de funções, sendo especialmente úteis em problemas complexos que envolvem não linearidades, múltiplos picos e descontinuidades (FILHO, 2023).

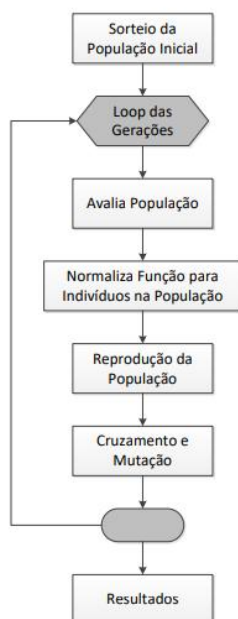
Os AGs se diferenciam dos métodos tradicionais de busca e otimização em quatro principais características: trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros em vez dos próprios parâmetros, operam com uma população de soluções em vez de focar em uma única alternativa, utilizam informações da função objetivo (FOB) e não dependem de suas derivadas ou conhecimento auxiliar adicional e empregam regras de transição probabilísticas para explorar o espaço de soluções, em vez de regras determinísticas (Algoritmos Genéticos, 2021).

No entanto, a aplicação de AGs exige uma função fitness (função de avaliação) bem definida, e o tempo de convergência pode ser proibitivo em algumas aplicações.

A estrutura básica de um AG é composta por uma população de possíveis soluções (indivíduos) que evoluem ao longo de gerações. Cada indivíduo é representado por uma *string* (cromossomo) formada por genes que codificam os

parâmetros do problema. A evolução ocorre por meio de três operadores principais: reprodução, cruzamento e mutação. Esses operadores permitem que os indivíduos mais aptos, conforme avaliados por uma função fitness, sejam selecionados para formar novas gerações. Na figura 19 apresenta-se um fluxograma genérico de AG.

Figura 19 - Representação do AG por fluxograma (FILHO, 2023).



Os AGs são amplamente utilizados em diversas áreas, incluindo engenharia, ciência da computação, ciências naturais e biologia, demonstrando grande eficiência em problemas onde outros métodos seriam inviáveis.

2.6 ANÁLISE DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência estão sujeitos a ocorrências de faltas aleatórias capazes de comprometer a operação e funcionamento da rede. A análise de curto-circuitos fornece informações essenciais, como as correntes nas linhas e tensões nas barras durante o momento da falta. Caso os curto-circuitos não sejam removidos rapidamente, os danos aos equipamentos que compõem o sistema podem ser significativos.

Portanto, é de extrema importância conhecer as correntes de faltas para que o dimensionamento dos equipamentos de proteção esteja adequado aos parâmetros

dos sistemas. Além disso, essas informações são fundamentais para a aplicação de técnicas de localização de faltas, que constituem o objetivo deste trabalho.

2.6.1 Componentes Simétricas

Antes que os tipos de faltas sejam apresentados, é necessário introduzir o conceito de componentes simétricas. A presença de curto-circuitos no sistema elétrico causa desbalanceamentos e torna as análises mais complexas. Em 1915, C. L. Fortescue propôs uma ferramenta analítica que permite a decomposição de qualquer sistema de “n” fases desequilibradas em suas respectivas componentes simétricas equilibradas.

No caso do sistema trifásico, que será analisado neste trabalho, e de acordo com o teorema proposto por Fortescue, um sistema trifásico de três fasores desbalanceados pode ser decomposto em três sistemas trifásicos de fasores balanceados. Essas componentes são chamadas de componentes simétricas positiva, representada pelo índice 1, negativa, representada pelo índice 2, e zero, representada pelo índice 0 (KINDERMANN, 1997).

De forma matricial, as representações das expressões de tensão e corrente podem ser descritas da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{\alpha}^2 & \dot{\alpha} \\ 1 & \dot{\alpha} & \dot{\alpha}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{\alpha}^2 & \dot{\alpha} \\ 1 & \dot{\alpha} & \dot{\alpha}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

A matriz T , conhecida como matriz de transformação das componentes de sequência nos fasores originais do sistema desbalanceado, é representada por:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{\alpha}^2 & \dot{\alpha} \\ 1 & \dot{\alpha} & \dot{\alpha}^2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$\dot{\alpha}$, o operador rotacional, é representado pelo termo:

$$\dot{\alpha} = 1 \angle 120^\circ \quad (2.4)$$

2.6.2 Tipos de Curto-circuito em Sistemas de Distribuição

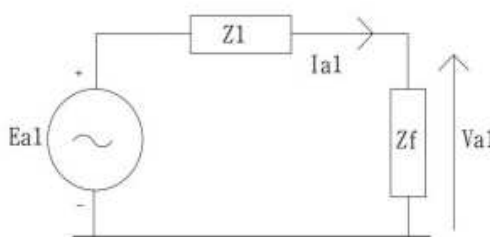
A seguir, serão descritos os tipos de curto-circuito em um sistema de distribuição radial. Esse sistema é caracterizado por sua simplicidade e baixo custo, sendo composto por barras alimentadas a partir de um único alimentador, com o fluxo de potência seguindo um único caminho até as cargas. No entanto, trata-se do sistema menos eficiente em termos operacionais. Este será o tipo de sistema analisado neste trabalho pois a maioria dos sistemas de distribuição são radiais.

• Curto-circuito Trifásico

Para analisar os tipos de curto-circuito é essencial determinar o módulo das correntes de curto-circuito. A partir do ponto de ocorrência da falta, pode-se representar o sistema elétrico por meio do equivalente de Thévenin.

No caso de um curto-circuito trifásico, as correntes são balanceadas, o que permite considerar apenas a componente simétrica positiva (KINDERMANN, 1997). Neste contexto, o circuito equivalente é representado por uma tensão de Thévenin E_{a1} , uma impedância de Thévenin de sequência positiva Z_1 e uma impedância de falta Z_f .

Figura 20 - Modelo do curto-circuito trifásico (FREITAS, 2017).



