



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

EMILY LORANE DA SILVA CERQUEIRA

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO BASEADA NA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

Bom Jesus da Lapa–BA
Agosto de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA

Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa

Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

EMILY LORANE DA SILVA CERQUEIRA

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO BASEADA NA TEORIA DAS
ONDAS VIAJANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira

Bom Jesus da Lapa–BA

Agosto de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

C411

Cerqueira, Emily Lorane da Silva

Localização de faltas de alta impedância em Sistemas de Distribuição baseada na Teoria das Ondas Viajantes. / Emily Lorane da Silva Cerqueira. – 2025.

83f.: il.

Orientadora: Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira

TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2025.

1. Sistemas de distribuição. I. Oliveira, Andressa Pereira. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 621.319

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

FOLHA DE APROVAÇÃO

EMILY LORANE DA SILVA CERQUEIRA

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO BASEADA NA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

Trabalho de Conclusão de Curso foi aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, aprovada em sua forma final pelo Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Bom Jesus da Lapa, 04 de agosto de 2025

Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira (UFOB)
(Orientadora)

Prof Dr. Manoel Messias Silva Júnior (UFOB)

Profa. Ma. Natália Lima de Oliveira Santos (UFOB)

Agradecimentos

A trajetória acadêmica, embora repleta de aprendizado, muitas vezes apresenta desafios que nos levam a refletir sobre seguir ou não em frente. Reconheço que muitos consideraram a desistência e que alguns, de fato, buscaram novos caminhos; o que não é um sinal de fraqueza, mas sim de coragem por buscar direções que melhor se adequam. Esse pensamento, em certos momentos, me acompanhou durante alguns anos de graduação. Contudo, o que me impulsionou a continuar, foi a certeza de que esta conquista não pertence apenas a mim, mas também a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para sua realização.

A Deus, Autor da minha fé, Senhor e Salvador da minha vida, vão as minhas primeiras palavras de gratidão. Tudo existe por Ele, através d'Ele e para Ele (Romanos 11:36). A Ele, digno de todo louvor e pelo qual todas as coisas vieram a existir, agradeço por Seu cuidado constante, amor imenso e o conforto que me deu em todos os anos de minha vida, bem como por ter colocado em meu caminho pessoas tão especiais.

À minha família, meu principal apoio, expresso meu sincero reconhecimento. À minha mãe, Cleide, aos meus avós Marlene e Valdemar, às minhas tias Clélia, Clésia, Rafaela (um verdadeiro presente) e ao meu tio Clécio (pelo constante apoio nas viagens de ida e volta dedicadas aos meus estudos), agradeço por todo o amor e ajuda prestados ao longo de toda a minha vida. Sou especialmente grata por terem acreditado em mim, mesmo quando eu duvidava, e por serem o refúgio seguro ao qual sempre pude e posso retornar.

À Kimberly e ao Fialho dedico meus agradecimentos especiais. A presença de vocês tornou a jornada acadêmica mais leve. Sou grata por todos os resumos compartilhados, por todos os docinhos após as provas, por todas as palavras de incentivo nos dias mais cansativos e por todas as risadas que amenizaram a rotina. Muito obrigada por todos os pequenos momentos que fizeram total diferença.

Ao meu marido, Matheus, manifesto minha gratidão por ser aquele que, mesmo à distância (na época), conseguia trazer meus sorrisos mais verdadeiros e, mesmo no silêncio, me fazia sentir acolhida. Aos meus amigos e irmãos em Cristo, que por muitas vezes me lembraram que a vida é muito mais ampla do que imaginamos e que as dificuldades não nos definem.

À Andressa, minha orientadora, a quem vejo como um instrumento escolhido por Deus para me orientar. Sua presença é um canal de bênçãos para todos que a conhecem e, mesmo com a correria do final de curso, foi e é uma fonte de paz. Meus mais sinceros agradecimentos por compartilhar seu conhecimento e sabedoria.

Estendo o meu apreço aos meus chefes e colegas da Rialma: obrigada pelo acolhimento, pelas responsabilidades, pelo suporte nas minhas atividades, pelas viagens e

até pelas reclamações; obrigada por permitir minha imersão no universo da elétrica e por experiências que guardarei por toda a vida.

Por fim, agradeço a todos que estiveram presentes em cada momento, por mais simples que fosse: aos meus colegas ufobianos, aos meus colegas que foram essenciais na fase inicial de adaptação, oferecendo apoio fundamental por estar em uma cidade longe de casa. Aos professores, que me deram a oportunidade de aprender e a todos os funcionários terceirizados que nos recebiam diariamente com um sorriso.

Com sinceridade,
Emily.

“[...] Conta as bênçãos, conta quantas são recebidas da divina mão. Uma a uma, dize-as de uma vez. Hás de ver surpreso quanto Deus já fez. [...]”

(Harpa Cristã, nº 564 - Refrão)

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para a localização de faltas de alta impedância em linhas de distribuição, com base na análise dos sinais de tensão e corrente provenientes da linha. A proposta foi avaliada considerando diferentes resistências de falta ($50\ \Omega$ a $5\ \text{k}\Omega$), ângulos de incidência (0° , 30° , 60° e 90°), tipos de falta e do local de ocorrência ao longo da linha. O estudo foi realizado em um sistema de 3 barras para uma frequência de amostragem de 2 MHz. Os resultados demonstraram que o uso do sinal de corrente, combinado com o ângulo de incidência de 60° , proporcionaram os menores erros de localização, evidenciando um desempenho mais robusto e estável da metodologia, mesmo em condições de resistências elevadas. Observou-se que, para resistências de até $2000\ \Omega$ (resistência típica para o solo de argila seca), o método manteve boa precisão independentemente das demais variáveis. Contudo, para resistências acima de $2500\ \Omega$, os erros aumentaram e passaram a variar conforme o tipo de sinal e o ângulo utilizado, apresentando melhor desempenho novamente com o ângulo de 60° . Além disso, constatou-se, a partir dos resultados obtidos para a metodologia proposta, a acurácia de 99,88%. Por fim, são sugeridas expansões futuras do trabalho, incluindo a aplicação da metodologia a diferentes tipos de faltas (como bifásicas, bifásicas com terra e trifásicas), em sistemas com bifurcação e com diferentes frequências de amostragem, visando maior abrangência e aplicabilidade em cenários reais.

Palavras-chave: Faltas de Alta Impedância, Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, Teoria da Ondas Viajantes, Filtro *Differentiation-Smoother*.

Abstract

This study proposes a methodology for locating high-impedance faults in distribution lines, based on the analysis of voltage and current signals obtained from the line. The approach was evaluated under varying fault resistances ($50\ \Omega$ to $5\ \text{k}\Omega$), incidence angles (0° , 30° , 60° and 90°), fault types, and fault positions along the line. Simulations were performed on a 3-bus system using a 2MHz sampling frequency. Results showed that current signals combined with a 60° incidence angle yielded the lowest localization errors, demonstrating the method's robustness and stability, even under high-resistance conditions. For resistances up to $2000\ \Omega$ —typical of dry clay soil—the methodology maintained high accuracy regardless of other factors. However, for resistances above $2500\ \Omega$, the errors increased and became more sensitive to the signal type and angle, with 60° once again providing the best performance. Furthermore, based on the results obtained for the proposed methodology, an accuracy of 99.88% was observed. Future work includes expanding the methodology to cover additional fault types (such as line-to-line, double line-to-ground, and three-phase faults), systems with branches, and different sampling frequencies, aiming to enhance its applicability in real-world scenarios.

Keywords: High-Impedance Faults, Electric Power Distribution System, Traveling Wave Theory, Differentiator-Smoother Filter.

Lista de Figuras

1	Metodologia da pesquisa	18
2	Circuito equivalente de uma linha de transmissão longa	21
3	Estrutura de poste para média e baixa tensão	23
4	Distribuição percentual dos tipos de falta em sistemas elétricos.	24
5	Circuito com as ondas viajantes	26
6	Localizador de falta tipo D	29
7	Estágios de filtragem do filtro DS	33
8	Diagrama unifilar do sistema de 3 barras	39
9	Modelagem da fonte	40
10	Modelagem da carga	40
11	Modelagem do transformador	41
12	Configuração da linha primária	41
13	Sistema de 3 barras no ATPDraw	42
14	Saída do Filtro DS	45
15	Metodologia da localização das faltas	46
16	Análise do sinal de tensão em função da resistência de falta e ângulo de incidência	49
17	Análise do sinal de corrente em função do ângulo de incidência	51
18	Análise Comparativa dos Sinais de Corrente em Diferentes Ângulos de Incidência	53
19	Análise da Resistência de Falta em Função da Localização de Ocorrência para as Fases A, B e C	55
20	Análise do Erro Percentual em Função do Local de Ocorrência	56
21	Análise do Custo Computacional em Função das Resistências de Faltas	58

Lista de Tabelas

1	Resistividade típica de diferentes tipos de solo	31
2	Valores de corrente de falta em diferentes superfícies.	32
4	Características de FAI de diferentes autores	43
5	Considerações adotadas na análise	44
6	Quantidade de Ocorrências por Resistência de Falta e Tipo de Falta	57

Lista de quadros

1	Principais referências bibliográficas utilizadas	36
---	--	----

Lista de abreviaturas, acrônimos e siglas

SEP	Sistema Elétrico de Potência
LT	Linha de Transmissão
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
FAI	Falta de Alta Impedância
TOV	Teoria das Ondas Viajantes (TW, do inglês <i>Traveling Waves</i>)
DS	<i>Filtro Differentiator-Smoother</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MATLAB®	<i>Matrix Laboratory</i> , ambiente de programação para cálculo numérico
Simulink	Ambiente para modelagem e simulação de sistemas dinâmicos, integrado ao MATLAB®
OVs	Ondas Viajantes
E_a	Erro absoluto
E_P	Erro percentual
DGs	Gerações Distribuídas
VHDL	<i>Hardware Description Language</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
TW	Transformada Wavelet
PL	Preditor Linear
PMUs	<i>Phasor Measurement Units</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
GPS	Sistema de Posicionamento Global (do inglês <i>Global Positioning System</i>)

Lista de Símbolos

V_S	Tensão de entrada
V_R	Tensão de saída
Z	Impedância
R	Resistência
$j\omega L$	Indutância
I_R	Corrente de saída
I_S	Corrente de entrada
Z_S	Impedância de surto
i_{OV}	características das ondas viajantes geradas
R_f	Resistência de falta
v_f	Valor de pico da tensão
v_{OV}	Amplitude das ondas de tensão
l	Comprimento total da linha de transmissão
$\%$	Porcentagem
t_A	Instante em que a primeira onda gerada chega ao terminal A
t_B	Instante em que a primeira onda gerada chega ao terminal B
v_p	Velocidade de propagação da onda na linha
d	Distância da falta
$\ll$	Muito menor que
$<$	Menor que
A	(Ampere) Corrente
Ω	Letra grega (Ômega) maiúscula
G	Ganho

V	Volts
AT	Falta entre fase A e o terra
BT	Falta entre fase B e o terra
CT	Falta entre fase C e o terra
km	Quilômetros
Hz	(Hertz) Frequência
T_1	Terminal 1
T_2	Terminal 2

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	Justificativa	18
1.3	Metodologia da pesquisa	18
1.4	Organização do texto	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica - SDEE	21
2.1.1	Modelagem do SDEE	21
2.1.2	Aspectos Construtivos - Linhas Aéreas	22
2.1.3	Proteção do SDEE	24
2.2	Ondas Viajantes - OV's	26
2.2.1	Localizador de Falta	27
2.2.2	Erro percentual	28
2.3	Falta de Alta Impedância - FAI	29
2.4	Filtro DS	31
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
3.1	Revisão Bibliográfica	34
4	METODOLOGIA	39
4.1	Modelagem do sistema teste	39
4.2	Considerações adotadas na análise	42
4.3	Metodologia proposta para a localização de faltas	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47

5.1	Análise de sensibilidade na localização de faltas	48
5.1.1	O Efeito do Tipo de Sinal e Ângulo de Incidência	48
5.1.2	O Efeito da Resistência de Falta e do Local de Ocorrência da Faltas	54
5.1.3	Avaliação quanto ao Tipo de Solo	56
5.2	Análise do Custo Computacional	58
6	CONCLUSÕES	59
6.1	Trabalhos Futuros	60
	REFERÊNCIAS	65
A	CÓDIGO PARA GERAÇÃO DE ARQUIVOS .ATP COM FALTAS EN- VOLVENDO TERRA	66

INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) abrange todo o processo desde a geração de energia até a entrega para o consumo final. É composto por usinas geradoras, linhas de transmissão de alta tensão e sistemas de distribuição, incluindo transformadores, dispositivos de proteção e outros componentes de operação e manutenção (ZANETTA, 2006). Devido à sua importância, é necessário que o SEP seja seguro e confiável, uma vez que qualquer interrupção pode afetar um grande número de pessoas, comprometendo atividades essenciais para o bem-estar e desenvolvimento da sociedade.

De acordo com Tleis (2008), uma falta é caracterizada como uma condição anormal resultante de uma falha elétrica em um equipamento do sistema. Essa condição pode incluir um curto-circuito, um contato inadequado ou qualquer outro defeito que interrompa o fluxo normal da corrente elétrica. As principais interrupções no SEP ocorrem nas Linhas de Transmissão (LT) e no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) sendo frequentemente causadas por fenômenos naturais, como descargas atmosféricas, e por deficiências em materiais e equipamentos (FILHO, 2024).

Cerca de 90% das faltas que ocorrem no SDEE são caracterizadas por uma resistência elevada no ponto de ocorrência, sendo assim denominadas como Falta de Alta Impedância (FAI) (KINDERMANN, 1992). Esse tipo de falta ocorre devido ao rompimento de condutores em redes aéreas causadas por condições climáticas adversas, contato com vegetação, danos a equipamentos, entre outros fatores similares.

Devido à sua alta resistência, as FAIs geram uma corrente reduzida, o que dificulta sua detecção pelos sistemas de proteção convencionais, que frequentemente as interpretam como operações normais de carga (BENNER; RUSSELL, 1997). Para lidar com esses desafios de forma eficaz, é fundamental determinar com precisão o ponto de ocorrência

da falta. Nesse contexto, uma das metodologias mais destacadas é a aplicação da Teoria das Ondas Viajantes (TW, do inglês *Traveling Waves*).

A localização de faltas em redes de energia, fundamentada na teoria das ondas viajantes, utiliza componentes de alta frequência dos sinais transitórios decorrentes de uma falta. Quando ocorre uma anomalia no sistema, geram-se sinais de alta frequência que se propagam rapidamente em ambas as direções ao longo da rede. O tempo de propagação desses sinais entre dois pontos distintos é empregado para identificar com precisão o local da falta (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

Para a análise das ondas viajantes, é necessário utilizar filtros que extraíam informações relevantes das componentes dos sinais de falta. Um dos filtros que pode ser utilizado para esse fim é o *Differentiator-Smoother* (DS). Este filtro é empregado devido à sua capacidade de proporcionar uma análise clara e eficiente, identificando com precisão eventos transitórios e eliminando de forma eficaz ruídos indesejados, como sinais de baixa frequência, que causam distorções nos dados (SCHWEITZER; KASZTENNY; MYNAM, 2015).

O sistema de distribuição é uma parte fundamental do sistema elétrico de potência (SEP), responsável por distribuir a energia gerada e transmitida para os consumidores. Devido à sua importância, o mesmo deve ser altamente confiável e seguro, com capacidade para correções rápidas em casos de irregularidades. Dessa forma, para este trabalho foi utilizado um sistema de 3 barras para localizar faltas de alta impedância em sistemas de distribuição, utilizando a teoria das ondas viajantes em conjunto com o processamento do filtro DS.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Localizar faltas de alta impedância em sistema de distribuição de energia elétrica utilizando o filtro DS aplicado à teoria das ondas viajantes.

1.1.2 Objetivos específicos

- Simular o sistema de distribuição de energia elétrica com 3 barras no *software* ATPDraw® e coletar os dados de tensão e corrente em terminais de leitura;
- Implementar o filtro DS no MATLAB® para extrair dados característicos dos sinais de tensão e corrente;

- Avaliar a precisão estimada baseada na teoria das ondas viajantes a partir dos dados obtidos por dois terminais;
- Comparar a precisão da localização de faltas obtida a partir da variação dos elementos utilizados nos cenários estudados.

1.2 Justificativa

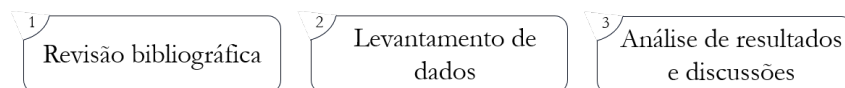
A confiabilidade do sistema elétrico de potência é fundamental para assegurar que a energia elétrica seja gerada, transmitida e distribuída de maneira segura e eficiente. Devido à sua complexidade e extensão, diversas faltas podem ocorrer ao longo de todo o processo. Tais faltas podem resultar em interrupções no fornecimento de energia, causando sérios inconvenientes para consumidores residenciais, industriais e comerciais, além de potencialmente comprometer serviços essenciais.

Assim, se faz necessário desenvolver métodos eficientes voltados à localização de faltas em sistemas de distribuição, com o intuito de minimizar prejuízos e impactos significativos. Esse enfoque não só assegura a continuidade do fornecimento de energia elétrica, mas também contribui para a segurança, a eficiência operacional e a redução de custos associados a reparos e substituições de equipamentos danificados.

1.3 Metodologia da pesquisa

A pesquisa apresentada classifica-se como exploratória qualitativa, com o propósito de desenvolver e esclarecer conceitos e ideias, permitindo uma formulação mais precisa de problemas e hipóteses, por meio da coleta de dados (HENRIQUES; MEDEIROS, 2017). A Figura 1 apresenta uma síntese da metodologia aplicada ao longo do projeto.

Figura 1 – Metodologia da pesquisa



1. Revisão bibliográfica: Consiste na análise de informações e estudos relevantes sobre o tema, com fundamento científico, proporcionando uma base teórica sólida para a pesquisa;
2. Levantamento de dados: Inclui a extração dos sinais de tensão ou corrente para a localização de faltas, utilizando informações obtidas por um e dois terminais. Esses

dados serão coletados por meio de simulações realizadas no *software* ATPDraw, que serão utilizados no algoritmo realizado no MATLAB®;

3. Análise de resultados e discussões: Compreende a análise dos resultados obtidos e a comparação dos mesmos com a literatura existente, explorando suas implicações teóricas e limitações.

1.4 Organização do texto

O trabalho está estruturado em seis capítulos, dos quais este primeiro contextualiza a pesquisa e destaca a necessidade de aprimorar as metodologias de identificação de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica. Os demais são:

Capítulo 2 – Apresentação do Sistema Elétrico Brasileiro, modelagem das linhas de distribuição, característica de proteção e conceituação dos métodos de localização de faltas;

Capítulo 3 – Apresentação de trabalhos relevantes ao tema de pesquisa;

Capítulo 4 – Aplicação da teoria das Ondas Viajantes e do filtro DS na localização de faltas em um sistema de distribuição de energia elétrica;

Capítulo 5 – Resultados e discussões, trazendo a comparação dos dados obtidos com trabalhos disponibilizados na literatura;

Capítulo 6 – Apresentação da conclusão do trabalho, bem como sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A maior parte das interrupções no sistema elétrico brasileiro ocorre nas linhas de transmissão e redes de distribuição, sendo os fenômenos naturais os principais responsáveis. Entre as causas mais comuns, destacam-se as descargas atmosféricas, que geram surtos de tensão e danos aos equipamentos, além das rupturas de cabos provocadas por esforços mecânicos excessivos ou condições climáticas extremas.

