

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

GUILHERME SÚCIA BASTOS

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO
ONDAS VIAJANTES, TRANSFORMADA DE CLARKE E TRANSFORMADA DE
WAVELET**

Itumbiara
2026



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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

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

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

Identificação da Produção Técnico-Científica

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

Nome Completo do Autor: Guilherme Súcia Bastos

Matrícula: 20211040070015

Título do Trabalho: Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando Ondas Viajantes, Transformada de Clarke e Transformada de Wavelet

Autorização - Marque uma das opções

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

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

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

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

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

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

Itumbiara-GO, 20/07/2026
Local Data

Guilherme Súcia Bastos

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

GUILHERME SUCIA BASTOS

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO
ONDAS VIAJANTES, TRANSFORMADA DE CLARKE E TRANSFORMADA DE
WAVELET**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara.

Prof. Dr. Marcelo Escobar De Oliveira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B3271 Bastos, Guilherme Súcia

Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando ondas viajantes, transformada de clarke e transformada de wavelet/ Guilherme Súcia Bastos. -- Itumbiara, 2026.

77 p. : il.

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Escobar de Oliveira.

1. Wavelets (Matemática). 2. Linhas de transmissão em fita. 3. Linhas elétricas. I. Título. II. Bastos, Guilherme Súcia. III. Oliveira, Marcelo Escobar de. IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.319

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecária: Marla de Souza Correia CRB-1/3011



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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

Termo de Aprovação

Guilherme Súcia Bastos

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO ONDAS VIAJANTES, TRANSFORMADA DE CLARKE E TRANSFORMADA DE WAVELET

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 10 de julho de 2026, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Escobar de Oliveira - Orientador
Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara
(Assinado Eletronicamente).

Profa. Dra. Jaqueline Oliveira Rezende - Membro interno
Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara
(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas - membro interno
Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara
(Assinado Eletronicamente).

Itumbiara – GO
2026

Documento assinado eletronicamente por:

- **Jaqueline Oliveira Rezende**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/07/2026 19:41:45.
- **Marcos Antonio Arantes de Freitas**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/07/2026 19:29:25.
- **Marcelo Escobar de Oliveira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/07/2026 17:52:57.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 08/07/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 798182

Código de Autenticação: c2d1b7b171



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

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me conceder força, sabedoria e perseverança para superar as dificuldades encontradas ao longo desta caminhada. Sua presença foi essencial nos momentos de incerteza, dando-me coragem para seguir em frente e concluir esta importante etapa da minha vida.

Aos meus pais e aos meus irmãos, deixo minha profunda gratidão pelo apoio, incentivo e compreensão durante toda essa jornada. A confiança de vocês em mim foram fundamentais para que eu pudesse enfrentar os desafios da graduação e alcançar este objetivo.

Agradeço também aos meus avós, que sempre me ajudaram da maneira que podiam, estando presentes em todos os momentos em que precisei, nunca negando ajuda. Sou grato pelo cuidado, pelo apoio e por todo o amor demonstrado ao longo da minha trajetória.

Por fim, agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Goiás de Itumbiara, que contribuíram para a minha formação acadêmica, sendo excelentes professores que, com compromisso e competência, colaboraram de forma significativa para a construção do conhecimento adquirido durante o curso.

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise de um método de localização de faltas em linhas de transmissão baseado na teoria de ondas viajantes, associado às técnicas de processamento de sinais por meio da Transformada de Clarke e da Transformada Wavelet. O estudo foi desenvolvido a partir de simulações realizadas no software ATPDraw, considerando diferentes tipos de falta, posições ao longo da linha e valores de resistência de falta. Foram analisadas duas configurações distintas de linhas de transmissão, correspondentes às torres autoportante em delta e estaiada monomastro, com o objetivo de avaliar a influência da geometria da linha no desempenho do algoritmo. Os sinais obtidos nas simulações foram processados no ambiente MATLAB, permitindo a identificação dos instantes de chegada das ondas viajantes em um terminal de interesse do circuito, e o cálculo da distância da falta em relação a esse terminal. Os resultados obtidos por meio das simulações e cálculos demonstraram que o método apresenta boa precisão, com erros geralmente inferiores a 1%, além de relativa robustez em relação à variação da resistência de falta. Observou-se ainda que o desempenho do algoritmo é influenciado pelo tipo de falta e por sua posição ao longo da linha, sendo as faltas trifásicas aquelas que apresentaram menor variação dos erros ao longo dos diferentes cenários analisados, indicando maior estabilidade e consistência nos resultados obtidos. A análise comparativa entre as configurações de torre mostrou que a geometria da linha impacta o comportamento das ondas viajantes e, conseqüentemente, a precisão da localização da falta, sendo que a configuração autoportante em delta apresentou resultados mais uniformes ao longo da linha. Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam a viabilidade da aplicação do método em estudos de localização de faltas, contribuindo para o desenvolvimento de técnicas mais rápidas, precisas e confiáveis para sistemas elétricos de potência.

Palavras-Chave: Localização de faltas; Linhas de transmissão; Transformada de Clarke; Transformada Wavelet; ATPDraw.

ABSTRACT

This study presents the analysis of a fault location method in transmission lines based on the traveling wave theory, combined with signal processing techniques using the Clarke Transform and the Wavelet Transform. The study was developed through simulations performed in ATPDraw software, considering different fault types, fault locations along the line, and fault resistance values. Two distinct transmission line configurations were analyzed, corresponding to delta self-supporting towers and guyed monopole towers, in order to evaluate the influence of line geometry on the performance of the algorithm. The signals obtained from the simulations were processed in the MATLAB environment, enabling the identification of the arrival instants of traveling waves at a selected terminal of the circuit, as well as the calculation of the fault distance relative to this terminal. The results obtained from the simulations and calculations demonstrated that the method presents good accuracy, with errors generally below 1%, as well as relative robustness with respect to variations in fault resistance. It was also observed that the algorithm performance is influenced by the type and location of the fault along the line, with three-phase faults showing the smallest variation in errors across the different analyzed scenarios, indicating greater stability and consistency in the obtained results. The comparative analysis between tower configurations showed that line geometry impacts the behavior of traveling waves and, consequently, the accuracy of fault location, with the delta self-supporting configuration presenting more uniform results along the line. Thus, the results obtained demonstrate the feasibility of applying the method in fault location studies, contributing to the development of faster, more accurate, and more reliable techniques for electric power systems.

Keywords: Fault location; Transmission lines; Clarke Transform; Wavelet Transform; ATPDraw.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Falta em Linhas de Transmissão	22
Figura 2 – Diagrama de Lattice de um Sistema Elétrico	24
Figura 3 – Transformada de Clarke Para um Sistema Equilibrado	26
Figura 4 – Transformada de Wavelet	28
Figura 5 – Parâmetro de Escala da Transformada de Wavelet	29
Figura 6 – Translação Aplicada a uma Wavelet pelo Índice K.....	30
Figura 7 – Tipos de Wavelet Mãe	30
Figura 8 – Subníveis da Transformada de Wavelet	31
Figura 9 – Aplicação do Downsampling	32
Figura 10 – Aplicação do Upsampling	33
Figura 11 – Exemplo de um Sinal de Detalhe para Pré Localização	35
Figura 12 – (a) Falta na segunda metade da linha, (b) Falta na primeira metade da linha	36
Figura 13 – Fluxograma das Simulações	40
Figura 14 – Código Transformada de Wavelet	41
Figura 15 – Exemplo de linha com Falta Trifásica	43
Figura 16 – Forma de Onda da Tensão Falta Trifásica	43
Figura 17 – Sinal Tratado	44
Figura 18 – Circuito Simulado no ATPDraw	45
Figura 19 – Bloco LCC no ATPDraw	45
Figura 20 – Aba Data do Bloco LCC no ATPDraw	46
Figura 21 – Detalhe das Distâncias da Torre	47
Figura 22 – Torre Autoportante em Delta	48
Figura 23 – Torre Estaiada Monomastro	50
Figura 24 – Coeficientes de Wavelet para uma Falta Fase-Terra Torre Autoportante em Delta	54
Figura 25 – Coeficientes de Wavelet para uma Falta Bifásica Torre Autoportante em Delta	58
Figura 26 – Coeficientes de Wavelet para uma Falta Fase-Ferra Torre Monomastro Estaiada	59
Figura 27 – Coeficientes de Wavelet para uma Falta Bifásica Torre Monomastro Estaiada	63

Figura 28 – (A) Falta Monofásica Torre Autoportante em Delta, (B) Falta Monofásica Torre Estaiada Monomastro	64
Figura 29 – (A) Falta Bifásica-Terra Torre Autoportante em Delta, (B) Falta Bifásica-Terra Torre Estaiada Monomastro	65
Figura 30 – (A) Falta Trifásica Torre Autoportante em Delta, (B) Falta Trifásica Torre Estaiada Monomastro	66
Figura 31 – (A) Influência do tipo de Falta Torre Autoportante em Delta, (B) Influência do Tipo de Falta Torre Estaiada Monomastro	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do Circuito	48
Tabela 2 – Parâmetros dos Geradores	48
Tabela 3 – Dimensões e características da torre autoportante em delta	49
Tabela 4 – Dimensões e características da torre estaiada monomastro	51
Tabela 5 – Parâmetros utilizados nas simulações	52
Tabela 6 – Resultados falta monofásica torre autoportante em delta	55
Tabela 7 – Resultados falta bifásica-terra torre autoportante em delta	56
Tabela 8 – Resultados falta trifásica torre autoportante em delta	57
Tabela 9 – Resultados falta bifásica torre autoportante em delta	58
Tabela 10 – Resultados falta monofásica torre estaiada monomastro	60
Tabela 11 – Resultados falta bifásica-terra torre estaiada monomastro	61
Tabela 12 – Resultados falta trifásica torre estaiada monomastro	62
Tabela 13 – Resultados falta bifásica torre estaiada monomastro	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ATPDraw – Alternative Transients Program Draw

DWT – Discrete Wavelet Transform (Transformada Discreta de Wavelet)

FFFT – Falta trifásica-terra

FFT – Falta fase-fase-terra

FF – Falta fase-fase

FT – Falta fase-terra

Rf – Resistência de Falta

Rt – Resistência de Aterramento

IDWT – Inverse Discrete Wavelet Transform (Transformada Wavelet Discreta Inversa)

LCC – Line Cable Constant

MATLAB – Matrix Laboratory

SEP – Sistema Elétrico de Potência

TW – Transformada Wavelet

v – Velocidade de propagação da onda (m/s)

L – Indutância distribuída da linha (H/m)

C – Capacitância distribuída da linha (F/m)

v_a – Velocidade de propagação do modo alfa (m/s)

v_0 – Velocidade de propagação do modo zero (m/s)

L_1 – Indutância de sequência positiva

C_1 – Capacitância de sequência positiva

L_0 – Indutância de sequência zero

C_0 – Capacitância de sequência zero

T – Matriz de transformação de Clarke

I_a, I_β, I_c – Correntes nas fases a, b e c

V_a, V_β, V_c – Tensões nas fases a, b e c

I_0, I_a, I_β – Componentes de corrente no sistema transformado

V_0, V_a, V_β – Componentes de tensão no sistema transformado

$x(n)$ – Sinal discreto de entrada

$\psi(t)$ – Função wavelet mãe

a – Parâmetro de escala da wavelet

b – Parâmetro de translação da wavelet

m – Índice de escala da transformada

k – Índice de deslocamento discreto

l – Comprimento total da linha (km)

t_{m0} – Tempo até metade da linha no modo zero

t_{ma} – Tempo até metade da linha no modo alfa

t_{12} – Diferença de tempo no ponto médio

t_α – Tempo da primeira descontinuidade no modo alfa

t_0 – Tempo da primeira descontinuidade no modo zero

t_{em} – Diferença entre tempos dos modos

td – Intervalo entre reflexões

t_a – Tempo de propagação até a falta

d – Distância da falta (km)

D_s – Distância simulada

D_c – Distância calculada

E_s – Erro relativo em relação à distância simulada (%)

E_t – Erro relativo em relação ao comprimento total (%)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 TÉCNICAS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO...	16
2.1. Métodos convencionais de localização de faltas	16
2.2. Métodos baseados em ondas viajantes	16
2.2.1 Métodos de um e dois terminais	17
2.3. Aplicação de Técnicas de Processamento de Sinais	18
2.4. Aplicações Industriais e Tendências em Sistemas Modernos de Transmissão	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1. Tipos de faltas em linha de transmissão	21
3.2. Ondas viajantes e diagrama de Lattice	23
3.3. Transformada de Clarke	25
3.4. Transformada de Wavelet	27
3.5. Análise multirresolução e reconstrução de wavelet	31
3.6 Cálculo da distância	34
4 METODOLOGIA	38
4.1. Procedimento das simulações	38
4.2. Definição dos indicadores de erro	41
4.3. Exemplo de aplicação do algoritmo	42
4.4. Modelagem do circuito	44
4.5. Torres utilizadas	48
4.5.1. Torre autoportante em delta	48
4.5.2. Torre estaiada monomastro	49
4.6 Simulações realizadas	51
5 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES	53
5.1. Resultados torre autoportante em delta	53
5.2. Resultados torre monomastro estaiada	59
5.3. Influência da Resistência de Falta	64
5.4. Influência do Tipo de Falta	68
5.5. Comparação entre as duas Torres	69
6 CONCLUSÕES	71
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	72
6.2 Produção científica decorrente do trabalho	72
REFERÊNCIAS	74

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência é responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, desempenhando papel fundamental no desenvolvimento econômico e social. Nesse contexto, as linhas de transmissão possuem grande importância, pois são responsáveis pelo transporte de grandes blocos de energia elétrica entre os centros de geração e os centros de consumo, geralmente localizados a grandes distâncias. Entretanto, devido à sua extensa exposição ao meio ambiente e às condições operacionais do sistema, essas estruturas estão sujeitas à ocorrência de faltas elétricas provocadas por descargas atmosféricas, falhas de isolamento, contato com vegetação, entre outros fatores.

A ocorrência de faltas em linhas de transmissão pode causar interrupções no fornecimento de energia, danos a equipamentos e impactos na estabilidade do sistema elétrico. Dessa forma, a rápida identificação e localização do ponto de falha torna-se essencial para reduzir o tempo de restabelecimento do sistema e facilitar as atividades de manutenção.

Tradicionalmente, a localização de faltas em linhas de transmissão tem sido realizada por meio de métodos baseados em impedância [1], os quais utilizam medições de tensão e corrente em regime permanente ou quase permanente. Apesar de amplamente utilizados, esses métodos podem apresentar limitações em linhas longas ou em situações envolvendo altas resistências de falta, devido a redução da corrente de curto [2], o que pode comprometer a precisão da estimativa da distância até o ponto de defeito.

Como alternativa, métodos baseados na teoria das ondas viajantes têm sido amplamente estudados [3], uma vez que utilizam os transitórios eletromagnéticos gerados no instante da ocorrência da falta. Quando ocorre uma falha em uma linha de transmissão, ondas eletromagnéticas são produzidas no ponto de defeito e se propagam ao longo da linha em direção aos seus terminais. A análise dos tempos de chegada dessas ondas permite estimar com elevada precisão a localização da falha.

Para a identificação de transitórios de alta frequência em sistemas elétricos, são amplamente empregadas técnicas de processamento de sinais capazes de representar variações temporais e espectrais de forma simultânea. Entre essas técnicas, destaca-se a Transformada Wavelet [3], a qual permite a análise de sinais não estacionários por meio da decomposição do sinal em diferentes escalas de tempo e frequência.

Transformada Wavelet possibilita a localização temporal dos eventos em um sinal, tornando-se especialmente adequada para a análise de fenômenos transitórios, como aqueles associados à ocorrência de faltas em linhas de transmissão. Dessa forma, essa técnica permite identificar descontinuidades e variações abruptas no sinal, que são características típicas da propagação de ondas viajantes em sistemas elétricos.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo aplicar a Transformada de Clarke associada à Transformada Discreta de Wavelet (DWT) para a localização de faltas em uma linha de transmissão de 440 kV e 300 km de extensão.

A Transformada de Clarke é uma técnica de transformação de sistemas trifásicos (ABC) para um sistema ortogonal de componentes, denominado α , β e 0. Essa transformação tem como principal objetivo simplificar a análise de grandezas trifásicas, convertendo-as em componentes desacopladas, o que facilita o estudo de fenômenos transitórios e desequilíbrios no sistema elétrico [4].

A Transformada Discreta de Wavelet (DWT), por sua vez, é utilizada para decompor os sinais no domínio do tempo e frequência, permitindo a identificação precisa dos instantes de ocorrência dos transitórios gerados pela falta. Essa característica é essencial para a detecção dos instantes de chegada das ondas viajantes no terminal de medição.

A linha de transmissão foi modelada utilizando o software ATPDraw [5], que permite a simulação de sistemas eletromagnéticos transitórios baseados em parâmetros distribuídos. Nesse tipo de modelagem, os parâmetros elétricos da linha (resistência, indutância, capacitância e condutância) são distribuídos ao longo de seu comprimento, proporcionando uma representação mais fiel do comportamento real da propagação das ondas eletromagnéticas. Além disso, a linha foi considerada transposta ao longo de seu comprimento, de forma a reduzir o acoplamento mútuo entre fases.

As simulações foram realizadas considerando diferentes tipos de faltas, tais como faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas à terra e trifásicas, bem como diferentes posições ao longo da linha e distintos valores de resistência de falta [6]. A resistência de falta representa a oposição à passagem de corrente no ponto de defeito, sendo um parâmetro que influencia diretamente a magnitude das correntes e tensões durante a ocorrência da falta.

Os sinais de tensão obtidos nas simulações foram exportados para o ambiente MATLAB, onde foram processados por meio das transformadas aplicadas. A partir desse processamento, foram identificados os instantes de chegada das ondas viajantes em um único terminal de medição, permitindo a estimativa da distância até o ponto de falta.

CAPÍTULO 2

TÉCNICAS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A localização de faltas em linhas de transmissão é uma função essencial dos sistemas de proteção em sistemas elétricos de potência, impactando diretamente a confiabilidade e a continuidade do fornecimento de energia. Diversas abordagens têm sido desenvolvidas ao longo dos anos com o objetivo de estimar com maior rapidez e precisão o ponto de ocorrência de defeitos ao longo das linhas de transmissão, especialmente em sistemas de grande extensão.

Neste contexto, destacam-se os métodos baseados em impedância e, mais recentemente, as técnicas fundamentadas em ondas viajantes e transitórios eletromagnéticos. Este capítulo apresenta uma revisão das principais abordagens utilizadas na literatura, bem como tendências recentes e aplicações industriais associadas ao tema.

2.1. Métodos Convencionais de Localização de Faltas

Os métodos convencionais de localização de faltas em linhas de transmissão são baseados na estimativa da impedância aparente vista pelos relés de proteção durante a ocorrência de um defeito. Nesses métodos, utiliza-se a relação entre tensão e corrente medidas no terminal da linha para estimar a distância até o ponto de falta, assumindo um comportamento aproximadamente linear entre impedância e comprimento da linha.

Devido à sua simplicidade de implementação e à utilização de grandezas já analisadas em sistemas de proteção convencionais, esses métodos são amplamente aplicados na indústria elétrica [7]. Entretanto, diversos estudos indicam que seu desempenho pode ser significativamente afetado por fatores como resistência de falta, carregamento pré-falta, variações paramétricas da linha e incertezas de modelagem.

Além disso, em linhas de transmissão longas, os efeitos de parâmetros distribuídos tornam-se mais relevantes, o que pode comprometer a precisão da estimativa da distância até o ponto de defeito.

2.2. Métodos Baseados em Ondas Viajantes

Como alternativa aos métodos convencionais, os métodos baseados na teoria das ondas viajantes têm sido amplamente investigados nas últimas décadas. Esses métodos exploram os

transitórios eletromagnéticos gerados no instante da ocorrência da falta, os quais se propagam ao longo da linha de transmissão em alta velocidade.