Dessa forma, a corrente de curto-circuito trifásico para o circuito equivalente mostrado na Figura 20 é expressa pela seguinte equação:

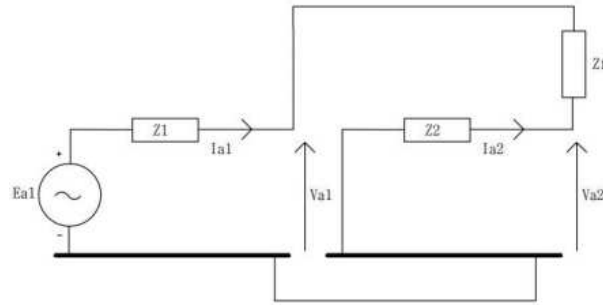
$$I_{\text{curto-circuito}} = I_{a1} = I_a = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_f} \quad (2.5)$$

• Curto-circuito Bifásico

No curto-circuito bifásico, é considerado apenas o contato entre duas fases, sem a interferência da terra. Devido ao fato de o sistema de distribuição estar distante da geração, a impedância de sequência positiva Z_1 é igual a impedância de sequência

de negativa Z_2 , e os dois modelos das componentes são conectados em paralelo. O circuito equivalente é descrito por:

Figura 21 - Modelo em paralelo do curto-circuito bifásico (FREITAS, 2017).



A partir deste circuito, observa-se que:

$$I_{a2} = -I_{a1} \quad (2.6)$$

$$I_{a0} = 0 \quad (2.7)$$

Portanto, a corrente de curto-circuito bifásico para o circuito equivalente na Figura 21 é dada por:

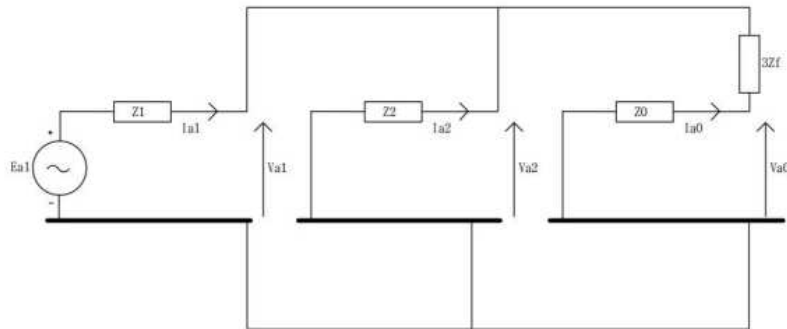
$$I_{curto-circuito} = I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.8)$$

Aplicando a matriz de transformação T , descrita na equação 2.2, obtém-se as correntes nas fases do sistema.

• Curto-circuito Bifásico – Terra

No curto-circuito bifásico – terra, há o contato de duas fases com a terra. Neste caso, tem-se a presença da componente de sequência zero, representada pela impedância Z_0 e o circuito equivalente é ilustrado por:

Figura 22 - Modelo do curto-circuito bifásico - terra (FREITAS, 2017).



As correntes de curto-circuito bifásico – terra, para o modelo equivalente na Figura 22, são dadas por:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2(Z_0 + 3Z_f)/(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)} \quad (2.9)$$

$$I_{a2} = -\frac{(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)} \cdot I_{a1} \quad (2.10)$$

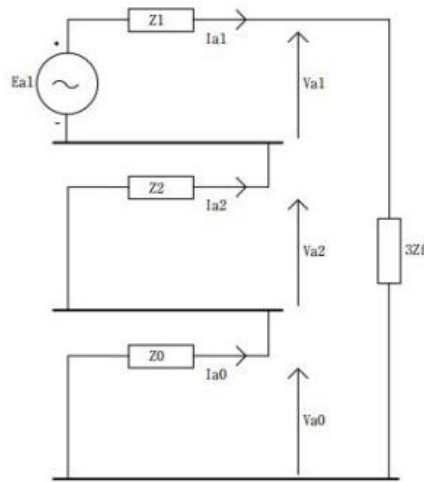
$$I_{a0} = -\frac{Z_1}{Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)} \cdot I_{a1} \quad (2.11)$$

Aplicando a matriz de transformação T descrita na equação 2.2, obtém-se as correntes nas fases do sistema.

- **Curto-circuito Monofásico**

No caso do curto-circuito monofásico, a falta ocorre quando uma das fases da rede se conecta com a terra. Neste cenário, os circuitos equivalentes das sequências positiva, negativa e zero são conectados em série, conforme representado na figura 23:

Figura 23 - Modelo do curto-circuito monofásico (FREITAS, 2017).



Para este caso, considera-se a impedância de sequência zero acumulada até o defeito (KINDERMANN, 1997). Além disso, tem-se:

$$Z_1 = Z_2 \quad (2.12)$$

Como:

$$I_{a1} = I_{a0} = I_{a2} \quad (2.13)$$

Obtém-se:

$$I_{\text{curto-circuito}} = I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2.14)$$

Aplicando a matriz de transformação T , descrita na equação 2.2, obtém-se as correntes nas fases do sistema.

Neste trabalho, serão analisados os curtos-circuitos monofásicos em sistemas de distribuição, considerando as características específicas de cada caso no estudo de localização de faltas. Além disso, as análises realizadas serão feitas em componentes de fase.

2.6.3 Frequência dos Tipos de Curto-circuito

Pela própria natureza dos tipos de curto-circuito, os curtos trifásicos são mais raros e os curtos monofásicos, foco desse trabalho, são mais comuns. As frequências

típicas de ocorrência de curto-circuito no sistema elétrico, apresentadas na Tabela 1, são:

Tabela 1 - Frequências típicas de ocorrência de curto-circuito (SATO e FREITAS, 2015).

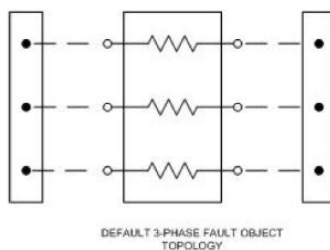
Curto-circuito	Frequência (%)
Trifásico	5
Bifásico	15
Bifásico - Terra	10
Monofásico	70

Além disso, os curto-circuitos podem ser classificados como permanentes ou temporários. Os curto-circuitos permanentes são irreversíveis espontaneamente e exigem reparos na rede para que o sistema possa ser reestabelecido. Por outro lado, os curto-circuitos temporários ocorrem sem que haja defeitos permanentes. Após a atuação da proteção, o sistema é automaticamente reestabelecido (KINDERMANN, 1997).

2.6.4 Modelagem de Faltas no OpenDSS

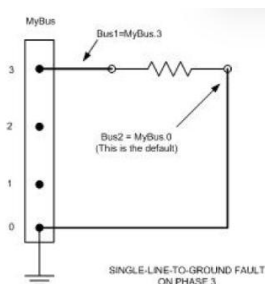
No OpenDSS, uma falta é representada por uma resistência multifásica com dois terminais. A figura 24 ilustra uma falta trifásica no software.