Em 2023, o Brasil registrou aproximadamente 47 mil interrupções no fornecimento de energia elétrica causadas por incêndios e queimadas, de acordo com uma pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Distribuidores de Energia (ABRADEE). Esses incidentes destacam outro fator principal responsável pelo elevado número de rompimentos de cabos aéreos, afetando diretamente a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia (Agência Brasil, 2023). Além disso, falhas em materiais e equipamentos, frequentemente associadas ao desgaste ou à ausência de manutenção regular, somadas ao contato dos condutores com a vegetação, como o crescimento de árvores que ultrapassam os limites das faixas de servidão, prejudicam a infraestrutura elétrica e aumentam a frequência de interrupções no fornecimento de energia.

O impacto ambiental e econômico dessas ocorrências é significativo, gerando custos para o reparo das redes, interrupções para consumidores e riscos à segurança de comunidades próximas às áreas atingidas. Esses fatores ressaltam a importância de dispositivos de proteção e métodos eficazes para prevenir, assegurar, detectar e corrigir a ocorrência de interrupções no fornecimento de energia (FILHO, 2024).

2.1 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica - SDEE

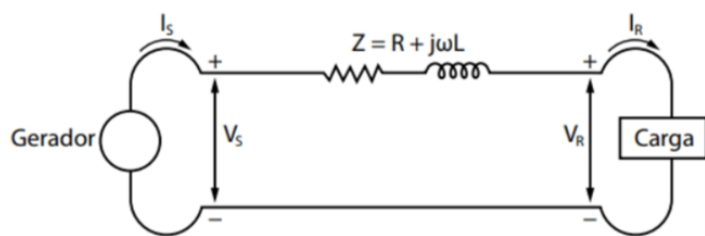
O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) é responsável por transportar a energia elétrica das subestações até os consumidores finais, garantindo uma entrega segura e com qualidade. É composto por uma rede de cabos, transformadores e dispositivos de proteção, que têm a função de minimizar perdas e interrupções no fornecimento. A maior parte dessa rede é aérea, o que acarreta desafios específicos, como a vulnerabilidade a condições climáticas adversas, que podem causar falhas ou danos aos componentes do sistema. Além disso, o SDEE deve ser projetado para detectar e corrigir falhas rapidamente, assegurando a continuidade do serviço e a eficiência do sistema. Esses aspectos tornam o SDEE crucial para a operação de sistemas modernos, exigindo alta confiabilidade e robustez no planejamento e na manutenção (KAGAN, 2010).

2.1.1 Modelagem do SDEE

O SDEE é estruturado a partir de conceitos e parâmetros utilizados nas Linhas de Transmissão (LT), adaptados para refletir as características específicas do sistema de distribuição. O modelo de uma LT leva em consideração quatro parâmetros principais: resistência, indutância, capacitância e condutividade. A resistência e a indutância formam a impedância, enquanto a capacitância e a condutividade formam a admitância. Cada um desses parâmetros exerce uma influência direta sobre o comportamento do sistema, sendo essenciais para uma modelagem precisa.

Ao analisar as características das LT para o SDEE, é possível simplificar o modelo ao ignorar dois dos principais parâmetros mencionados: a condutância e a capacitância. Dessa forma, o modelo torna-se um circuito de corrente alternada simples em série. O circuito equivalente de uma LT curta é representado na Figura 2.

Figura 2 – Circuito equivalente de uma linha de transmissão longa



Fonte: Binotto, Zamodzl e Texeira (2018)

A condutância pode ser negligenciada devido à configuração da rede estudada, que é uma rede aérea. Nesse tipo de rede, a corrente de fuga gerada pelos isoladores é extremamente baixa, o que torna a condutância praticamente irrelevante para a análise.

Assim, a contribuição deste parâmetro para o desempenho global da linha é mínima, permitindo sua exclusão sem afetar significativamente a precisão do modelo (BINOTTO; ZAMODZL; TEXEIRA, 2018).

Ao desconsiderar a condutância, a linha aérea pode ser tratada como predominantemente capacitiva. Esse comportamento ocorre devido à baixa resistência ao fluxo de corrente, o que resulta em uma alta capacitância ao longo da extensão da linha. Todavia, a capacitância também pode ser desprezada em função da extensão da rede de distribuição quando comparada às LT.

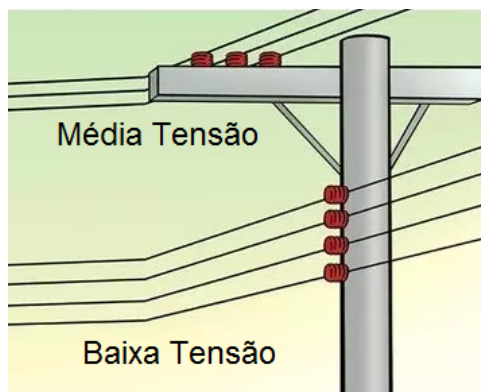
Em termos da extensão do SDEE é possível classificar o sistema como uma linha de transmissão curta. Essa classificação implica que a distribuição dos parâmetros ao longo da linha ocorre de forma relativamente uniforme, o que viabiliza a simplificação de certos cálculos sem comprometer a precisão dos resultados da análise. Em linhas curtas, a capacitância em derivação, que representa a carga capacitiva associada aos condutores e isoladores ao longo da linha, exerce um impacto reduzido, uma vez que a distância não é suficientemente grande para que os efeitos de propagação da onda e as perdas capacitivas e indutivas sejam tão pronunciados quanto nas linhas longas. Portanto, essa variável pode ser desconsiderada em uma análise concentrada, sem que haja efeitos significativos na modelagem do sistema.

A análise concentrada, ao excluir parâmetros de impacto menor, permite um foco maior nos parâmetros que realmente influenciam o desempenho do sistema, como a impedância e a reatividade. Esses parâmetros são determinantes para a dinâmica elétrica da rede, afetando a distribuição de corrente, as perdas de energia e o controle da tensão. Assim, a simplificação promovida pela análise concentrada torna a modelagem mais eficiente e direcionada aos aspectos mais relevantes do sistema, sem prejudicar a qualidade dos resultados obtidos (STEVENSON, 1986).

2.1.2 Aspectos Construtivos - Linhas Aéreas

As redes de distribuição de energia elétrica podem ser classificadas em dois tipos principais: redes aéreas, que utilizam postes e estruturas elevadas para suporte dos condutores, e redes subterrâneas, onde os cabos são instalados em dutos ou diretamente no solo.

Devido às suas vantagens econômicas e facilidade de instalação e manutenção, as redes aéreas de distribuição de energia elétrica são a escolha predominante em regiões menos densamente povoadas e em cenários no qual a rapidez na implementação é essencial. Em contrapartida, as redes subterrâneas, apesar de apresentarem custos mais elevados, oferecem maior proteção contra intempéries e vandalismos, sendo preferíveis em áreas com

Figura 3 – Estrutura de poste para média e baixa tensão

Fonte: ENEGES (2025)

alta densidade de carga, locais congestionados por equipamentos e regiões com exigências estéticas e ambientais, como pontos turísticos (BARROS, 2020).

As redes aéreas de distribuição de energia elétrica são projetadas e construídas utilizando postes, geralmente de concreto ou madeira, que servem como estrutura de suporte para os componentes do sistema. Outra peça fundamental desse tipo de rede é a cruzeta, que estão localizados os pinos que fixam os cabos energizados. Esses cabos são comumente fabricados em alumínio, com ou sem alma de aço, e podem ser classificados como nus ou protegidos, dependendo da necessidade de isolamento e proteção mecânica.

As redes aéreas podem ser subdivididas em três tipos principais, de acordo com suas características construtivas e funcionais:

Rede de Distribuição Aérea Convencional: Composta por cabos nus fixados em isoladores sobre cruzetas. Esse tipo de rede é amplamente utilizado devido ao baixo custo inicial e à simplicidade de instalação, mas apresenta maior suscetibilidade a falhas causadas por curto-circuitos decorrentes de contato com galhos, animais ou objetos externos.

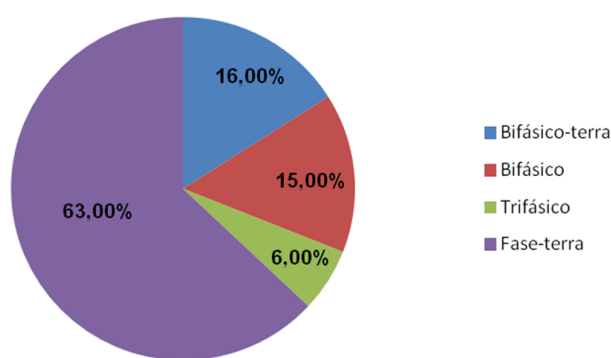
Rede de Distribuição Aérea Compacta: Essa rede utiliza cabos nus dispostos em uma configuração mais compacta e próximos uns dos outros, reduzindo a ocupação do espaço aéreo. Os condutores são mantidos sob tensão por espaçadores, que garantem o afastamento adequado entre eles. Esse tipo de rede é indicado para áreas urbanas onde a densidade de estruturas é alta.

Rede de Distribuição Aérea Isolada: Composta por cabos isolados, essa rede é projetada para operar em condições em que há maior proximidade com árvores, estruturas urbanas ou outros objetos. Devido ao isolamento dos condutores, esse tipo de rede oferece maior segurança operacional e menor probabilidade de interrupções causadas por contatos acidentais. No entanto, seu custo de implantação é mais elevado em comparação às redes convencionais.

2.1.3 Proteção do SDEE

As faltas em sistemas elétricos podem ser classificadas como balanceadas ou desbalanceadas. Uma falta balanceada afeta as três fases de maneira igual, também chamada de falta trifásica. Já a falta desbalanceada afeta as fases de forma desigual e pode ser monofásica (uma fase), bifásica (duas fases) ou bifase-terra (duas fases com contato com o solo). A Figura 4 ilustra a distribuição percentual dos diferentes tipos de falta, destacando a predominância das faltas fase-terra em comparação com os demais tipos.

Figura 4 – Distribuição percentual dos tipos de falta em sistemas elétricos.



Fonte: Cobelo (2019)

As faltas podem ser permanentes ou transitórias. Uma falta permanente não pode ser corrigida, mesmo após tentativas de religamento, e o circuito permanece aberto para evitar mais danos ao sistema. Já uma falta transitória pode ser corrigida com sucesso após o religamento, mas ainda pode causar ondas que desestabilizam as fases, prejudicando temporariamente o funcionamento do sistema elétrico (PANINI JR, 2015).

Os principais dispositivos empregados na proteção de sistemas elétricos são os fusíveis e os relés. Os fusíveis operam por meio da fusão de um elemento condutor quando submetidos a uma corrente excessiva, interrompendo o circuito de forma irreversível. Já os relés são dispositivos mais sofisticados, capazes de detectar e responder a diferentes anomalias no sistema elétrico, como sobrecarga, curto-circuito, sobretensão e subtensão.

A evolução dos relés acompanhou o desenvolvimento tecnológico, partindo dos modelos eletromecânicos, conhecidos por sua robustez e confiabilidade, passando pelos relés eletrônicos e, mais recentemente, pelos relés digitais microprocessados. Estes últimos possibilitaram um avanço significativo na proteção elétrica, ao incorporar processamento de sinais e algoritmos de tomada de decisão mais avançados. No entanto, essa evolução também trouxe desafios, como a necessidade de maior capacitação técnica para operação e manutenção, além da obsolescência acelerada da tecnologia digital.

Além de identificar e classificar as faltas, os sistemas modernos de proteção tam-

bém buscam localizá-las com precisão, reduzindo o tempo de resposta e os impactos ao fornecimento. À vista disso, existem três grupos principais de métodos com esse objetivo: algoritmos com base na impedância aparente, ondas viajantes e redes neurais (CAVALARI et al., 2022).

A primeira, baseada na impedância aparente, utiliza as componentes fundamentais de tensão e corrente medidas na subestação para estimar a impedância entre a origem e o ponto da falta. Embora de fácil implementação e sem necessidade de equipamentos adicionais no alimentador, sua precisão é comprometida em casos de faltas de alta impedância, onde as baixas correntes dificultam medições precisas. Em contraste, os métodos que empregam inteligência artificial, como as Redes Neurais Artificiais (RNAs), exploram sua natureza não linear para reconhecer padrões complexos, todavia, exigem extensas simulações para treinamento e demandam retreinamento caso a topologia da rede seja alterada (REZAPOUR; JAMALI; BAHMANYAR, 2023).

No contexto das proteções baseadas em ondas viajantes, os relés digitais desempenham um papel fundamental. Devido à sua capacidade de operar com altas taxas de amostragem e processar sinais em tempo real, esses dispositivos permitem a detecção rápida e precisa de faltas, algo inviável com as tecnologias convencionais. Enquanto os métodos tradicionais de proteção baseiam-se na análise de grandezas elétricas em regime permanente, a abordagem por ondas viajantes foca na caracterização de transientes de alta frequência, garantindo maior imunidade a fenômenos de baixa frequência e proporcionando uma localização mais exata das faltas em linhas de transmissão (MAMEDE FILHO, 2020).

Um localizador de falta é um sistema que identifica com precisão onde ocorreu uma falta. O mesmo usa cálculos avançados para estimar a distância e pode até identificar seu tipo e calcular a impedância envolvida. Esses dispositivos trabalham junto com relés digitais e outros equipamentos inteligentes, compartilhando dados e aumentando a confiabilidade da proteção do sistema elétrico.

Antes, a localização de faltas em redes elétricas dependia de inspeções visuais demoradas e dispendiosas, como patrulhas terrestres ou aéreas. Com o avanço dos localizadores automáticos, esse processo tornou-se significativamente mais ágil e eficiente, graças à utilização de métodos baseados em impedância, redes neurais e ondas viajantes. Cada metodologia apresenta uma aplicabilidade específica, de acordo com os parâmetros considerados. Em sistemas de distribuição com diferentes topologias e possibilidade de faltas com impedâncias elevadas, os métodos baseados em ondas viajantes mostram-se mais adequados, pois analisam a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas geradas no instante da falta, determinando sua localização com base no tempo que essas ondas levam para atingir os terminais da linha. Por esse princípio, são menos sensíveis às variações normais de carga e às condições operacionais do sistema (PANINI, 2015).

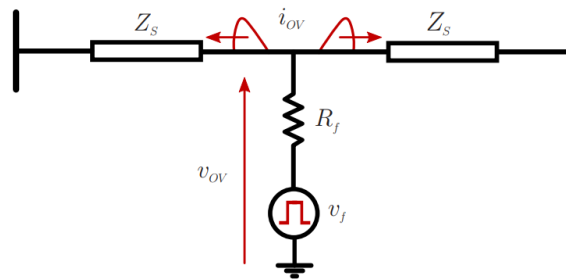
2.2 Ondas Viajantes - OVs

Devido aos avanços tecnológicos na área de processamento de sinais, surgiram dispositivos de proteção com taxas de amostragem cada vez mais altas, capazes de capturar sinais em frequências na ordem de centenas de kHz ou até mesmo MHz. Essa evolução permite uma análise detalhada de fenômenos transitórios que ocorrem em sistemas de transmissão e distribuição, possibilitando maior precisão e rapidez na detecção de falhas. Exemplos desses dispositivos incluem os relés digitais, usualmente utilizados na proteção de sistemas elétricos.

A análise baseada em ondas viajantes apresenta diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais. Por operar com sinais de alta frequência, essa técnica é imune a fenômenos de baixa frequência, como oscilações de potência, saturação de transformadores de corrente e ruídos presentes nos sinais da frequência fundamental. Essa característica torna as ondas viajantes uma abordagem ideal para sistemas modernos que demandam maior confiabilidade e robustez na detecção e localização de faltas (RIBEIRO et al., 2020).

As ondas viajantes são fenômenos que ocorrem em sistemas de energia elétrica quando há perturbações abruptas, como faltas, comutação de circuitos ou descargas atmosféricas. Esses distúrbios, chamados também como transientes, geram variações de tensão e corrente que se propagam ao longo da linha em ambas as direções a partir do ponto de origem da perturbação, o que pode afetar diretamente as condições de operação da rede elétrica. A Figura 5 ilustra a propagação dessas ondas ao longo de uma linha, evidenciando os efeitos das variações de tensão e corrente causadas pelas perturbações.

Figura 5 – Circuito com as ondas viajantes



Fonte: Ribeiro et al. (2020)

No momento da falta, a tensão instantânea v_f representa o valor de pico da tensão no local afetado, enquanto as amplitudes das ondas de tensão v_{ov} e corrente i_{ov} indicam as características das ondas geradas pela perturbação. Essas informações são essenciais para o diagnóstico e a análise do impacto da falha no sistema. A resistência de falta R_f , por sua vez, desempenha um papel crucial na dinâmica das ondas viajantes, pois ela reflete a dissipação de energia associada à falha, afetando tanto a amplitude quanto a distribuição

da onda ao longo da linha. A impedância de surto Z_s da linha de transmissão, por sua vez, representa a resistência da linha à passagem das ondas, influenciando a velocidade e a intensidade com que elas se propagam.

A interação das ondas viajantes com os componentes da linha pode causar reflexões e atenuações impactando a eficiência do sistema elétrico e a proteção dos equipamentos. A detecção e mitigação eficaz dessas ondas são essenciais para garantir a continuidade do fornecimento de energia e a integridade da rede. O estudo das ondas viajantes contribui para o desenvolvimento de soluções de proteção mais avançadas, otimizando as respostas automáticas do sistema e minimizando danos, como no desligamento rápido de seções afetadas, evitando interrupções no fornecimento de energia (DAS; SANTOSO; ANANTHAN, 2022).

Os transientes gerados em uma falta deslocam-se pela linha de transmissão até atingirem suas extremidades, no qual estão instalados os detectores de ondas viajantes. Ao chegar aos terminais da linha, registram-se mudanças abruptas, conhecidas como degraus, nas formas de onda de tensão e corrente. Essas alterações indicam a chegada das frentes de onda originadas no ponto de falta. Após o impacto inicial, ocorre a reflexão e a propagação das ondas ao longo da linha, gerando interação entre ondas refletidas e transmitidas. Essa superposição modifica os padrões originais dos transientes, resultando na formação de novas formas de onda (LOPES et al., 2019).

2.2.1 Localizador de Falta

Os localizadores de faltas de ondas viajantes são classificados em cinco tipos principais: A, B, C, D e E, de acordo com o método de medição adotado. O tipo A, que utiliza terminação única, captura os transientes em apenas uma extremidade da linha e determina a localização da falta a partir das reflexões geradas pelas descontinuidades no sistema. Por outro lado, os tipos B e C, que empregam circuitos geradores de pulso, foram progressivamente substituídos por tecnologias mais modernas devido à sua complexidade e alto custo. O tipo B, de dois terminais, envia sinais entre as extremidades da linha após detectar os transientes, enquanto o tipo C, funciona como um radar de circuito fechado, injetando pulsos na linha e analisa suas reflexões.