A localização da falta é realizada a partir da análise dos instantes de chegada das ondas viajantes nos terminais da linha ou de suas reflexões ao longo do sistema. Diferentemente dos métodos baseados em fasores, essas técnicas utilizam informações de alta frequência presentes nos transitórios iniciais, sendo menos dependentes das condições de regime permanente do sistema elétrico.

Segundo Deng [8], os métodos baseados em ondas viajantes apresentam elevada robustez frente a diferentes condições de operação, uma vez que utilizam informações contidas nos transitórios eletromagnéticos de alta frequência gerados no instante da falta. De maneira semelhante, Mishra, Gupta e Yadav (2023) [9] destacam que essas técnicas tendem a apresentar menor sensibilidade à resistência de falta, ao carregamento da linha e às variações operacionais do sistema quando comparadas aos métodos tradicionais baseados em impedância.

2.2.1. Métodos de Um Terminal e Dois Terminais

Nos métodos de um terminal, a localização da falta é realizada utilizando medições provenientes de apenas um extremo da linha de transmissão. A estimativa da posição do defeito é obtida a partir da análise dos tempos de chegada das ondas incidentes e refletidas.

Apesar da redução de custos de instrumentação, essa abordagem apresenta desafios relacionados à identificação precisa dos instantes de reflexão e à influência de múltiplas reflexões ao longo da linha [9].

Já os métodos de dois terminais utilizam medições sincronizadas em ambos os extremos da linha de transmissão. A localização da falta é obtida a partir da diferença entre os instantes de chegada das ondas viajantes em cada terminal.

Essa abordagem apresenta elevada precisão, uma vez que depende diretamente do tempo de propagação das ondas ao longo da linha, reduzindo a influência de parâmetros operacionais do sistema. Entretanto, sua implementação requer sistemas de sincronização temporal de alta precisão, geralmente baseados em GPS (Global Positioning System) ou PMUs (Phasor Measurement Units).

De acordo com [10], os métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes utilizando medições sincronizadas em dois terminais podem alcançar elevada precisão na estimativa da posição da falta, mesmo em linhas de transmissão de grande extensão. Em razão dessa característica, tais métodos são frequentemente utilizados como referência para avaliação e desenvolvimento de novos algoritmos de localização baseados em transitórios eletromagnéticos.

2.3. Aplicação de Técnicas de Processamento de Sinais

Os sinais obtidos durante a ocorrência de faltas em linhas de transmissão apresentam natureza não estacionária e conteúdo significativo em alta frequência. Dessa forma, técnicas de processamento de sinais são amplamente utilizadas para a identificação e extração das informações relevantes contidas nos transitórios eletromagnéticos.

Entre essas técnicas, destacam-se os métodos baseados em transformadas tempo-frequência. Em particular, a Transformada Wavelet tem sido amplamente aplicada devido à sua capacidade de representar simultaneamente informações no domínio do tempo e da frequência.

Segundo [11], a Transformada Wavelet permite a detecção dos instantes de chegada das ondas viajantes, mesmo em condições de ruído e distorções do sistema elétrico.

A Transformada Wavelet é uma ferramenta matemática utilizada na análise de sinais não estacionários, permitindo a decomposição do sinal em diferentes escalas de frequência. Diferentemente da Transformada de Fourier, que fornece apenas informações no domínio da frequência, a Wavelet permite análise simultânea tempo-frequência, sendo particularmente adequada para a identificação de transitórios de curta duração.

No contexto da localização de faltas, a Transformada Wavelet é amplamente utilizada para destacar componentes de alta frequência associados ao surgimento das ondas viajantes, contribuindo para a determinação precisa dos instantes de propagação dos transitórios.

2.4. Aplicações Industriais e Tendências em Sistemas Modernos de Transmissão

Nos últimos anos, observa-se um aumento significativo no desenvolvimento e na aplicação de técnicas baseadas em ondas viajantes para localização de faltas em linhas de

transmissão. Esse avanço está diretamente relacionado à evolução dos sistemas digitais de proteção e ao aumento das taxas de amostragem dos dispositivos de medição.

Além do desenvolvimento acadêmico, essas técnicas também vêm sendo incorporadas em aplicações industriais. Equipamentos modernos de proteção já utilizam algoritmos baseados em transitórios eletromagnéticos para detecção e localização de faltas em sistemas de potência.

Um exemplo é o relé SEL-T400L, que implementa técnicas baseadas em ondas viajantes para proteção ultra-rápida e localização de faltas desenvolvido pela Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). Esse dispositivo utiliza medições de alta frequência e processamento digital de sinais para identificar os transitórios gerados pela ocorrência da falta, permitindo elevada precisão e tempos de atuação reduzidos quando comparado a métodos convencionais baseados em fasores [12].

Outra aplicação industrial relevante é o SEL-TWFL (Dual Traveling-Wave Fault Locator), também desenvolvido pela SEL, projetado especificamente para localização de faltas por ondas viajantes em linhas de transmissão. O sistema utiliza medições sincronizadas e a análise dos tempos de chegada das ondas viajantes nos terminais da linha para fornecer estimativas de localização significativamente mais precisas que os métodos convencionais baseados em impedância [13].

Adicionalmente, fabricantes como a GE Vernova Grid Solutions disponibilizam equipamentos de monitoramento e registradores digitais, como o Reason RPV311, que incorporam funcionalidades de localização precisa de faltas utilizando técnicas de ondas viajantes, ampliando a aplicação dessas metodologias em sistemas modernos de transmissão e subestações digitais [14].

Outra aplicação relevante encontra-se em sistemas de transmissão em corrente contínua em alta tensão (HVDC), nos quais métodos baseados em ondas viajantes têm recebido crescente atenção devido à elevada velocidade de propagação dos transitórios eletromagnéticos e à necessidade de detecção e localização de faltas em escalas de tempo da ordem de milissegundos [15]. Em sistemas HVDC modernos, a rápida identificação do ponto de defeito é fundamental para minimizar os impactos sobre a estabilidade e a disponibilidade da transmissão.

Por exemplo, a fabricante Hitachi Energy incorpora algoritmos de localização de faltas em seus sistemas HVDC baseados na plataforma MACH™, amplamente utilizada em projetos de transmissão em corrente contínua ao redor do mundo [16]. Além disso, estudos recentes têm

investigado a aplicação de técnicas baseadas em ondas viajantes em sistemas HVDC do tipo VSC (Voltage Source Converter), demonstrando elevada precisão na localização de faltas em linhas de transmissão de longa distância. Tais abordagens exploram os instantes de chegada dos transitórios eletromagnéticos gerados pela falta, permitindo estimativas mais precisas e menos sensíveis às condições operacionais do sistema quando comparadas aos métodos convencionais baseados em impedância [17].

Apesar dos avanços observados nos métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes e Transformada Wavelet, ainda existem desafios relacionados à identificação precisa dos transitórios eletromagnéticos e à influência das características físicas da linha de transmissão sobre o desempenho do algoritmo. Nesse contexto, a geometria da torre torna-se um fator relevante, pois a disposição espacial dos condutores, o espaçamento entre fases, a altura em relação ao solo e a presença dos cabos para-raios influenciam os parâmetros elétricos distribuídos da linha, como indutância, capacitância, acoplamento eletromagnético e velocidades modais de propagação das ondas.

Dessa forma, o presente trabalho busca contribuir para essa área por meio da avaliação comparativa de um algoritmo de localização de faltas aplicado a duas configurações geométricas distintas de linhas de transmissão: torre autoportante em delta e torre estaiada monomastro, verificando como esses diferentes arranjos impactam a precisão da estimativa da distância até a falta. Diferentemente de estudos que analisam apenas a influência do tipo, da posição ou da resistência de falta, este trabalho também investiga como a geometria física da linha pode afetar a propagação dos transitórios e, consequentemente, a precisão da estimativa da distância até o ponto de falta. Assim, a principal contribuição do estudo está na análise da sensibilidade do algoritmo frente a diferentes arranjos físicos da linha, mantendo a metodologia de processamento baseada na Transformada de Clarke, Transformada Wavelet e teoria das ondas viajantes.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos utilizados no desenvolvimento do método de localização de faltas em linhas de transmissão, abordando os conceitos de faltas elétricas, ondas viajantes, Transformada de Clarke e Transformada Wavelet, os quais são essenciais para a análise dos transitórios eletromagnéticos e para a estimativa da posição da falta.

3.1. TIPOS DE FALTAS EM LINHA DE TRANSMISSÃO

Segundo Mamede Filho (2013) [18], as linhas de transmissão estão sujeitas à ocorrência de diferentes tipos de faltas, que representam condições anormais de operação capazes de provocar alterações significativas nas tensões e correntes do sistema. Essas faltas podem ser causadas por diversos fatores, como descargas atmosféricas, falhas de isolamento, contato com vegetação, ação do vento, poluição, envelhecimento de equipamentos e agentes externos que interfiram na rede elétrica.

De forma geral, os curto-circuitos em sistemas trifásicos podem ser classificados em faltas simétricas e faltas assimétricas. As faltas simétricas envolvem as três fases de maneira equilibrada, enquanto as faltas assimétricas afetam apenas uma ou duas fases, provocando desequilíbrio entre as correntes e tensões do sistema.

Nas linhas de transmissão, os principais tipos de curto-circuito são:

- falta monofásica-terra (FT ou fase-terra);
- falta bifásica (FF ou fase-fase);
- falta bifásica-terra (FFT ou fase-fase-terra);
- falta trifásica (FFF) ou trifásica-terra (FFFT).

Na figura 1 é apresentado o esquemático dos tipos de falta, onde R_f é a resistência de falta e R_t a resistência de terra.

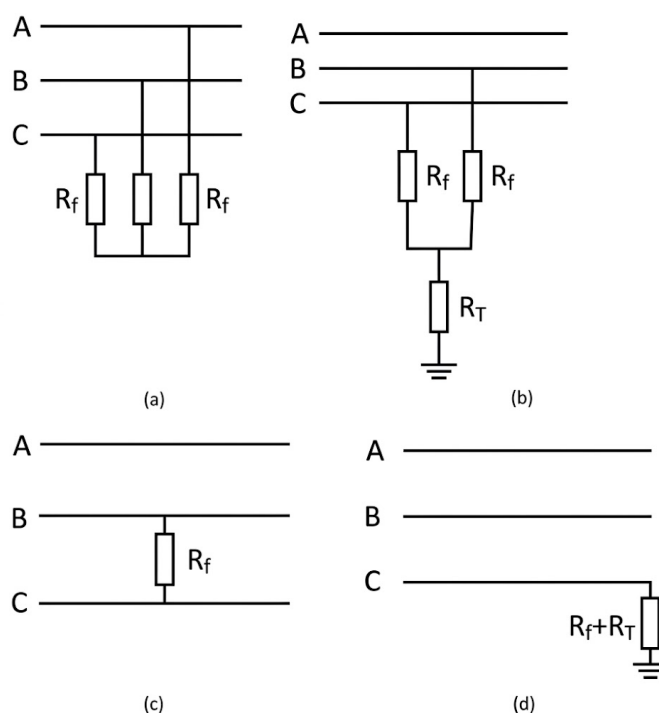


Figura 1: Tipos de Falta em Linhas de Transmissão.

(a) Falta Trifásica, (b) Falta Bifásica-Terra

(c) Falta Bifásica, (d) Falta Monofásica

Fonte: Autor.

Entre esses tipos, a falta monofásica-terra é a mais frequente em sistemas elétricos de potência [19], sendo normalmente associada ao rompimento da isolamento entre um condutor e a terra. Já as faltas bifásicas e bifásicas-terra envolvem duas fases, com ou sem contato com o solo, enquanto as faltas trifásicas são menos frequentes, porém geralmente mais severas, por envolverem simultaneamente as três fases do sistema.

Do ponto de vista elétrico, a ocorrência de uma falta provoca uma mudança brusca no regime permanente da linha, gerando transitórios eletromagnéticos que se propagam ao longo do sistema. Como consequência, há variações abruptas nas formas de onda de tensão e corrente, além de alterações na amplitude, fase e conteúdo espectral dos sinais medidos nos terminais da linha. Essas perturbações são particularmente importantes em métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes, uma vez que a identificação correta do instante de chegada dessas ondas depende diretamente da resposta transitória produzida por cada tipo de curto-circuito [20].

Além da classificação pelo número de fases envolvidas, as faltas também podem ser avaliadas em função de sua impedância de falta, a qual representa a oposição à circulação da

corrente no ponto do defeito. Quando a impedância de falta é baixa, correntes de curto-circuito de maior magnitude são estabelecidas, provocando alterações mais abruptas nas condições elétricas da linha e gerando transitórios eletromagnéticos com amplitudes mais elevadas.

Por outro lado, faltas de alta impedância limitam a corrente que circula pelo ponto de defeito, reduzindo a energia associada ao evento transitório. Como consequência, as ondas viajantes geradas apresentam menor amplitude, tornando sua detecção mais suscetível à influência de ruídos e distorções do sistema elétrico, o que pode dificultar a identificação e a localização da falta [21].

3.2. ONDAS VIAJANTES

Ondas viajantes são fenômenos eletromagnéticos que ocorrem em linhas de transmissão quando há uma perturbação no sistema elétrico, como a ocorrência de uma falta, chaveamentos ou descargas atmosféricas. Essas perturbações provocam variações abruptas nas grandezas elétricas, como tensão e corrente, gerando transitórios que se propagam ao longo da linha na forma de componentes de alta frequência. Essas ondas transportam energia e informação sobre o evento que as originou, sendo amplamente utilizadas em técnicas de análise e localização de faltas em sistemas elétricos de potência.

Quando uma falta ocorre em um ponto da linha de transmissão, forma-se uma descontinuidade elétrica no sistema. A partir desse ponto, ondas viajantes são geradas e passam a se propagar em ambas as direções ao longo da linha, em direção aos seus terminais [22]. A velocidade de propagação dessas ondas depende das características elétricas da linha, como descrito na equação 1.

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (1)$$

Em que v [km/s] é a velocidade de propagação do sinal na linha, L é o parâmetro distribuído de indutância [H] e C o de capacitância [F].

Durante sua propagação ao longo da linha, as ondas viajantes podem sofrer reflexões e transmissões ao encontrar descontinuidades no sistema elétrico, tais como terminais da linha, transformadores, mudanças de impedância ou o próprio ponto de falta. Essas reflexões ocorrem devido à diferença de impedância característica entre os elementos do sistema, sendo essa

definida como a razão entre tensão e corrente de uma onda progressiva que se propaga ao longo da linha, sendo determinada pelos parâmetros distribuídos da própria linha de transmissão. Quando ocorre uma descontinuidade entre a impedância característica da linha e a impedância do elemento conectado, parte da energia é refletida e parte é transmitida, gerando ondas que se propagam em direções opostas [23]. O comportamento dessas ondas ao longo da linha fornece informações importantes para a identificação e localização da falta.

A análise das ondas viajantes baseia-se principalmente na identificação dos instantes de chegada dessas ondas nos terminais da linha de transmissão. Ao medir o tempo necessário para que as ondas geradas no ponto de falta atinjam os terminais da linha, é possível estimar a distância entre o ponto de medição e o local onde ocorreu a falha. Dessa forma, métodos baseados em ondas viajantes são amplamente utilizados em sistemas de proteção e monitoramento, apresentando elevada precisão na localização de faltas, especialmente em linhas de transmissão de grande extensão [24].

Para facilitar a análise do comportamento dessas ondas ao longo do sistema, utiliza-se frequentemente o Diagrama de Lattice, também conhecido como diagrama espaço-tempo [25]. Esse diagrama é uma representação gráfica na qual são representadas simultaneamente as dimensões de espaço e tempo, permitindo visualizar de forma clara o sistema, como demonstrado na figura 2.

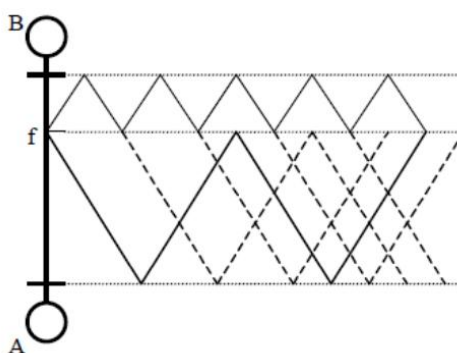


Figura 2: Diagrama de Lattice de um Sistema Elétrico.

Fonte: Adaptado de [26].

No Diagrama de Lattice, o eixo horizontal representa o tempo, enquanto o eixo vertical representa a distância ao longo da linha de transmissão, com as barras A e B, e o ponto de falta (f). A trajetória das ondas viajantes é representada por linhas inclinadas no diagrama, cuja inclinação está diretamente relacionada à velocidade de propagação da onda no meio de

transmissão. Dessa forma, é possível observar graficamente o caminho percorrido pelas ondas desde o ponto de origem até os terminais da linha.

Quando uma onda viajante atinge uma descontinuidade no sistema, como o terminal da linha ou um ponto de mudança de impedância, parte da onda pode ser refletida de volta ao longo da linha e outra parte pode ser transmitida. Esses fenômenos também podem ser representados no Diagrama de Lattice, permitindo visualizar claramente os múltiplos caminhos percorridos pelas ondas refletidas e transmitidas ao longo do tempo.

No contexto da localização de faltas baseada em ondas viajantes, o diagrama de Lattice auxilia na compreensão da propagação das ondas geradas no ponto de defeito ao longo da linha de transmissão. Além disso, essa representação facilita a interpretação dos sinais registrados nos terminais da linha, contribuindo para a formulação das equações utilizadas na estimativa da localização da falta [26].

3.3. TRANSFORMADA DE CLARKE

Em sistemas de transmissão de energia elétrica, as linhas são geralmente constituídas por circuitos trifásicos. Devido ao acoplamento eletromagnético existente entre os condutores, as grandezas elétricas de cada fase não são totalmente independentes. Assim, quando ocorre uma falta em uma das fases da linha de transmissão, seus efeitos também podem ser observados nas demais fases do sistema. Como consequência, as equações diferenciais que descrevem os transitórios eletromagnéticos tornam-se interdependentes, o que dificulta a análise direta desses fenômenos.

Para simplificar essa análise, é conveniente realizar o desacoplamento das equações do sistema, permitindo que cada componente seja estudada de forma independente. Nesse contexto, utilizam-se as chamadas transformações modais, que consistem em ferramentas matemáticas capazes de converter um sistema de equações acopladas em um conjunto de equações desacopladas. Esse procedimento facilita significativamente o estudo dos transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão, além de permitir uma interpretação mais clara da propagação das ondas viajantes ao longo da linha [26].

Entre as transformações modais mais utilizadas em sistemas elétricos destaca-se a Transformada de Clarke, que permite converter as grandezas trifásicas de um sistema de coordenadas naturais (a, b, c) para um sistema de coordenadas ortogonais formado pelas

componentes α (alfa), β (beta) e 0 (zero) [27]. Essa transformação projeta o sistema trifásico em um plano bidimensional ortogonal, representado pelas componentes α e β , enquanto a componente zero está associada às correntes ou tensões que retornam pelo neutro ou pela terra, na figura 3 é apresentado a transformada de Clarke aplicada um sistema equilibrado.