Figura 24 - Topologia de uma falta trifásica no OpenDSS (EPRI).



No caso de uma falta monofásica (fase-terra), é possível defini-la analisando o modelo da figura 25.

Figura 25 - Falta monofásica na fase 3 (ou fase c) conectada na barra MyBus (EPRI).



3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo, são apresentadas a formulação matemática e o método de solução proposto para a localização de faltas em sistemas de distribuição por meio de método de otimização. Como já mencionado, o método desenvolvido neste trabalho identifica a localização de faltas monofásicas simuladas no sistema por meio da medição das correntes em algum ponto nas linhas, considerando a configuração do curto-circuito monofásico descrita na Seção 2.6.2.

3.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O problema de localização de faltas neste estudo é modelado matematicamente por meio da função objetivo (função *fitness*), apresentada na Equação (3.1) e detalhada nas Equações (3.2), (3.3) e (3.4):

$$f_{ob} = (\Delta I_a)^2 + (\Delta I_b)^2 + (\Delta I_c)^2 \quad (3.1)$$

$$\Delta I_a = |I_{a,AG} - I_{a,real}| \quad (3.2)$$

$$\Delta I_b = |I_{b,AG} - I_{b,real}| \quad (3.3)$$

$$\Delta I_c = |I_{c,AG} - I_{c,real}| \quad (3.4)$$

Onde:

- f_{ob} é a função objetivo do problema de otimização;
- ΔI_a é o módulo da diferença entre a corrente em situação de falta calculada e real na fase A;
- ΔI_b é o módulo da diferença entre a corrente em situação de falta calculada e real na fase B;
- ΔI_c é o módulo da diferença entre a corrente em situação de falta calculada e real na fase C;
- $I_{a,AG}$ é a corrente em situação de falta calculada na fase A;
- $I_{a,real}$ é corrente em situação de falta real na fase A;

- $I_{b,AG}$ é a corrente em situação de falta calculada na fase B;
- $I_{b,real}$ é a corrente em situação de falta real na fase B;
- $I_{c,AG}$ é a corrente em situação de falta calculada na fase C;
- $I_{c,real}$ é a corrente em situação de falta real na fase C.

A função objetivo apresentada na Equação (3.1) tem como propósito minimizar o erro quadrático entre as correntes nas situações de falta calculadas pelo AG e os valores simulados (como se fossem as correntes reais em falta), considerando um curto-circuito monofásico aplicado no sistema.

Quanto menor o valor da função objetivo, mais próximas estarão as correntes calculadas pelo AG das correntes reais em falta. O objetivo do problema de otimização é minimizar a Equação (3.1), de modo a identificar a barra, fase e impedância de falta no sistema que melhor condizem com a situação da falta simulada.

3.2 MÉTODO DE SOLUÇÃO

A ideia é que o método possa localizar faltas a partir de alguma medição de corrente. Como no caso não se tinha dados de faltas reais, optou-se por simulá-las, para emular faltas reais que pudessem acontecer. Assim, foi necessário simular faltas monofásicas no sistema teste para avaliar o método de otimização, localizando corretamente a condição de falta (localização e impedância).

3.2.1 Primeira Etapa

Utilizando o OpenDSS por meio da interface do MATLAB®, foi inicialmente escolhida, de forma aleatória, mas considerando sua localização no sistema (início, meio ou fim da rede), uma barra onde o curto-circuito monofásico seria aplicado. Em seguida, foi selecionada, também de forma aleatória, uma das fases (A, B ou C) para aplicação da falta. Posteriormente, determinou-se um valor de impedância de falta, variando entre baixos e altos valores. Por fim, foi escolhida uma linha onde as correntes das três fases seriam medidas, novamente de forma aleatória, mas levando em consideração sua posição na rede, essa escolha representa a posição de um

medidor. Veja que nesse trabalho optou-se por variar a posição do medidor, para analisar se nessas condições o método conseguiria encontrar a solução.

Após essas definições, foi invocada no MATLAB® uma função responsável por aplicar o curto-circuito e medir os valores de corrente na posição escolhida para o medidor nesta simulação específica. Para a aplicação da falta, utilizou-se o seguinte comando:

```
DSSText.Command = sprintf('New Fault.1curto phases=1 bus1=%s.%d  
r=%f', barra, fase, resistencia);
```

Esse comando cria uma falta na barra e fase especificadas, com o valor de impedância determinado.

Em seguida, o circuito com a falta aplicada é resolvido, e os seguintes comandos são executados:

```
DSSCircuit.SetActiveElement(['Line.' ponto]);  
correntes_ponto = DSSCircuit.ActiveCktElement.CurrentsMag;
```

Esses comandos, respectivamente, selecionam a linha de interesse no OpenDSS (relativa à posição do medidor escolhido) e obtêm a magnitude da corrente circulante na linha, sem considerar o ângulo de fase.

Por fim, as magnitudes das correntes nas fases A, B e C, medidas na linha selecionada, são armazenadas para posterior análise.

Resumindo-se, a primeira etapa é apenas a simulação de um dos casos de curto-circuito a ser avaliado pelo método, como se fosse um curto real, para o qual deseja-se que o AG encontre a localização e impedância de falta.

3.2.2 Segunda Etapa

Na segunda etapa tem-se mais especificamente o método de otimização aplicado.

Após a simulação da falta monofásica e a obtenção das correntes na linha definida como se fosse o medidor, foi aplicado o método de otimização baseado em Algoritmos Genéticos (AG) para definir o local e a impedância da falta simulada, comparando grandezas calculadas a partir de simulações com as soluções candidatas do AG com aquelas previamente conhecidas por meio da simulação da falta específica a ser analisada.

Inicialmente, foi definida a função objetivo (*função fitness*), descrita na Seção 3.1, responsável por quantificar o erro de cada solução candidata.

Em seguida, foi definida uma função para aplicar a falta (para cada indivíduo, candidato a solução) e calcular as magnitudes das correntes medidas nas três fases, de forma semelhante à função descrita na Primeira Etapa. Para isso, o OpenDSS foi invocado pelo MATLAB® para rodar o fluxo de potência, aplicando a falta e calculando as correntes.

O AG foi então ajustado de forma a usar a função objetivo e seu processo de otimização para encontrar a melhor solução possível que seja compatível, em termos de correntes no medidor, com a falta aplicada que se deseja localizar.