O tipo E combina características de terminação única e dupla e utiliza algoritmos avançados para otimizar a análise dos transientes. Isso permite que o tipo E seja altamente eficiente, atendendo às demandas de sistemas que requerem maior robustez e desempenho na detecção de faltas. Devido a essas vantagens tecnológicas, tanto o tipo E quanto o tipo D têm se tornado os modelos preferenciais em sistemas modernos de transmissão de energia elétrica, onde a precisão e a confiabilidade são essenciais (KRZYSZTOF et al., 2011).

O modelo D de localizador de faltas de ondas viajantes se baseia na detecção precisa da primeira partida das frentes de onda em cada extremidade da linha, utilizando temporizadores sincronizados. Após a ruptura, o comportamento do arco de falta e as descontinuidades da linha não afetam mais a medição, simplificando o processo. A reflexão das terminações da linha não é relevante, sendo necessário apenas considerar o tipo de detecção utilizado, como detecção de tensão nas extremidades com disjuntores abertos e de corrente onde o disjuntor está fechado.

Nesse modelo, as ondas geradas pela falta se propagam em direções opostas, chegando rapidamente às subestações A e B. A equação que define a localização da falta para este modelo de dois terminais pode ser expressa como:

$$d = \frac{l + (t_A - t_B) * v_p}{2} \quad (1)$$

onde:

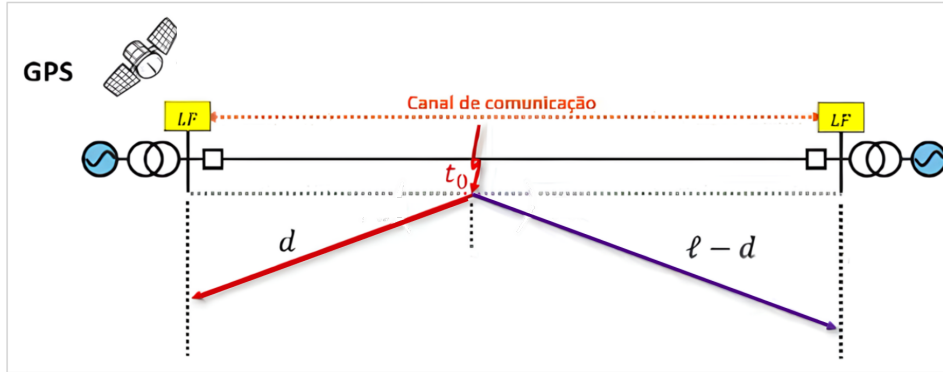
- d é a distância da falta em relação ao terminal analisado;
- l é o comprimento total da linha analisada;
- t_A é o instante em que a primeira onda gerada chega ao terminal A , em segundos;
- t_B é o instante em que a primeira onda gerada chega ao terminal B , em segundos;
- v é a velocidade de propagação da onda na linha;

A precisão na determinação da distância até a falta exige que os dispositivos de medição em ambas as extremidades da linha estejam sincronizados. Essa sincronização é realizada por meio de um sistema GPS (do inglês *Global Positioning System*), garantindo que a diferença de tempo entre a chegada das ondas seja precisa. A Figura 6 ilustra o processo de propagação das ondas geradas pela falta e a sincronização das medições nas subestações A e B.

Focar na análise de dois terminais é essencial para aprimorar a precisão da localização das faltas, uma vez que possibilita a comparação das ondas viajantes geradas em cada extremidade do sistema, facilitando a estimativa da distância e a identificação da falta com maior confiabilidade.

2.2.2 Erro percentual

As equações de erro absoluto (Ea) e erro percentual (Ep) são fundamentais para avaliar a precisão de métodos utilizados, uma vez que os métodos baseados em ondas

Figura 6 – Localizador de falta tipo D

Fonte: LOPES et al. (2021)(Adaptado)

viajantes devem apresentar erros pequenos para garantir a confiabilidade e a eficácia na proteção do SEP.

O erro absoluto calcula a diferença entre a posição real da falta e a posição estimada pelo modelo. Esse cálculo é importante para medir o desvio na localização da falta, ajudando a ajustar os algoritmos e a identificar possíveis fontes de imprecisão, como variações na velocidade de propagação ou erros no tempo de chegada das ondas nos terminais. A equação do erro absoluto pode ser vista na Equação 2.

O erro percentual oferece uma visão relativa da precisão do método, levando em consideração o comprimento total da linha de transmissão. Esse valor é importante para comparar a performance de diferentes técnicas de localização, garantindo que o erro seja avaliado de forma proporcional ao sistema analisado. A equação do erro percentual pode ser vista na Equação 3.

$$Ea_2 = vt - x_2 \quad (2)$$

$$Ep_2 = \frac{|x_2 - vt|}{L} \times 100 \quad (3)$$

2.3 Falta de Alta Impedância - FAI

No primeiro semestre de 2021, cabos rompidos em redes aéreas de distribuição foram registrados como a quinta principal causa de mortes relacionadas à eletricidade no Brasil (DAMIAO et al., 2022). Esse cenário se deve ao fato de que aproximadamente 90% das faltas em redes de distribuição são classificadas como de alta impedância, cuja detecção apresenta maior dificuldade para a atuação eficaz dos dispositivos de proteção (BACIL, 2020).

A Falta de Alta Impedância (FAI) ocorre em sistemas de distribuição quando os cabos entram em contato com superfícies de baixa condutividade, como árvores, asfalto, concreto ou grama, sendo frequentemente causada por descargas atmosféricas, corrosão ou contato com árvores. A principal característica da FAI é a baixa magnitude da corrente de falta, que é insuficiente para acionar dispositivos convencionais de proteção, como relés e fusíveis. Isso permite que os condutores energizados fiquem em contato com o solo por períodos prolongados, elevando os riscos de choques elétricos para pessoas e animais nas proximidades.

As FAIs são um tipo de curto-circuito que pode ser balanceado ou desbalanceado. Elas ocorrem quando uma ou mais fases do alimentador primário de um sistema elétrico entram em contato com superfícies de alta resistência, como solo ou árvores. A corrente gerada por esse tipo de falta é muito baixa, semelhante à corrente normal de operação do sistema ou a distúrbios comuns, como o chaveamento de bancos de capacitores. Essa característica torna a FAI difícil de detectar, o que representa um desafio significativo para as distribuidoras de energia e para a comunidade científica, que buscam métodos mais eficazes de identificação e proteção contra esse tipo de falha (COBELO, 2019).

Em geral, as distribuidoras adotam uma impedância máxima de falta de 40Ω nos cálculos de curto-circuito à terra, com o objetivo de dimensionar adequadamente os dispositivos de proteção. No entanto, os níveis reais de resistência de falta podem ser bem mais altos, dependendo das condições do solo e dos elementos presentes na superfície. Fatores como o tipo e a umidade do solo, além da presença de materiais que conduzem corrente — como tubos metálicos de água, cercas de metal e até raízes de árvores — podem influenciar significativamente a resistência (BATISTA et al., 2022).

Nesse contexto, a Tabela 1 apresenta as resistividades típicas de diferentes tipos de solo. Esses valores devem ser entendidos como estimativas típicas, e não como valores fixos ou invariáveis. Isso porque a resistividade do solo varia bastante conforme características como umidade, concentração e tipo de sais minerais presentes na água, granulometria e temperatura. Além disso, essas propriedades podem mudar de uma região para outra e até com a profundidade, o que faz com que o solo possa se comportar, em alguns casos, como um isolante quando seco, ou como um mau condutor mesmo em condições naturais (Fluke Corporation, 2006).

Quanto maior a resistividade do solo, menor será a corrente que consegue circular em caso de uma falha. Por isso, solos com resistividade elevada tendem a gerar correntes de falta mais baixas, o que pode impactar diretamente a detecção dessas ocorrências pelos sistemas de proteção. A Tabela 2 apresenta valores típicos de corrente de falta associados a diferentes tipos de solo, com base em suas resistividades características. Essa correlação é essencial para avaliar a sensibilidade dos dispositivos de proteção e destaca a importância de se conhecer bem as propriedades do solo em análises voltadas à segurança

Tabela 1 – Resistividade típica de diferentes tipos de solo

Tipo de solo	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Observações
Lama, solo muito úmido, pantanoso	5 a 100	-
Argila úmida, solo de cultivo, solo margoso	80	40% umidade
	330	20% umidade
	140	50% umidade
Terra de jardim	480	20% umidade
Solo de argila arenosa	150	-
Solo arenoso úmido	300	-
Concreto 1:5	400	-
Cascalho molhado	500	-
Solo arenoso seco	1000	-
Cascalho seco	1.000	-
Calcário compacto	1.000 a 5.000	-
Areia molhada	1.300	-
Argila seca	1.500 a 5.000	-
Areia seca	3.000 a 8.000	-

Fonte: Fluke Corporation (2006)(Adaptado)

e à confiabilidade dos sistemas elétricos.

O desenvolvimento de tecnologias voltadas à detectar e localizar faltas de alta impedância ajuda a reduzir significativamente o tempo de interrupção e impactos assim como, melhorar a confiabilidade do sistema. Os métodos existentes podem ser classificados de acordo com os parâmetros analisados, como fasores pós-falta, impedância, ondas viajantes, inteligência artificial e outras (CAVALARI et al., 2022).

2.4 Filtro DS

O filtro *Differentiator-Smoother* (DS) é uma ferramenta utilizada na análise de transitórios em sistemas de transmissão de energia, aproveitando o fenômeno das ondas viajantes que surgem nesses sistemas. Esses transitórios ocorrem quando há eventos como faltas, gerando variações rápidas nas tensões e correntes que se propagam pela linha de transmissão em altíssimas velocidades, próximas à velocidade da luz. Essas ondas são parcialmente refletidas e transmitidas em cada ponto no qual encontram mudanças nas

Tabela 2 – Valores de corrente de falta em diferentes superfícies.

Superfície	Corrente de Falta (A)
Asfalto seco	$\ll 1$
Concreto (não reforçado)	< 1
Areia seca	< 1
Areia molhada	15
Gramma seca	20
Gramma molhada	40
Pasto molhado	50
Concreto (reforçado)	75

Fonte: Batista et al. (2022)

características do sistema, como terminais e transformadores, e possuem componentes de alta frequência, exigindo dispositivos de proteção com alta taxa de amostragem para uma análise precisa.

Projetado para operar em janelas de tempo de 20 microssegundos (μs) com uma taxa de amostragem de 1 MHz, o filtro DS utiliza coeficientes ajustados, de modo que a primeira metade da janela apresenta um ganho negativo (-G) e a segunda metade, um ganho positivo (+G), sendo $G = 1$ para os parâmetros mencionados. Esse ajuste permite ao filtro detectar variações bruscas nos sinais, como degraus de tensão e corrente, facilitando a identificação de fenômenos transitórios (LOPES et al., 2019).

O filtro segue três estágios de operação:

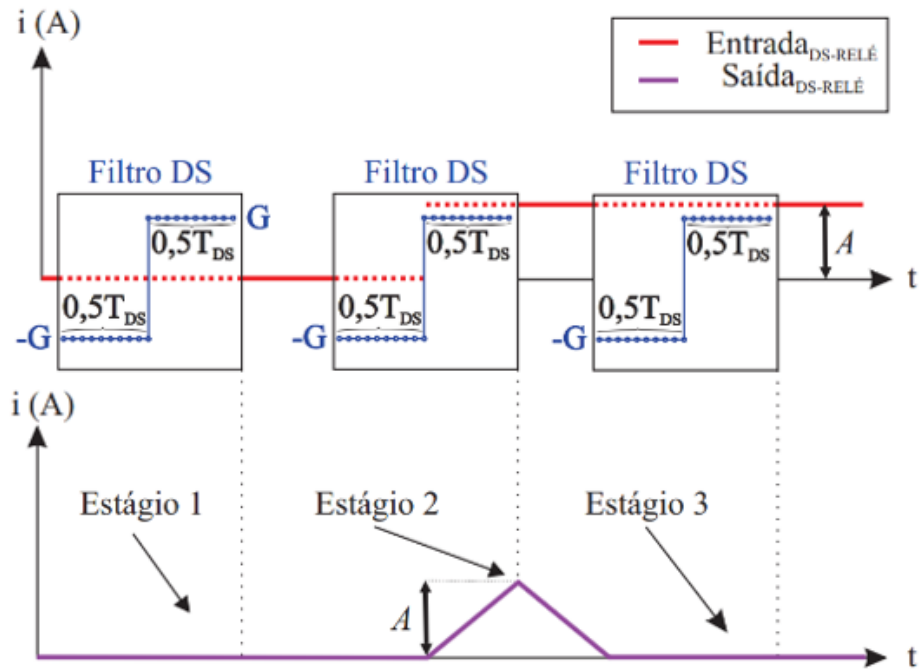
1. Saída zero antes da variação do sinal;
2. Com a borda de subida do sinal em degrau, a saída do filtro começa a crescer, atingindo um valor máximo quando as bordas de subida do sinal e do filtro se alinha;
3. A saída do filtro decresce até retornar ao regime permanente, estabilizando-se.

Essa resposta do filtro é eficaz na detecção de transientes e falhas, já que reage de forma sensível às mudanças rápidas no sinal, sendo ideal para aplicações de proteção em sistemas elétricos. A Figura 7 ilustra o comportamento da saída do filtro ao longo desses estágios.

A utilização do filtro DS para análise das ondas viajantes possibilita uma detecção mais eficiente de transitórios, eliminando ruídos e componentes de baixa frequência que não são relevantes. Como as ondas viajantes carregam informações sobre a localização e a severidade das faltas, o filtro DS se torna uma ferramenta essencial para dispositivos de proteção modernos, permitindo identificar com maior precisão os pontos exatos onde as faltas ocorrem. Assim, essa abordagem contribui significativamente para a confiabilidade

e a robustez dos sistemas de transmissão de energia (RIBEIRO; LOPES; HONORATO, 2019).

Figura 7 – Estágios de filtragem do filtro DS



Fonte: Ribeiro, Lopes e Honorato (2019)

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Revisão Bibliográfica

Ali et al. (2016) apresentam uma análise detalhada sobre o efeito da utilização de diferentes frequências de amostragem e tamanhos de janela na previsão da localização de faltas de alta impedância (FAI) em uma rede de distribuição. Utiliza-se um único ponto de medição para capturar o sinal de tensão trifásico. Além disso, o estudo investiga o impacto do uso de diferentes wavelets mães para prever a seção com falta, além de realizar uma análise de sensibilidade considerando pontos de falta ao longo da linha e valores de impedância de falta. Os resultados mostram que a wavelet mãe Sym8 obteve melhores resultados na localização da seção com falta em comparação com outras wavelets mães.

Farias et al. (2016) propõe um método inovador para a localização de faltas monofásicas em redes de distribuição, utilizando um equacionamento no domínio do tempo para modelar o comportamento do alimentador durante a falta. O ponto central de seu método reside na aplicação de uma Rede Neural Artificial (RNA) com treinamento online para estimar os parâmetros desconhecidos das equações do alimentador. Em sua avaliação, a variação da resistência de falta (de 10Ω a 50Ω) e do nível de carregamento do alimentador influenciaram os erros, resultando em uma avaliação satisfatória para resistências mais baixas. Especificamente, obteve-se um erro máximo de 3,4%.

Shi (2018) propõe uma metodologia para a localização de faltas em sistemas de distribuição, baseado na análise da topologia da rede e na detecção de ondas viajantes geradas pelo religamento automático de disjuntores calculando a diferença entre os sinais pré-falta e pós-falta. Para identificar a onda refletida no ponto de falta, aplica-se a transformada wavelet, permitindo a extração precisa da componente refletida. A eficácia do

método foi validada por meio de simulações no software ATP-EMTP, demonstrando uma boa precisão na localização de faltas, com erros inferiores a 600 metros, independentemente do tipo de aterramento adotado no sistema.

Souza et al. (2018) desenvolveram uma metodologia para detectar faltas de alta impedância baseada em boosting de árvores de decisão. Utilizaram dados gerados a partir de simulações de eventos comuns da rede elétrica e técnicas de aprendizado de máquina para treinamento e testes. O classificador XGBoost apresentou uma acurácia de 97,67%, indicando que essa abordagem é promissora para a implementação de técnicas de aprendizado de máquina, visando melhorar a segurança e a confiabilidade das redes de distribuição.

Mortazavi, Moravej e Shahrtas (2019) apresentam um algoritmo no domínio do tempo para localizar FAIs em sistemas de distribuição, utilizando apenas medições de um IED na subestação principal. O método compara a tensão estimada da fase defeituosa com a medida para determinar a localização da falta. As simulações realizadas no alimentador IEEE 34 com diferentes parâmetros de FAI mostraram que o método é eficaz, mesmo com incertezas nos dados de carga, sendo aplicável tanto em redes assimétricas quanto em sistemas desequilibrados. O modelo de carga utilizado foi baseado em impedância constante, e futuros trabalhos incluirão modelos de carga mais complexos e a consideração da contribuição das gerações distribuídas (DGs) nas faltas.

Doria-Garcia et al. (2020) apresentaram uma formulação matemática baseada na aplicação do método dos mínimos quadrados para localizar faltas de alta impedância em linhas de transmissão. Este método estima a distância da falha, independentemente da sua natureza, a partir de medições de tensão e corrente nos terminais da linha. Os experimentos evidenciaram alta precisão, com erros inferiores a 10%.

Grimaldi et al. (2020) propõe uma técnica para detecção de faltas de alta impedância (FAI) em sistemas elétricos, utilizando a energia dos sinais de erro do preditor linear. O método mostrou ser robusto contra falsos positivos causados por distúrbios semelhantes, como energização de carga. A técnica demonstrou viabilidade ao identificar corretamente o período transitório da FAI, com boa performance usando um limiar de 50% e ordem do preditor linear de 10. A detecção e classificação foram realizadas em até 100 ms, abaixo do tempo máximo de 150 ms exigido no Brasil. O método, no entanto, precisa ser avaliado em presença de correntes de inrush e cargas não lineares.

Ramos et al. (2020) apresentaram um modelo analítico fundamentado em princípios físicos para a localização de faltas de alta impedância em redes de distribuição. A formulação leva em consideração o efeito capacitivo das linhas, bem como medições de tensões e correntes em apenas um terminal. A solução foi desenvolvida utilizando o método dos mínimos quadrados e o comportamento estatístico das estimativas obtidas

no modelo do sistema no domínio da frequência, para identificar a seção com falta. O modelo evidenciou erros médios de 1,95% destacando aspectos potenciais para aplicações em vida real.

Batista et al. (2022) desenvolveram um algoritmo em VHDL (*VHSIC Hardware Description Language*) integrado a um dispositivo FPGA (*Field Programmable Gate Array*) para detectar faltas de alta impedância por meio da análise fasorial e das correntes de sequência zero. Utilizaram a Transformada Discreta de Fourier para obter o diagrama fasorial e o MATLAB® como plataforma de integração. O algoritmo demonstrou eficácia ao identificar as falhas e atuar para interromper o fornecimento de energia elétrica para toda a rede, evidenciando a viabilidade da solução implementada no FPGA.

Damião et al. (2022) propuseram um algoritmo para detectar faltas de alta impedância baseado nos sinais de corrente típicos dessas falhas combinando a Transformada Wavelet (TW) com o Preditor Linear (PL). Utilizaram um modelo de teste de uma concessionária de energia elétrica brasileira, variando superfícies de contato, barramentos e seus respectivos carregamentos. Os resultados obtidos foram satisfatórios detectando e eliminando a falta de alta impedância no instante da falta em perturbações de até 150ms.