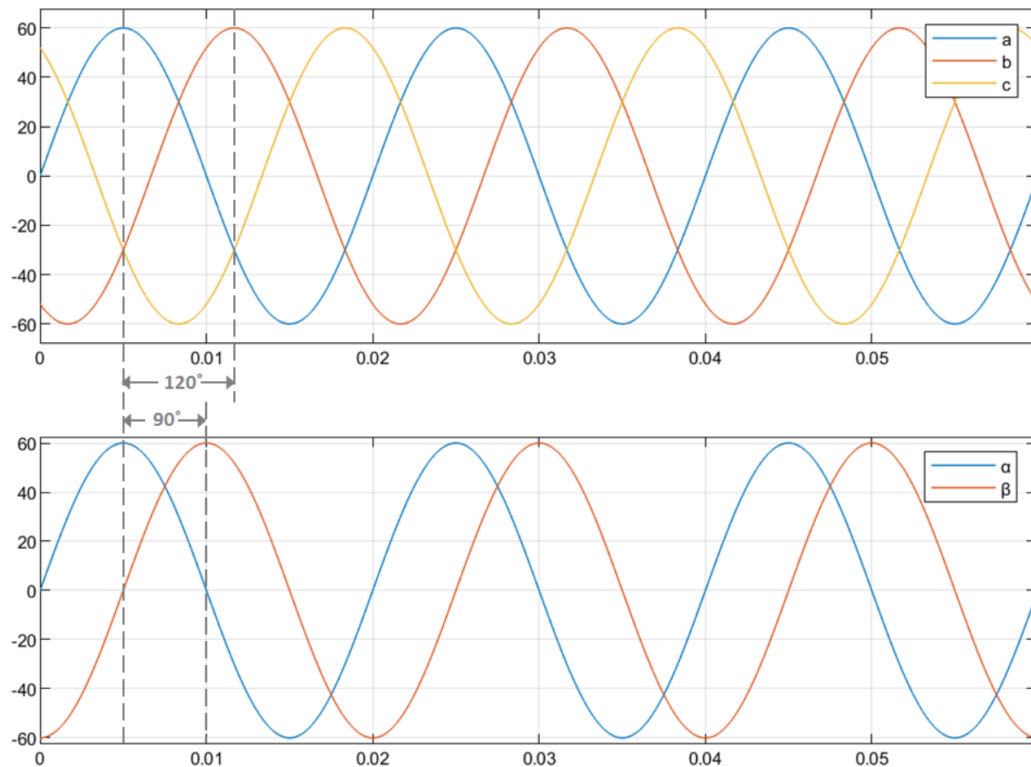


Figura 3: Transformada de Clarke Para um Sistema Equilibrado

Fonte: [28].

Em sistemas perfeitamente equilibrados, a componente zero tende a ser nula, o que simplifica ainda mais a análise do sistema. Entretanto, durante a ocorrência de faltas ou desequilíbrios, essa componente pode apresentar valores significativos.

Matematicamente, a Transformada de Clarke pode ser representada por meio da seguinte matriz de transformação:

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

A partir dessa matriz, as correntes e tensões trifásicas podem ser transformadas para o novo sistema de coordenadas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Em que I_a , I_b e I_c representam as correntes nas três fases do sistema, enquanto I_0 , I_α e I_β correspondem às componentes transformadas. De maneira análoga, V_a , V_b e V_c representam as tensões de fase, enquanto V_0 , V_α e V_β correspondem às tensões no sistema transformado.

A aplicação dessa transformação permite reduzir o acoplamento existente entre as fases do sistema trifásico, facilitando a análise dos transitórios eletromagnéticos associados à ocorrência de faltas em linhas de transmissão. Além disso, a transformação possibilita que cada componente seja analisada separadamente, contribuindo para a identificação das ondas viajantes presentes nos sinais medidos nos terminais da linha.

Outro aspecto importante é que a velocidade de propagação das ondas viajantes pode apresentar valores diferentes para determinadas componentes modais do sistema. Em particular, as componentes associadas aos modos α , 0 e β podem apresentar velocidades de propagação distintas, as quais podem ser determinadas pelas seguintes expressões [29]:

$$v_\alpha = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad v_\beta = \frac{1}{\sqrt{L_\beta C_\beta}} \quad v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (4)$$

Em que L_1 e C_1 representam os parâmetros de indutância e capacitância associados à sequência positiva da linha de transmissão, L_β e C_β correspondem aos parâmetros de sequência negativa e L_0 e C_0 correspondem aos parâmetros de sequência zero.

Dessa forma, ao converter os sinais trifásicos para um sistema de coordenadas ortogonais por meio da Transformada de Clarke, torna-se possível aplicar técnicas avançadas de processamento de sinais para a análise dos transitórios eletromagnéticos. Entre essas técnicas destaca-se a Transformada de Wavelet, que permite identificar com maior precisão os instantes de chegada das ondas viajantes nos terminais da linha, contribuindo para a estimativa da localização da falta.

3.4. TRANSFORMADA DE WAVELET

A Transformada de Wavelet é uma técnica de processamento de sinais utilizada para a análise de fenômenos transitórios em sistemas elétricos de potência. Diferentemente de métodos

clássicos de análise espectral, como a Transformada de Fourier, que fornecem apenas informações no domínio da frequência, a Transformada de Wavelet permite analisar simultaneamente o comportamento do sinal nos domínios do tempo e da frequência. Essa característica torna essa ferramenta particularmente adequada para o estudo de sinais não estacionários, como os transitórios eletromagnéticos gerados durante a ocorrência de faltas em linhas de transmissão, conforme a figura 4.



Figura 4: Transformada de Wavelet

Fonte: Adaptado de [30].

Quando ocorre uma falta em uma linha de transmissão, são gerados transitórios de alta frequência associados à propagação de ondas viajantes ao longo da linha. A identificação precisa desses transitórios é fundamental para determinar o instante de chegada das ondas nos terminais da linha e, conseqüentemente, estimar a localização da falta. Nesse contexto, a Transformada de Wavelet se destaca por sua capacidade de detectar variações abruptas no sinal, permitindo identificar com maior precisão os instantes associados à ocorrência desses eventos [30].

Entre as diferentes formas de aplicação da Transformada de Wavelet, destaca-se a Transformada Discreta de Wavelet (DWT – *Discrete Wavelet Transform*), que é amplamente utilizada em aplicações digitais. A DWT é especialmente adequada para algoritmos computacionais, pois pode ser implementada por meio de operações discretas aplicadas diretamente aos sinais amostrados, facilitando sua utilização em sistemas de processamento digital de sinais e em ferramentas computacionais como o MATLAB.

Matematicamente, a Transformada Discreta de Wavelet pode ser representada pela equação 5:

$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum x(n) \psi\left(\frac{k - nb_0}{a_0^m}\right) \quad (5)$$

Em que $x(n)$ representa o sinal de entrada que será analisado pela transformada.

A função $\psi(t)$ corresponde à wavelet mãe, que é a função base utilizada no processo de decomposição do sinal. A partir dessa função são geradas diversas outras funções, chamadas wavelets filhas, por meio de operações de escalonamento e deslocamento ao longo do tempo. Essas funções permitem analisar o sinal em diferentes regiões temporais e em diferentes escalas de frequência.

O parâmetro a está relacionado à escala da wavelet, sendo responsável por controlar o nível de compressão ou expansão da função wavelet. Quando o valor de a é pequeno, a wavelet torna-se mais comprimida, permitindo detectar componentes de alta frequência presentes no sinal. Por outro lado, quando o valor de a aumenta, a wavelet torna-se mais alongada, possibilitando a análise de componentes de baixa frequência. Dessa forma, o parâmetro de escala permite observar o comportamento do sinal em diferentes resoluções, conforme a figura 5.

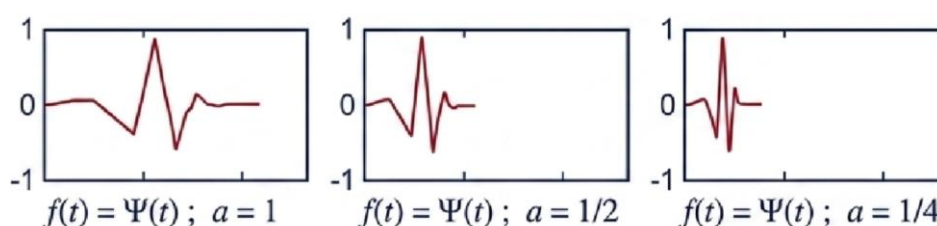


Figura 5: Parâmetro de Escala da Transformada de Wavelet

Fonte: Adaptado de [26].

Já o parâmetro b representa a translação da wavelet, sendo responsável pelo deslocamento da função ao longo do eixo temporal. Esse deslocamento permite que a wavelet percorra o sinal analisado, realizando uma análise local de suas características. Dessa forma, a translação possibilita identificar o instante de ocorrência de discontinuidades, variações abruptas e outros fenômenos transitórios presentes no sinal.

O índice m está associado aos diferentes níveis de escala considerados no processo de decomposição do sinal. Na Transformada Wavelet Discreta, a escala é definida por $a = a_0^m$, de modo que cada valor de m corresponde a um nível específico de análise. Essa característica permite observar o sinal em diferentes faixas de frequência. Em geral, níveis menores estão associados a componentes de maior frequência, enquanto níveis maiores correspondem a componentes de menor frequência.

Por fim, o índice k está associado à posição discreta das amostras do sinal analisado, indicando o ponto do sinal em que a wavelet é avaliada durante o processo de decomposição.

Dessa forma, a wavelet é deslocada ao longo do sinal de forma discreta, permitindo analisar sua correspondência com diferentes regiões do sinal de entrada. Assim, para cada combinação entre o nível de escala m e a posição k , obtém-se um coeficiente wavelet TWD(m,k), conforme apresentado na Figura 6.

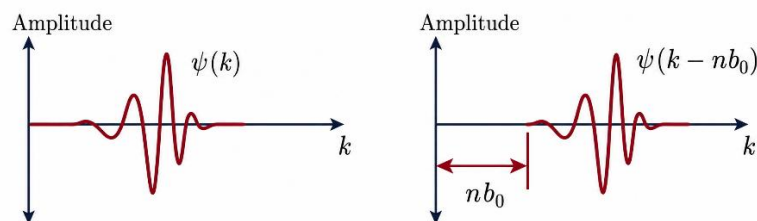


Figura 6: Translação Aplicada a uma Wavelet

Fonte: Adaptado de [30].

A wavelet mãe constitui a função base da transformada e apresenta algumas características importantes, como média nula, comportamento oscilatório em sua região central e decaimento para zero em suas extremidades. Entre as principais wavelets mãe utilizadas na literatura, destacam-se as famílias Daubechies (db3), Coiflets (coif2) e Symlets (sym3), além das wavelets contínuas Morlet (morlet), Mexican Hat (mexh) e Meyer (meyr), conforme mostrados na Figura 7. A partir da wavelet mãe são geradas as chamadas wavelets filhas, obtidas por meio de operações de escalonamento e translação. Essas funções permitem realizar uma varredura do sinal em diferentes escalas e posições ao longo do tempo, possibilitando a identificação de eventos transitórios presentes no sinal [31].

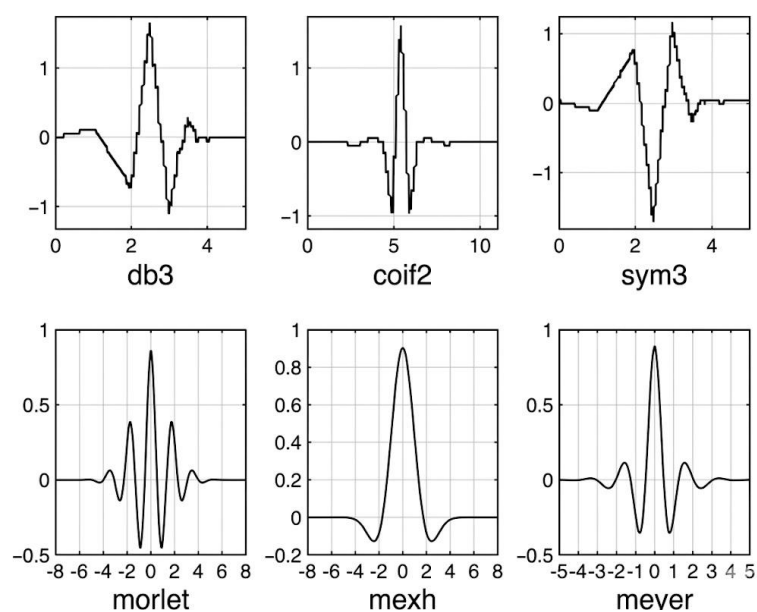


Figura 7: Tipos de Wavelet Mãe

Fonte: Adaptado de [30].

3.5. ANÁLISE MULTIRRESOLUÇÃO E RECONSTRUÇÃO DE WAVELET

Uma das principais características da Transformada Discreta de Wavelet é a realização da chamada análise multirresolução do sinal. Esse conceito refere-se à capacidade de analisar um mesmo sinal em diferentes níveis de resolução, permitindo observar simultaneamente componentes de alta e baixa frequência. Dessa forma, é possível decompor o sinal original em várias partes que representam diferentes faixas do seu espectro de frequência.

A análise multirresolução é implementada por meio de um processo de filtragem sucessiva, no qual o sinal é processado por um banco de filtros digitais. Esses filtros realizam a separação das componentes do sinal de acordo com sua faixa de frequência. Em geral, são utilizados dois tipos de filtros complementares:

- Filtro passa-baixa, responsável por preservar as componentes de baixa frequência do sinal;
- Filtro passa-alta, responsável por extrair as componentes de alta frequência.

Do ponto de vista do processamento de sinais, o processo de filtragem consiste em realizar uma convolução entre o sinal de entrada e a resposta ao impulso do filtro. Essa operação permite separar o conteúdo espectral do sinal em diferentes bandas de frequência, possibilitando a análise de cada componente de forma independente, a figura 8 exemplifica a aplicação dos filtros.

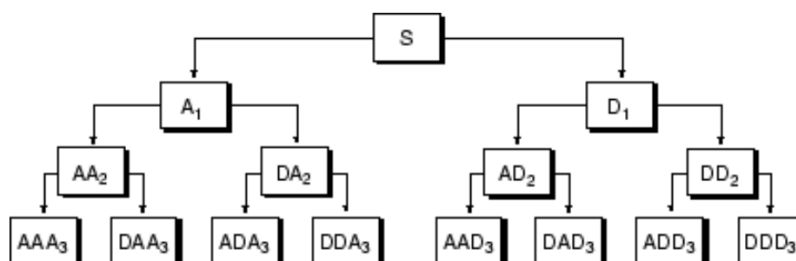


Figura 8: Subníveis da Transformada de Wavelet

Fonte: [32].

Quando o sinal original passa por esse banco de filtros, são gerados dois novos sinais. O sinal obtido após a aplicação do filtro passa-baixa é denominado sinal de aproximação (A), pois representa uma versão suavizada do sinal original, contendo principalmente suas componentes de baixa frequência. Já o sinal obtido pela aplicação do filtro passa-alta é denominado sinal de detalhe (D), pois concentra as componentes de alta frequência presentes no sinal.

Entretanto, se apenas o processo de filtragem fosse aplicado, o número de amostras do sinal resultante aumentaria, gerando redundância de dados. Para evitar esse problema, após a filtragem é aplicado um operador denominado *downsampling*, responsável por reduzir o número de amostras do sinal resultante. Esse operador consiste basicamente em selecionar apenas algumas amostras do sinal filtrado, descartando as demais. Em sua forma mais comum, o downsampling mantém uma amostra e descarta a seguinte, reduzindo pela metade a quantidade de dados, de acordo com a figura 9.

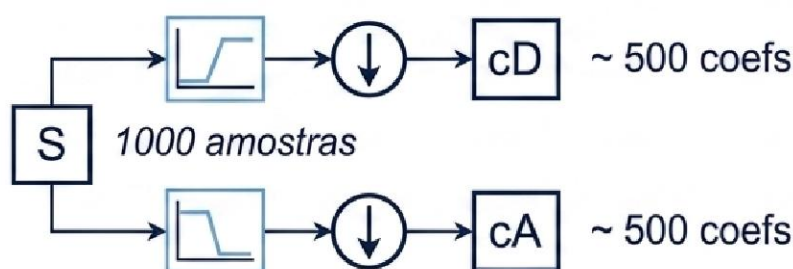


Figura 9: Aplicação do Downsampling.

Fonte: Adaptado de [33].

Esse procedimento garante que o número total de amostras após a decomposição permaneça aproximadamente igual ao número de amostras do sinal original, evitando o aumento desnecessário da quantidade de dados a serem processados.

Após a primeira etapa de decomposição, apenas o sinal de aproximação é novamente submetido ao mesmo processo de filtragem e redução de amostras. Esse procedimento pode ser repetido sucessivamente, gerando diferentes níveis de decomposição do sinal. Cada nível corresponde a uma nova separação do conteúdo de baixa frequência do sinal, produzindo novas aproximações e novos detalhes.

Considerando a frequência de amostragem de 120 kHz utilizada nas simulações e a decomposição Wavelet realizada até o nível 2, os sinais são separados em diferentes bandas de frequência. O primeiro nível de detalhe (D1) corresponde aproximadamente à faixa de 30 a 60 kHz, enquanto o segundo nível de detalhe (D2) abrange aproximadamente a faixa de 15 a 30 kHz. A aproximação de nível 2 (A2) concentra as componentes de frequência inferiores a aproximadamente 15 kHz. Dessa forma, a análise multirresolução permite separar as diferentes componentes espectrais do sinal, sendo o nível D1 utilizado para destacar os transitórios de alta frequência associados às ondas viajantes.

Esse processo sucessivo de filtragem e redução de amostras constitui a chamada análise multirresolução, na qual o sinal original é dividido em diversas sub-bandas de frequência, cada uma representando diferentes características do sinal. Na figura 8 é ilustrado de forma simplificada o processo de decomposição de um sinal em múltiplos níveis.

Além do processo de decomposição, a Transformada de Wavelet também permite realizar a reconstrução do sinal original, a partir dos coeficientes de aproximação e detalhe obtidos durante a análise. Esse processo é realizado por meio da chamada Transformada Wavelet Discreta Inversa (IDWT).

Durante a reconstrução, ocorre inicialmente um processo inverso ao *downsampling*, denominado *upsampling*, no qual são inseridas novas amostras no sinal, geralmente na forma de zeros entre as amostras existentes. Em seguida, os sinais passam por filtros de reconstrução apropriados e são combinados novamente, permitindo recuperar o sinal original sem perda significativa de informação, como na figura 10.

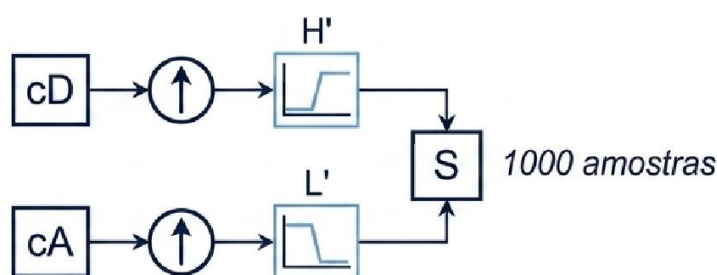


Figura 10: Aplicação do Upsampling.

Fonte: Adaptado de [33].

A utilização correta de bancos de filtros adequados garante que o processo de decomposição e reconstrução apresente reconstrução perfeita, ou seja, o sinal original pode ser obtido novamente a partir de seus coeficientes wavelet.

No contexto da localização de faltas baseada em ondas viajantes, os coeficientes de detalhe obtidos pela Transformada Discreta de Wavelet são de grande importância, pois concentram as componentes de alta frequência associadas aos transitórios gerados no instante da ocorrência da falta. Dessa forma, a análise desses coeficientes permite identificar com maior precisão os instantes de chegada das ondas viajantes nos terminais da linha de transmissão, fornecendo informações essenciais para a determinação da localização da falta.

3.6. CÁLCULO DA DISTÂNCIA DA FALTA

Para calcular corretamente a distância da falta em curtos fase-terra, é necessário, inicialmente, realizar a pré-localização, isto é, identificar em qual metade da linha a falta ocorreu. Essa etapa é fundamental porque os métodos baseados em ondas viajantes utilizam os tempos de chegada das reflexões nos terminais, e esses tempos dependem diretamente do ponto onde a falta aconteceu ao longo da linha.

Como as ondas se propagam e são refletidas nas discontinuidades do sistema (como a própria falta e os terminais da linha), diferentes posições de falta podem gerar padrões de tempo semelhantes quando observados apenas em um terminal. Assim, sem a informação prévia sobre em qual metade da linha está a falta, pode haver ambiguidade na solução, levando a erros na estimativa da distância.