O Algoritmo Genético, como já detalhado na Seção 2.5, é uma técnica de otimização inspirada na seleção natural de Charles Darwin. Neste trabalho, ele busca encontrar a melhor combinação de barra de falta, fase de falta e impedância de falta, minimizando o erro entre as correntes reais (através de simulação) na Primeira Etapa e as correntes calculadas pelo AG na Segunda Etapa.

A implementação do AG no MATLAB® é realizada por meio da *Global Optimization Toolbox*, descrita na Seção 2.4.1 e seguiu os seguintes passos:

3.2.2.1 Definição dos Indivíduos (Representação das Soluções)

Um indivíduo dentro da população do AG representa uma possível solução do problema. Para este estudo, cada indivíduo é um vetor de três variáveis:

- $x(1)$: Índice da barra onde o curto-circuito foi aplicado.
- $x(2)$: Fase do curto-circuito (1, 2 ou 3, correspondente às fases A, B ou C).
- $x(3)$: Impedância de Falta (Ω).

Cada indivíduo representa uma solução candidata, ou seja, um possível local de falta. O AG avalia várias soluções e busca encontrar a melhor.

3.2.2.2 Sorteio da População Inicial

A população inicial consiste na criação de indivíduos aleatórios dentro de limites permitidos. Para este trabalho, a população inicial foi de 400 indivíduos aleatórios e os limites permitidos foram:

- Barra de falta: Escolha aleatória de uma barra válida entre o número de barras existentes no sistema teste.
- Fase de falta: Escolha aleatória de uma fase entre A, B ou C.
- Impedância de falta: Geração de um valor de impedância aleatório entre $0,1\Omega$ e 1000Ω .

Ou seja, a população inicial contém 400 possíveis soluções para o problema. A função que configura a criação da população no MATLAB® é a *@gacreationuniformint*, que gera a população inicial do AG com valores inteiros distribuídos uniformemente dentro dos limites especificados para cada variável (barra, fase e impedância de falta).

3.2.2.3 Avaliação da Função Objetivo (*Fitness Function*)

O desempenho de cada indivíduo é avaliado por meio da função objetivo descrita na Seção 3.1. O AG busca minimizar essa função, encontrando os valores de barra, fase e impedância que geram o menor erro, relativo às correntes para aquela falta.

3.2.2.4 Seleção

Após o cálculo da *Fitness Function* para cada indivíduo, o AG seleciona os melhores candidatos para a próxima geração. Ou seja, as soluções com menor erro têm maior probabilidade de serem selecionadas para reprodução. A função que configura a seleção no MATLAB® é a *@selectiontournament*, que seleciona os indivíduos para a próxima geração por meio de torneios. Em cada torneio, um subconjunto da população é escolhido aleatoriamente, e o indivíduo mais apto desse grupo é selecionado.

3.2.2.5 Cruzamento (*Crossover*)

Os melhores indivíduos são combinados para gerar novos indivíduos. Quando dois indivíduos pais são selecionados, o cruzamento produz dois filhos, misturando os genes dos pais. Esse processo garante diversidade e permite a exploração de novas soluções.

Para o problema analisado, a taxa de cruzamento foi definida em 0,9, ou seja, 90% dos indivíduos serão gerados por cruzamento. Os 10% restantes são copiados diretamente da população anterior por meio de elitismo. Neste problema, os 10 melhores indivíduos da geração anterior são preservados na nova geração, garantindo que boas soluções não sejam perdidas ao longo do processo. A função que configura o cruzamento no MATLAB® é a *@crossoverlaplace*, que utiliza a distribuição de Laplace para gerar descendentes.

3.2.2.6 Mutação

Após o cruzamento, alguns indivíduos sofrem mutação, ou seja, pequenas alterações aleatórias nos valores de suas variáveis. Esse mecanismo ajuda a evitar que o AG fique preso em soluções de estagnação. A função que configura a mutação no MATLAB® é a *@mutationpower*, que aplica mutações aos indivíduos utilizando o modelo estatístico de distribuição de potência.

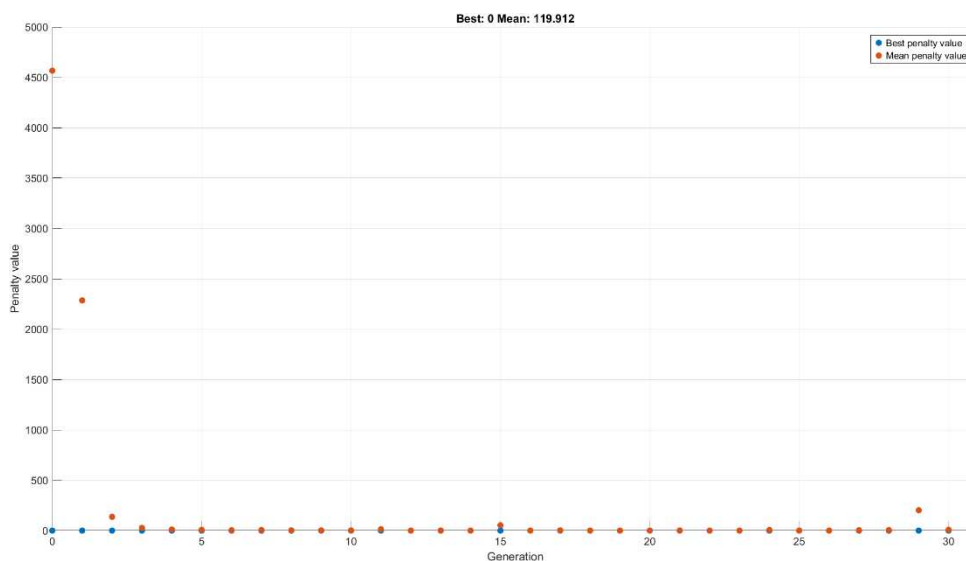
3.2.2.7 Critério de Parada

O AG continua gerando novas populações até que um dos critérios de parada seja atingido. Para este problema, os critérios definidos são:

- Número máximo de gerações: 100.
- Número máximo de gerações sem melhorias: 30 (ou seja, se 30 gerações consecutivas não trouxerem melhorias significativas, o AG é interrompido automaticamente, evitando desperdício de processamento quando o algoritmo está estagnado).
- Tolerância de convergência: 1×10^{-12} (ou seja, se a melhoria do erro for menor que este valor, o AG é interrompido).