Cavalari et al. (2022) propõe um método para localização de faltas de alta impedância (FAIs) em sistemas de distribuição de energia elétrica, utilizando medições fasoriais de PMUs e um algoritmo de busca exaustiva. O método foi simulado no *software* OpenDSS para o sistema IEEE 34 barras, utilizando três PMUs. Os resultados de dez casos analisados demonstraram boa precisão na localização da falta, com erros abaixo de 1% sem incertezas nos dados. Com a introdução de incertezas, o erro aumentou, mas permaneceu abaixo de 10%, com uma média de 3,51%.

O Quadro 1 resume as principais referências bibliográficas supracitadas, abordando o objetivo e as principais especificações de cada projeto.

Quadro 1 – Principais referências bibliográficas utilizadas

Referência	Objetivo	Principais especificações
Ali et al. (2016)	Analisar o efeito da utilização de diferentes frequências de amostragem e tamanhos de janela na previsão da localização de FAIs em uma rede de distribuição.	Utilizam um único ponto de medição para capturar o sinal de tensão trifásico e realizam a análise de sensibilidade considerando pontos de falha ao longo da linha e valores de impedância de falha.

Farias et al. (2016)	Localizar faltas monofásicas em sistemas de distribuição utilizando um equacionamento no domínio do tempo para modelar o comportamento do alimentador durante a falta.	Aplica uma Rede Neural Artificial com treinamento online para estimar parâmetros desconhecidos das equações do alimentador.
Shi (2018)	Localizar faltas em sistemas de distribuição analisando a topologia da rede e na detecção de ondas viajantes geradas pelo religamento automático de disjuntores.	Aplica a transformada wavelet para identificar a onda refletida no ponto de falta.
Souza et al. (2018)	Detectar faltas de alta impedância baseada em Boosting de árvores de decisão.	Empregam dados obtidos por meio de simulações de eventos comuns na rede elétrica e aplicam métodos de aprendizado de máquina.
Mortazavi, Moravej e Shahrtas (2019)	Localizar faltas de alta impedância em sistemas de distribuição utilizando um algoritmo no domínio do tempo com medições de um IED na subestação principal.	Comparam a tensão estimada da fase defeituosa com a medida para determinar a localização da falta. Aplicável em redes assimétricas e sistemas desequilibrados.
Doria-Garcia et al. (2020)	Localizar faltas de alta impedância em linhas de transmissão baseada em formulação matemática.	Aplicam o método dos mínimos quadrados a partir de medições de tensão e corrente.
Grimaldi et al. (2020)	Propor uma técnica para a detecção de faltas de alta impedância em sistemas elétricos utilizando a energia dos sinais de erro do preditor linear como indicador de FAI.	Detecção e classificação realizadas em até 100 ms, abaixo do limite de 150 ms exigido no Brasil.
Ramos et al. (2020)	Localizar faltas de alta impedância em redes de distribuição utilizando um modelo analítico baseado em física.	Analisa o efeito capacitivo das linhas, bem como as tensões e correntes em apenas um terminal, aplicando o método dos mínimos quadrados e realizando uma análise estatística do comportamento.

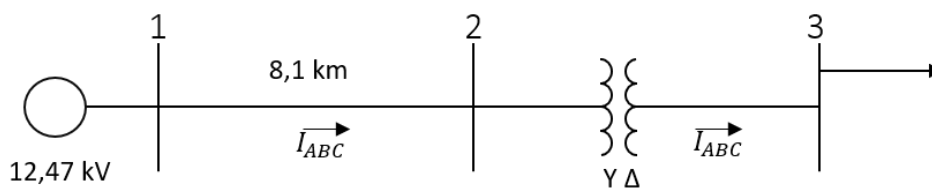
Batista et al. (2022)	Detectar faltas de alta impedância em sistemas de distribuição por meio de análise fasorial e correntes de sequência zero.	Monitora a corrente fasorial com a Transformada de Fourier e a corrente RMS de sequência zero. Desenvolve e implementa um algoritmo em VHDL em dispositivos FPGA.
Damião et al. (2022)	Detectar faltas de alta impedância no sistema de distribuição utilizando a Transformada Wavelet concatenado ao Preditor Linear.	Baseiam-se nos sinais de corrente típicos das falta utilizando a Transformada Wavelet e o Preditor Linear.
Cavalari et al. (2022)	Localizar de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição elétrica utilizando de medições fasoriais de PMUs e um algoritmo de busca exaustiva.	Realizada no software OpenDSS para o sistema IEEE 34 barras, com três PMUs.

METODOLOGIA

4.1 Modelagem do sistema teste

Para validar a metodologia proposta, optou-se pela construção de um sistema com três barras, 12,47 kV, 60 Hz, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 8. Embora seja uma configuração simplificada, sua concepção foi a partir do modelo IEEE 4 barras para um sistema de distribuição de energia elétrica, que permite a representação do sistema, de forma realista, dos principais fenômenos elétricos associados à propagação de transitórios em redes de média e baixa tensão.

Figura 8 – Diagrama unifilar do sistema de 3 barras



Fonte: Autoria própria (2025)

Essa abordagem de simplificação foi adotada com o objetivo de concentrar o estudo nos aspectos operacionais relevantes e otimizar a análise dos complexos fenômenos transitórios. A simplicidade da topologia não compromete a representatividade dos eventos, mas sim facilita a compreensão e o aprofundamento na dinâmica desses fenômenos, direcionando os esforços de pesquisa para os objetivos centrais do trabalho.

A modelagem da fonte, da carga, do transformador e da linha primária foi realizada conforme ilustrado nas Figuras 9, 10, 11 e 12, respectivamente. A fonte utilizada

trata-se de uma fonte de corrente alternada (CA) trifásica balanceada. As cargas foram configuradas em conexão estrela, sendo representadas por potências complexas com os seguintes valores: $S_{Lan} = 3 \text{ kVA}$ (fator de potência 0,95 indutivo), $S_{Lbn} = 5 \text{ kVA}$ (fator de potência 0,85 indutivo) e $S_{Lab} = 10 \text{ kVA}$ (fator de potência 0,90 indutivo) (IEEE, 2017).

Figura 9 – Modelagem da fonte

Fonte: Santos et al. (2020)

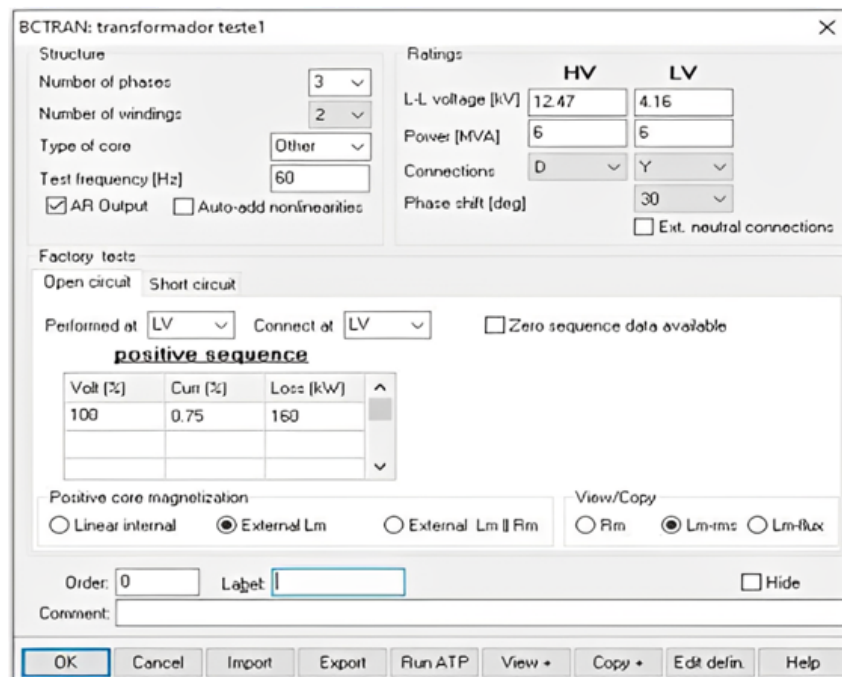
Figura 10 – Modelagem da carga

Fonte: Santos et al. (2020)

O transformador empregado é do tipo BCTRAN, cuja principal diferença em rela-

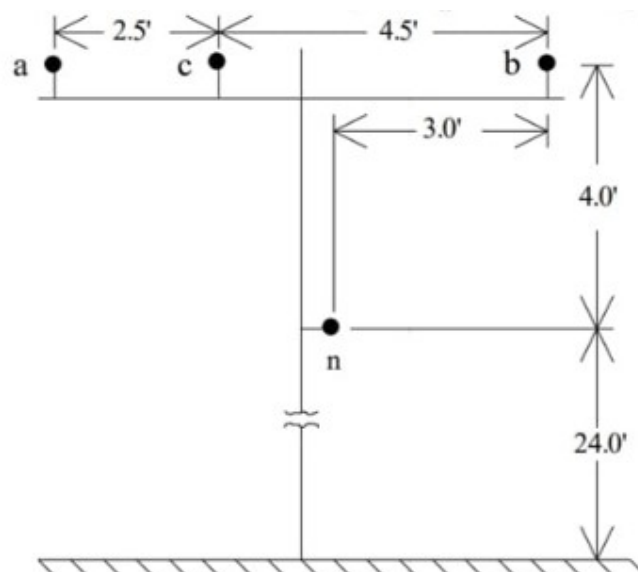
ção ao modelo idealizado por Santos et al. (2020) refere-se à configuração das conexões, sendo adotada neste trabalho a ligação estrela-delta. Essa configuração é amplamente utilizada em transformadores abaixadores, uma vez que a conexão estrela permite a adaptação a tensões elevadas no lado primário, enquanto a conexão delta é mais adequada ao manuseio de correntes elevadas no lado secundário, característica comum em sistemas de distribuição de energia elétrica (UMANS, 2014).

Figura 11 – Modelagem do transformador



Fonte: Santos et al. (2020)

Figura 12 – Configuração da linha primária



Fonte: IEEE (2017)

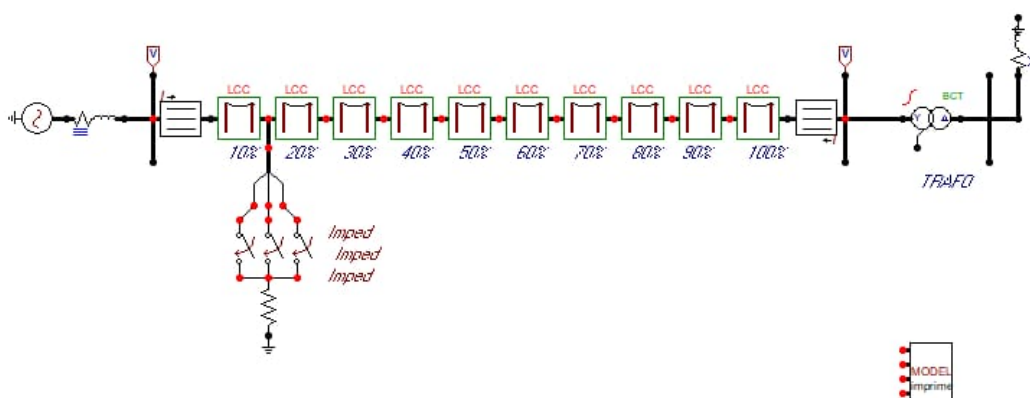
4.2 Considerações adotadas na análise

A validação e robustez da metodologia proposta fundamentam-se na seleção criteriosa de 5 parâmetros para a simulação. Essa escolha direciona o foco para o desenvolvimento de um método de localização de FAIs baseado em ondas viajantes e em sistemas de distribuição, assegurando a representatividade dos cenários e permitindo uma análise aprofundada da eficácia do algoritmo sob diversas condições.

A primeira variável considerada é o local de ocorrência das faltas, distribuído a cada 10% do comprimento total do sistema. Isso permite que as faltas sejam simuladas em intervalos regulares ao longo da linha, proporcionando uma avaliação detalhada de como a posição da falta afeta a propagação das ondas viajantes e a precisão do método de localização. A linha em questão possui 8,1 km de comprimento (Figura 13).

Foram simulados os tipos de falta monofásica - AT, BT e CT - em que A, B e C representam as fases e T o terra, com a resistência de falta variando entre 50 Ω e 5 k Ω . A resistência de falta é um parâmetro determinante na detecção das FAIs, uma vez que está diretamente relacionada à magnitude da corrente de falta. Em geral, quanto maior a resistência presente no ponto da falta — a qual depende, entre outros fatores, das características da superfície de contato entre o condutor e o solo — menor será a corrente gerada. Esse comportamento compromete a eficácia dos dispositivos de proteção convencionais, que possuem limiares de atuação baseados, predominantemente, na detecção de correntes mais elevadas (SIFAT et al., 2022).

Figura 13 – Sistema de 3 barras no ATPDraw



Fonte: Autoria própria (2025)

A Tabela 4 apresenta uma análise comparativa de metodologias de localização de FAIs, evidenciando as características de resistências abordadas por outros estudos. Esta comparação, por sua vez, justifica a abrangência da faixa de resistências de falta explorada neste trabalho, que visa aprimorar a robustez e aplicabilidade da metodologia proposta.

Tabela 4 – Características de FAI de diferentes autores

Referências	Características da FAI
Aboshady et al. (2019)	$R_f = 0.01-100 \, \Omega$
Mortazavi et al. (2019)	$R_f = 0.1 - 1.0 \, k\Omega$
Ramos et al. (2020)	Variável no tempo: $R_f = 4058 - 40 \, \Omega$
Okumus e Nuroglu (2021)	$R_f = 0 - 100 \, \Omega$
Penido et al. (2022)	$R_f = 2 - 500 \, \Omega$
Cavalari et al. (2022)	$R_f = 2.5 - 5.0 \, k\Omega$
Metodologia Proposta	$R_f = 0.05 - 5 \, k\Omega$
Fonte: (CAVALARI et al., 2022)(Adaptado)	

A frequência de amostragem utilizada foi de 2 MHz, uma vez que a utilização de altas taxas de amostragem é fundamental para a detecção precisa de ondas viajantes em sistemas elétricos, especialmente em estudos de localização de faltas. De acordo com estudos comparativos, a acurácia na estimativa da posição da falta está diretamente associada à resolução temporal proporcionada pela frequência de amostragem adotada. Em experimentos realizados com faltas monofásicas à terra em diferentes pontos de uma linha observou-se que os erros médios e máximos de localização diminuem significativamente à medida que a taxa de amostragem aumenta (ALVES et al., 2015; LIN; LUO; HE, 2017).

Para garantir uma análise mais abrangente, este estudo considera uma gama mais ampla de ângulos de incidência, explorando os valores de 0° , 30° , 60° e 90° nas simulações. Essa variação permite avaliar o desempenho do método proposto frente a diferentes cenários de incidência.

Dessa forma, a Tabela 5 apresenta as variáveis adotadas nas simulações realizadas para a análise do sistema. No contexto do modelo construído, as medições de corrente e tensão são obtidas entre dois terminais, permitindo avaliar o impacto das faltas de alta impedância em diferentes pontos da rede.

4.3 Metodologia proposta para a localização de faltas

A simulação do sistema teste foi conduzida com o objetivo de gerar sinais de corrente e tensão nos dois terminais da linha (T_1 e T_2), contemplando diferentes condições de falta. No total, foram simulados 1.080 cenários distintos, a partir dos quais foram obtidos dados fundamentais para a extração de características relevantes ao processo de localização. Destes, aproximadamente 90% foram utilizados nas análises, correspondendo aos cenários que apresentaram erros inferiores a 10%.

Tabela 5 – Considerações adotadas na análise

Variáveis de simulação	Valores
Locais de ocorrência	A cada 10% do tamanho da linha
Resistência de falta	50 Ω , 100 Ω , 500 Ω , 800 Ω , 1000 Ω , 2000 Ω , 2500 Ω , 2900 Ω , 3350 Ω , 4525 Ω
Tipos de faltas	AT, BT, CT
Ângulo de incidência	0°, 30°, 60°, 90°
Frequência de amostragem	2 MHz

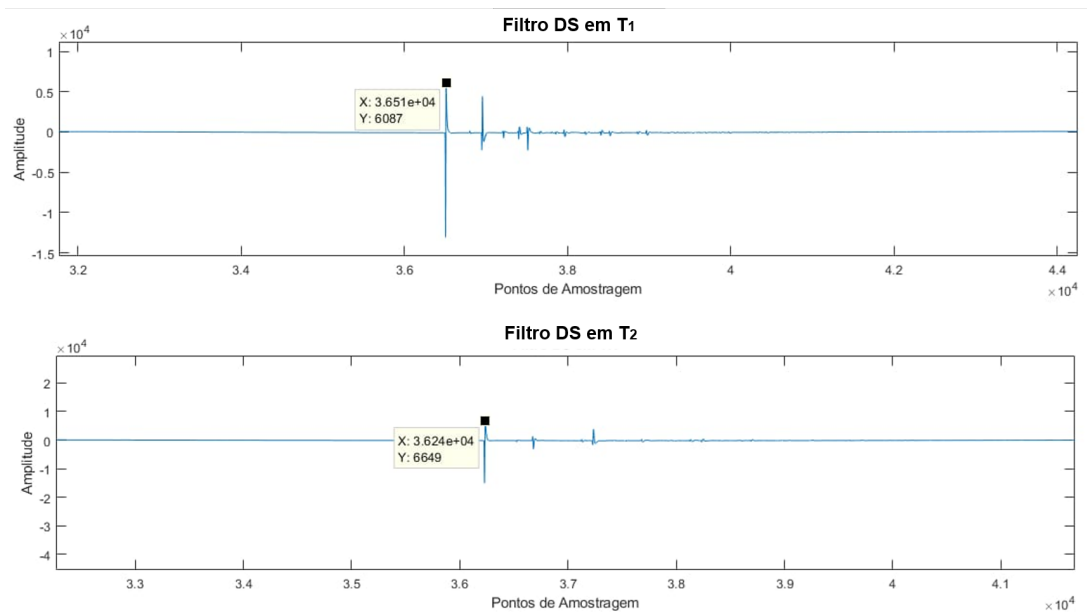
A construção do banco de dados foi baseada na combinação sistemática das variáveis descritas na Tabela 5, utilizando princípios de análise combinatória. Essa abordagem assegurou uma cobertura abrangente de casos possíveis, considerando variações na localização da falta, resistência de falta e ângulo de incidência da onda.

As simulações foram conduzidas no *software* ATPDraw, adotando-se o modelo de linha proposto por J. Marti, amplamente reconhecido por sua precisão na representação de linhas transpostas, além de calcular de forma automática a velocidade de propagação com base nos parâmetros elétricos da linha (MARTI, 1982). A modelagem foi implementada por meio do bloco *Line and Cable Constants (LCC)*. Cada simulação foi executada com uma duração total de 100 ms, equivalente a cinco ciclos de 20 ms, considerando uma frequência de operação de 60 Hz. A janela temporal considerada para análise abrangeu 40 ms anteriores e 60 ms posteriores ao instante da falta, permitindo avaliar tanto o regime pré-falta quanto os efeitos transitórios subsequentes.

A geração automatizada dos 1.080 casos foi viabilizada por *scripts* desenvolvidos no ambiente MATLAB®, os quais modificaram de forma programada os arquivos de entrada no formato *.atp*. Esses *scripts* foram responsáveis por parametrizar automaticamente o ponto de aplicação da falta, a resistência associada e o ângulo de incidência da frente de onda. A metodologia adotada seguiu os princípios descritos por VITOR (2025), utilizando um arquivo base contendo marcadores para substituição dinâmica dos parâmetros (Apêndice A).