A pré-localização pode ser realizada conforme a metodologia proposta por Ali Abur e Héctor Magnago [34], baseada na análise dos tempos das primeiras reflexões das ondas viajantes, obtidas por meio da Transformada de Wavelet (TW).

De forma mais simples, compara-se a diferença entre os instantes de chegada das primeiras reflexões associadas ao modo terra e ao modo alfa. Essa diferença é então comparada com a diferença esperada desses tempos considerando o ponto médio da linha.

Na prática, quanto mais distante estiver a falta, maior será a diferença entre esses tempos de chegada. Assim, se essa diferença for maior que a correspondente ao meio da linha, a falta está na segunda metade. Caso contrário, ela está na primeira metade da linha.

Inicialmente, definem-se os tempos de propagação das ondas até a metade da linha para o modo zero e alfa (α) de propagação:

$$t_{m0} = \frac{l}{2 \cdot v_{m0}} \quad (6)$$

$$t_{m\alpha} = \frac{l}{2 \cdot v_{m\alpha}} \quad (7)$$

Em que:

- l é o comprimento total da linha;
- v_{m0} e $v_{m\alpha}$ são as velocidades de propagação dos modos terra e alfa, respectivamente.

A partir desses valores, calcula-se:

$$t_{l2} = |t_{m0} - t_{m\alpha}| \quad (8)$$

Em seguida, define-se a diferença entre os instantes de chegada das primeiras ondas detectadas:

$$t_{dm} = |t_{\alpha} - t_0| \quad (9)$$

Em que:

- t_{α} corresponde ao tempo da primeira descontinuidade identificada no modo alfa;
- t_0 corresponde ao tempo associado ao modo terra, ambos obtidos a partir do primeiro nível da Transformada de Wavelet.

A comparação entre esses tempos permite identificar a região de ocorrência da falta, conforme as seguintes condições:

- Se $t_{dm} > t_{l2}$: a falta ocorreu na segunda metade da linha de transmissão;
- Caso contrário ($t_{dm} \leq t_{l2}$): a falta está localizada na primeira metade da linha;

Na figura 11 é apresentado um sinal que demonstra a identificação da região de falta.

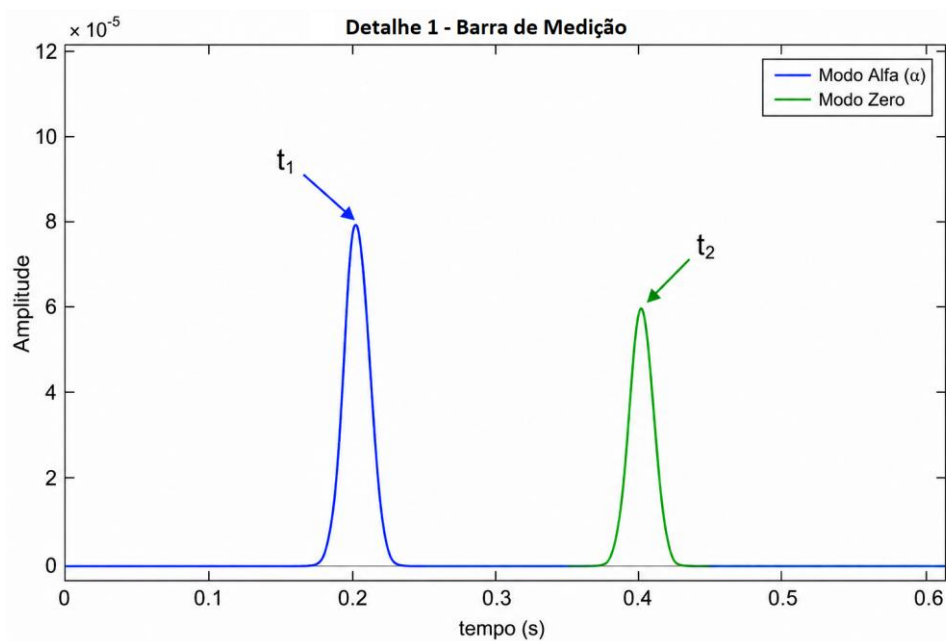


Figura 11: Sinal de Detalhe Modo Alfa e Modo Zero.

Fonte: Autor.

Na Figura identificam-se os tempos $t_\alpha = t_1 = 0,2\text{ s}$ e $t_0 = t_2 = 0,4\text{ s}$, resultando em $t_{dm} = 0,2\text{ s}$. Considerando $t_{m0} = 8,5 \times 10^{-4}\text{ s}$ e $t_{m\alpha} = 5,1 \times 10^{-4}\text{ s}$, obtém-se $t_{l2} = 3,4 \times 10^{-4}\text{ s}$, o que indica que, para o caso analisado, a falta ocorreu na segunda metade da linha de transmissão.

Após a determinação da região da falta, é possível calcular sua distância em relação ao terminal de medição.

Para isso, utiliza-se o tempo t_d , que representa o intervalo entre as duas primeiras reflexões da onda viajante associada ao modo alfa. Esse tempo pode ser obtido diretamente a partir dos coeficientes de detalhe da Transformada de Wavelet.

A interpretação física desse tempo pode ser melhor compreendida analisando o percurso das ondas ao longo da linha por meio do diagrama de Lattice na figura 12.

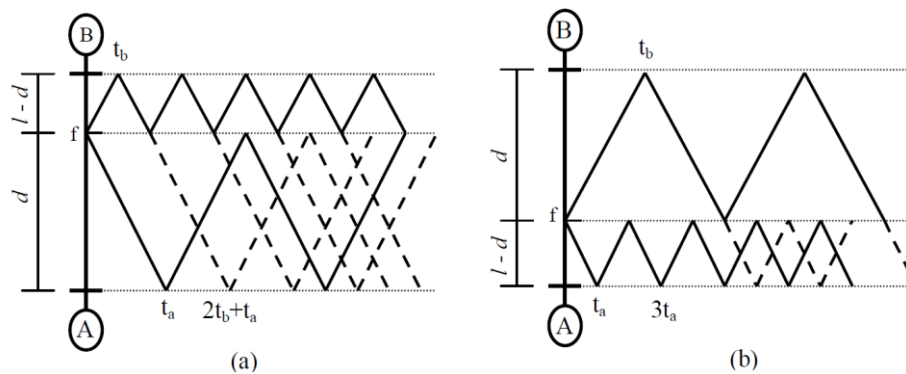


Figura 12: (a) falta na segunda metade da linha, (b) falta na primeira metade da linha.

Fonte: [26].

Nesse contexto, o tempo t_d corresponde ao intervalo necessário para que a onda percorra o trajeto de ida e volta entre o ponto de falta e o terminal de medição, podendo ser expresso como:

$$t_d = 2 \cdot t_a \quad (10)$$

Em que t_a representa o tempo de propagação da onda entre o terminal e o ponto de falta.

Com base nisso, a distância da falta pode ser calculada pelas seguintes expressões:

- Primeira metade da linha:

$$d = \frac{v_{\alpha} \cdot t_d}{2} \quad (11)$$

- Segunda metade da linha:

$$d = l - \frac{v_{\alpha} \cdot t_d}{2} \quad (12)$$

Em que:

- v_{α} é a velocidade de propagação do modo alfa;
- t_d é o intervalo entre as duas primeiras reflexões detectadas.

Para os outros tipos de falta, o impacto da onda proveniente do outro terminal não é significativo [26], sendo assim, o cálculo da distância pode ser simplificado para a equação 11, não sendo necessário pré-localizar a falta.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para a realização das simulações e para a implementação do método de localização de faltas proposto. São descritos o sistema elétrico modelado, os parâmetros considerados, os cenários de falta analisados e as etapas de processamento dos sinais empregadas para a estimativa da distância da falta.

4.1. PROCEDIMENTO DAS SIMULAÇÕES

O procedimento adotado para a obtenção da distância da falta foi dividido em etapas sucessivas de simulação, aquisição de sinais, processamento e cálculo da posição da falta. Inicialmente, foram realizadas simulações no software ATPDraw para todas as combinações estabelecidas entre tipo de falta, distância ao longo da linha e resistência de falta, de forma a compor os diferentes cenários analisados no trabalho.

Em cada simulação, os sinais de tensão foram adquiridos no terminal de interesse com uma frequência de amostragem de 120 kHz, valor adotado para garantir a adequada representação dos fenômenos transitórios de alta frequência associados às ondas viajantes. Para cada cenário, os dados obtidos foram armazenados em função do tempo e posteriormente exportados para processamento no ambiente MATLAB.

Na etapa de processamento, aplicou-se inicialmente a Transformada de Clarke, com a finalidade de decompor os sinais trifásicos em componentes modais mais adequadas à análise dos transitórios gerados pela falta. Em seguida, foi aplicada a Transformada Wavelet ao sinal selecionado, visando identificar com maior precisão as variações abruptas associadas à incidência e à reflexão das ondas viajantes ao longo da linha.

A análise wavelet foi realizada até o segundo nível de decomposição, sendo o foco principal direcionado aos coeficientes de detalhe do primeiro nível, por estes concentrarem as componentes de alta frequência mais relevantes para a detecção dos instantes iniciais do transitório. A wavelet-mãe *coif4* foi adotada no algoritmo implementado em MATLAB, devido à sua boa resposta na identificação de descontinuidades em sinais transitórios.

Na sequência, procedeu-se à reconstrução do sinal wavelet, de modo a evidenciar os transitórios associados à propagação e às reflexões das ondas viajantes. Para a identificação

automática dos instantes de interesse, foi utilizado um critério baseado na detecção por limiar (threshold) aplicado à envoltória do sinal reconstruído. Inicialmente, a envoltória foi obtida a partir do valor absoluto do sinal e suavizada por meio de uma média móvel. Em seguida, foi definido um limiar de detecção com base na média e no desvio-padrão da envoltória.

Para evitar detecções indevidas causadas por pequenas oscilações próximas ao limiar, foi utilizada uma lógica de histerese, além de critérios de duração mínima dos eventos e de agrupamento de eventos temporalmente próximos. Dessa forma, os instantes utilizados no cálculo da distância da falta foram determinados automaticamente a partir do início dos intervalos identificados pelo algoritmo de detecção.

Finalmente, com base nesses tempos e na etapa de pré-localização da falta, foi possível determinar a posição estimada do defeito ao longo da linha, por meio da aplicação das Equações 11 e 12, conforme a metade da linha previamente identificada.

Na figura 13 é apresentado um fluxograma reduzido do procedimento geral para a realização das simulações.

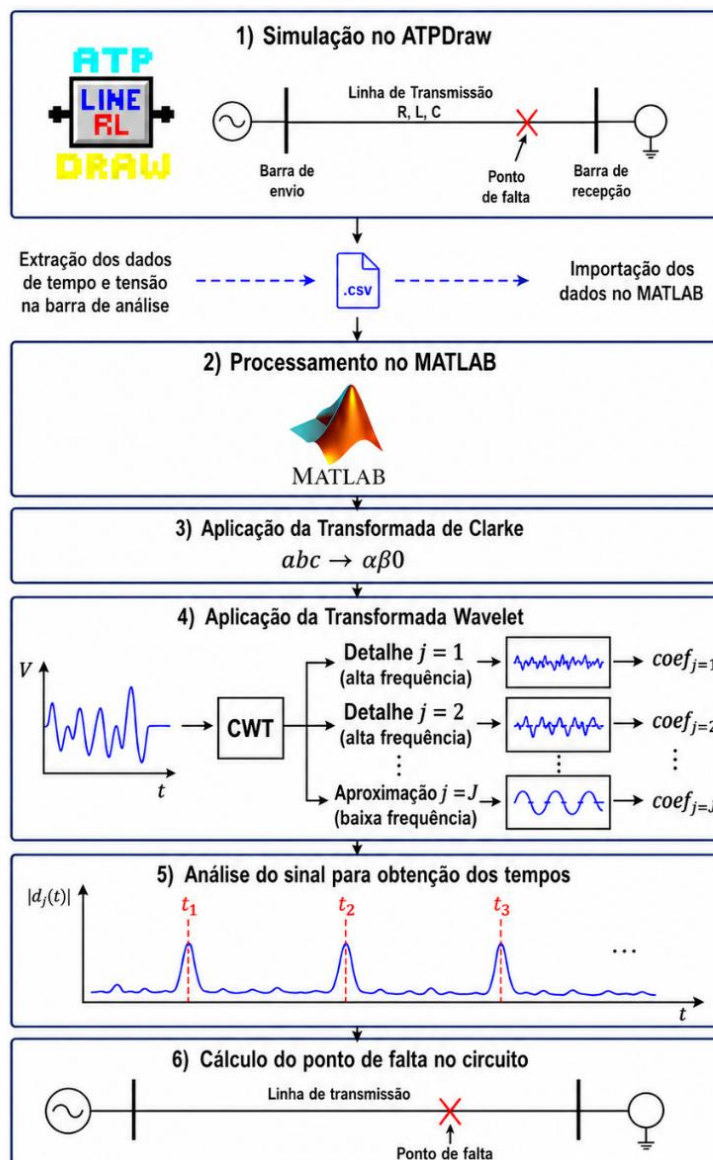


Figura 13: Fluxograma das Simulações

Fonte: Autor.

A partir da realização das simulações no ATPDraw, os dados de tensão medidos no barramento de envio são armazenados em função do tempo e posteriormente exportados para o ambiente MATLAB. Em seguida, aplica-se a Transformada de Clarke conforme as matrizes de transformação apresentadas nas Equações 2 e 3. A partir dos sinais obtidos, seleciona-se a componente alfa da tensão (V_α), que é utilizada como sinal de entrada para a Transformada Wavelet.

A aplicação da Transformada Wavelet é realizada de acordo com a Equação 5, considerando apenas a decomposição até o nível 1, uma vez que o objetivo é analisar as componentes de maior frequência presentes no sinal de tensão. A wavelet-mãe escolhida foi a Coiflet de ordem 4 (coif4). Após a decomposição, realiza-se a reconstrução dos coeficientes de

detalhe de nível 1, pois esse sinal concentra as componentes de alta frequência necessárias para a identificação dos transitórios associados à ocorrência da falta. Na Figura 14 é apresentado o código MATLAB utilizado para a aplicação da Transformada Wavelet.

```
[c1,l1] = wavedec(Valpha,1,'coif4');
cd1_rec = wrcoef('d',c1,l1,'coif4',1);
```

Figura 14: Código Transformada de Wavelet.

Fonte: Autor.

No código implementado, as variáveis *c1* e *l1* correspondem, respectivamente, ao vetor de coeficientes da decomposição e ao vetor que contém informações sobre a estrutura dessa decomposição até o nível 1. Dessa forma, são armazenados tanto os coeficientes de detalhe de nível 1 quanto os coeficientes de aproximação de nível 1. A variável *Valpha* representa a componente alfa da tensão ($V\alpha$), enquanto 'coif4' define a wavelet-mãe utilizada no processo. Esses parâmetros são empregados pela função *wavedec*, responsável por realizar a decomposição wavelet do sinal.

Na segunda linha do código é realizada a reconstrução wavelet por meio da função *wrcoef*. A variável *cd1_rec* representa o sinal reconstruído a partir dos coeficientes de detalhe de nível 1. O parâmetro 'd' indica que serão utilizados os coeficientes de detalhe, enquanto *c1* e *l1* correspondem aos vetores que armazenam os coeficientes da decomposição e sua estrutura. Por fim, o parâmetro 1 especifica o nível de detalhe utilizado na reconstrução.

O sinal reconstruído *cd1_rec* é utilizado na análise temporal da falta, pois evidencia os transitórios de alta frequência produzidos pela propagação e reflexão das ondas viajantes ao longo da linha de transmissão. A partir desse sinal, são identificados os instantes de chegada e reflexão das ondas, permitindo o cálculo da distância da falta por meio das Equações 11 ou 12, após a determinação da metade da linha em que a falta ocorreu.

4.2. DEFINIÇÃO DOS INDICADORES DE ERRO

Para a avaliação do desempenho do algoritmo de localização de faltas, foram definidos dois indicadores de erro, utilizados para quantificar a diferença entre a distância real da falta e a distância estimada pelo método.

O primeiro indicador corresponde ao erro relativo em relação à distância simulada, denominado E_s , que permite avaliar a precisão da estimativa em relação à posição real da falta. O segundo indicador corresponde ao erro relativo ao comprimento total da linha de transmissão, denominado E_t , possibilitando analisar o impacto do erro considerando toda a extensão da linha.

As equações utilizadas para o cálculo desses indicadores são apresentadas a seguir:

$$E_s = \frac{D_s - D_c}{D_s} \times 100 \quad (13)$$

$$E_t = \frac{D_s - D_c}{L} \times 100 \quad (14)$$

Em que:

- D_s representa a distância da falta definida na simulação no ATPDraw;
- D_c representa a distância da falta calculada pelo algoritmo implementado no MATLAB;
- L corresponde ao comprimento total da linha de transmissão considerada no estudo, sendo igual a 300 km.

Esses indicadores foram utilizados para avaliar o desempenho do método em diferentes cenários de simulação, permitindo analisar a influência de parâmetros como tipo de falta, resistência de falta e posição ao longo da linha na precisão dos resultados obtidos.

4.3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORITMO

Como exemplo de aplicação do procedimento descrito, considera-se uma falta trifásica ocorrida em uma torre estaiada do tipo monomastro, localizada a 50 km do ponto de medição, com resistência de falta de 400 Ω , como apresentado na figura 15.

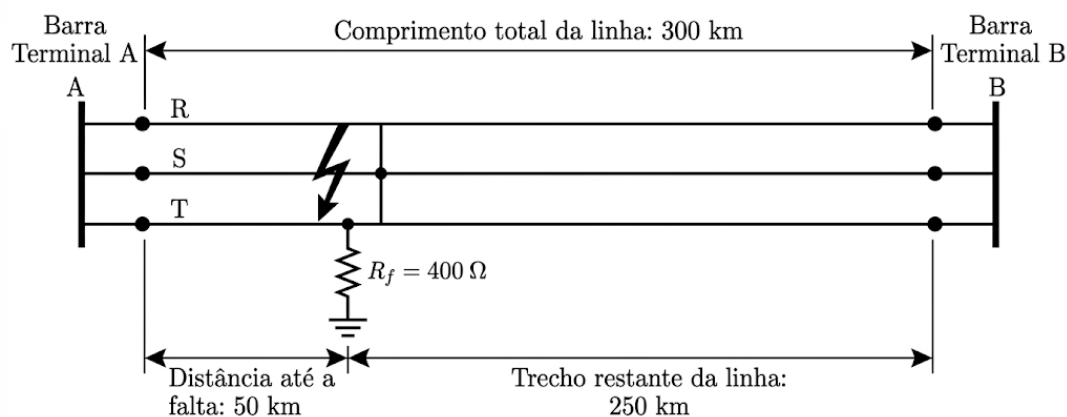


Figura 15: Exemplo de linha com Falta Trifásica.

Fonte: Autor.

A forma de onda de tensão obtida no barramento A por meio da simulação no ATPDraw é apresentada na Figura 16.

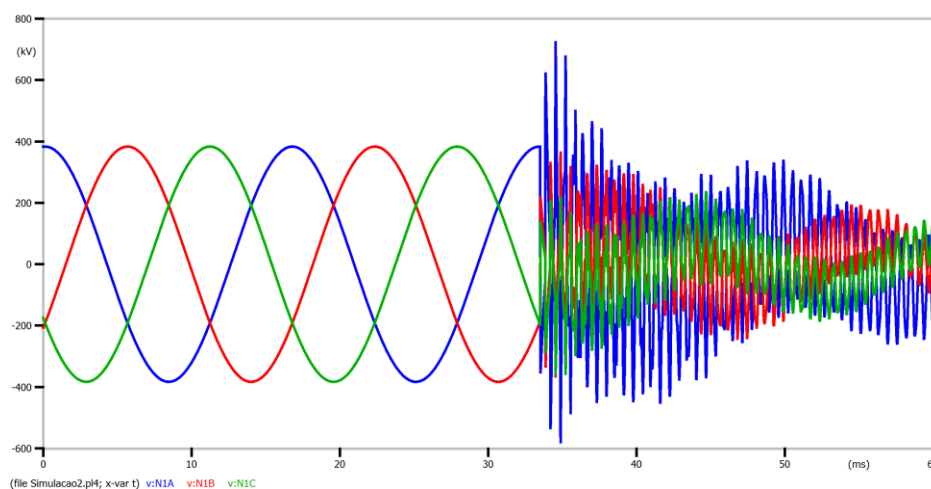


Figura 16: Forma de Onda da Tensão Falta Trifásica

Fonte: Autor.