A convergência do AG foi avaliada por meio da evolução do valor da penalidade ao longo das gerações. Para que o AG convirja, o tempo computacional médio das simulações foi, aproximadamente, 1 minuto. A Figura 26 apresenta o comportamento da penalidade, utilizando como exemplo um dos casos de falta que será analisado na Seção 4.3 deste trabalho.

Figura 26 - Exemplo: Comportamento de Penalidade.



O *Best Penalty Value* indica o menor erro entre as correntes medidas e simuladas encontrado até cada geração. Já o *Mean Penalty Value* representa a média das penalidades da população em cada geração. O comportamento esperado para convergência do AG é que, conforme as gerações avançam, o *Best Penalty Value* tenda a um valor mínimo, enquanto o *Mean Penalty Value* apresenta uma redução progressiva. No caso analisado do exemplo acima, o *Best Penalty Value* (erro) estabiliza em zero, indicando que o AG encontrou uma solução satisfatória para o problema.

3.2.2.8 Solução Final

O AG retorna a melhor solução encontrada composta pela barra, fase e impedância de falta que minimiza o erro entre as correntes calculadas e reais, permitindo a localização otimizada de faltas na rede elétrica.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do método proposto, por meio de simulações realizadas com o sistema teste.

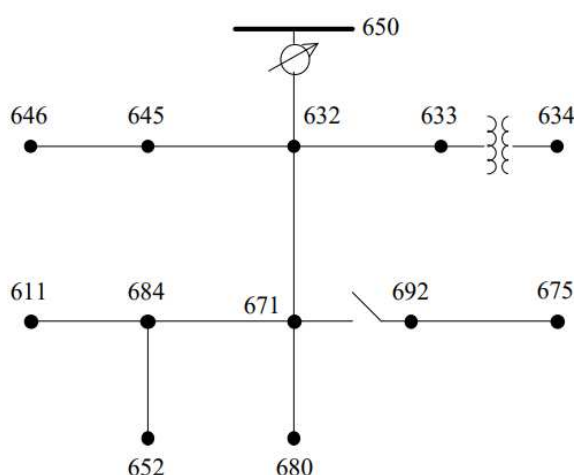
Os softwares OpenDSS e MATLAB® foram utilizados para analisar os resultados encontrados.

O objetivo da aplicação do método é identificar o local da falta (barra e fase) e a impedância de falta, a partir das correntes medidas em algum medidor na região da ocorrência, buscando obter o menor erro possível.

4.1 SISTEMA TESTE IEEE 13 BARRAS

O sistema utilizado para as simulações foi o IEEE 13 Barras, que opera com uma tensão nominal de 4,16kV. Esse sistema é composto por um alimentador, um regulador de tensão, barras, linhas, banco de capacitores, transformadores e cargas, sendo amplamente utilizado em testes de sistemas de distribuição. A Figura 27 apresenta o diagrama unifilar do sistema IEEE 13 Barras.

Figura 27 - Diagrama unifilar do Sistema IEEE 13 Barras (TECHNOLOGIES, 2024).



4.2 ESTUDOS DE CASO

Foram realizados 9 estudos de caso baseados na localização da barra onde o curto-circuito foi aplicado (no início, meio ou fim do sistema), a fase de falta (A, B ou

C) e na localização da linha onde os medidores de corrente foram posicionados (no início, meio ou fim do sistema). A Tabela 2 apresenta os casos estudados:

Tabela 2 - Casos estudados para a metodologia proposta.

Caso	Barra de falta	Fase de falta	Linha de medição
1	650	A	650-632
2	650	A	670-671
3	650	A	671-680
4	692	B	650-632
5	692	B	632-670
6	692	B	671-680
7	680	A	650-632
8	680	A	632-670
9	680	A	671-680

4.3 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados foram obtidos a partir da implementação dos casos estudados, considerando, para cada caso, a variação da impedância de falta entre os valores de 1Ω , 10Ω , 50Ω , 100Ω , 500Ω e 1000Ω . Com base nos valores de correntes reais (emuladas em simulação, no momento da falta) e nas correntes calculadas (obtidas pelo AG), o algoritmo genético determinou a barra, a fase, e a impedância de falta para cada caso analisado.

4.3.1 Resultados do Caso 1: Barra de falta no início do sistema (650), fase de falta A e linha de medição no início do sistema (650-632)

Tabela 3 - Resultados do Caso 1.

Barra AG	Fase AG	$Z_f (\Omega)$		Correntes (A)						Erro (Best Penalty Value)
		Real	AG	Fase A Real	Fase A AG	Fase B Real	Fase B AG	Fase C Real	Fase C AG	
650	A	1	0,99	562,2891	562,2896	417,4588	417,4592	591,4059	591,4056	$5,30603 \times 10^{-7}$
650	A	10	10,00	562,5867	562,5867	419,0378	419,0378	591,7379	591,7379	0
650	A	50	50,00	562,5813	562,5813	419,0330	419,0330	591,7408	591,7408	0
650	A	100	100,00	562,5806	562,5806	419,0324	419,0324	591,7412	591,7412	0
650	A	500	500,00	562,5801	562,5801	419,0320	419,0320	591,7415	591,7415	0
650	A	1000	1000,00	562,5800	562,5800	419,0319	419,0319	591,7415	591,7415	$1,53998 \times 10^{-21}$

Analisando os resultados, é possível observar que:

- A barra e fase encontradas pelo algoritmo genético (AG) coincidem com o ponto de aplicação de falta;
- As impedâncias de faltas obtidas pelo AG são iguais ou próximas aos valores simulados;
- As correntes em falta calculadas são próximas dos valores de correntes simulados para as fases A, B e C;
- O erro (Best Penalty Value) para todos os valores de impedância de falta é zero ou próximo de zero.

4.3.2 Resultados do Caso 2: Barra de falta no início do sistema (650), fase de falta A e linha de medição no meio do sistema (670-671)

Tabela 4 - Resultados do Caso 2.