Os arquivos gerados foram armazenados em diretórios organizados e executados sequencialmente no ATPDraw, resultando em um conjunto de saídas contendo os sinais de corrente e tensão. Tais sinais foram posteriormente processados com o filtro *Differentiator-Smoother* (DS), o que permitiu a detecção precisa dos instantes de chegada das ondas viajantes (Figura 14). Esta etapa é essencial para a aplicação dos algoritmos de localização baseados na TOV, fornecendo uma base confiável para as estimativas de distância da falta.

Para a avaliação dos resultados, os erros de localização foram considerados aceitá-

Figura 14 – Saída do Filtro DS

Fonte: Autoria Própria (2025)

veis quando inferiores a 10%, limiar que é geralmente empregado em estudos de localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição (CAVALARI et al., 2022). A adoção desse critério reconhece a complexidade inerente à detecção e localização precisa de faltas com altas resistências, as quais podem apresentar características elétricas menos pronunciadas, impactando diretamente a acurácia dos métodos.

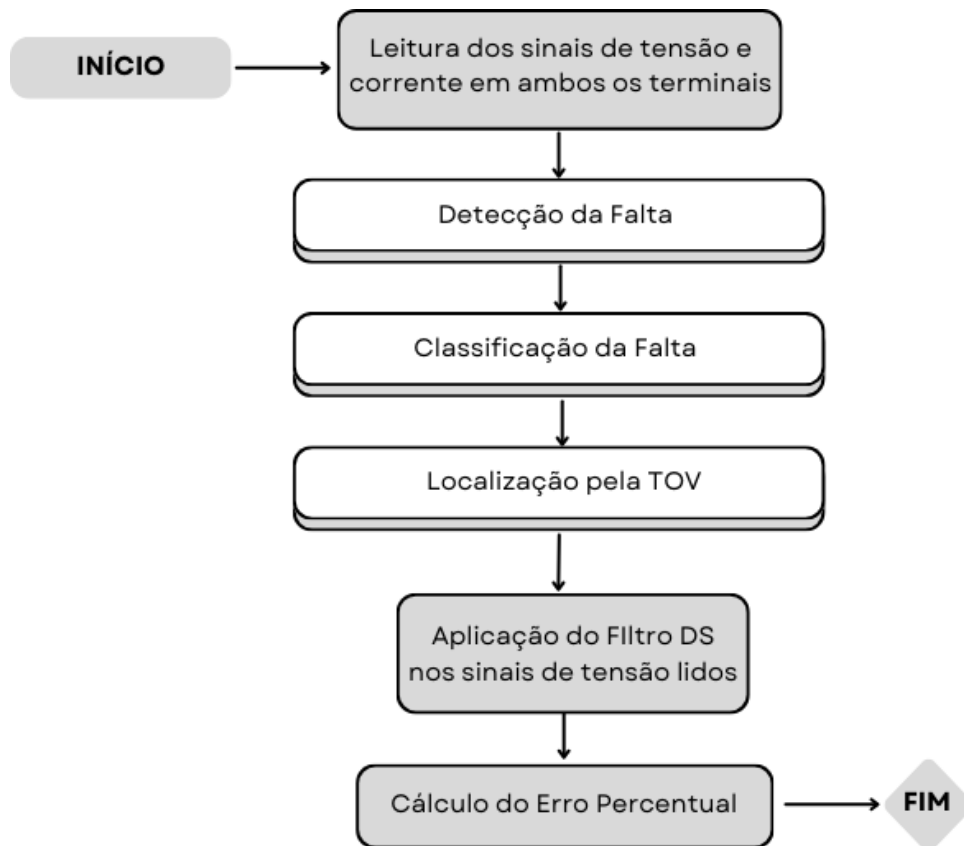
A metodologia adotada para a localização de faltas de alta impedância em linhas de distribuição é estruturada em três etapas principais: detecção, classificação e estimativa da distância da falta.

- **Detecção da Falta:** O processo de localização de faltas se inicia com a aquisição e o monitoramento contínuo dos sinais de corrente e tensão nos terminais da linha. Esses sinais são comparados a limites de referência predefinidos para a operação normal do sistema. A detecção da falta ocorre quando os valores dos sinais excedem esses limiares, indicando a presença de uma anormalidade e ativando as etapas subsequentes de análise.
- **Classificação da Falta:** Após a detecção, é crucial classificar o tipo de falta que ocorreu no sistema. Isso se deve à variedade de configurações de faltas que podem se manifestar, como faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas com terra ou trifásicas. A correta identificação do tipo de falta é fundamental para o processamento adequado dos sinais nas fases posteriores do algoritmo de localização.
- **Estimativa da Distância da Falta:** A etapa final consiste na estimativa da distância da falta ao longo da linha. Para isso, os sinais de corrente ou tensão das fases

afetadas são submetidos ao Filtro DS, que realça as frentes de ondas viajantes. A Teoria das Ondas Viajantes (TOV), com base no Tipo D (Equação 1), é então aplicada, utilizando a diferença nos tempos de chegada dessas ondas aos terminais para calcular a localização.

A Figura 15 apresenta, de maneira simplificada, as três etapas fundamentais no processo de localização de faltas, bem como os demais processos necessários para sua execução, incluindo a avaliação do método proposto por meio do cálculo do erro percentual.

Figura 15 – Metodologia da localização das faltas



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados da pesquisa e as discussões pertinentes, estruturados de forma a facilitar a compreensão da influência de diversas variáveis no desempenho dos métodos de localização de faltas. A seção está organizada em subseções, cada uma dedicada à análise de um grupo específico de variáveis, considerando a variação das resistências de falta na faixa de $50\ \Omega$ a $5\ \text{k}\Omega$, para as três fases monofásicas (AT, BT e CT).

Inicialmente, será abordada a análise de sensibilidade em função do tipo de sinal juntamente com o ângulo de incidência aplicado à localização de faltas, comparando os resultados obtidos a partir da extração dos dados característicos dos sinais de tensão ou corrente. O objetivo é identificar qual tipo de sinal e ângulo oferece maior acurácia e confiabilidade na determinação da localização da falta.

Na sequência, serão explorados os efeitos da resistência de falta e da localização do ponto de ocorrência, com o objetivo de identificar possíveis padrões de desempenho da metodologia em função da impedância e da posição ao longo da linha. Em seguida, também será analisado o impacto do tipo de solo, por meio da impedância associada e, por fim, uma subseção será dedicada à análise do custo computacional das diferentes abordagens e cenários simulados, visando avaliar sua viabilidade prática. Essa estrutura busca proporcionar uma visão clara e aprofundada dos principais fatores que influenciam a eficácia da metodologia proposta.

5.1 Análise de sensibilidade na localização de faltas

5.1.1 O Efeito do Tipo de Sinal e Ângulo de Incidência

As Figuras 16 e 17 apresentam uma análise comparativa do erro percentual na estimativa da localização de faltas na linha de distribuição de 8,1 km, em função da resistência de falta, para uma frequência de amostragem de 2 MHz, aplicada a 70% da extensão da linha. Para cada tipo de falta monofásica (AT, BT e CT), foram testados quatro ângulos de incidência (0° , 30° , 60° e 90°), avaliando-se o desempenho tanto dos sinais de corrente quanto dos sinais de tensão.

5.1.1.1 Sinal de Tensão

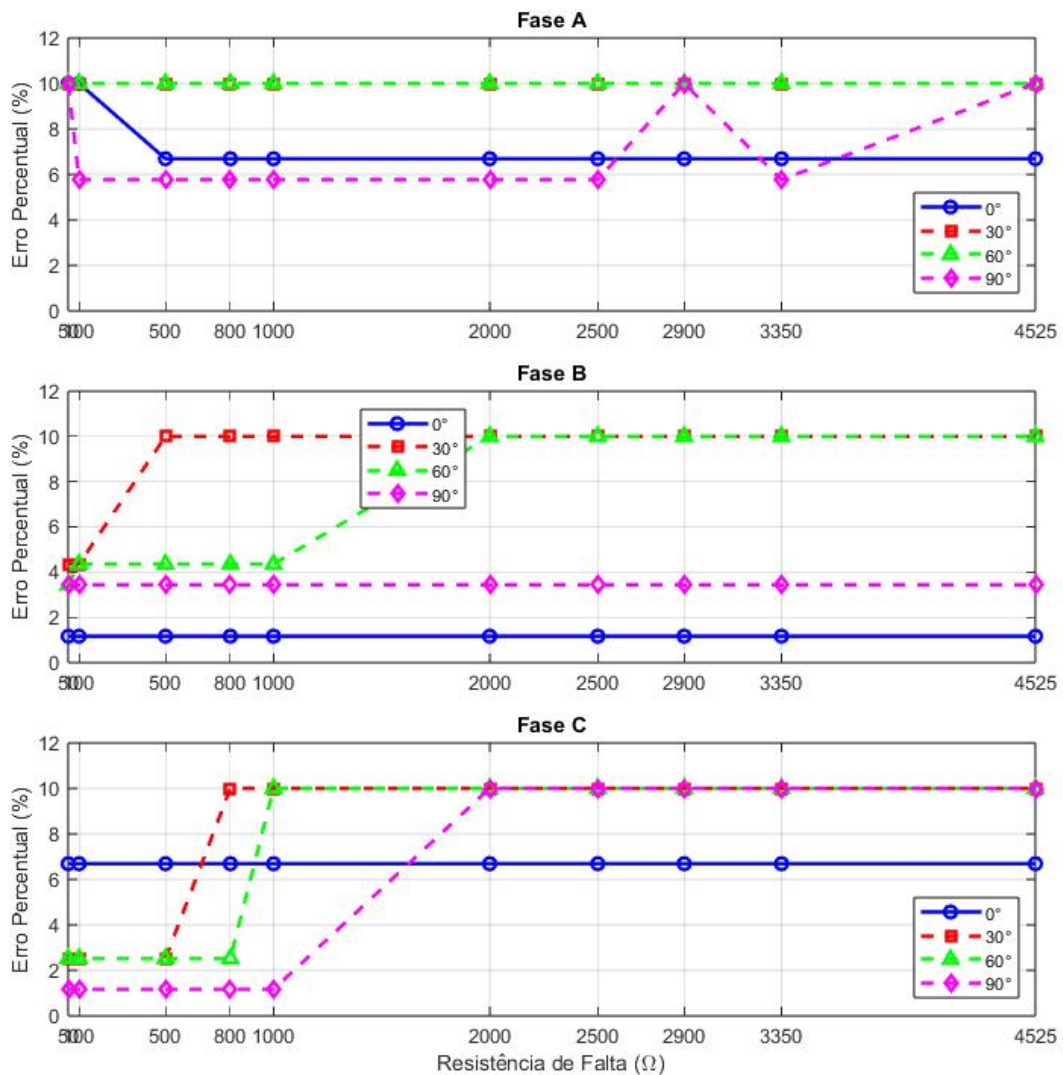
Para a análise dos resultados obtidos a partir do sinal de tensão, foi considerada a Figura 16, a qual apresenta a variação dos erros de localização em função dos diferentes cenários simulados. Essa figura permite avaliar o desempenho da metodologia quando se utiliza exclusivamente o sinal de tensão, considerando aspectos como resistência de falta e ângulo de incidência.

- Embora o ângulo de 0° tenha apresentado o melhor desempenho para a faltas BT, com erro de apenas 1,16%, observou-se um erro médio significativamente superior, de 7,35%, nas faltas AT e CT.
- O ângulo de 30° resultou em erros elevados para as três fases, com valores próximos a 10%. Um desempenho aceitável foi observado apenas em condições de baixas resistências de falta, sendo limitado a até 50 Ω para a faltas BT e até 500 Ω para a fase CT.
- O ângulo de 60° também apresentou erros relativamente elevados, destacando um desempenho mais favorável apenas para a falta CT, que alcançou o menor erro, próximo a 2%, para resistências de até 800 Ω .
- O ângulo de 90° apresentou maiores erros nas faltas AT e CT, comprometendo a precisão da localização da falta nessas situações. Na fase BT, o erro foi inferior, mantendo-se próximo de 4%.

5.1.1.2 Sinal de Corrente

Para a análise dos resultados baseados no sinal de corrente, utilizou-se a Figura 17, a qual ilustra o comportamento dos erros de localização frente às diferentes condições

Figura 16 – Análise do sinal de tensão em função da resistência de falta e ângulo de incidência



Fonte: Autoria Própria (2025)

simuladas, empregando exclusivamente os sinais de corrente, levando em conta variáveis como a resistência de falta e o ângulo de incidência.

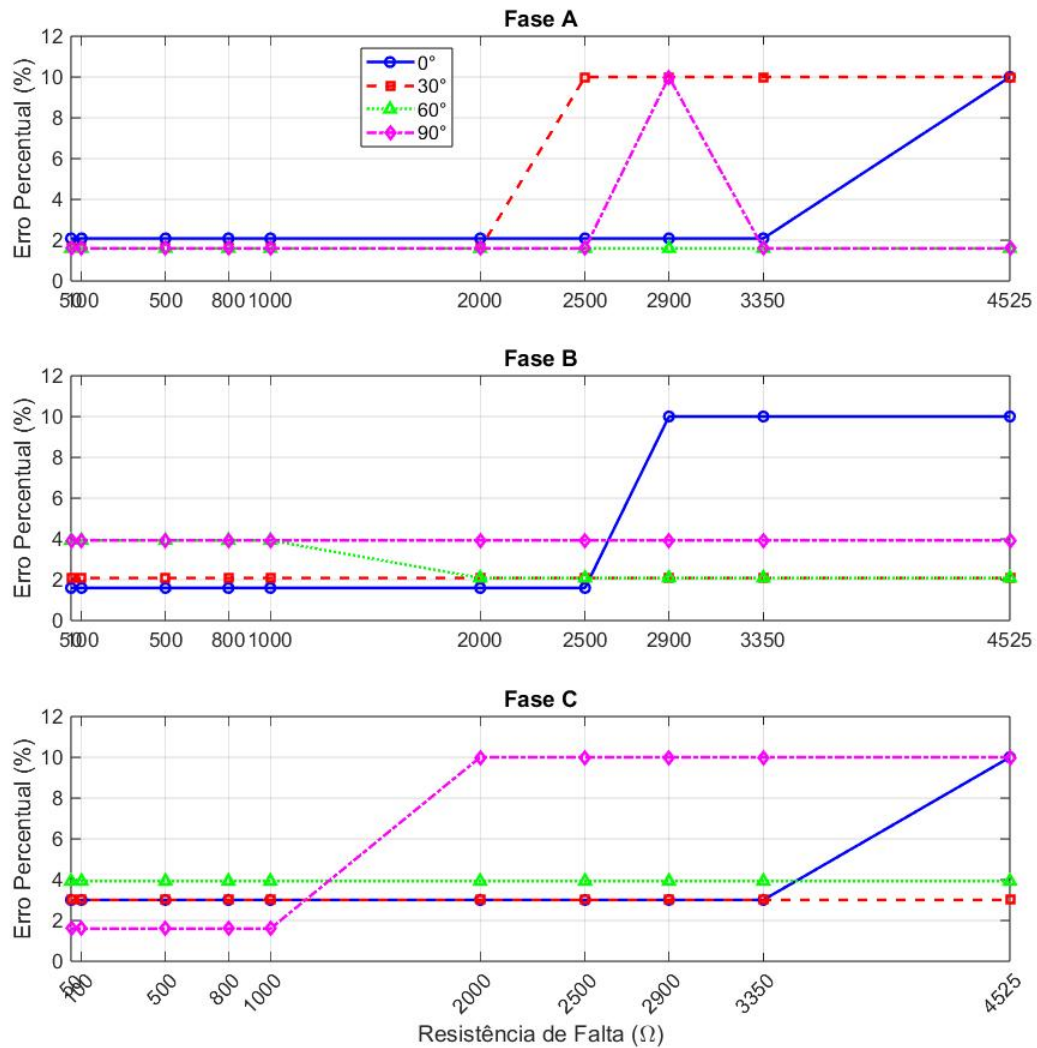
- Para o ângulo de 0°, as faltas AT, BT e CT apresentam erros baixos e estáveis para resistências entre 50 Ω e aproximadamente 2500 Ω , destacando-se a falta BT por registrar os menores valores de erro. Contudo, a partir de 2500 Ω para a faltas BT e 3350 Ω para as faltas AT e CT, observa-se um aumento abrupto nos erros, que atingem valores próximos a 10%.
- Para o ângulo de 30°, os erros são igualmente baixos para resistências até 2000 Ω . A Fase A, no entanto, apresenta elevação significativa do erro a partir de 2500 Ω , atingindo erros em torno de 10%. As Fases B e C mostram comportamento mais estável ao longo de toda a faixa de resistência, com erros geralmente abaixo de 3%.

- No cenário de 60° , destaca-se a Fase A, que apresenta os menores erros e maior estabilidade em toda a faixa de resistências, o que sugere maior robustez sob esse ângulo de incidência. Para as três fases, os erros mantiveram-se baixos e consistentes, com exceção da Fase B, que demonstrou uma redução acentuada após 2000Ω que favoreceu os resultados. A Fase C, por sua vez, manteve-se praticamente constante, com erros abaixo de 4% ao longo de todos os pontos. De modo geral, a estabilidade e a baixa magnitude dos erros neste ângulo de incidência superam as observadas nos demais ângulos.
- No caso do ângulo de 90° , nota-se um comportamento assimétrico: as Fases A e C passam a apresentar erros em torno de 10% para resistências acima de 2000Ω , enquanto a Fase B mantém uma notável estabilidade, com erros constantes abaixo de 4%.

Os resultados evidenciam que os menores erros percentuais na localização de faltas foram obtidos por meio da análise dos sinais de corrente. Embora os sinais de tensão tenham apresentado desempenho ligeiramente superior em casos pontuais — como na fase B para o ângulo de 0° e na fase C para o ângulo de 90° —, esse comportamento se mostrou inconsistente entre as fases, sem um padrão uniforme. Além disso, os sinais de tensão apresentaram erros mais elevados mesmo em condições de baixa resistência de falta, o que limita sua confiabilidade.

Em contrapartida, os erros obtidos a partir dos sinais de corrente demonstraram maior estabilidade e precisão ao longo das simulações, com erro médio percentual de 3,45% (equivalente a um erro médio absoluto de aproximadamente 270 metros). Essa consistência ressalta a robustez da metodologia frente às variações tanto na resistência de falta quanto no ângulo de incidência, consolidando o uso da corrente como variável mais eficaz para a localização precisa de faltas de alta impedância.

Dessa forma, constata-se que o método apresentou desempenho notadamente superior quando fundamentado nos sinais de corrente. Esse resultado corrobora as expectativas teóricas, uma vez que, em sistemas de distribuição, os sinais de corrente tendem a ser mais sensíveis e confiáveis para a identificação e localização de faltas — especialmente aquelas de alta impedância —, ao passo que, em sistemas de transmissão, o uso de sinais de tensão é mais comum em virtude das características específicas desses ambientes (MIRANDA, 2025). Assim, a aplicação da Teoria das Ondas Viajantes utilizando sinais de corrente mostra-se mais apropriada ao contexto estudado.