A partir dos sinais de tensão em função do tempo, foi realizado o processamento descrito no fluxograma, envolvendo a aplicação da Transformada de Clarke e da Transformada Wavelet. O sinal resultante após esse tratamento é mostrado na Figura 17, na qual é possível observar com maior clareza os transitórios associados à propagação das componentes de alta frequência.

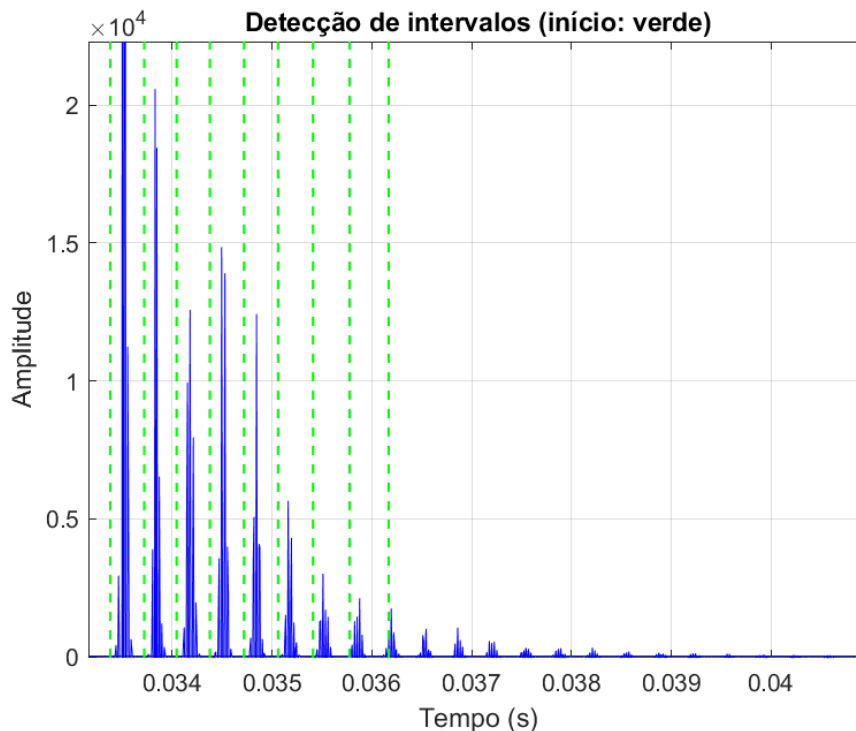


Figura 17: Sinal Tratado

Fonte: Autor.

Os traçados em destaque na figura indicam os instantes iniciais dos principais picos do sinal reconstruído, os quais estão associados às reflexões das ondas ao longo da linha. Com base nesses instantes, foram determinados os intervalos de tempo relevantes para o cálculo do parâmetro t_d . Para o caso analisado, foram considerados oito intervalos possíveis, sendo adotada a média desses valores, resultando em um tempo de $t_d = 0,0003349749$ s.

Considerando a velocidade de propagação da onda na linha igual a $2,93996 \times 10^5$ km/s, foi possível calcular a distância estimada da falta, de acordo com a Equação 11, obtendo-se o valor de 49,2406 km. Considerando que a posição real da falta é de 50 km, o erro absoluto obtido foi de 759,4 m, correspondente a um erro relativo de aproximadamente 0,25% em relação à posição real da falta. Esses resultados indicam uma boa precisão do método para o cenário analisado.

4.4. MODELAGEM DO CIRCUITO

Para analisar como as variações dos parâmetros da linha de transmissão afetam o comportamento transitório dos fasores de tensão e corrente e a operação do algoritmo de localização de faltas, foram realizadas simulações no ATPDraw, ambiente gráfico utilizado para a modelagem e simulação de sistemas elétricos transitórios. Essa ferramenta permite representar componentes do sistema elétrico, como linhas de transmissão, fontes, cargas e faltas,

possibilitando a obtenção de sinais de tensão e corrente com nível de detalhamento adequado para estudos envolvendo transitórios eletromagnéticos.

Na figura 18 é apresentado o modelo do circuito simulado no ATPDraw.

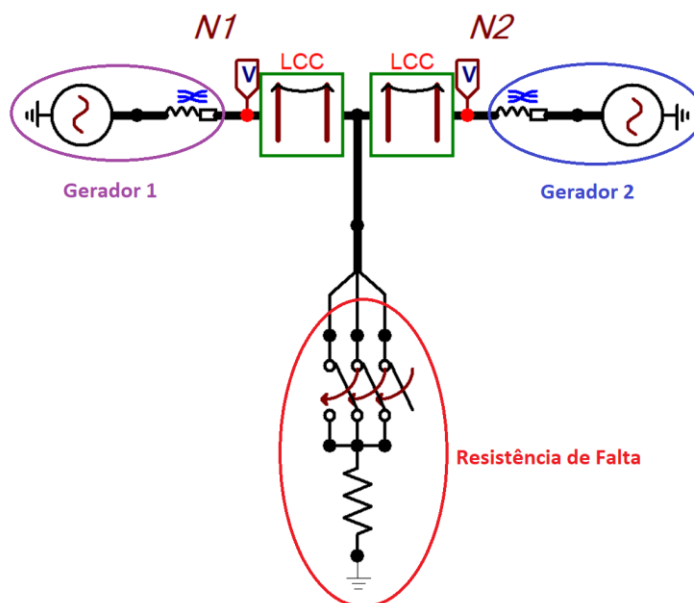


Figura 18: Circuito Simulado no ATPDraw

Fonte: Autor.

Para a realização das simulações, foram consideradas duas linhas de transmissão com geometrias de torres e condutores distintas, conforme ilustrado na Figura 18. Nessa configuração, a barra de medição de tensão é representada por N1 e a barra remota por N2, enquanto as linhas de transmissão são modeladas por meio dos blocos LCC (Line Cable Constant), responsáveis pela representação da linha a partir de seus parâmetros geométricos.

Os espaçamentos geométricos dos cabos e as características dos condutores são modelados na aba de Data do bloco LCC do ATPDraw, apresentado na figura 19 e 20.

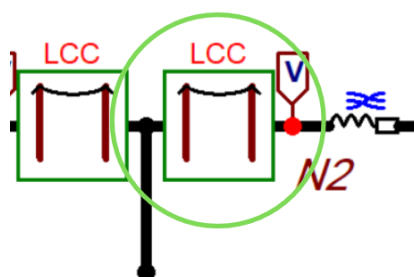


Figura 19: Bloco LCC no ATPDraw

Fonte: Autor

#	Ph.no	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.4635	1.257	0.0889	-9.67	23.67	10.2	1	0	1
2	1	0.4635	1.257	0.0889	-9.67	24.47	11.04	1	0	1
3	1	0.4635	1.257	0.0889	-8.87	24.47	11.04	1	0	1
4	1	0.4635	1.257	0.0889	-8.87	23.67	10.2	1	0	1
5	2	0.4635	1.257	0.0889	-0.4	27.27	13.84	1	0	1
6	2	0.4635	1.257	0.0889	-0.4	28.07	14.64	1	0	1
7	2	0.4635	1.257	0.0889	0.4	28.07	14.64	1	0	1
8	2	0.4635	1.257	0.0889	0.4	27.27	13.84	1	0	1
9	3	0.4635	1.257	0.0889	8.87	23.67	10.2	1	0	1
10	3	0.4635	1.257	0.0889	8.87	24.47	11.04	1	0	1
11	3	0.4635	1.257	0.0889	9.67	24.47	11.04	1	0	1
12	3	0.4635	1.257	0.0889	9.67	23.67	10.2	1	0	1
13	0	0	0.4572	4.188	-7.51	35	28.6	1	0	1
14	0	0	0.4572	4.188	7.51	35	28.6	1	0	1

Figura 20: Aba Data do Bloco LCC no ATPDraw

Fonte: Autor

Os parâmetros geométricos e elétricos dos condutores são fundamentais para a correta modelagem da linha de transmissão no módulo LCC do ATPDraw. O parâmetro Rin representa o raio interno do condutor, enquanto Rout corresponde ao seu raio externo e o parâmetro Resis indica a resistência elétrica em corrente contínua por unidade de comprimento, apresentados na figura 20. Já Horiz define a posição horizontal do condutor em relação a uma linha de referência, enquanto os parâmetros Vtower e Vmid representam, respectivamente, a altura do condutor em relação ao solo e sua altura no meio do vão, considerando o efeito da flecha, esses três parâmetros podem ser analisados de acordo com a figura 21.

Em conjunto, esses dados permitem ao programa calcular com maior precisão os parâmetros elétricos distribuídos da linha, como resistência, indutância, capacitância e impedância características.

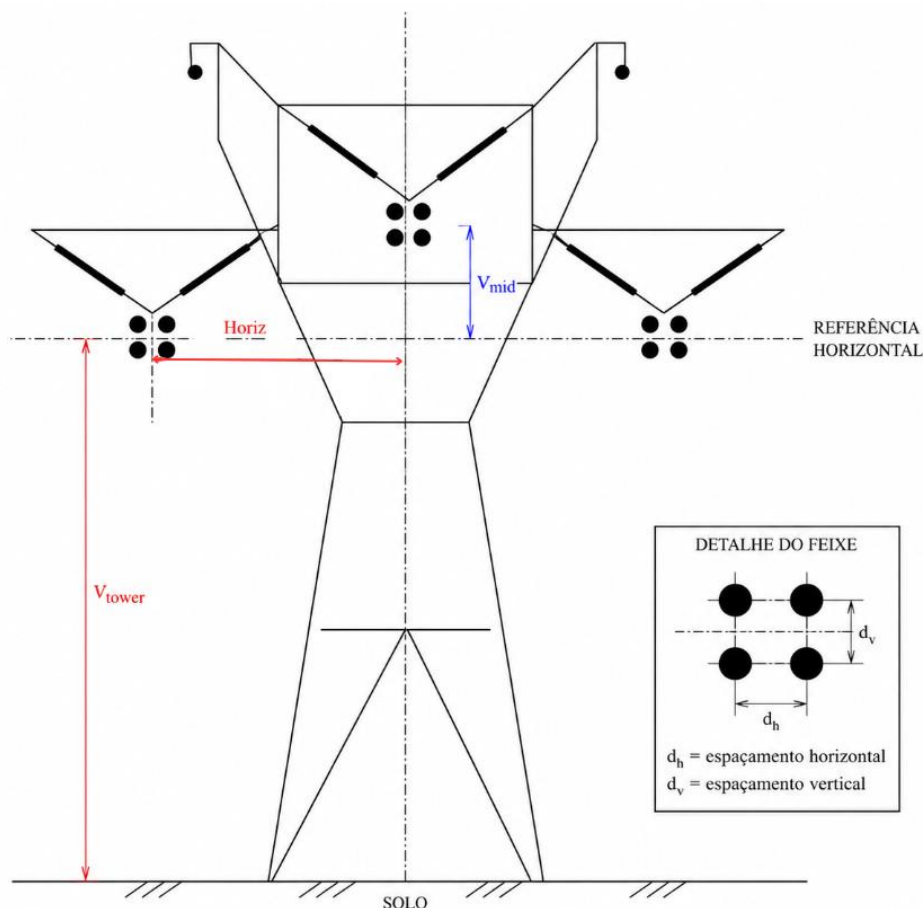


Figura 21: Detalhe das Distâncias da Torre.

Fonte: Autor.

Para as simulações, foram adotadas duas configurações geométricas diferentes, uma para cada simulação, com o objetivo avaliar a influência do espaçamento entre os condutores no desempenho e na precisão do algoritmo de localização de faltas, uma vez que a disposição física dos cabos altera os parâmetros elétricos da linha e, consequentemente, o comportamento dos transitórios propagados ao longo do sistema.

Apesar da diferença entre as configurações geométricas adotadas, foram mantidos constantes, em ambos os casos, o comprimento da linha, a tensão nominal, a resistividade do solo e a frequência de operação. Além disso, considerou-se que ambas as linhas são transpostas.

Nas tabelas 1 e 2 são apresentadas os principais parâmetros do circuito e dos geradores utilizados no sistema elétrico analisado.

Tabela 1: Parâmetros do Circuito.

Comprimento Total:	300 km
Resistividade do Solo:	250 $\Omega \cdot m$
Tensão Nominal:	440 kV
Frequência:	60 Hz
Linha com Transposição	

Tabela 2: Parâmetros dos Geradores.

Parâmetro	Gerador 1	Gerador 2
Tensão:	462 kV	418 kV (-10°)
Resistência de Seq. Positiva:	1,698 Ω	1,787 Ω
Resistência de Seq. Zero:	0,358 Ω	0,405 Ω
Reatância Ind. Positiva:	51,4 Ω	54,1 Ω
Reatância Ind. Seq. Zero:	11,2 Ω	12,3 Ω

4.5. TORRES UTILIZADAS

4.5.1. TORRE AUTOPORTANTE EM DELTA

A primeira torre modelada corresponde a uma configuração autoportante em delta, composta por um circuito simples trifásico e quatro subcondutores por fase, contabilizando 12 condutores. A disposição dos condutores foi adotada de acordo com o arranjo geométrico da torre, conforme ilustrado na Figura 22.

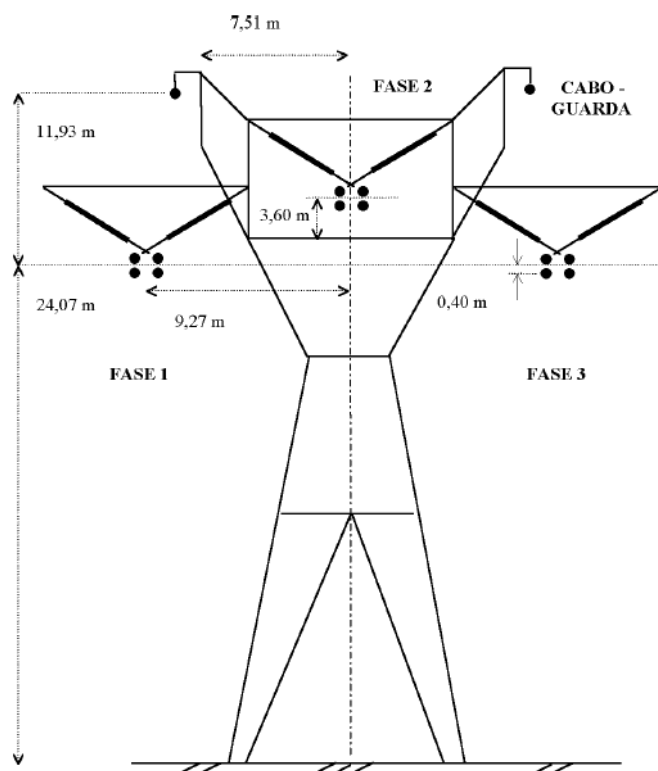


Figura 22: Torre Autoportante em Delta

Fonte: [26].

Na tabela 3 é apresentado os dados que compõem a modelagem da configuração da torre Autoportante em Delta no bloco LCC.

Tabela 3: Dimensões e Características da Torre Autoportante em Delta

Condutor	Fase	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0,4635	1,257	0,0889	-9,67	23,67	10,20
2	1	0,4635	1,257	0,0889	-9,67	24,47	11,04
3	1	0,4635	1,257	0,0889	-8,87	24,47	11,04
4	1	0,4635	1,257	0,0889	-8,87	23,67	10,20
5	2	0,4635	1,257	0,0889	-0,40	27,27	13,84
6	2	0,4635	1,257	0,0889	-0,40	28,07	14,64
7	2	0,4635	1,257	0,0889	0,40	28,07	14,64
8	2	0,4635	1,257	0,0889	0,40	27,27	13,84
9	3	0,4635	1,257	0,0889	8,87	23,67	10,20
10	3	0,4635	1,257	0,0889	8,87	24,47	11,04
11	3	0,4635	1,257	0,0889	9,67	24,47	11,04
12	3	0,4635	1,257	0,0889	9,67	23,67	10,20
13	0	0	0,4572	4,188	-7,51	35	28,60
14	0	0	0,4572	4,188	7,51	35	28,60

4.5.2. TORRE ESTAIADA MONOMASTRO

A segunda configuração analisada corresponde a uma torre estaiada do tipo monomastro, também composta por um circuito trifásico simples e quatro subcondutores por fase. Nessa estrutura, os condutores foram posicionados de acordo com a geometria característica desse arranjo, conforme apresentado na Figura 23.

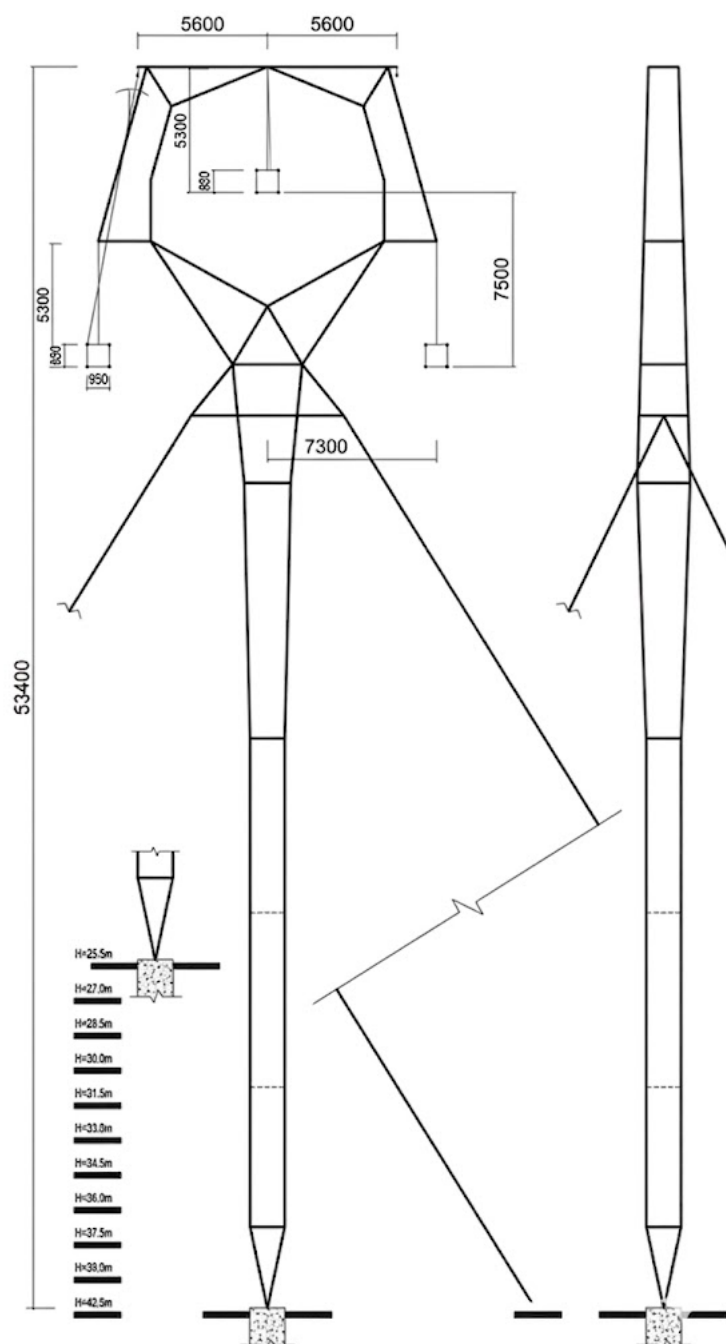


Figura 23: Torre Estaiada Monomastro

Fonte: [35].