Barra AG	Fase AG	$Z_f (\Omega)$		Correntes (A)						Erro (Best Penalty Value)
		Real	AG	Fase A Real	Fase A AG	Fase B Real	Fase B AG	Fase C Real	Fase C AG	
650	A	1	0,99	481,5848	481,5858	217,1729	217,1733	479,8417	479,8409	$1,73376 \times 10^{-6}$
650	A	10	10,00	481,8960	481,8960	218,0533	218,0533	480,2640	480,2640	$8,83946 \times 10^{-15}$
650	A	50	50,00	481,8914	481,8914	218,0518	218,0518	480,2667	480,2667	0
650	A	100	100,00	481,8908	481,8908	218,0516	218,0516	480,2670	480,2670	0
650	A	500	500,00	481,8904	481,8904	218,0514	218,0514	480,2673	480,2673	0
650	A	1000	1000,00	481,8903	481,8903	218,0514	218,0514	480,2673	480,2673	$1,56542 \times 10^{-22}$

Analisando os resultados, é possível observar que:

- A barra e fase encontradas pelo algoritmo genético (AG) coincidem com o ponto de aplicação de falta;
- As impedâncias de faltas obtidas pelo AG são iguais ou próximas aos valores simulados;
- As correntes em falta calculadas são próximas dos valores de correntes simulados para as fases A, B e C;
- O erro (Best Penalty Value) para todos os valores de impedância de falta é zero ou próximo de zero.

4.3.3 Resultados do Caso 3: Barra de falta no início do sistema (650), fase de falta A e linha de medição no fim do sistema (671-680)

Tabela 5 - Resultados do Caso 3.

Barra AG	Fase AG	$Z_f (\Omega)$		Correntes (A)						Erro (Best Penalty Value)
		Real	AG	Fase A Real	Fase A AG	Fase B Real	Fase B AG	Fase C Real	Fase C AG	
650	A	1	1,14	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	$1,1728 \times 10^{-15}$
650	A	10	9,97	0,0005728	0,0006	0,0005975	0,0006	0,0005721	0,0006	$7,16727 \times 10^{-21}$
650	A	50	50,00	0,0005723	0,0006	0,0005975	0,0006	0,0005721	0,0006	$4,31641 \times 10^{-23}$
650	A	100	100,06	0,0005723	0,0006	0,0005975	0,0006	0,0005721	0,0006	$6,1816 \times 10^{-24}$
650	A	500	498,81	0,0005723	0,0006	0,0005975	0,0006	0,0005721	0,0006	$1,20514 \times 10^{-25}$
650	A	1000	996,30	0,0005723	0,0006	0,0005975	0,0006	0,0005721	0,0006	$3,06064 \times 10^{-25}$

Analisando os resultados, é possível observar que:

- A barra e fase encontradas pelo algoritmo genético (AG) coincidem com o ponto de aplicação de falta;
- As impedâncias de faltas obtidas pelo AG são próximas dos valores simulados;
- As correntes em falta calculadas são próximas dos valores de correntes simulados para as fases A, B e C;
- O erro (Best Penalty Value) para todos os valores de impedância de falta é próximo de zero.

4.3.4 Resultados do Caso 4: Barra de falta no meio do sistema (692), fase de falta B e linha de medição no início do sistema (650-632)

Tabela 6 - Resultados do Caso 4.

Barra AG	Fase AG	$Z_f (\Omega)$		Correntes (A)						Erro (Best Penalty Value)
		Real	AG	Fase A Real	Fase A AG	Fase B Real	Fase B AG	Fase C Real	Fase C AG	
692	B	1	1,00	551,8320	551,8320	2157,8963	2157,8963	583,5698	583,5698	0
692	B	10	10,00	567,6263	567,6263	663,2606	663,2606	581,8296	581,8296	0
692	B	50	50,00	563,5062	563,5062	466,7930	466,7930	589,4647	589,4647	$7,45742 \times 10^{-12}$
692	B	100	100,00	562,8609	562,8609	442,0603	442,0603	590,4590	590,4590	0
692	B	500	500,00	562,6490	562,6490	423,9169	423,9169	591,5845	591,5845	0
692	B	1000	1000,00	562,6145	562,6145	421,4739	421,4739	591,6630	591,6630	0

Analisando os resultados, é possível observar que:

- A barra e fase encontradas pelo algoritmo genético (AG) coincidem com o ponto de aplicação de falta;
- As impedâncias de faltas obtidas pelo AG são iguais dos valores simulados;
- As correntes em falta calculadas são próximas dos valores de correntes simulados para as fases A, B e C;
- O erro (Best Penalty Value) para todos os valores de impedância de falta é zero ou próximo de zero.

4.3.5 Resultados do Caso 5: Barra de falta no meio do sistema (692), fase de falta B e linha de medição no meio do sistema (632-670)

Tabela 7 - Resultados do Caso 5.

Barra AG	Fase AG	$Z_f (\Omega)$		Correntes (A)						Erro (Best Penalty Value)
		Real	AG	Fase A Real	Fase A AG	Fase B Real	Fase B AG	Fase C Real	Fase C AG	
692	B	1	1,00	470,5948	470,5948	1971,1019	1971,1019	480,8736	480,8736	0
692	B	10	10,00	485,7989	485,7989	466,8863	466,8863	472,5790	472,5790	0
692	B	50	50,00	482,5611	482,5611	267,6982	267,6982	478,3966	478,3966	0
692	B	100	100,00	481,8908	481,8908	218,0516	218,0516	480,2670	480,2670	0
692	B	500	500,00	481,9444	481,9444	223,0652	223,0652	480,1524	480,1524	0
692	B	1000	1000,00	481,9174	481,9174	220,5581	220,5581	480,2098	480,2098	0

Analisando os resultados, é possível observar que:

- A barra e fase encontradas pelo algoritmo genético (AG) coincidem com o ponto de aplicação de falta;
- As impedâncias de faltas obtidas pelo AG são iguais dos valores simulados;
- As correntes em falta calculadas são próximas dos valores de correntes simulados para as fases A, B e C;
- O erro (Best Penalty Value) para todos os valores de impedância de falta é zero.

4.3.6 Resultados do Caso 6: Barra de falta no meio do sistema (692), fase de falta B e linha de medição no fim do sistema (671-680)

Tabela 8 - Resultados do Caso 6.

Barra AG	Fase AG	$Z_f (\Omega)$		Correntes (A)						Erro (Best Penalty Value)
		Real	AG	Fase A Real	Fase A AG	Fase B Real	Fase B AG	Fase C Real	Fase C AG	
692	B	1	1,00	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006	$1,53915 \times 10^{-13}$
692	B	10	10,14	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	$4,78007 \times 10^{-14}$
692	B	50	49,76	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	$1,87647 \times 10^{-16}$
692	B	100	100,00	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0
692	B	500	500,00	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0
692	B	1000	999,92	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	$2,42558 \times 10^{-13}$

Analisando os resultados, é possível observar que:

- A barra e fase encontradas pelo algoritmo genético (AG) coincidem com o ponto de aplicação de falta;
- As impedâncias de faltas obtidas pelo AG são próximas dos valores simulados;
- As correntes em falta calculadas são próximas dos valores de correntes simulados para as fases A, B e C;
- O erro (Best Penalty Value) para todos os valores de impedância de falta é zero ou próximo de zero.