Figura 17 – Análise do sinal de corrente em função do ângulo de incidência

Fonte: Autoria Própria (2025)

5.1.1.3 Ângulo de incidência

Para um estudo mais aprofundado sobre o impacto do ângulo de incidência, agora voltado para sua influência em relação à resistência de falta, a análise foi conduzida considerando-se os sinais de corrente e uma varredura abrangente nas resistências de falta, dentro dos limites estabelecidos por este projeto (50 Ω a 4525 Ω). Esta investigação, cujos dados são ilustrados na Figura 17, permitirá compreender como as diferentes angulações da onda incidente interagem com a impedância da falta, revelando a robustez e as limitações do método para cada fase em um espectro variado de resistências.

Observa-se que, para resistências de até 2000 Ω , os erros percentuais mantêm-se geralmente baixos para todas as fases e ângulos. No entanto, à medida que a resistência aumenta, surgem diferenças relevantes entre os cenários:

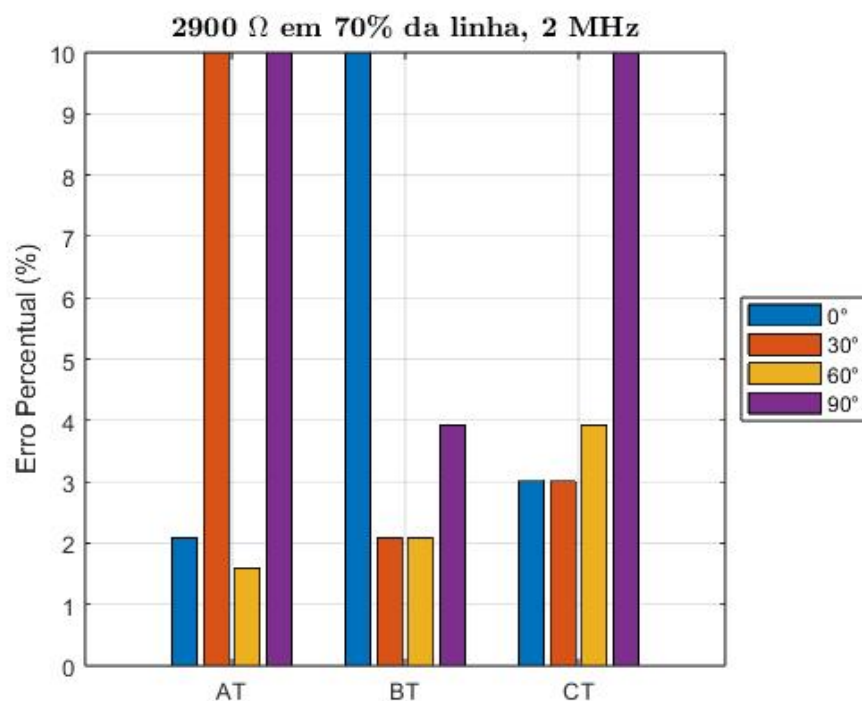
- **Análise da Fase A:** Observa-se que o erro percentual apresenta variação significativa em função da resistência de falta e do ângulo de incidência. Para resistências de até 2000 Ω , o erro permanece consistentemente baixo em todos os ângulos analisados. O ângulo de 60° destaca-se por manter um erro percentual sempre reduzido em toda a faixa de resistências avaliada. Este comportamento sugere que o método é notavelmente robusto para a Fase A quando a falta ocorre com essa angulação. Em contrapartida, os ângulos de 0° e 30° exibem um aumento considerável no erro percentual para resistências de falta acima de 3350 Ω e 2500 Ω , respectivamente. Por sua vez, o ângulo de 90° demonstra um pico de erro por volta de 2900 Ω , retornando subsequentemente a valores estáveis com erros inferiores a 2%, o que pode ser indicativo de uma sensibilidade pontual ou de uma transição no regime de comportamento do método para essa angulação.
- **Análise da Fase B:** Analisa-se um desempenho mais estável e, geralmente, com erros menores em comparação com a Fase A, especialmente em cenários de alta resistência. Para resistências de falta de até 2500 Ω , o erro permanece baixo em todos os ângulos. Os ângulos de 30° e 60° se destacam por sua excelente performance, com o erro percentual mantendo-se consistentemente baixo (entre 2% e 3%) em toda a faixa de resistências de falta analisada. Isso confirma a alta robustez do método para a Fase B nessas angulações. Além disso, o ângulo de 60° apresenta uma vantagem adicional: os erros são ainda menores para resistências acima de 2000 Ω em comparação com as resistências iniciais. Em contraste, o ângulo de 0° mostra um aumento mais pronunciado do erro para resistências acima de 2500 Ω . O ângulo de 90°, mesmo apresentando o maior erro para resistências baixas, conseguiu manter-se em torno de 4% até as resistências mais elevadas, demonstrando que o método é relativamente preciso para a Fase B na maioria das condições testadas.
- **Análise da Fase C:** Assim como nas outras fases, para resistências de falta de até 2000 Ω , o erro é mínimo em todas as angulações. Os ângulos de 30° e 60° são os mais eficazes para a Fase C, mantendo o erro percentual consistentemente baixo (entre 2% e 3%) em toda a gama de resistências avaliadas. Isso indica alta precisão e estabilidade do método sob essas condições. O ângulo de 0° mantém um erro baixo para uma ampla variedade de resistências; contudo, ele mostra um aumento significativo para resistências acima de 3350 Ω , indicando um ponto onde seu desempenho começa a cair. Por outro lado, o ângulo de 90° apresenta um comportamento mais crítico, com um aumento abrupto no erro percentual já a partir de 2000 Ω , mantendo-se nesse patamar para resistências mais altas.

A Figura 18 apresenta uma análise comparativa para diferentes ângulos de incidência, com ênfase na resistência de 2900 Ω — valor representativo de condições típicas

de alta impedância, como aquelas encontradas em solos de calcário compacto, argila seca e areia seca. Essa resistência foi escolhida por refletir não apenas uma situação realista de operação, mas também por se posicionar como um limiar a partir do qual ocorrem mudanças mais acentuadas no desempenho dos algoritmos de localização de faltas. A análise foi realizada considerando 70% da extensão da linha considerando exclusivamente os sinais de corrente — que, como demonstrado anteriormente, apresentaram os menores erros percentuais de forma consistente, sendo a melhor escolha de sinal para ser trabalhado com a metodologia proposta.

Nota-se na Figura 18 que nas faltas do tipo AT, os ângulos de 30° e 90° resultaram nos maiores erros, enquanto o de 60° apresentou o melhor desempenho. Para faltas do tipo BT, o erro máximo ocorreu em 0°, enquanto os ângulos de 30° e 60° mantiveram-se com erros baixos e consistentes. Já nas faltas CT, novamente o ângulo de 90° levou ao maior erro, com os demais se mantendo abaixo de 5%.

Figura 18 – Análise Comparativa dos Sinais de Corrente em Diferentes Ângulos de Incidência



Fonte: Autoria Própria (2025)

Os resultados obtidos indicam que o ângulo de 60° proporciona o desempenho mais robusto e preciso entre todas as fases analisadas. Essa configuração se distingue por apresentar menor sensibilidade às variações de fase e manter consistentemente erros percentuais reduzidos, mesmo para resistências de falta mais elevadas. Tal estabilidade e baixa magnitude de erro em todas as fases (A, B e C), as quais registraram comportamento consistente com erros inferiores a 4% em quase toda a faixa de resistência exami-

nada, evidenciam a superior robustez da metodologia quando aplicada sob este ângulo de incidência.

Esses resultados reforçam a influência do ângulo de incidência da onda viajante na precisão da localização da falta e evidenciam o potencial da metodologia baseada em sinais de corrente, principalmente sob incidências próximas de 60° . Essa informação é útil para otimizar algoritmos de localização, considerando-se cenários operacionais realistas em sistemas de distribuição.

5.1.2 O Efeito da Resistência de Falta e do Local de Ocorrência da Faltas

A Figura 19 ilustra o desempenho da metodologia em resposta a faltas de alta impedância, considerando variações tanto na posição de ocorrência ao longo da linha quanto na resistência de falta, com distinção entre as três fases (Fase A, Fase B e Fase C). Para esta análise, adotou-se um ângulo de incidência de 60° em todas as fases e frequência de amostragem de 2 MHz.

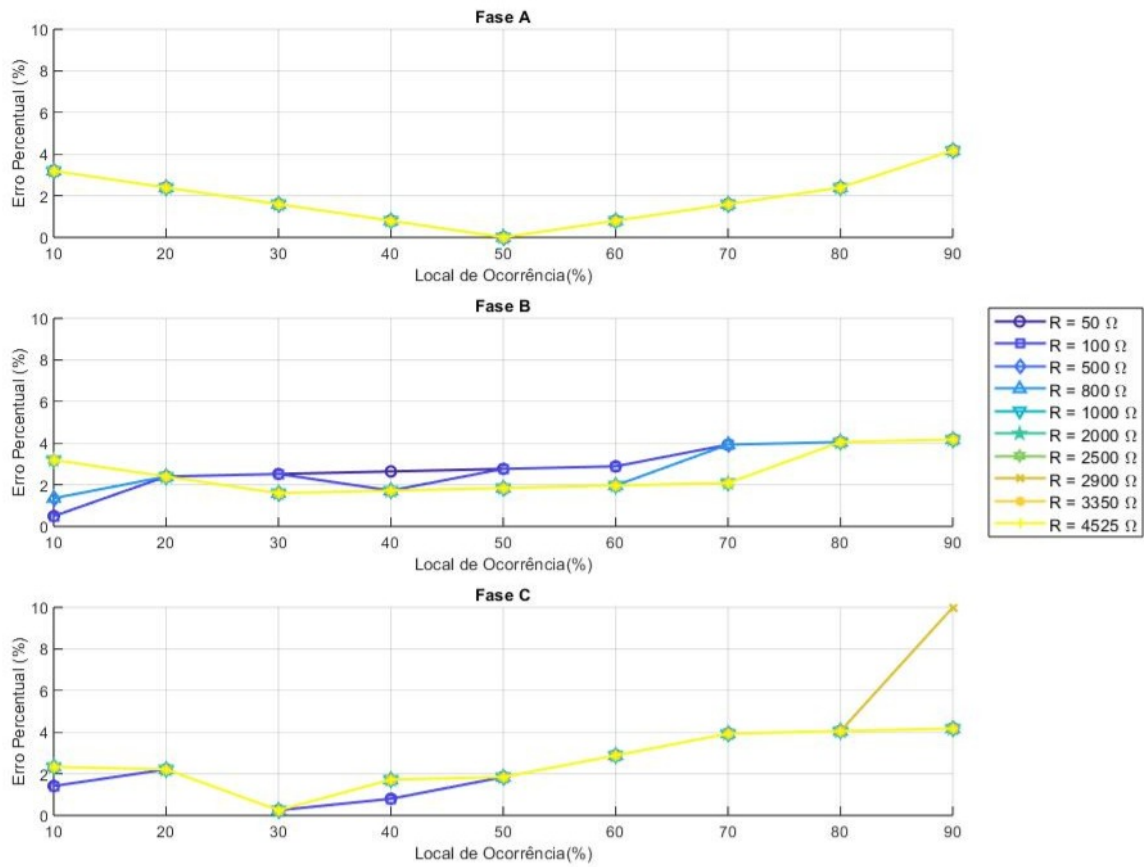
Observa-se que a metodologia apresentou um desempenho satisfatório nesses cenários, com erros percentuais relativamente baixos, mesmo sob condições de resistências elevadas. Em todas as fases analisadas, os erros permaneceram abaixo de 4%, evidenciando a robustez da abordagem diante das variações na impedância de falta.

Ao analisar o comportamento do erro em cada fase, observa-se que a Fase A se destacou por apresentar desvio padrão nulo, evidenciando total estabilidade nos resultados — característica que a diferencia das demais fases, nas quais foram identificadas oscilações pontuais. Além disso, a Fase A registrou os menores valores de erro, com média de 1,88%, indicando maior precisão. A Fase B apresentou desempenho intermediário, com os erros estabilizando em torno de 2% para resistências superiores a $1500\ \Omega$. Já a Fase C demonstrou comportamento notavelmente estável, mantendo erro praticamente constante, próximo de 4%, ao longo de toda a faixa de resistência analisada.

Apesar das variações nos valores absolutos de erro, as três fases seguiram um padrão semelhante: os erros tendem a ser maiores nas extremidades da linha e a diminuir gradualmente em direção ao ponto central, próximo de 50% do comprimento total. Tal tendência é um padrão também evidenciado na Figura 17, que investigou de forma abrangente a influência de diferentes ângulos de incidência na precisão do sistema, reforçando que a elevação do erro com o crescimento da resistência de falta é uma característica do sistema, embora os ângulos possam introduzir variações na magnitude ou ponto de saturação do erro.

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 20, a qual fornece um recorte

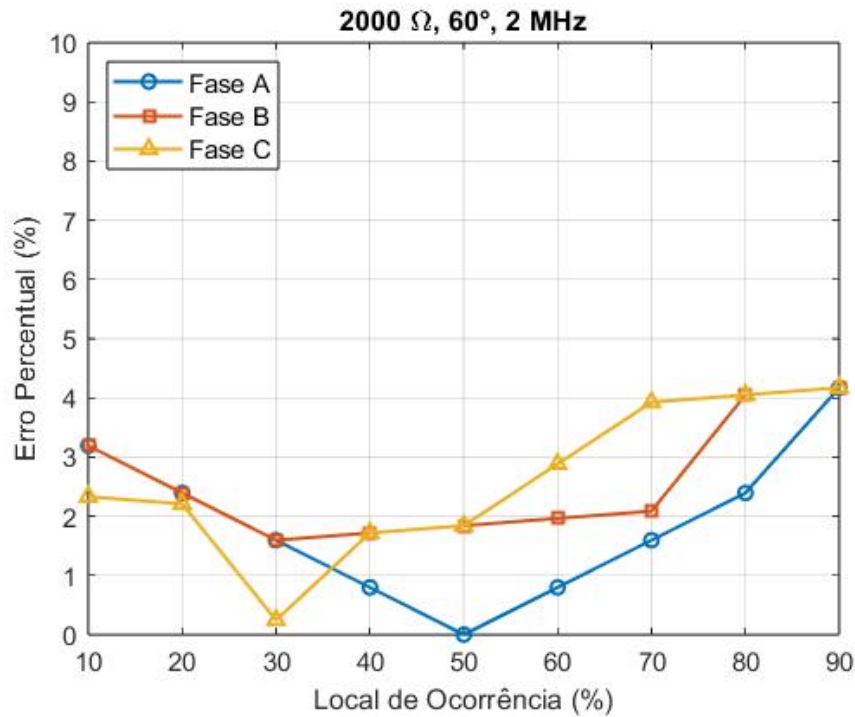
Figura 19 – Análise da Resistência de Falta em Função da Localização de Ocorrência para as Fases A, B e C



Fonte: Autoria Própria (2025)

específico para o cenário com resistência de falta de 2000Ω e ângulo de incidência de 60° , observa-se a similar relação entre a posição da falta ao longo da linha e o nível de erro associado à sua localização. Os maiores percentuais de erro concentram-se nas extremidades da linha, próximas aos terminais T_1 e T_2 , enquanto os menores erros são verificados na região central, em torno de 50% do comprimento da linha. Esse comportamento evidencia que o método apresenta melhor desempenho e maior precisão nas zonas intermediárias da linha de distribuição.

Apesar dos bons resultados, os erros mais elevados nas extremidades apontam para limitações do algoritmo nessas regiões. Isso sugere a importância de considerar melhorias, como o uso de medições em múltiplos pontos da rede ou a combinação com outros métodos, a fim de aumentar a precisão da localização de faltas próximas aos extremos da linha.

Figura 20 – Análise do Erro Percentual em Função do Local de Ocorrência

Fonte: Autoria Própria (2025)

5.1.3 Avaliação quanto ao Tipo de Solo

A detecção e localização de faltas em sistemas elétricos são intrinsecamente influenciadas pelas características do solo no local da ocorrência. Solos de baixa resistividade, como lama, solo muito úmido e pantanoso (5 a $100 \Omega \cdot m$), ou argila úmida, solo de cultivo e solo margoso (80 a $330 \Omega \cdot m$), conforme detalhado na Tabela 1, tendem a apresentar uma menor resistência de falta. Para cenários com essas baixas resistências, a metodologia aplicada demonstrou erros inferiores a 4% em todos os testes, conforme evidenciado nas Figuras 17, 19 e 20, o que atesta sua eficácia inicial.

Em contrapartida, cenários caracterizados por uma resistência de falta elevada, tipicamente associada a solos de alta resistividade como argila seca, areia seca e calcário compacto (Tabela 1), impõem desafios consideráveis à acurácia da metodologia de localização. No entanto, os estudos apresentados revelam que, mesmo para essas condições de elevada resistência, o desempenho da metodologia pode ser otimizado de forma significativa. Variáveis operacionais como o ângulo de incidência e o local de ocorrência da falta na extensão da linha de distribuição desempenham efeitos bem influentes.

Dessa forma, a análise demonstra que, em solos de alta resistividade — a exemplo de argila seca, areia seca, calcário compacto e cascalho seco —, o ângulo de 60° de incidência proporcionou um desempenho consistentemente superior em todas as fases. Notavelmente, essa configuração manteve erros inferiores a 4% mesmo para resistências

de falta elevadas.

Esta observação destaca como uma condição específica pode conduzir a resultados mais precisos e estáveis mesmo para impedâncias mais altas. A alteração na sensibilidade do algoritmo em função dessas variáveis ressalta, portanto, a importância de considerar múltiplos parâmetros para aprimorar a confiabilidade na localização de faltas de alta impedência em diversas condições de solo e operação do sistema.

Dessa forma, com base nas análises realizadas, observou-se que, em aproximadamente 90% dos cenários simulados — considerando todas as fases, diferentes valores de resistência de falta, posições ao longo da linha e ângulos de incidência — a metodologia apresentou um erro médio de 2,4%, resultando em uma precisão média de 97,6%.

Considerando a distribuição de ocorrências apresentada na Tabela 6, que reúne exclusivamente os cenários em que os erros ultrapassaram o patamar de 10%, é possível observar que há uma maior concentração de casos justamente nas faixas de 2900 Ω e 4525 Ω . Os casos com resistência de 4525 Ω apresentaram erros que chegaram a ultrapassar a marca de 30%, evidenciando o desafio que esse cenário impõe ao método de localização. Esse desequilíbrio na distribuição dos dados, aliado às dificuldades naturais da localização de faltas em condições de alta impedância, contribui para uma maior sensibilidade do sistema.

Além disso, nota-se uma assimetria na quantidade de ocorrências entre as fases, o que pode influenciar o desempenho do método conforme o tipo de falta. Assim, a análise conjunta da figura e da tabela reforça a importância de estratégias específicas para aprimorar a acurácia em situações mais críticas.

Tabela 6 – Quantidade de Ocorrências por Resistência de Falta e Tipo de Falta

Resistência de Falta (Ω)	Quantidade de Ocorrência		
	AT	BT	CT
2000	1	1	8
2500	8	4	8
2900	8	8	9
3350	8	8	9
4525	16	7	14
Somatório	41	28	48
Total	117		

Nesta pesquisa, foram analisadas resistências de falta de até 5 k Ω , ultrapassando os limites comumente abordados na literatura (Tabela 4). Mesmo diante dessa ampla faixa de resistência, a metodologia proposta demonstrou elevado desempenho, mantendo os erros absolutos abaixo de 120 metros em todos os cenários simulados, o que reforça

sua consistência na localização de faltas. Além disso, a acurácia máxima alcançada foi de 99,88%, configurando-se como o melhor resultado obtido entre os casos avaliados.