Os parâmetros geométricos utilizados na modelagem dessa configuração no bloco LCC do ATPDraw são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Dimensões e Características da Torre Estaiada Monomastro

Condutor	Fase	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	1,48	0,073	-5,825	22,725	8,725
2	1	0	1,48	0,073	-5,375	22,725	8,725
3	1	0	1,48	0,073	-5,825	22,275	8,275
4	1	0	1,48	0,073	-5,375	22,275	8,275
5	2	0	1,48	0,073	-0,225	30,225	1,225
6	2	0	1,48	0,073	0,225	30,225	16,225
7	2	0	1,48	0,073	-0,225	29,775	15,775
8	2	0	1,48	0,073	0,225	29,775	15,775
9	3	0	1,48	0,073	5,375	22,725	8,725
10	3	0	1,48	0,073	5,825	22,725	8,725
11	3	0	1,48	0,073	5,375	22,275	8,275
12	3	0	1,48	0,073	5,825	22,275	8,275
13	0	0	0,8425	4,188	-2,8	39	30
14	0	0	0,8425	4,188	2,8	39	30

4.6. SIMULAÇÕES REALIZADAS

As simulações realizadas tiveram como objetivo avaliar o desempenho do algoritmo de localização de faltas em diferentes condições operacionais da linha de transmissão. Para isso, foram considerados diferentes tipos de curto-circuito, posições de falta ao longo da linha e valores de resistência de falta, permitindo analisar a influência desses parâmetros na precisão da estimativa da distância.

A variação da posição da falta possibilita verificar o comportamento do método em diferentes regiões do sistema, já que a propagação e a reflexão das ondas viajantes dependem diretamente do ponto em que a descontinuidade ocorre. Além disso, a análise de diferentes tipos de falta permite avaliar a sensibilidade do algoritmo diante de distintas condições de desequilíbrio entre fases.

Também foram considerados diferentes valores de resistência de falta, buscando representar situações mais próximas das condições reais de operação. Nesse contexto, faltas com menor resistência, como 50 Ω , tendem a produzir transitórios mais intensos, enquanto resistências mais elevadas, como 400 Ω , podem reduzir a amplitude dos sinais e dificultar a detecção das ondas viajantes.

Dessa forma, o conjunto de simulações adotado permite uma avaliação abrangente do método proposto, contemplando diferentes cenários de severidade, localização e tipo de falta. Os principais parâmetros utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros utilizados nas Simulações

Parâmetro	Valores considerados
Tipos de falta	Monofásica-terra (FT), Bifásica (FF), Bifásica-terra (FFT), Trifásica-terra (FFFT)
Resistência de falta (Ω)	0, 50, 100, 200, 400
Distância da falta (km)	50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250
Grandeza analisada	Sinais de tensão/corrente para aplicação do algoritmo de localização
Objetivo da análise	Avaliar a influência da posição, do tipo e da resistência da falta na precisão do algoritmo

A combinação desses parâmetros possibilita avaliar o comportamento do algoritmo sob diferentes condições de operação, permitindo identificar sua robustez frente às variações mais relevantes associadas às faltas em linhas de transmissão.

A escolha das distâncias de falta buscou contemplar tanto pontos intermediários quanto regiões próximas aos terminais da linha, permitindo verificar o comportamento do algoritmo em situações nas quais os tempos de propagação e reflexão das ondas viajantes apresentam características distintas.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no ambiente do ATPDraw e do processamento dos sinais no MATLAB, conforme o procedimento descrito no capítulo anterior. O objetivo desta etapa é avaliar o desempenho do algoritmo de localização de faltas baseado em ondas viajantes diante das diferentes condições simuladas, considerando variações no tipo de falta, na distância ao longo da linha de transmissão e na resistência de falta.

Para a análise dos resultados, foram definidos dois indicadores de erro: o erro relativo à distância simulada, E_s , e o erro relativo ao comprimento total da linha, E_t . Esses indicadores foram utilizados para avaliar a precisão das estimativas obtidas pelo algoritmo, permitindo a comparação entre a distância real da falta e o valor calculado.

A partir dessas métricas, foram organizadas tabelas contendo as distâncias simuladas, as distâncias estimadas pelo algoritmo e os respectivos erros calculados. Esses resultados permitem avaliar a influência dos diferentes cenários de simulação na precisão do método de localização de faltas.

5.1. RESULTADOS TORRE AUTOPORTANTE EM DELTA

Para exemplificar os resultados referentes à geometria da torre autoportante em delta, foi considerada uma falta fase-terra simulada a 200 km do ponto de medição, com resistência de aterramento de $100 \, \Omega$. A Figura 24 apresenta o sinal de tensão da componente alfa após a aplicação da Transformada de Clarke e da Transformada Wavelet.

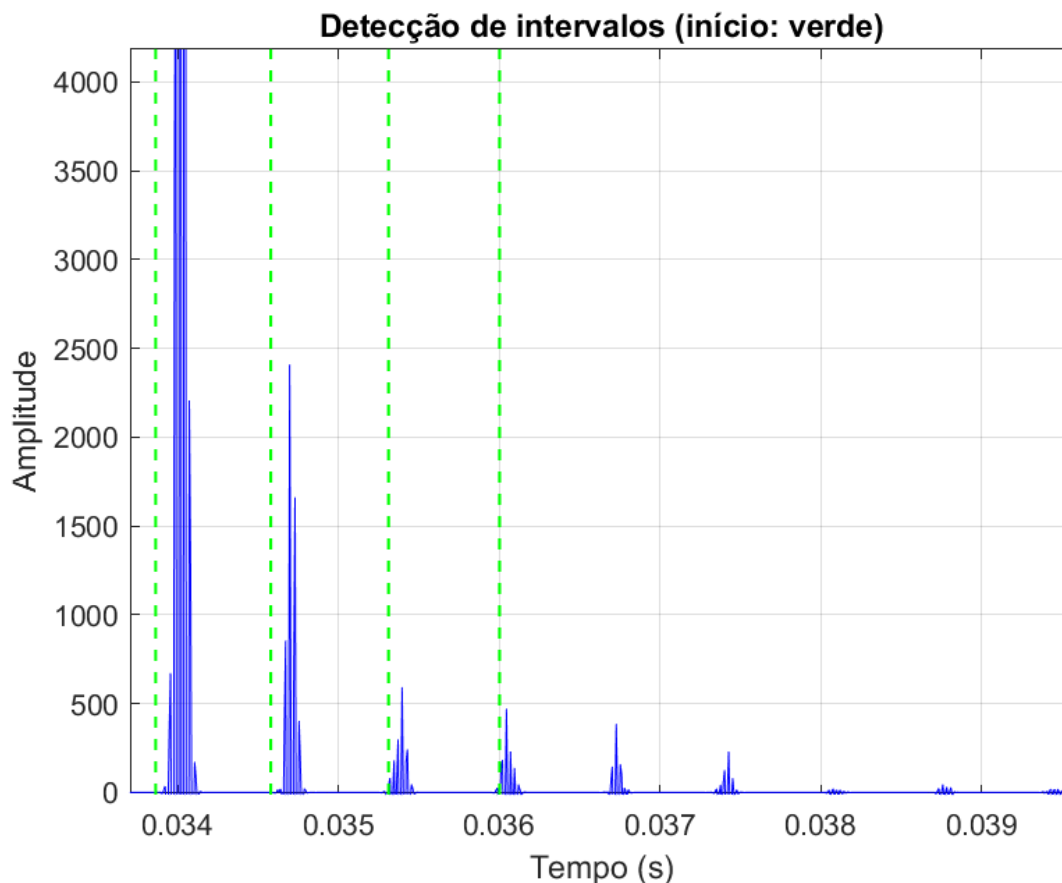


Figura 24: Coeficientes de Wavelet para uma Falta Fase-Terra Torre Autoportante em Delta

Fonte: autor

De acordo com os instantes de reflexão evidenciados na Figura, foram considerados três intervalos de interesse. A partir da média desses valores, obteve-se o tempo $t_d = 0,00068026$ s.

Para o caso da torre autoportante em delta, a velocidade de propagação do sinal na linha é de $2,92079 \times 10^5$ km/s. Substituindo esses valores na Equação 12, obtém-se uma distância estimada de falta de 200,65 km. Esse resultado corresponde a um erro de 0,22% em relação ao comprimento total da linha.

Os demais resultados das simulações e dos cálculos referentes à torre autoportante em delta são apresentados nas Tabelas 6 a 9.

Tabela 6: Resultados Falta Monofásica Torre Autoportante em Delta

Tipo de Falta	Distância Simulada (km)	Resistência de Falta (Ohm)	Distância Calculada (km)	Es (%)	Et (%)
Monofásica	50	0	47,75	4,51	0,75
Monofásica	50	50	47,75	4,51	0,75
Monofásica	50	100	48,05	3,90	0,65
Monofásica	50	200	47,44	5,12	0,85
Monofásica	50	400	46,83	6,33	1,06
Monofásica	75	0	74,00	1,33	0,33
Monofásica	75	50	74,51	0,65	0,16
Monofásica	75	100	73,60	1,87	0,47
Monofásica	75	200	73,60	1,87	0,47
Monofásica	75	400	74,20	1,06	0,27
Monofásica	100	0	98,23	1,77	0,59
Monofásica	100	50	99,02	0,98	0,33
Monofásica	100	100	99,14	0,86	0,29
Monofásica	100	200	99,14	0,86	0,29
Monofásica	100	400	99,14	0,86	0,29
Monofásica	125	0	124,83	0,14	0,06
Monofásica	125	50	124,83	0,14	0,06
Monofásica	125	100	124,83	0,14	0,06
Monofásica	125	200	124,83	0,14	0,06
Monofásica	125	400	124,83	0,14	0,06
Monofásica	150	0	148,41	1,06	0,53
Monofásica	150	50	148,41	1,06	0,53
Monofásica	150	100	148,41	1,06	0,53
Monofásica	150	200	148,71	0,86	0,43
Monofásica	150	400	148,11	1,26	0,63
Monofásica	175	0	171,05	2,25	1,32
Monofásica	175	50	171,05	2,25	1,32
Monofásica	175	100	171,05	2,25	1,32
Monofásica	175	200	172,27	1,56	0,91
Monofásica	175	400	172,27	1,56	0,91
Monofásica	200	0	199,95	0,03	0,02
Monofásica	200	50	199,64	0,18	0,12
Monofásica	200	100	200,65	0,33	0,22
Monofásica	200	200	201,06	0,53	0,35
Monofásica	200	400	199,64	0,18	0,12
Monofásica	225	0	225,59	0,26	0,20
Monofásica	225	50	225,59	0,26	0,20
Monofásica	225	100	225,49	0,22	0,16
Monofásica	225	200	225,97	0,43	0,32
Monofásica	225	400	223,97	0,46	0,34
Monofásica	250	0	250,43	0,17	0,14
Monofásica	250	50	250,43	0,17	0,14
Monofásica	250	100	250,43	0,17	0,14
Monofásica	250	200	250,43	0,17	0,14
Monofásica	250	400	249,21	0,32	0,26

Tabela 7: Resultados Falta Bifásico a Terra Torre Autoportante em Delta

Tipo de Falta	Distância Simulada (km)	Resistência de Falta (Ohm)	Distância Calculada (km)	Es (%)	Et (%)
BifasicoT	50	0	48,96	2,07	0,35
BifasicoT	50	50	48,96	2,07	0,35
BifasicoT	50	100	48,96	2,07	0,35
BifasicoT	50	200	48,96	2,07	0,35
BifasicoT	50	400	48,96	2,07	0,35
BifasicoT	75	0	74,33	0,90	0,22
BifasicoT	75	50	74,33	0,90	0,22
BifasicoT	75	100	74,33	0,90	0,22
BifasicoT	75	200	74,33	0,90	0,22
BifasicoT	75	400	74,33	0,90	0,22
BifasicoT	100	0	98,99	1,01	0,34
BifasicoT	100	50	98,99	1,01	0,34
BifasicoT	100	100	98,99	1,01	0,34
BifasicoT	100	200	99,14	0,86	0,29
BifasicoT	100	400	99,39	0,61	0,20
BifasicoT	125	0	124,08	0,74	0,31
BifasicoT	125	50	124,08	0,74	0,31
BifasicoT	125	100	124,08	0,74	0,31
BifasicoT	125	200	124,08	0,74	0,31
BifasicoT	125	400	124,08	0,74	0,31
BifasicoT	150	0	149,02	0,65	0,33
BifasicoT	150	50	149,22	0,52	0,26
BifasicoT	150	100	149,22	0,52	0,26
BifasicoT	150	200	149,22	0,52	0,26
BifasicoT	150	400	149,02	0,65	0,33
BifasicoT	175	0	173,55	0,83	0,48
BifasicoT	175	50	173,55	0,83	0,48
BifasicoT	175	100	173,55	0,83	0,48
BifasicoT	175	200	173,55	0,83	0,48
BifasicoT	175	400	173,55	0,83	0,48
BifasicoT	200	0	198,89	0,55	0,37
BifasicoT	200	50	198,89	0,55	0,37
BifasicoT	200	100	198,89	0,55	0,37
BifasicoT	200	200	198,89	0,55	0,37
BifasicoT	200	400	198,89	0,55	0,37
BifasicoT	225	0	223,22	0,79	0,59
BifasicoT	225	50	223,22	0,79	0,59
BifasicoT	225	100	223,22	0,79	0,59
BifasicoT	225	200	223,22	0,79	0,59
BifasicoT	225	400	223,22	0,79	0,59
BifasicoT	250	0	247,86	0,86	0,71
BifasicoT	250	50	247,86	0,86	0,71
BifasicoT	250	100	247,86	0,86	0,71
BifasicoT	250	200	247,86	0,86	0,71
BifasicoT	250	400	247,86	0,86	0,71

Tabela 8: Resultados Falta Trifásica Torre Autoportante em Delta

Tipo de Falta	Distância Simulada (km)	Resistência de Falta (Ohm)	Distância Calculada (km)	Es (%)	Et (%)
Trifásico	50	0	48,96	2,07	0,35
Trifásico	50	50	48,96	2,07	0,35
Trifásico	50	100	48,96	2,07	0,35
Trifásico	50	200	48,96	2,07	0,35
Trifásico	50	400	48,96	2,07	0,35
Trifásico	75	0	74,33	0,90	0,22
Trifásico	75	50	74,33	0,90	0,22
Trifásico	75	100	74,33	0,90	0,22
Trifásico	75	200	74,33	0,90	0,22
Trifásico	75	400	74,33	0,90	0,22
Trifásico	100	0	99,02	0,98	0,33
Trifásico	100	50	99,02	0,98	0,33
Trifásico	100	100	99,02	0,98	0,33
Trifásico	100	200	99,02	0,98	0,33
Trifásico	100	400	99,02	0,98	0,33
Trifásico	125	0	124,08	0,74	0,31
Trifásico	125	50	124,08	0,74	0,31
Trifásico	125	100	124,08	0,74	0,31
Trifásico	125	200	124,08	0,74	0,31
Trifásico	125	400	124,08	0,74	0,31
Trifásico	150	0	148,82	0,79	0,39
Trifásico	150	50	148,82	0,79	0,39
Trifásico	150	100	148,82	0,79	0,39
Trifásico	150	200	148,82	0,79	0,39
Trifásico	150	400	148,82	0,79	0,39
Trifásico	175	0	173,55	0,83	0,48
Trifásico	175	50	173,55	0,83	0,48
Trifásico	175	100	173,55	0,83	0,48
Trifásico	175	200	173,55	0,83	0,48
Trifásico	175	400	173,55	0,83	0,48
Trifásico	200	0	198,89	0,55	0,37
Trifásico	200	50	198,89	0,55	0,37
Trifásico	200	100	198,89	0,55	0,37
Trifásico	200	200	198,89	0,55	0,37
Trifásico	200	400	198,89	0,55	0,37
Trifásico	225	0	223,23	0,79	0,59
Trifásico	225	50	223,23	0,79	0,59
Trifásico	225	100	223,23	0,79	0,59
Trifásico	225	200	223,23	0,79	0,59
Trifásico	225	400	223,23	0,79	0,59
Trifásico	250	0	247,86	0,86	0,71
Trifásico	250	50	247,86	0,86	0,71
Trifásico	250	100	247,86	0,86	0,71
Trifásico	250	200	247,86	0,86	0,71
Trifásico	250	400	247,86	0,86	0,71

Para o caso da falta Bifásica, foi simulada uma falta a 75 km do ponto de medição. A Figura 25 apresenta o sinal de tensão da componente alfa após a aplicação das transformadas.

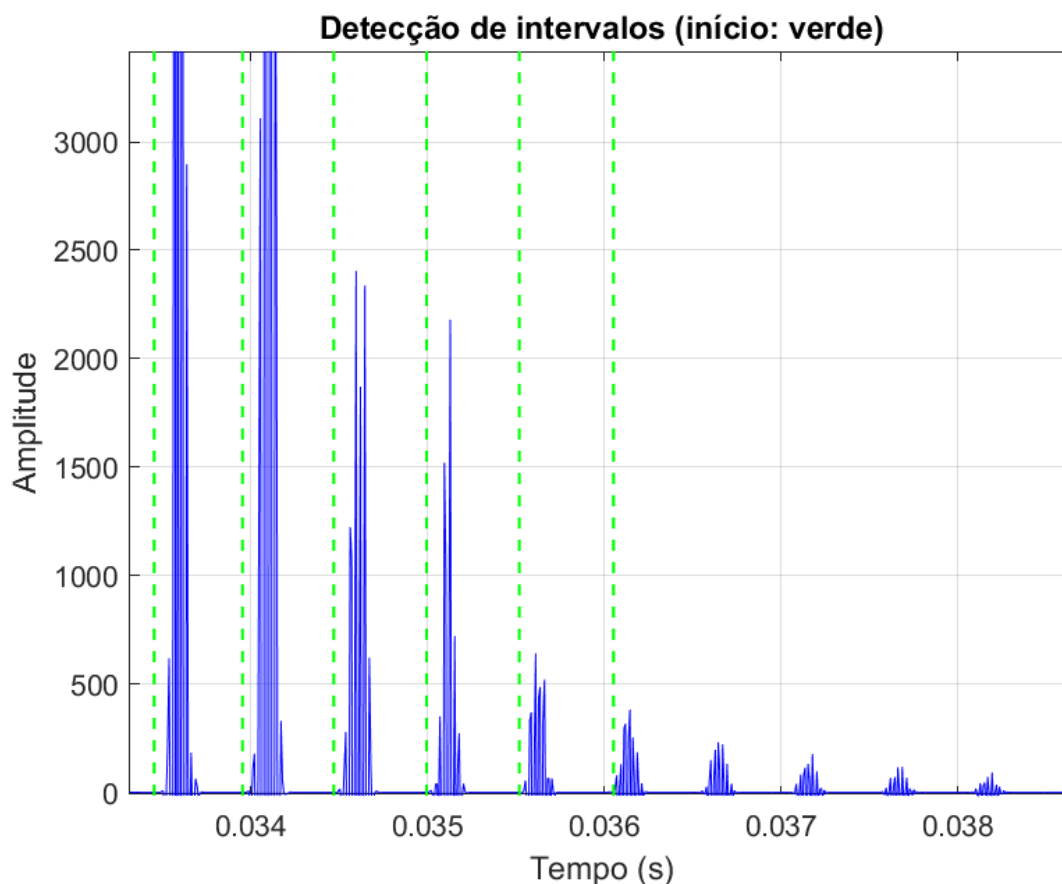


Figura 25: Coeficientes de Wavelet para uma Falta Bifásica Torre Autoportante em Delta

Fonte: autor

Para o caso, a média dos 5 intervalos resultou no tempo de $t_d = 0,00050894$ s, dos Substituindo esses valores na Equação 11, obtém-se uma distância estimada de falta de 74,32 km, correspondendo em um erro de 0,22% em relação ao comprimento total da linha.