4.3.7 Resultados do Caso 7: Barra de falta no fim do sistema (680), fase de falta A e linha de medição no início do sistema (650-632)

Tabela 9 - Resultados do Caso 7.

Barra AG	Fase AG	$Z_f (\Omega)$		Correntes (A)						Erro (Best Penalty Value)
		Real	AG	Fase A Real	Fase A AG	Fase B Real	Fase B AG	Fase C Real	Fase C AG	
680	A	1	1,00	1961,2196	1961,2189	427,5607	427,5607	571,7442	571,7443	$4,23293 \times 10^{-7}$
680	A	10	10,00	789,6989	789,6989	415,8883	415,8883	593,5951	593,5951	0
680	A	50	50,00	608,5736	608,5736	418,0519	418,0519	592,5035	592,5035	$3,83766 \times 10^{-17}$
680	A	100	100,00	585,5588	585,5588	418,4908	418,4908	592,1321	592,1321	0
680	A	500	500,00	567,1234	567,1234	418,9400	418,9400	591,7920	591,7920	$1,2159 \times 10^{-19}$
680	A	1000	1000,00	564,8514	564,8514	418,9858	418,9858	591,7669	591,7669	$4,97369 \times 10^{-11}$

Analisando os resultados, é possível observar que:

- A barra e fase encontradas pelo algoritmo genético (AG) coincidem com o ponto de aplicação de falta;
- As impedâncias de faltas obtidas pelo AG são iguais aos valores simulados;
- As correntes em falta calculadas medidas são próximas dos valores de correntes simulados para as fases A, B e C;
- O erro (Best Penalty Value) para todos os valores de impedância de falta é zero ou próximo de zero.

4.3.8 Resultados do Caso 8: Barra de falta no fim do sistema (680), fase de falta A e linha de medição no meio do sistema (632-670)

Tabela 10 - Resultados do Caso 8.

Barra AG	Fase AG	$Z_f (\Omega)$		Correntes (A)						Erro (Best Penalty Value)
		Real	AG	Fase A Real	Fase A AG	Fase B Real	Fase B AG	Fase C Real	Fase C AG	
680	A	1	1,00	1888,1741	1888,1734	224,7063	224,7063	462,6225	462,6226	$4,37961 \times 10^{-7}$
680	A	10	10,00	709,9167	709,9167	217,5267	217,5267	481,4858	481,4858	$4,78007 \times 10^{-14}$
680	A	50	50,00	527,9843	527,9843	217,6169	217,6169	480,8582	480,8582	$2,6221 \times 10^{-11}$
680	A	100	100,00	504,9267	504,9267	217,7860	217,7860	480,5698	480,5698	$3,17987 \times 10^{-9}$
680	A	500	500,00	486,4543	486,4543	218,0014	218,0014	480,3043	480,3043	$1,89456 \times 10^{-21}$
680	A	1000	1000,00	484,1720	484,1720	218,0263	218,0263	480,2859	480,2859	$1,91885 \times 10^{-21}$

Analisando os resultados, é possível observar que:

- A barra e fase encontradas pelo algoritmo genético (AG) coincidem com o ponto de aplicação de falta;
- As impedâncias de faltas obtidas pelo AG são iguais aos valores simulados;
- As correntes em falta calculadas são próximas dos valores de correntes simulados para as fases A, B e C;
- O erro (Best Penalty Value) para todos os valores de impedância de falta é próximo de zero.

4.3.9 Resultados do Caso 9: Barra de falta no fim do sistema (680), fase de falta A e linha de medição no fim do sistema (671-680)

Tabela 11 - Resultados do Caso 9.

Barra AG	Fase AG	$Z_f (\Omega)$		Correntes (A)						Erro (Best Penalty Value)
		Real	AG	Fase A Real	Fase A AG	Fase B Real	Fase B AG	Fase C Real	Fase C AG	
680	A	1	1,00	1487,3187	1488,5265	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	1,45875
680	A	10	10,00	228,6156	228,6213	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	$3,18883 \times 10^{-5}$
680	A	50	50,00	46,8068	46,8068	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	$5,48391 \times 10^{-11}$
680	A	100	99,91	23,5047	23,5261	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,000458114
680	A	500	500,00	4,7170	4,7170	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	$9,92582 \times 10^{-12}$
680	A	1000	1000,00	2,3595	2,3595	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	$5,87948 \times 10^{-13}$

Analisando os resultados, é possível observar que:

- A barra e fase encontradas pelo algoritmo genético (AG) coincidem com o ponto de aplicação de falta;
- As impedâncias de faltas obtidas pelo AG são próximas dos valores simulados;
- As correntes em falta calculadas são próximas dos valores de correntes simulados para as fases A, B e C;
- O erro (Best Penalty Value) para todos os valores de impedância de falta é próximo de zero.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposta uma metodologia para a localização de faltas monofásicas em um sistema de distribuição, utilizando medições de correntes em situação de falta e a implementação de um Algoritmo Genético (AG).

Com base nos resultados obtidos a partir de nove estudos de caso, nos quais a localização do curto-circuito e da medição de correntes variava entre o início, meio e fim da rede, foi possível concluir que:

- A identificação da barra e da fase de falta foi sempre precisa. Em todos os casos, o algoritmo identificou exatamente a barra e fase em que o curto-circuito foi aplicado.
- As impedâncias de faltas determinadas foram iguais ou muito próximas dos valores simulados. Pequenas diferenças foram observadas principalmente nos casos em que a medição ocorreu no fim do sistema.
- As correntes calculadas foram iguais ou próximas dos valores simulados, comprovando a eficácia do AG em minimizar a função objetivo.

Algumas limitações precisam ser destacadas, como o fato de as simulações terem sido realizadas apenas no sistema radial IEEE 13 barras. Além disso, embora o tempo de processamento tenha sido aceitável para os casos analisados, ele pode se tornar uma restrição em sistemas mais complexos e com múltiplas faltas simultâneas.