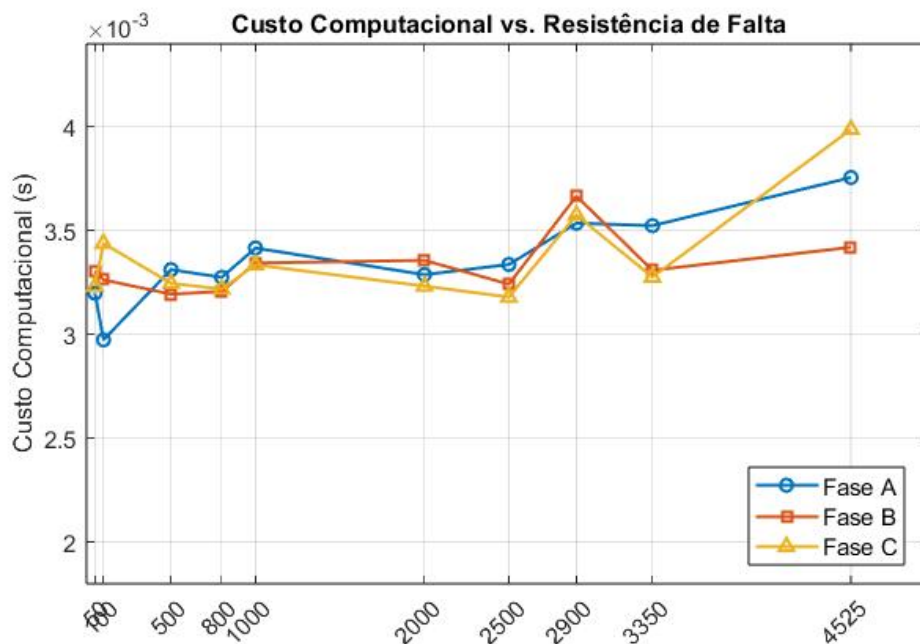
Dessa forma, a metodologia proposta se destaca por sua robustez e adaptabilidade frente às diversas condições operacionais do sistema elétrico. Sua aplicabilidade a diferentes topologias de rede, aliada à ausência da necessidade de etapas de treinamento, contribui para torná-la uma solução versátil e eficiente no enfrentamento dos desafios impostos por faltas de alta impedância em redes de distribuição.

5.2 Análise do Custo Computacional

O equipamento utilizado para a realização das simulações possui arquitetura de 64 bits, com processador AMD Ryzen 7 4800 H com Radeon Graphics (2,90 GHz), 8 GB de memória RAM e unidade de armazenamento SSD de 512 GB.

A avaliação do custo computacional demonstrou que o tempo médio de processamento do sinal de corrente, utilizando o Filtro DS, foi de aproximadamente 3,38 milissegundos por cenário analisado. Esse desempenho destaca a viabilidade da metodologia proposta para aplicações que demandam respostas rápidas, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Análise do Custo Computacional em Função das Resistências de Faltas



Fonte: Autoria Própria (2025)

CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o desempenho de um método para a localização de faltas de alta impedância em linhas de distribuição de energia elétrica, considerando quatro variáveis principais: o tipo de sinal utilizado (tensão ou corrente), o ângulo de incidência da falta, a resistência de falta e o local de ocorrência da falta. Através das análises feitas, foi possível extrair conclusões relevantes quanto à precisão, robustez e aplicabilidade do método proposto.

Os resultados evidenciaram que os sinais de corrente apresentaram melhor desempenho geral na estimativa da posição da falta, com menores erros percentuais e maior estabilidade frente às variações dos parâmetros. Em contrapartida, embora os sinais de tensão tenham se destacado pontualmente em alguns cenários específicos (como na Fase A em determinados ângulos), seu comportamento foi menos consistente entre as fases e faixas de resistência.

Quanto ao ângulo de incidência, o valor de 60° se mostrou o mais eficaz, promovendo erros mais baixos e comportamento estável tanto para sinais de corrente quanto de tensão, especialmente na Fase A. Este resultado sugere uma melhor interação do sinal com a impedância de falta nesse ângulo, otimizando a resposta do algoritmo de localização.

No que se refere à resistência de falta, observou-se que os menores erros foram obtidos para resistências de até $2000\ \Omega$, independentemente do tipo de sinal ou do ângulo de incidência. A partir desse valor, especialmente acima de $2500\ \Omega$, os erros passaram a se elevar de forma mais acentuada e passaram a variar significativamente em função das demais variáveis analisadas, como o tipo de sinal e o ângulo de incidência. Nesse intervalo, o método apresentou desempenho mais consistente quando utilizado com ângulo de 60° , o qual se destacou por manter erros mais baixos e estáveis, mesmo em condições de alta

impedância.

Em relação à posição da falta ao longo da linha, identificou-se que os maiores erros ocorrem nas extremidades (próximas aos terminais T_1 e T_2), enquanto a região central apresentou maior acurácia. Esse padrão evidencia uma limitação na sensibilidade do método nas bordas da linha, exigindo maior atenção em possíveis aplicações práticas.

Em síntese, o método demonstrou eficácia na localização de faltas de alta impedância, sobretudo com o uso de sinais de corrente e ângulo de incidência de 60° , tendo maior desempenho na região central da linha, com uma acurácia de 99,88% e tempo médio de resposta de 3,38 microssegundos. A metodologia analisada apresenta forte potencial para aplicação em ambientes reais, contribuindo para a melhoria da detecção e resposta rápida a faltas em sistemas de distribuição.

6.1 Trabalhos Futuros

O estudo de métodos para localização de faltas de alta impedância ainda representa um campo de pesquisa com grande potencial de expansão. Apesar dos avanços apresentados nesta pesquisa, diversas frentes podem ser exploradas com o objetivo de ampliar a aplicabilidade da metodologia, tornando-a mais abrangente e adequada a um espectro mais amplo de situações reais enfrentadas no sistema elétrico de potência.

Com vistas a um maior escopo de cenários operacionais, recomenda-se a ampliação da metodologia para a análise de diferentes tipos de faltas, como faltas bifásicas, bifásicas com terra e trifásicas, assim como a consideração de uma faixa mais ampla de valores elevados para a resistência de falta. Avaliar a resposta da metodologia frente a essas condições permitirá verificar sua flexibilidade, além de contribuir para sua validação em um conjunto mais abrangente de ocorrências possíveis em sistemas reais.

Além disso, sugere-se a aplicação da metodologia proposta em sistemas com topologias mais complexas, como linhas de distribuição com bifurcações ou presença de ramais laterais. Essas configurações representam um desafio adicional, uma vez que alteram significativamente o comportamento da propagação de ondas, podendo gerar reflexões e distorções que comprometem a precisão da localização de faltas. A adaptação do método a essas estruturas exigirá ajustes nos modelos matemáticos empregados e, possivelmente, a implementação de mecanismos complementares para compensação ou identificação do trecho da linha afetado.

Adicionalmente, recomenda-se aplicar a metodologia a sistemas de teste amplamente utilizados na literatura, como os sistemas IEEE 13 e IEEE 34 barras. Isso possibilitará uma comparação direta com outros estudos já consolidados, contribuindo para a

validação e reconhecimento da abordagem proposta. Embora essa tarefa seja complexa devido à maior complexidade estrutural e diversidade dos elementos presentes nesses sistemas, ela é fundamental para aprofundar a exploração e o desenvolvimento da metodologia, garantindo sua robustez e aplicabilidade em cenários reais mais desafiadores.

Outro aspecto relevante a ser investigado é o impacto da variação da frequência de amostragem na eficácia do método. A utilização de frequências de amostragem mais elevadas pode possibilitar uma captura mais precisa dos transitórios associados à falta, especialmente em casos de curta duração e alta impedância. No entanto, isso também pode acarretar aumento da complexidade computacional e da sensibilidade a ruídos. Avaliar o equilíbrio entre resolução temporal e robustez numérica será fundamental para otimizar o desempenho da técnica em diferentes condições operacionais.

Tais desenvolvimentos permitirão avaliar a escalabilidade, adaptabilidade e eficácia da metodologia em um contexto mais próximo das exigências práticas de operação e proteção em sistemas elétricos de potência.

Referências Bibliográficas

- Agência Brasil. *Brasil teve 47 mil quedas de luz causadas por incêndios em 2023*. 2023. Acesso em: 14 jan. 2025. Disponível em: <<https://abradee.org.br/por-agencia-brasil-brasil-teve-47-mil-quedas-de-luz-causadas-por-incendios-em-2023/>>.
- ALI, M. S. et al. Studies on the application of wavelet families for a high impedance fault location algorithm in a distribution network. *Journal Name*, v. 24, n. 6, p. 1–1–2016, 2016.
- ALVES, M. H. et al. Teoria das ondas viajantes e filtragem adaptativa de sinais para localização de faltas em linhas de transmissão. In: *12º Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional/2º Latin-American Conference on Computational Intelligence*. [S.l.: s.n.], 2015.
- BACIL, G. G. *Simulação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica*. [S.l.]: Autor, 2020. Recurso eletrônico: 1 arquivo PDF (149 páginas, 5,93 MB).
- BARROS, A. F. A. de. *Análise das Principais Causas de Descontinuidade no Fornecimento de Energia Elétrica e de seus Impactos nos Indicadores de Qualidade*. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2020. XII, 51 p. Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Elétrica. ISBN Não especificado. Disponível em: <NÃoespecificado>.
- BATISTA, E. A. et al. Detecção de faltas de alta impedância por meio de análise fasorial e correntes de sequência zero. *Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia da Paraiba, v. 59, p. 1224, 12 2022. ISSN 1517-0306.
- BENNER, C.; RUSSELL, B. Practical high-impedance fault detection on distribution feeders. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 3, p. 635–640, 1997.
- BINOTTO, J. M.; ZAMODZL, R.; TEXEIRA, G. P. *Sistemas elétricos: componentes*. [S.l.]: Sagah, 2018.
- CAVALARI, C. F. et al. Um método de localização de faltas em sistemas de distribuição baseado em medições fasoriais e busca exaustiva: Análises de sensibilidade a erros de medições. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2022. v. 3, n. 1.
- COBELO, P. C. M. M. *Estudo e Implementação de Modelo de Falta de Alta Impedância*. 65 p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica, Brasília, DF, 2019. Publicação 2019.

DAMIAO, A. L. et al. Detecção de faltas de alta impedância no sistema de distribuição de energia elétrica utilizando a transformada wavelet concatenado ao preditor linear. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE AUTOMÁTICA (SBA). *XXIV Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2022*. 16 a 19 de outubro de 2022, 2022.

DAMIÃO, A. L. et al. Detecção de faltas de alta impedância no sistema de distribuição de energia elétrica utilizando a transformada wavelet concatenado ao preditor linear. In: *Proceedings do XXIV Congresso Brasileiro de Automática*. [S.l.]: SBA Sociedade Brasileira de Automática, 2022.

DAS, S.; SANTOSO, S.; ANANTHAN, S. N. *Fault Location on Transmission and Distribution Lines: Principles and Applications*. Hoboken, NJ: Wiley, 2022. Includes bibliographical references and index. Cover Design: Wiley. Cover Image: © REDPIXEL.PL/Shutterstock. Set in 9.5/12.5pt STIXTwoText by Straive, Chennai, India. ISBN 9781119121466. Disponível em: <<https://lccn.loc.gov/2021030668>>.

DORIA-GARCIA, J. et al. High impedance fault location: Generalized extension for ground faults. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier Ltd, v. 114, 1 2020. ISSN 01420615.

ENEGES. *Diferença entre Linha de Distribuição e Transmissão*. 2025. Acesso em: 29 jan. 2025. Disponível em: <<https://energes.com.br/diferenca-entre-linha-de-distribuicao-e-transmissao/>>.

FARIAS, P. E. et al. Fault location in distribution systems: A method considering the parameter estimation using a rna online. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 12, p. 5151–5157, dez. 2016.

FILHO, D. R. M. J. M. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: LTC, 2024.

Fluke Corporation. *Resistência do Aterramento*. 2006.

GRIMALDI, R. B. et al. High impedance fault detection based on linear prediction. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, Brazil, v. 190, p. 106846, 2020. Received 25 May 2020; Received in revised form 12 August 2020; Accepted 9 September 2020. Available online 21 September 2020. Corresponding author: tarso@ufs.br.

HENRIQUES, A.; MEDEIROS, J. B. *Metodologia Científica da Pesquisa Jurídica*. [S.l.]: Atlas, 2017. v. 9.

IEEE. *IEEE PES Resources*. 2017. <<https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Acesso em: 23 jun. 2025.

KAGAN, N. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. E-book. São Paulo: Editora Blucher, 2010. 164 p. Acesso em: 09 dez. 2024. ISBN 9788521216896. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521216896/>>.

KINDERMANN, G. *Curto circuito*. [S.l.]: Sagra-DC Luzzatto, 1992.

KRZYSZTOF, G. et al. Traveling wave fault location in power transmission systems: An overview. *J. Electrical Systems*, v. 7, n. 3, p. 287–296, 2011. Regular paper.

- LIN, Q.; LUO, G.; HE, J. Travelling-wave-based method for fault location in multi-terminal dc networks. *The Journal of Engineering*, Wiley Online Library, v. 2017, n. 13, p. 2314–2318, 2017.
- LOPES, F. et al. Using the differentiator-smoother filter to analyze traveling waves on transmission lines: Fundamentals, settings and implementation. In: IPST. *International Conference on Power Systems Transients (IPST2019)*. Perpignan, France: IPST, 2019.
- LOPES, F. V. et al. Past, present, and future trends of traveling wave-based fault location solutions. In: FEDERAL UNIVERSITY OF PARAÍBA (UFPB), FEDERAL RURAL UNIVERSITY OF PERNAMBUCO (UFRPE), UNIVERSITY OF BRASÍLIA (UNB), CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). *6th Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS 2021)*. [S.l.], 2021. Email: felipelopes@cear.ufpb.br.
- MARTI, J. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, p. 147–157, 1982.
- MIRANDA, V. C. P. *Análise de Modelos para a Localização de Faltas em Linhas de Transmissão baseada na Teoria das Ondas Viajantes*. 87 p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)) — Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, Colegiado de Engenharia Elétrica, jun 2025. Orientadora: Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira.
- MORTAZAVI, S. H.; MORAVEJ, Z.; SHAHRTAS, S. M. A searching based method for locating high impedance arcing fault in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 2, p. 531–540, April 2019.
- PANINI, J. A. *Localizador de faltas por ondas viajantes em linhas de transmissão*. 50 p. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2015. Bibliografia: f. 47-48. Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli.
- RAMOS, M. J. et al. Physics-based analytical model for high impedance fault location in distribution networks. *Electric Power Systems Research*, Elsevier Ltd, v. 188, 11 2020. ISSN 03787796.
- REZAPOUR, H.; JAMALI, S.; BAHMANYAR, A. Review on artificial intelligence-based fault location methods in power distribution networks. *Energies*, v. 16, n. 12, 2023. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/12/4636>>.
- RIBEIRO, E. P. A.; LOPES, F. V.; HONORATO, T. R. Modelagem do filtro differentiator-smoother: Validação via análise de transitórios e resposta em frequência de dispositivos microprocessados reais. *Universidade de Brasília*, Brasília, Brasil, 2019. Este trabalho recebeu apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).
- RIBEIRO, L. M. A. et al. Modelagem de linhas de transmissão em programas emtp: Um estudo sobre a propagação de ondas viajantes. *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília*, 2020.

- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. Fault location on power networks. *Power Systems*, Springer Verlag, v. 48, p. 1–422, 2010. ISSN 18604676.
- SANTOS, N. et al. Simulation tutorial in atpdraw software – iee4 4 nodes test feeder – part 1. In: . [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. 2015.
- SHI, S. Travelling waves based fault location scheme for feeders in power distribution network. *The Journal of Engineering*, v. 2018, 07 2018.
- SIFAT, A. I. et al. *Monitoring and Detection of Low-current High-Impedance Faults in Distribution Networks*. 2022. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2210.16981>>.
- SOUZA, B. A. V. de et al. Detecção de faltas de alta impedância baseada em boosting de Árvores de decisão. In: *Proceedings IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. [S.l.]: SBA Sociedade Brasileira de Automática, 2018.
- STEVENSON, W. D. *Elementos de análise de sistemas de potência*. 2. ed.. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- TLEIS, N. *Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2008.
- UMANS, S. D. *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 107 p. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580553741/>. Acesso em: 16 jul. 2025. ISBN 9788580553741.
- VITOR, B. C. *Análise da influência dos dispositivos de medição na localização de faltas em linhas de transmissão utilizando filtro DS e Teoria das Ondas Viajantes*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal do Oeste da Bahia, Bom Jesus da Lapa-BA, 2025.
- ZANETTA, L. C. *Fundamentos de sistemas elétricos de potência*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2006.