Tabela 9: Resultados Falta Bifasica Torre Autoportante em Delta

Tipo de Falta	Distância Simulada (km)	Distância Calculada (km)	Es (%)	Et (%)
Bifasica	50	48,96	2,07	0,35
Bifasica	75	74,33	0,90	0,22
Bifasica	100	99,02	0,98	0,33
Bifasica	125	124,08	0,74	0,31
Bifasica	150	148,82	0,79	0,39
Bifasica	175	173,55	0,83	0,48
Bifasica	200	198,89	0,55	0,37
Bifasica	225	223,22	0,79	0,59
Bifasica	250	247,86	0,86	0,71

5.2. RESULTADOS TORRE MONOMASTRO ESTAIADA

Para à geometria da torre monomastro estaiada, foi considerada também uma falta fase-terra simulada a 200 km do ponto de medição, com resistência de aterramento de 100 Ω . Na Figura 26 é apresentado o sinal de tensão da componente alfa após a aplicação da Transformada de Clarke e da Transformada Wavelet.

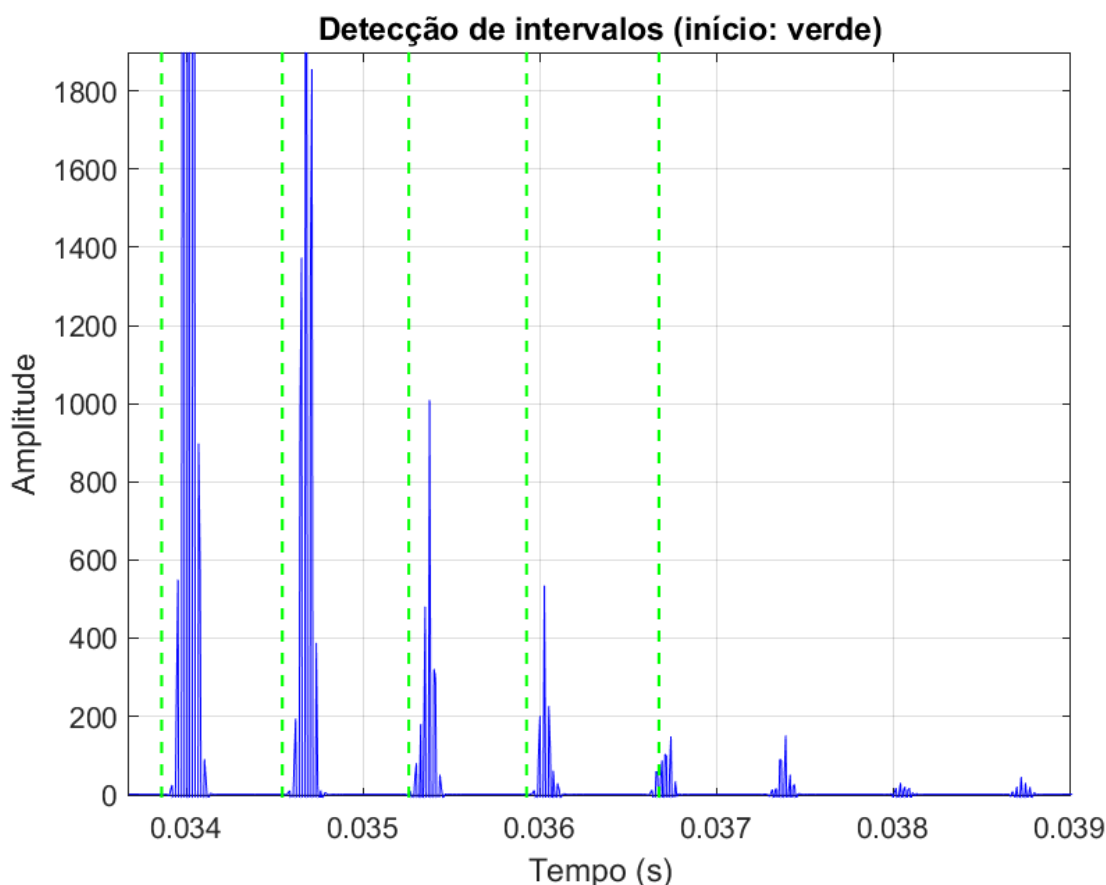


Figura 26: Coeficientes de Wavelet para uma Falta Fase-Terra Torre Monomastro Estaiada

Fonte: autor

A partir dos quatro intervalos de interesse destacados na Figura, obteve-se, por meio da média dos valores, $t_d = 0,00067575$ s.

Para o caso da torre monomastro estaiada, a velocidade de propagação do sinal na linha é de $2,93996 \times 10^5$ km/s. Substituindo esses valores na Equação 12, obtém-se uma distância estimada de falta de 200,67 km. Esse resultado corresponde a um erro de 0,22% em relação ao comprimento total da linha.

Os demais resultados das simulações e dos cálculos referentes à torre monomastro estaiada são apresentados nas Tabelas 10 a 13.

Tabela 10: Resultados Falta Monofásica Torre Monomastro Estaiada

Tipo de Falta	Distância Simulada (km)	Resistência de Falta (Ohm)	Distância Calculada (km)	Es (%)	Et (%)
Monofásica	50	0	48,98	2,04	0,34
Monofásica	50	50	48,37	3,27	0,54
Monofásica	50	100	47,14	5,72	0,95
Monofásica	50	200	47,14	5,72	0,95
Monofásica	50	400	46,53	6,94	1,16
Monofásica	75	0	74,69	0,41	0,10
Monofásica	75	50	74,39	0,82	0,20
Monofásica	75	100	73,96	1,39	0,35
Monofásica	75	200	71,63	4,49	1,12
Monofásica	75	400	70,41	6,13	1,53
Monofásica	100	0	98,26	1,74	0,58
Monofásica	100	50	98,87	1,13	0,38
Monofásica	100	100	98,87	1,13	0,38
Monofásica	100	200	99,18	0,82	0,27
Monofásica	100	400	99,18	0,82	0,27
Monofásica	125	0	122,45	2,04	0,85
Monofásica	125	50	123,67	1,06	0,44
Monofásica	125	100	123,67	1,06	0,44
Monofásica	125	200	124,89	0,08	0,04
Monofásica	125	400	126,12	0,90	0,37
Monofásica	150	0	147,55	1,64	0,82
Monofásica	150	50	146,32	2,45	1,23
Monofásica	150	100	148,47	1,02	0,51
Monofásica	150	200	148,47	1,02	0,51
Monofásica	150	400	148,57	0,96	0,48
Monofásica	175	0	175,11	0,06	0,04
Monofásica	175	50	176,33	0,76	0,44
Monofásica	175	100	176,33	0,76	0,44
Monofásica	175	200	176,33	0,76	0,44
Monofásica	175	400	176,33	0,76	0,44
Monofásica	200	0	200,21	0,10	0,07
Monofásica	200	50	200,23	0,11	0,08
Monofásica	200	100	200,67	0,33	0,22
Monofásica	200	200	201,13	0,56	0,38
Monofásica	200	400	200,82	0,41	0,27
Monofásica	225	0	225,51	0,23	0,17
Monofásica	225	50	225,51	0,23	0,17
Monofásica	225	100	225,77	0,34	0,26
Monofásica	225	200	225,77	0,34	0,26
Monofásica	225	400	226,53	0,68	0,51
Monofásica	250	0	251,33	0,53	0,44
Monofásica	250	50	251,33	0,53	0,44
Monofásica	250	100	251,02	0,41	0,34
Monofásica	250	200	251,02	0,41	0,34
Monofásica	250	400	251,02	0,41	0,34

Tabela 11: Resultados Falta Bifásico a Terra Torre Monomastro Estaiada

Tipo de Falta	Distância Simulada (km)	Resistência de Falta (Ohm)	Distância Calculada (km)	Es (%)	Et (%)
BifasicoT	50	0	49,24	1,52	0,25
BifasicoT	50	50	49,24	1,52	0,25
BifasicoT	50	100	49,24	1,52	0,25
BifasicoT	50	200	49,24	1,52	0,25
BifasicoT	50	400	49,24	1,52	0,25
BifasicoT	75	0	73,77	1,64	0,41
BifasicoT	75	50	73,77	1,64	0,41
BifasicoT	75	100	73,77	1,64	0,41
BifasicoT	75	200	73,77	1,64	0,41
BifasicoT	75	400	73,77	1,64	0,41
BifasicoT	100	0	98,81	1,19	0,40
BifasicoT	100	50	98,81	1,19	0,40
BifasicoT	100	100	98,81	1,19	0,40
BifasicoT	100	200	98,81	1,19	0,40
BifasicoT	100	400	98,81	1,19	0,40
BifasicoT	125	0	123,11	1,51	0,63
BifasicoT	125	50	123,92	0,87	0,36
BifasicoT	125	100	123,92	0,87	0,36
BifasicoT	125	200	123,92	0,87	0,36
BifasicoT	125	400	123,92	0,87	0,36
BifasicoT	150	0	148,77	0,82	0,41
BifasicoT	150	50	148,77	0,82	0,41
BifasicoT	150	100	148,77	0,82	0,41
BifasicoT	150	200	148,77	0,82	0,41
BifasicoT	150	400	148,65	0,90	0,45
BifasicoT	175	0	173,57	0,82	0,48
BifasicoT	175	50	173,57	0,82	0,48
BifasicoT	175	100	173,41	0,91	0,53
BifasicoT	175	200	173,41	0,91	0,53
BifasicoT	175	400	173,41	0,91	0,53
BifasicoT	200	0	198,36	0,82	0,55
BifasicoT	200	50	198,36	0,82	0,55
BifasicoT	200	100	198,36	0,82	0,55
BifasicoT	200	200	198,36	0,82	0,55
BifasicoT	200	400	198,36	0,82	0,55
BifasicoT	225	0	223,06	0,86	0,65
BifasicoT	225	50	223,06	0,86	0,65
BifasicoT	225	100	223,06	0,86	0,65
BifasicoT	225	200	223,26	0,77	0,58
BifasicoT	225	400	223,26	0,77	0,58
BifasicoT	250	0	247,95	0,82	0,68
BifasicoT	250	50	247,95	0,82	0,68
BifasicoT	250	100	247,95	0,82	0,68
BifasicoT	250	200	247,95	0,82	0,68
BifasicoT	250	400	248,16	0,74	0,61

Tabela 12: Resultados Falta Trifásica Torre Monomastro Estaiada

Tipo de Falta	Distância Simulada (km)	Resistência de Falta (Ohm)	Distância Calculada (km)	Es (%)	Et (%)
Trifásico	50	0	49,24	1,52	0,25
Trifásico	50	50	49,24	1,52	0,25
Trifásico	50	100	49,24	1,52	0,25
Trifásico	50	200	49,24	1,52	0,25
Trifásico	50	400	49,24	1,52	0,25
Trifásico	75	0	73,77	1,64	0,41
Trifásico	75	50	73,77	1,64	0,41
Trifásico	75	100	73,77	1,64	0,41
Trifásico	75	200	73,77	1,64	0,41
Trifásico	75	400	73,77	1,64	0,41
Trifásico	100	0	98,81	1,19	0,40
Trifásico	100	50	98,81	1,19	0,40
Trifásico	100	100	98,81	1,19	0,40
Trifásico	100	200	98,81	1,19	0,40
Trifásico	100	400	98,81	1,19	0,40
Trifásico	125	0	123,92	0,87	0,36
Trifásico	125	50	123,92	0,87	0,36
Trifásico	125	100	123,92	0,87	0,36
Trifásico	125	200	123,92	0,87	0,36
Trifásico	125	400	123,92	0,87	0,36
Trifásico	150	0	148,65	0,90	0,45
Trifásico	150	50	148,65	0,90	0,45
Trifásico	150	100	148,65	0,90	0,45
Trifásico	150	200	148,65	0,90	0,45
Trifásico	150	400	148,65	0,90	0,45
Trifásico	175	0	173,41	0,91	0,53
Trifásico	175	50	173,41	0,91	0,53
Trifásico	175	100	173,41	0,91	0,53
Trifásico	175	200	173,41	0,91	0,53
Trifásico	175	400	173,41	0,91	0,53
Trifásico	200	0	198,36	0,82	0,55
Trifásico	200	50	198,36	0,82	0,55
Trifásico	200	100	198,36	0,82	0,55
Trifásico	200	200	198,36	0,82	0,55
Trifásico	200	400	198,36	0,82	0,55
Trifásico	225	0	223,26	0,77	0,58
Trifásico	225	50	223,26	0,77	0,58
Trifásico	225	100	223,26	0,77	0,58
Trifásico	225	200	223,26	0,77	0,58
Trifásico	225	400	223,26	0,77	0,58
Trifásico	250	0	248,16	0,74	0,61
Trifásico	250	50	248,16	0,74	0,61
Trifásico	250	100	248,16	0,74	0,61
Trifásico	250	200	248,16	0,74	0,61
Trifásico	250	400	248,16	0,74	0,61

Para o caso da falta Bifásica, foi simulada uma falta a 75 km do ponto de medição. A Figura 27 apresenta o sinal de tensão da componente alfa após a aplicação das transformadas.

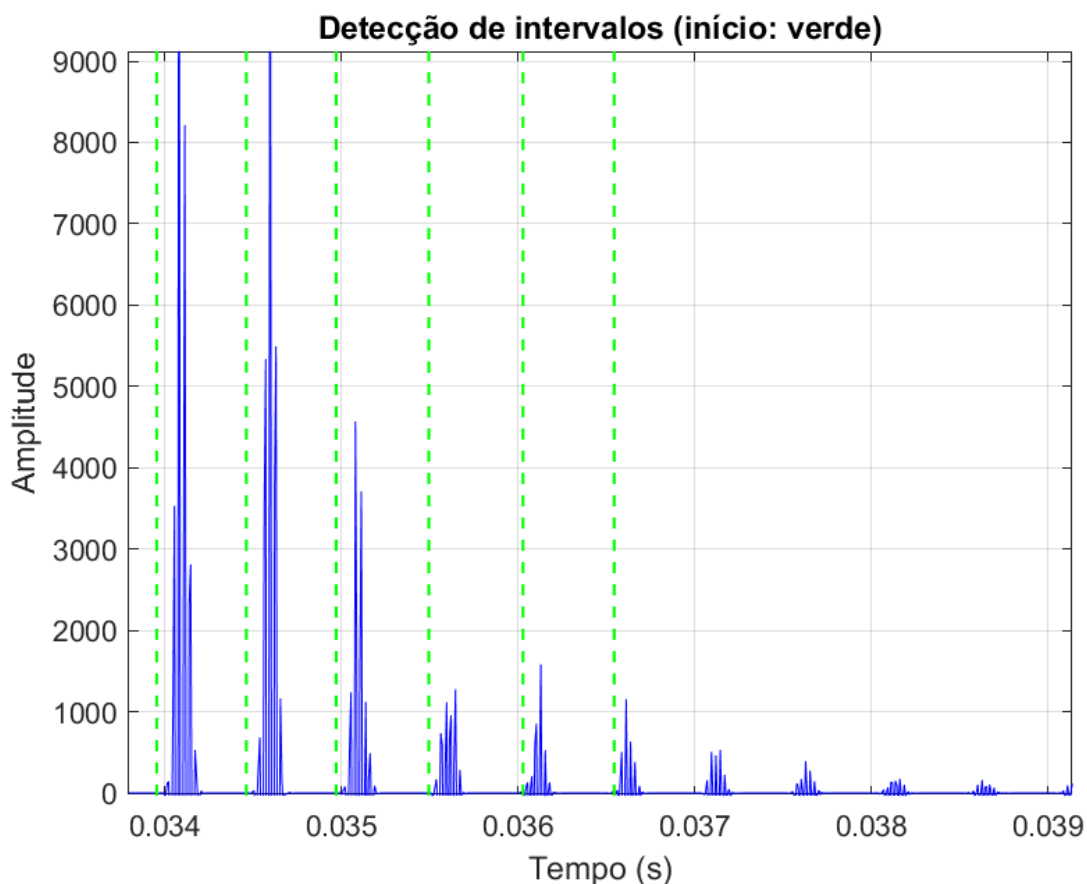


Figura 27: Coeficientes de Wavelet para uma Falta Bifásica Torre Estaiada Monomastro

Fonte: autor

Para o caso, a média dos 5 intervalos resultou no tempo de $t_d = 0,00050186$ s, dos Substituindo esses valores na Equação 11, obtém-se uma distância estimada de falta de 73,77 km, correspondendo em um erro de 0,41% em relação ao comprimento total da linha.

Tabela 13: Resultados Falta Bifasica Torre Monomastro Estaiada

Tipo de Falta	Distância Simulada (km)	Distância Calculada (km)	Es (%)	Et (%)
Bifasica	50	49,24	1,52	0,25
Bifasica	75	73,77	1,64	0,41
Bifasica	100	98,88	1,12	0,37
Bifasica	125	123,91	0,87	0,36
Bifasica	150	148,64	0,90	0,45
Bifasica	175	173,41	0,91	0,53
Bifasica	200	198,36	0,82	0,55
Bifasica	225	223,25	0,77	0,58
Bifasica	250	248,15	0,74	0,61

5.3. INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE FALTA

Com o objetivo de analisar a influência da resistência de falta no desempenho do algoritmo de localização, as figuras 28 a 30 apresentam a variação do erro total em função da distância ao longo da linha de transmissão, considerando separadamente cada valor de resistência de falta adotado nas simulações.

Dessa forma, é possível observar o comportamento do erro para diferentes condições de impedância de falta, permitindo avaliar a sensibilidade do método frente a variações desse parâmetro. A análise conjunta desses resultados possibilita identificar padrões de variação do erro ao longo da linha, bem como verificar se o aumento da resistência de falta impacta significativamente na estimativa da distância da falta.

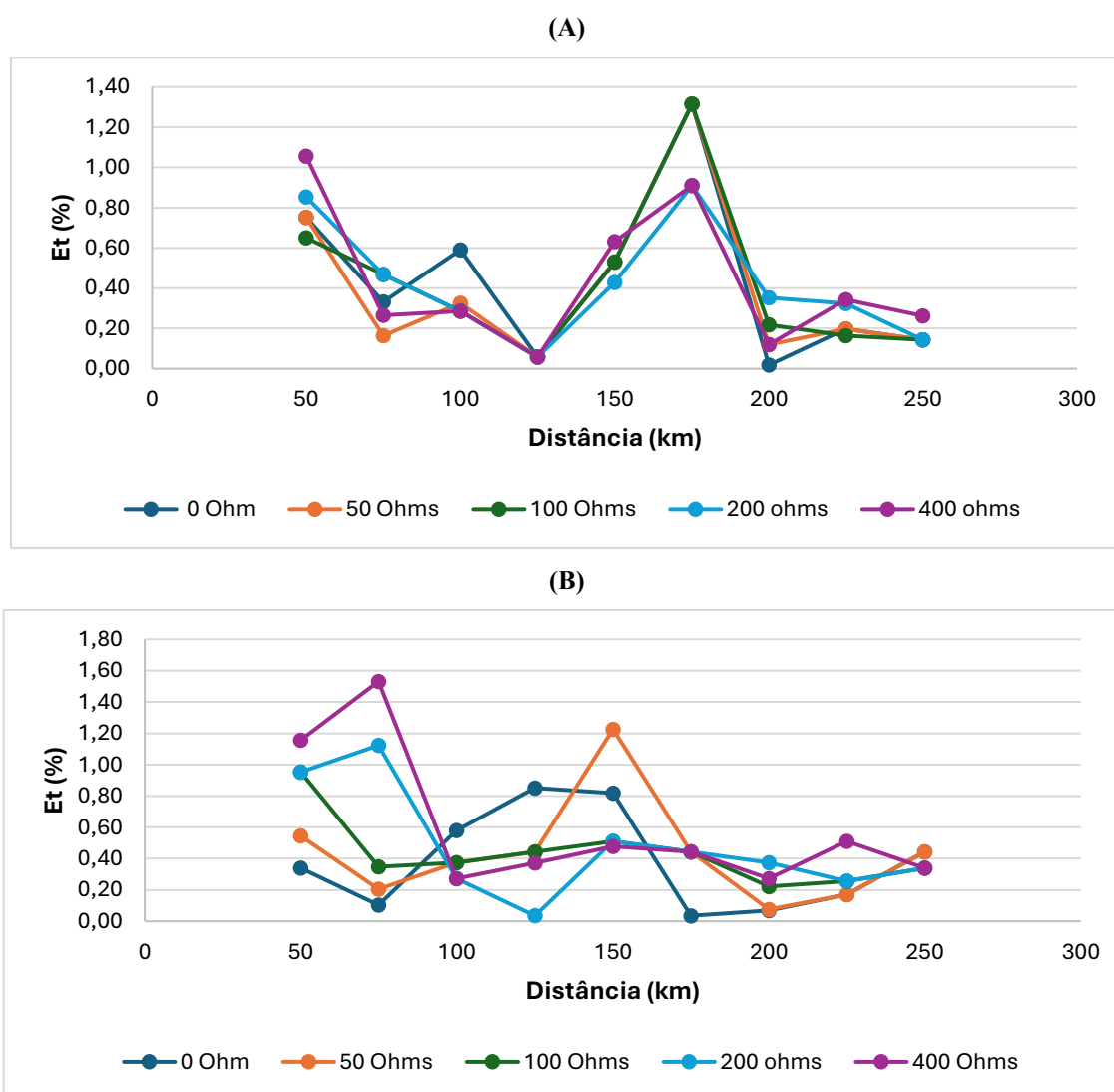


Figura 28: (A) Falta Monofásica Torre Autoportante em Delta, (B) Falta Monofásica Torre Estaiada Monomastro.