Apesar dessas limitações, os resultados comprovaram que o uso do AG é uma ferramenta eficiente para a localização de faltas monofásicas em sistemas de distribuição. Cada cenário analisado apresentou coerência entre os valores esperados e medidos, com erros mínimos, comprovando a precisão da metodologia aplicada.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para a continuidade deste trabalho incluem:

- Aplicação da metodologia em sistemas mais complexos, como em redes malhadas e redes de maior porte.
- Aplicação do método para localização de faltas bifásicas, trifásicas e múltiplas faltas simultâneas.
- Avaliação de outros métodos de otimização complementares ou alternativos, como enxame de partículas, colônia de formigas e métodos híbridos, visando melhorar a eficiência computacional.

REFERÊNCIAS

A ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/a-aneel>. Acesso em: 20 Dezembro 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Distribuição. **Ministério de Minas e Energia**, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/distribuicao>. Acesso em: 20 dez. 2024.

ALGORITMOS Genéticos. **ICMC**, 2021. Disponível em: <https://sites.icmc.usp.br/andre/research/genetic/>. Acesso em: 12 jan. 2025.

CATÁLOGO de Transformadores. **Kron Medidores**, 2021. Disponível em: https://kron.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Catalogo_Transformadores_2017_KRON.pdf. Acesso em: 2025 jan. 21.

CONTEUDISTA. Diferença entre Linha de Distribuição e Transmissão. **Energês**, 2021. Disponível em: <https://energes.com.br/diferenca-entre-linha-de-distribuicao-e-transmissao/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ELÉTRICA, Agência N. D. E. Regulação. **gov.br**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/regulacao#:~:text=O%20sistema%20de%20distribui%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9,que%20%2C3%20kV>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ELÉTRICOS, JUDY M. PARA RAIOS POLIMÉRICOS DE DISTRIBUIÇÃO 15KV 10KA C/ FERRAGEM R\$/PÇ. **JUDY Materiais Elétricos**, 2018. Disponível em: <https://judycabos.com.br/produto/para-raio-polimerico-de-distribuicao-15kv-10ka-c-ferragem-rpc/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ENGENHARIA, Equipe M. Equipamentos do Sistema de Distribuição. **Mesh Engenharia**, 2023. Disponível em: <https://meshengenharia.com/2023/11/16/equipamentos-do-sistema-de-distribuicao/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ENGENHARIA, RTT. Disjuntores/Alimentadores de Média Tensão e Alta Tensão nas Classes de Tensão 15 KV a 440 KV. **Rtt Engenharia**, 2018. Disponível em: <http://www.rttengenharia.com.br/servicos-descricao/22/disjuntores-alimentadores-de-media-tensao-e-alta-tensao>. Acesso em: 26 fev. 2025.

EPRI. Defining Faults. **OpenDSS Documentation**. Disponível em: <https://opendss.epri.com/DefiningFaults.html>. Acesso em: 23 Janeiro 2025.

FERREIRA, Ivanilda A.; NOBREGA, Dayvisson D. D. Confiabilidade de Sistemas no Setor Elétrico: Estudo de Caso Envolvendo Ocorrências de Queimadas em Linhas de Transmissões. **XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, Joinville, 10 out. 2017. 02-03.

FILHO, João A. P. **MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO (Código da Disciplina: ENE081 B) - Algoritmos Evolutivos**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 43. 2023.

FREITAS, Paulo C. F. *et al.* Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Por Meio da. **Sociedade Brasileira de Automática**, Ouro Preto, 14 fev. 2021. 6.

FREITAS, Paulo C. F. **Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Otimização por Nuvens de Partículas e Busca em Vizinhança Variável**. Universidade Federal de Ouro Preto. João Monlevade, p. 99. 2017.

FREITAS, Paulo R. R. D. **Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando o software OpenDSS**. Universidade de São Paulo – USP (Escola Politécnica). São Paulo, p. 191. 2015.

GLOBAL Optimization Toolbox. **The G6G Directory of Omics and Intelligent Software**, 2016. Disponível em: <https://www.g6g-softwaredirectory.com/ai/genetic-algorithms/20030R-MathWorks-Global-Optimization-Toolbox.php>. Acesso em: 11 jan. 2025.

GLOBAL Optimization Toolbox. **MathWorks**, 2017. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/global-optimization.html>. Acesso em: 11 jan. 2025.

INBRAEP. INBRAEP. **Definição dos Fundamentos de Rede de Distribuição**, 2021. Disponível em: https://inbraep.com.br/publicacoes/definicao-dos-fundamentos-de-rede-de-distribuicao/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 10 jan. 2025.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César B. D.; ROBBA, Ernesto J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2ª. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto-Circuito**. 2ª. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

MATLAB: O que é e para que serve. **OPENCADD**, 2022. Disponível em: <https://www.opencadd.com.br/blog/o-que-e-matlab>. Acesso em: 11 jan. 2025.

OU, Shifeng *et al.* Fault Location Analysis in Active Distribution Network Based on Multi-population Genetic Algorithm. **Journal of Physics: Conference Series**, Nanning, 07 jan. 2022. 01-09.

POWER System. **Circuit Globe**. Disponível em: <https://circuitglobe.com/power-system.html>. Acesso em: 20 Dezembro 2024.

RADATZ, Paulo; ROCHA, Celso; SEXAUER, Jason. Introdução ao OpenDSS. **The Open Distribution System Simulator**, 2016. Disponível em: <https://ifgjatai.eu5.org/OpenDSS.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2025.

REGRAS e Procedimentos de Distribuição (Prodist). **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 20 Dezembro 2024.

RODRIGUES, Victor Tadeu D. S. **Método analítico para localização de faltas monofásicas em Sistemas de Distribuição**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 78. 2021.

SATO, Fujio; FREITAS, Walmir. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SIELETRIC. Chave seccionadora 25kV abertura com carga. **SIELETRIC**. Disponível em: <https://www.sieletric.com.br/produto/chave-seccionadora-25kv-abertura-com-carga>. Acesso em: 21 jan. 2025.

SILVA, Pedro H. S. **Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia**. Universidade Federal de Ouro Preto. João Monlevade, p. 71. 2022.

SISTEMA de Acompanhamento de Reservatórios. **Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/sin#:~:text=O%20Sistema%20Interligado%20Nacional%20%2D%20SIN,%C3%A9%20fiscalizado%20e%20regulado%20pela>. Acesso em: 20 Dezembro 2024.

TECHNOLOGIES, RTDS. Real-Time Simulation Model of IEEE 13 Node Test Feeder. **Shout Wiki**, 2024. Disponível em: https://images.shoutwiki.com/mindworks/7/7e/IEEE_13_Bus_Power_System.pdf. Acesso em: 28 Janeiro 2025.