CÓDIGO PARA GERAÇÃO DE ARQUIVOS .ATP COM FALTAS ENVOLVENDO TERRA

```
1
2 % Limpa o console e define variáveis de controle de erro
3 clear;
4 clc;
5
6 % Muda o diretório atual para o especificado e armazena o
   ↪ caminho real
7
8 b=cd('C:\ATP'); %esse diretório deve conter uma pasta
   ↪ "Registros" e o arquivo .atp do sistema modelo
9 realpath = pwd;
10
11 % Define os par metros do sistema
12 locais = 9; angulos = 4; impedancias = 10; tipos = 6; % sistema
   ↪ escolhido
13
14 % Define os valores dos par metros
15 loc =
   ↪ {'0.81', '1.62', '2.43', '3.24', '4.05', '4.86', '5.67', '6.48', '7.29'};
16 ang = {'000', '030', '060', '090'};
17 imp = {'0050', '0100', '0500', '0800', '1000', '2000', '2500',
   ↪ '2900', '3350', '4525'};
18 tip = {'_AT', '_BT', '_CT', 'ABT', 'ACT', 'BCT'};
19
```

```

20 %, 'ABC', '_AB', '_AC', '_BC'};
21
22
23 % Define o arquivo do sistema modelo .atp na variável modelo_ATP
24 modelo_ATP = 'NomeDoArquivo.atp';
25
26 % Cria e abre um arquivo .bat para escrita, na pasta "Registros"
27 fd3 = fopen('Registros\\simular_arquivos_atp.bat', 'w');
28
29 % Escreve comandos no arquivo .bat, que é executado no prompt de
    ↳ comando
30 fprintf(fd3, 'ECHO OFF\n'); %desativa a exibição dos comandos
    ↳ que estão sendo executados no prompt de comando
31 fprintf(fd3, 'REM\n'); %permite comentários no arquivo .bat
32 fprintf(fd3, 'cd D:\\ATP\\atpmingw'); %define o diretório do
    ↳ arquivo tpbigG.exe
33
34 %os arquivos .ATP gerados posteriormente por esse código devem
    ↳ estar no
35 %mesmo diretório do programa tpbigG.exe (copiar os arquivos
    ↳ gerados para
36 %lá)
37 %o programa tpbigG.exe executa arquivos .atp
38
39 % Laços para percorrer todas as combinações de locais, ngulos ,
    ↳ imped ncias e tipos
40 for i = 1:locais
41     for j = 1:angulos
42         for k = 1:impedancias
43             for l = 1:tipos
44
45                 % Cria o nome do arquivo ATP com base na
    ↳ combinação atual de par metros
46                 arquivo_ATP =
    ↳ sprintf('Registros\\%sang%sZ%s%s.atp', loc{i}, ang{j},
    ↳ imp{k}, tip{l}); %cria arquivo ATP
47                 arquivo_1 = sprintf('%sang%sZ%s%s.1', loc{i},
    ↳ ang{j}, imp{k}, tip{l}); %cria arquivo models
48
49                 % Adiciona comandos ao arquivo .bat

```

```

50         fprintf(fd3, 'tpbigG %sang%sZ%s%s.atp\n',
↪loc{i}, ang{j}, imp{k}, tip{l}); %executa o programa tpbigG
↪com o arquivo .atp
51         fprintf(fd3, 'REN MODELS.1 %s\n', arquivo_1);
↪%renomeia o arquivo MODELS.1 gerado
52         fprintf(fd3, '@if exist *.dbg del *.dbg\n');
↪%exclui os arquivos .dbg
53         fprintf(fd3, 'REM\n');
54
55         fd1 = fopen(modelo_ATP, 'r'); %abre arquivo para
↪leitura
56         fd2 = fopen(arquivo_ATP, 'w'); %abre arquivo
↪para escrita
57         nL = 1;
58         linha = fgets(fd1);
59         fprintf(fd2, '%s', linha);
60
61
62         while ~feof(fd1)
63             nL = nL + 1;
64             linha = fgets(fd1);
65             fprintf(fd2, '%s', linha);
66         end
67
68
69 % NGULO
70 %30, 60 e 90, 00
71 % Aqui altera a parametriza  o do ngulo
72
73 x=[48 48 48]; %000
74
75 defineang = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a
↪variável para "false" em todos os casos
76
77 for z=1:angulos
78     if strcmp(ang{z}, ang{j})
79         defineang(z) = {'true'};
80     end
81 end
82
83 verific000 = {'true', 'false', 'false', 'false'};

```

```

84 verific030 = {'false', 'true', 'false', 'false'};
85 verific060 = {'false', 'false', 'true', 'false'};
86 verific090 = {'false', 'false', 'false', 'true'};
87
88 if isequal(defineang, verific000) %verifica se as variáveis
    ↪ lógicas são exatamente iguais
89     x = [48 51 51]; % 000° (0,033 s) = 033 % código ascii para
    ↪ o número, vai de 48 =0 até 57 = 9. São 3 valores porque o
    ↪ tempo tem 3 algarismos
90 elseif isequal(defineang, verific030)
91     x = [48 51 53]; % 030° (0,035 s) = 035
92 elseif isequal(defineang, verific060)
93     x = [48 51 54]; % 060° (0.036 s) = 036
94 elseif isequal(defineang, verific090)
95     x = [48 51 56]; % 090° (0,038 s) = 008
96 end
97
98 % A- 2481+130
99 % B- 2417
100 % C- 2581
101
102
103 %Calcular quantos bytes tem até a posição do ngulo de
    ↪ incidência no
104 %código .atp
105
106 % Define o caminho do arquivo
107 b=cd('C:\ATP');
108 arquivo = 'NomeDoArquivo.atp';
109
110 % Lê o conteúdo do arquivo
111 conteudo = fileread(arquivo);
112
113 % Define o caractere a ser buscado
114 AnguloIncidenciaSetado = '.045'; % Substitua pelo valor desejado
115
116 % Encontra TODAS as posições do caractere alvo
117 posicoes = strfind(conteudo, AnguloIncidenciaSetado);
118
119 if length(posicoes) < 3

```

```

120     fprintf('Menos de três ocorrências de "%s" foram encontradas
↪no arquivo.\n', AnguloIncidenciaSetado);
121 else
122     % Converte a string completa para bytes assumindo
↪codificação UTF-8
123     conteudo_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
124
125     % Obtém os bytes até a primeira, segunda e terceira
↪ocorrências
126     BytesIncidenciaA =
↪length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(1)-1), 'UTF-8'));
127     BytesIncidenciaB =
↪length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(2)-1), 'UTF-8'));
128     BytesIncidenciaC =
↪length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(3)-1), 'UTF-8'));
129 % BytesTerra =
↪length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(4)-1), 'UTF-8'));
130 end
131
132
133
134
135 fseek(fd2, BytesIncidenciaA, 'bof'); %Move o ponteiro para o
↪byte 2112
136 fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase A
137 fseek(fd2, BytesIncidenciaB, 'bof');
138 fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase B
139 fseek(fd2, BytesIncidenciaC, 'bof');
140 fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase C
141
142
143 %TIPO DE FALTA
144 %O valor numérico da função fseek indica a quantidade de
↪caracteres até o
145 %valor a ser alterado
146 %Altera a parametrização
147
148 x = [57 46 57 57 57]; %corresponde ao valor 9.999, que fará
↪a chave da falta abrir
149

```



```

150     definetip = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
151     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
152
153     for z=1:tipos
154         if strcmp(tip{z}, tip{1})
155             definetip(z) = {'true'};
156         end
157     end
158
159     verifictipAT = {'true', 'false', 'false', 'false', 'false',
160     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
161     verifictipBT = {'false', 'true', 'false', 'false', 'false',
162     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
163     verifictipCT = {'false', 'false', 'true', 'false', 'false',
164     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
165     verifictipABT = {'false', 'false', 'false', 'true', 'false',
166     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
167     verifictipACT = {'false', 'false', 'false', 'false', 'true',
168     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
169     verifictipBCT = {'false', 'false', 'false', 'false',
170     ↪ 'false', 'true', 'false', 'false', 'false', 'false'};
171     % verifictipABC = {'false', 'false', 'false', 'false',
172     ↪ 'false', 'false', 'true', 'false', 'false', 'false'};
173     % verifictipAB = {'false', 'false', 'false', 'false',
174     ↪ 'false', 'false', 'false', 'true', 'false', 'false'};
175     % verifictipAC = {'false', 'false', 'false', 'false',
176     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'true', 'false'};
177     % verifictipBC = {'false', 'false', 'false', 'false',
178     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'true'};
179
180     %Faltas com Terra
181
182     %fseek(fd2, (BytesTerra-1), 'bof'); %abre a chave da falta em B
183     %fwrite(fd2, x, 'char');
184
185     if isequal(definetip, verifictipAT)
186
187         % AT: Na definição do tipo, a ação fseek/fwrite substitui
188         ↪ o tempo de abertura da chave para as fases
    
```

```

178      % que não queremos que operem para o tempo de 9.999
↵segundos
179      % A função fseek posiciona o cursor de acordo com a
↵quantidade de
180      % caracteres anteriores (que é o valor numérico na função)
181      %Quantidade de caracteres para a falta em:
182      %A - 2232; B - 2150; C - 2314
183
184      fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da
↵falta em B
185      fwrite(fd2, x, 'char');
186      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof'); %abre a chave da
↵falta em C
187      fwrite(fd2, x, 'char');
188
189
190  elseif isequal(definetip, verifictipBT)
191      % BT
192      fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof');
193      fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase A
194      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof');
195      fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase C
196
197
198  elseif isequal(definetip, verifictipCT)
199      % CT
200      fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof');
201      fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase A
202      fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da
↵falta em B
203      fwrite(fd2, x, 'char');
204
205
206  elseif isequal(definetip, verifictipABT)
207      % ABT
208      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof'); %abre a chave da
↵falta em C
209      fwrite(fd2, x, 'char');
210
211
212  elseif isequal(definetip, verifictipACT)

```

```
213      % ACT
214      fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da
↵ falta em B
215      fwrite(fd2, x, 'char');
216
217
218  elseif isequal(definetip, verifictipBCT)
219      % BCT
220      fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof'); %abre a chave da
↵ falta em A
221      fwrite(fd2, x, 'char');
222
223
224  elseif isequal(definetip, verifictipABC)
225      % ABC
226      % não faz nada
227
228  elseif isequal(definetip, verifictipAB)
229      % AB
230      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof'); %abre a chave da
↵ falta em C
231      fwrite(fd2, x, 'char');
232
233      %Aqui irei abrir a chave conectada ao nó XX0003XX0002 para
234      %desconectar o aterramento das faltas
235
236      fseek(fd2, 2661, 'bof');
237      fwrite(fd2, x, 'char');
238
239  elseif isequal(definetip, verifictipAC)
240      % AC
241
242      fseek(fd2, 2546, 'bof'); %abre a chave da falta em B
243      fwrite(fd2, x, 'char');
244
245      %Aqui irei abrir a chave conectada ao nó XX0003XX0002 para
246      %desconectar o aterramento das faltas
247
248      fseek(fd2, 2661, 'bof');
249      fwrite(fd2, x, 'char');
250
```

```

251 elseif isequal(definetip, verifictipBC)
252     % BC
253
254     fseek(fd2, 2629, 'bof'); %abre a chave da falta em A
255     fwrite(fd2, x, 'char');
256
257     %Aqui irei abrir a chave conectada ao nó XX0003XX0002 para
258     %desconectar o aterramento das faltas
259
260     fseek(fd2, 2661, 'bof');
261     fwrite(fd2, x, 'char');
262
263 end
264
265
266 x=[48 48 48]; %000
267
268 defineang = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a
269     ↪variável para "false" em todos os casos
270
271 for z=1:angulos
272     if strcmp(ang{z}, ang{j})
273         defineang(z) = {'true'};
274     end
275 end
276
277 %IMPED NCIA
278 % Aqui altera a parametrização da imped ncia
279 x = [46 48 48 48 49];
280
281 defineimp = {'false', 'false', 'false', 'false','false',
282     ↪'false', 'false', 'false','false', 'false'}; %seta a
283     ↪variável para "false" em todos os casos
284
285 for z=1:impedancias
286     if strcmp(imp{z}, imp{k})
287         defineimp(z) = {'true'};
288     end
289 end

```

```

289 %Calcular quantos bytes tem até a posição do ngulo da
    ↳ imped ncia no
290 %código .atp
291
292 % Define o caminho do arquivo
293 b=cd('C:\ATP');
294 arquivo = 'NomeDoArquivo.atp';
295
296 % Lê o conteú'do do arquivo
297 conteudo = fileread(arquivo);
298
299 % Define o caractere a ser buscado
300 ImpedanciaSetado = '888'; % Substitua pelo valor desejado
301
302 % Encontra TODAS as posições do caractere alvo
303 posicoes = strfind(conteudo, ImpedanciaSetado);
304 %posicoes = strfind(upper(conteudo), 'IMPEDANCIA'); % Ignora
    ↳ diferença entre maiú'sculas e minú'sculas
305
306
307 % Converte a string completa para bytes assumindo
    ↳ codificação UTF-8
308 conteudo_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
309
310 % Obtém os bytes até a primeira, segunda e terceira
    ↳ ocorrências
311 BytesImpedancia =
    ↳ length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(1)-3), 'UTF-8'));
312 % if isempty(posicoes) || posicoes(1) < 2
313 %     error('A variável posicoes está vazia ou tem um valor
    ↳ inválido.');
```

```

314 % end
315 %
316 % % Converter para string (se necessário) e garantir indexação
    ↳ válida
317 % BytesImpedancia =
    ↳ length(unicode2native(char(conteudo(1:posicoes(1)-2)),
    ↳ 'UTF-8'));
318
319
320

```

```

321 verificimp50 = {'true', 'false', 'false', 'false', 'false',
    ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
322 verificimp100 = {'false', 'true', 'false', 'false', 'false',
    ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
323 verificimp500 = {'false', 'false', 'true', 'false', 'false',
    ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
324 verificimp800 = {'false', 'false', 'false', 'true', 'false',
    ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
325 verificimp1000 = {'false', 'false', 'false', 'false', 'true',
    ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
326 verificimp2000 = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
    ↪ 'true', 'false', 'false', 'false', 'false'};
327 verificimp2500 = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
    ↪ 'false', 'true', 'false', 'false', 'false'};
328 verificimp2900 = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
    ↪ 'false', 'false', 'true', 'false', 'false'};
329 verificimp3350 = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
    ↪ 'false', 'false', 'false', 'true', 'false'};
330 verificimp4525 = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
    ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'true'};
331
332 if isequal(defineimp, verificimp50)
333     x = [48 48 53 48]; % código ascii para o número, vai de 48
    ↪ =0 até 57 = 9. São 3 valores porque o tempo tem 3 algarismos
334                     % imp = 050
335 elseif isequal(defineimp, verificimp100)
336     x = [48 49 48 48]; % imp = 100
337 elseif isequal(defineimp, verificimp500)
338     x = [48 53 48 48]; % imp = 500
339 elseif isequal(defineimp, verificimp800)
340     x = [48 56 48 48]; % imp = 800
341 elseif isequal(defineimp, verificimp1000)
342     x = [49 48 48 48]; % imp = 1000
343 elseif isequal(defineimp, verificimp2000)
344     x = [50 48 48 48]; % imp = 2000
345 elseif isequal(defineimp, verificimp2500)
346     x = [50 53 48 48]; % imp = 2500
347 elseif isequal(defineimp, verificimp2900)
348     x = [50 57 48 48]; % imp = 2900
349 elseif isequal(defineimp, verificimp3350)
350     x = [51 51 53 48]; % imp = 3350

```

```

351 elseif isequal(defineimp, verificimp4525)
352     x = [52 53 50 53]; % imp = 4525
353 end
354
355 %quantidade de caracteres da impedancia da falta
356
357 fseek(fd2,BytesImpedancia, 'bof');
358 fwrite(fd2, x, 'char');
359
360
361 %LOCAIS
362 % Aqui altera a parametrização do local
363 x = [46 48 48 48 49];
364
365 defineloc = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
366     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta
367     ↪ a variável para "false" em todos os casos
368
369 for z=1:locais
370     if strcmp(loc{z}, loc{i})
371         defineloc(z) = {'true'};
372     end
373 end
374
375 verificlocA = {'true', 'false', 'false', 'false', 'false',
376     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
377 verificlocB = {'false', 'true', 'false', 'false', 'false', 'false',
378     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
379 verificlocC = {'false', 'false', 'true', 'false', 'false', 'false',
380     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
381 verificlocD = {'false', 'false', 'false', 'true', 'false', 'false',
382     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
383 verificlocE = {'false', 'false', 'false', 'false', 'true', 'false',
384     ↪ 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
385 verificlocF = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
386     ↪ 'true', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false'};
387 verificlocG = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
388     ↪ 'false', 'true', 'false', 'false', 'false', 'false'};
389 verificlocH = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
390     ↪ 'false', 'false', 'true', 'false', 'false', 'false'};

```

```

381 verificlocI = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
    ↪ 'false', 'false', 'false', 'true', 'false', 'false'};
382
383
384 if isequal(defineloc, verificlocA)      % '0.81'
385     x = [48 46 56 49];
386 elseif isequal(defineloc, verificlocB)  % '1.62'
387     x = [49 46 54 50];
388 elseif isequal(defineloc, verificlocC)  % '2.43'
389     x = [50 46 52 51];
390 elseif isequal(defineloc, verificlocD)  % '3.24'
391     x = [51 46 50 52];
392 elseif isequal(defineloc, verificlocE)  % '4.05'
393     x = [52 46 48 53];
394 elseif isequal(defineloc, verificlocF)  % '4.86'
395     x = [52 46 56 54];
396 elseif isequal(defineloc, verificlocG)  % '5.67'
397     x = [53 46 54 55];
398 elseif isequal(defineloc, verificlocH)  % '6.48'
399     x = [54 46 52 56];
400 elseif isequal(defineloc, verificlocI)  % '7.29'
401     x = [55 46 50 57];
402 end
403
404
405     %Calcular quantos bytes tem até a posição do local da falta
    ↪no código .atp
406
407 % Define o caminho do arquivo
408 b=cd('C:\ATP');
409 arquivo = 'NomeDoArquivo.atp';
410
411 % Lê o conteúdo do arquivo
412 conteudo = fileread(arquivo);
413
414 % Define o caractere a ser buscado
415 LocalASetado = 'B0.81A'; % Substitua pelo valor desejado
416 LocalBSetado = 'B0.81B';
417 LocalCSetado = 'B0.81C';
418
419 % Encontra TODAS as posições do caractere alvo

```



```

420 posicaoLocalA = strfind(conteudo, LocalASetado);
421 posicaoLocalB = strfind(conteudo, LocalBSetado);
422 posicaoLocalC = strfind(conteudo, LocalCSetado);
423
424 % if length(posicoes) < 3
425 %     fprintf('Menos de três ocorrências de "%s" foram
↪ encontradas no arquivo.\n', AnguloIncidenciaSetado);
426 % else
427 %     Converte a string completa para bytes assumindo
↪ codificação UTF-8
428     posicaoLocalA_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
429     posicaoLocalB_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
430     posicaoLocalC_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
431
432 % Obtém os bytes até a primeira, segunda e terceira
↪ ocorrências
433     BytesIncidenciaA =
↪ length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalA-1)),
↪ 'UTF-8'));
434     BytesIncidenciaB =
↪ length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalB-1)),
↪ 'UTF-8'));
435     BytesIncidenciaC =
↪ length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalC-1)),
↪ 'UTF-8'));
436
437
438
439 % Os valores numéricos do fseek indicam as posições dos dados
↪ que precisam ser alterados.
440 %que são as 3 fases do local do curto-circuito, onde a chave de
↪ curto se prende
441
442 fseek(fd2, BytesIncidenciaA, 'bof'); %faltaB
443 fwrite(fd2, x, 'char');
444 fseek(fd2, BytesIncidenciaB, 'bof'); %faltaA
445 fwrite(fd2, x, 'char');
446 fseek(fd2, BytesIncidenciaC, 'bof'); %faltaC
447 fwrite(fd2, x, 'char');
448
449     fclose(fd1);

```

```

450     fclose(fd2);
451         end
452     end
453 end
454 end
455
456 % Escreve comandos no arquivo .bat
457 % fileID = fopen('Registros\simular_arquivos_atp.bat', 'a');
458 % fprintf(fileID, '@if exist Models.1 del Models.1\r\n');
459 % %fprintf(fileID, '@if exist Graphics del Graphics\r\n');
460 % fprintf(fileID, '@if exist *.aux del *.aux\r\n');
461 % fprintf(fileID, '@if exist *.bin del *.bin\r\n');
462 % fprintf(fileID, '@if exist *.tmp del *.tmp\r\n');
463 % fprintf(fileID, '@if exist *.dbg del *.dbg\r\n');
464 % fprintf(fileID, '@if exist *.lis del *.lis\r\n');
465 % fprintf(fileID, '@if exist *.pch del *.pch\r\n');
466 % %fprintf(fileID, '@if exist *.atp del *.atp\r\n');
467 % fprintf(fileID, '@if exist *.bak del *.bak\r\n');
468 % fprintf(fileID, '@if exist *.pl4 del *.pl4\r\n');
469 % fprintf(fileID, '@if exist *.mdl del *.mdl\r\n');
470 % fprintf(fileID, '@if exist *.pl4 del *.pl4\r\n');
471 % fprintf(fileID, '@if exist *.atp del *.atp\r\n');
472 % fclose(fileID);
473 fclose(fd3);

```

Programa 1 – ...

CorujaT_EX



Este volume foi tipografado em L^AT_EX na classe CorujaT_EX como uma demanda do Colegiado do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) ([\(<https://github.com/ademariocarvalho/CCEE_UFOB_CorujaTEX>\)](https://github.com/ademariocarvalho/CCEE_UFOB_CorujaTEX)).