Fonte: Autor.

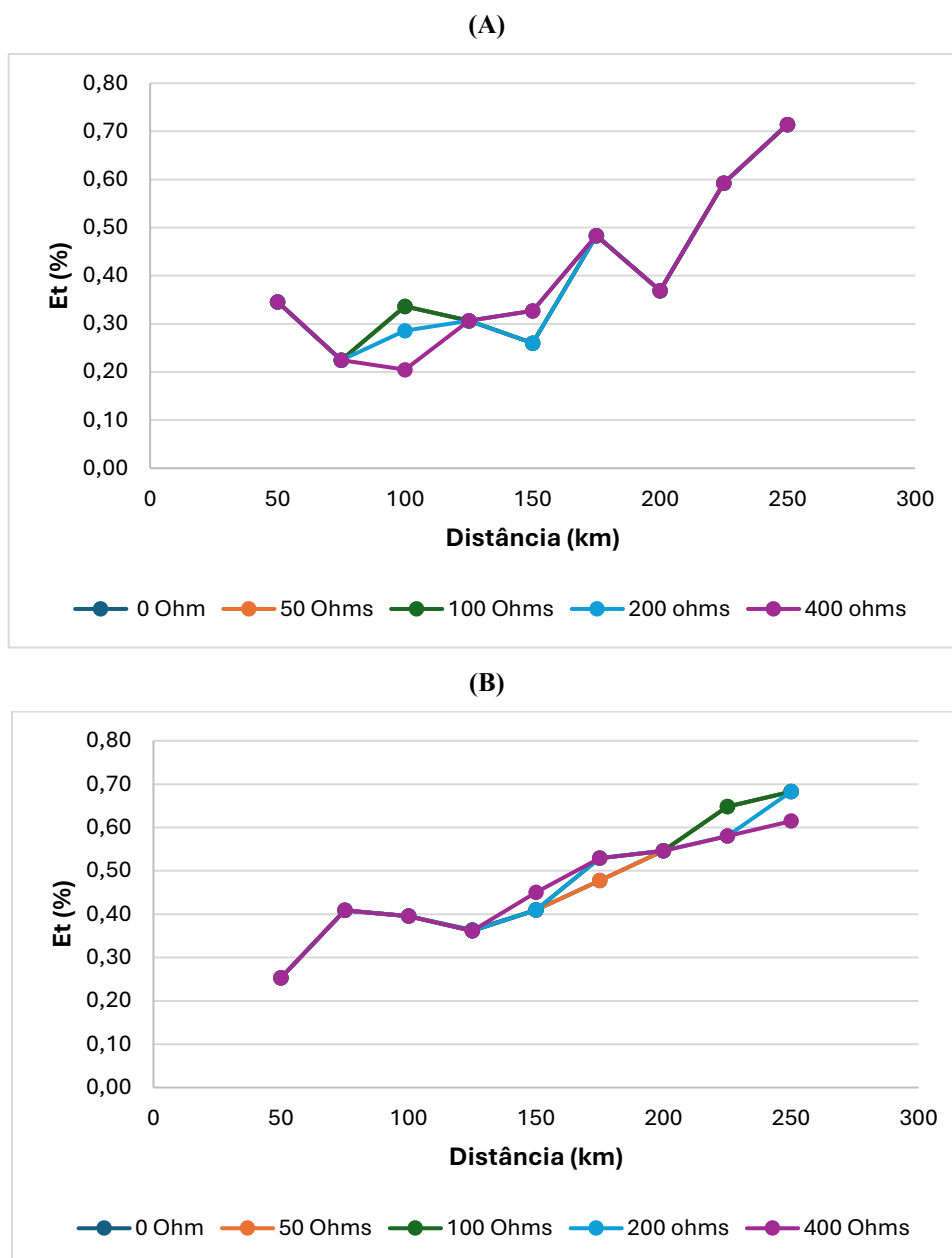


Figura 29: (A) Falta Bifásico a Terra Torre Autoportante em Delta, (B) Falta Bifásico a Terra Torre Estaiada Monomastro.

Fonte: Autor.

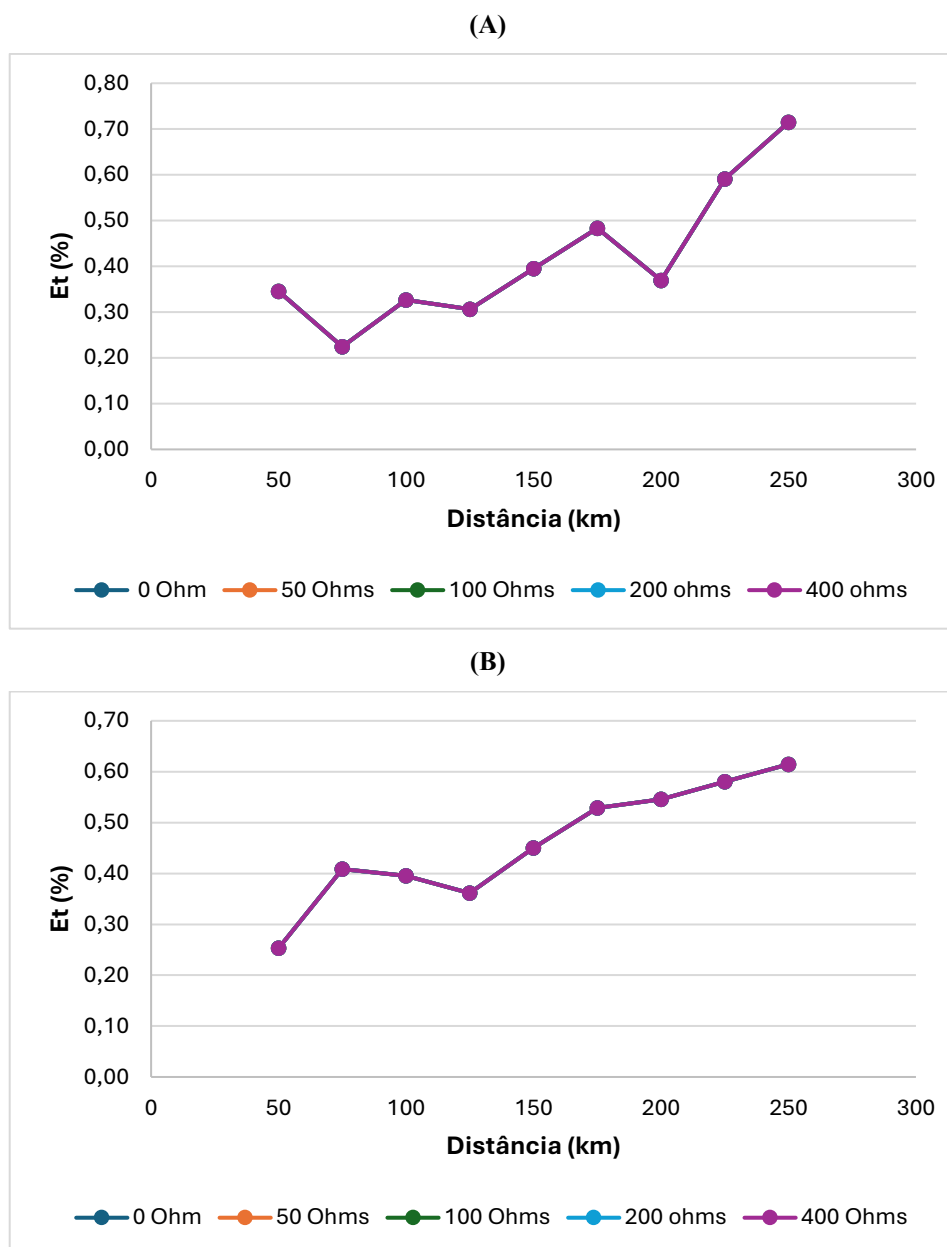


Figura 30: (A) Falta Trifásica Torre Autoportante em Delta, (B) Falta Trifásica Torre Estaiada Monomastro.

Fonte: Autor

De forma geral, observa-se que o erro total E_t permaneceu, na maior parte dos casos, inferior a 1%, indicando uma boa precisão do método de localização de faltas. Além disso, verifica-se uma tendência de aumento do erro com o avanço da distância ao longo da linha, comportamento já esperado devido à maior influência das reflexões e atenuações das ondas viajantes em regiões mais distantes do ponto de medição.

Em relação à resistência de falta, nota-se que sua influência sobre o erro foi, em geral, pouco significativa, uma vez que as curvas associadas aos diferentes valores de resistência

apresentaram comportamento semelhante ao longo da linha. Isso indica que o método utilizado apresenta boa robustez frente à variação da impedância de falta, mantendo níveis de erro relativamente próximos para diferentes condições.

No entanto, uma exceção importante é observada no caso das faltas monofásicas, nas quais o erro apresentou maior sensibilidade à variação da resistência de falta. Nesse cenário, foram observadas variações mais acentuadas entre as curvas, especialmente para valores mais elevados de resistência, como 400 Ω , bem como a ocorrência de erros superiores a 1% em regiões específicas da linha, particularmente próximas ao início e à região central do sistema.

Esse comportamento ocorre porque faltas monofásicas tendem a gerar transitórios de menor intensidade, principalmente em condições de alta impedância, dificultando a identificação exata dos instantes de chegada das ondas viajantes. Além disso, reflexões das ondas ao longo da linha podem provocar pequenas variações nos picos detectados pela Transformada Wavelet, resultando nos picos observados na Figura 20.

Outro fator importante está relacionado ao processo de amostragem do sinal, uma vez que pequenas variações na identificação dos picos da wavelet podem causar diferenças no cálculo da distância da falta. Esse efeito se torna mais perceptível em regiões da linha onde há maior influência das reflexões das ondas viajantes.

Para os demais tipos de falta, como bifásica, bifásica-terra e trifásica, observou-se um comportamento mais estável, com baixa dispersão dos valores de erro para diferentes resistências de falta. Isso ocorre devido à maior energia envolvida nesses tipos de curto-circuito, resultando em transitórios de mais fácil detecção pelo algoritmo.

Por fim, ao comparar as duas configurações de torre analisadas, nota-se que a influência da resistência de falta se mantém relativamente consistente em ambos os casos. Entretanto, na torre estaiada monomastro, observa-se uma leve tendência de maior crescimento do erro com o aumento da distância, especialmente para resistências mais elevadas, indicando maior sensibilidade da configuração geométrica às condições de alta impedância.

5.4. INFLUÊNCIA DO TIPO DE FALTA

Em relação ao tipo de falta, a figura 31 apresenta a variação do erro em função da distância ao longo da linha, para cada tipo de falta analisada. Para a obtenção dessas curvas, foi realizada a média dos valores de erro correspondentes aos diferentes níveis de resistência de falta considerados nas simulações, permitindo uma análise mais representativa do comportamento do método, independentemente da influência pontual da impedância de falta. Ressalta-se que as curvas referentes às faltas trifásica e bifásica apresentam o mesmo comportamento e, consequentemente, se sobrepõem no gráfico.

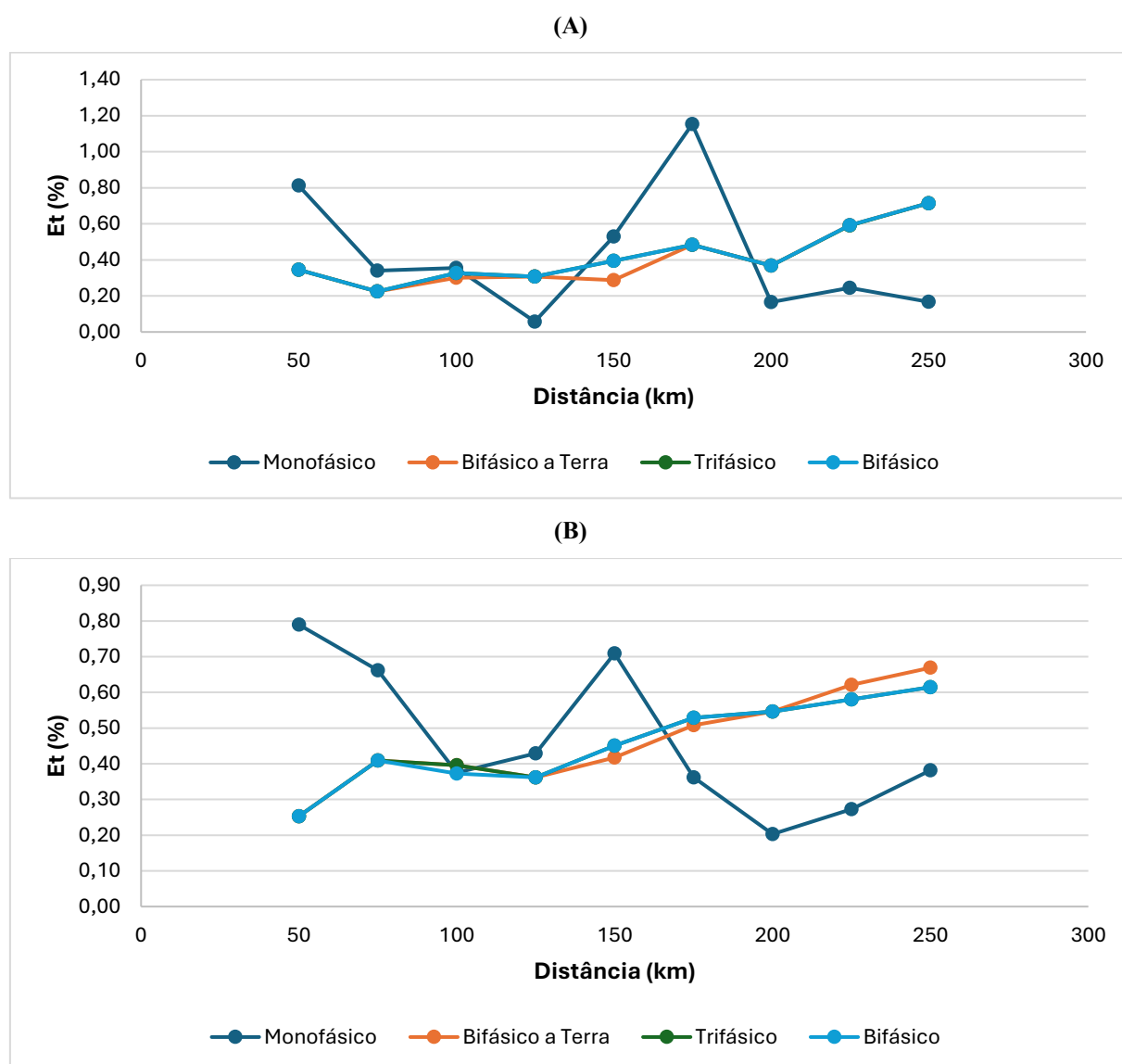


Figura 31: (A) Influencia Tipo de Falta Torre Autoportante em Delta, (B) Influencia Tipo de Falta Torre Estaiada Monomastro.

Fonte: Autor.

Os resultados indicam que o tipo de falta exerce influência significativa na precisão do método de localização, sendo as faltas trifásicas as que apresentam melhor desempenho devido à sua natureza simétrica. Por outro lado, faltas monofásicas e bifásicas tendem a apresentar maior variabilidade nos erros, especialmente em determinadas regiões da linha.

Na Figura 31 (A) e (B), destaca-se ainda a ocorrência de um pico na curva correspondente à falta monofásica próximo da região central da linha. Esse comportamento pode estar relacionado à maior sensibilidade desse tipo de falta às reflexões e atenuações das ondas viajantes ao longo da linha. Como faltas monofásicas produzem transitórios de menor intensidade, pequenas variações na identificação dos picos da Transformada Wavelet podem provocar diferenças mais significativas no cálculo da distância, principalmente em regiões mais afastadas do ponto de medição.

Além disso, observa-se que a geometria da torre também impacta o desempenho do algoritmo, uma vez que diferentes configurações físicas dos condutores alteram os parâmetros da linha e, conseqüentemente, a propagação das ondas viajantes. Nesse contexto, a configuração da torre autoportante em delta apresentou resultados mais estáveis, enquanto a torre estaiada monomastro demonstrou maior sensibilidade ao tipo de falta e à distância da ocorrência.

5.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS ESTRUTURAS

A partir da análise dos resultados obtidos para as duas configurações de linha de transmissão foi possível avaliar de forma comparativa o impacto da geometria da torre no desempenho do algoritmo de localização de faltas baseado em ondas viajantes.

De maneira geral, ambas as configurações apresentaram bons níveis de precisão, com erros predominantemente inferiores a 1% na maior parte dos cenários analisados. No entanto, diferenças importantes foram observadas em relação à estabilidade dos resultados, à sensibilidade aos parâmetros de falta e ao comportamento do erro ao longo da linha.

A configuração com torre autoportante em delta apresentou, de forma geral, resultados mais estáveis, com menor dispersão dos valores de erro para diferentes tipos de falta e valores de resistência. Além disso, o crescimento do erro ao longo da linha ocorreu de forma mais moderada, indicando menor sensibilidade às variações de posição da falta. Esse comportamento sugere que a geometria mais simétrica dessa configuração contribui para uma propagação mais

uniforme das ondas viajantes, favorecendo a detecção dos instantes de reflexão utilizados no cálculo da distância.

Por outro lado, a configuração com torre estaiada monomastro apresentou maior variabilidade nos resultados, especialmente para faltas bifásicas e em condições de maior distância em relação ao ponto de medição. Observou-se também uma tendência mais acentuada de crescimento do erro ao longo da linha, bem como maior sensibilidade à variação da resistência de falta em alguns cenários. Esse comportamento pode ser atribuído à geometria menos simétrica da estrutura, que influencia os parâmetros elétricos da linha e o acoplamento entre fases, resultando em maior distorção e atenuação dos transitórios propagados.

Em relação ao tipo de falta, verificou-se que, em ambas as configurações, as faltas trifásicas apresentaram os melhores resultados, com menor variabilidade e maior estabilidade do erro. Em contrapartida, as faltas monofásicas demonstraram maior sensibilidade às condições de simulação, especialmente em combinação com valores elevados de resistência de falta, sendo esse efeito mais evidente na torre estaiada.

Dessa forma, os resultados indicam que, embora o algoritmo apresente bom desempenho em ambas as configurações analisadas, a geometria da torre exerce influência significativa na precisão e na robustez do método, sendo a configuração autoportante em delta a que apresentou desempenho global mais consistente.

Esses resultados reforçam a importância da consideração dos parâmetros geométricos da linha de transmissão no desenvolvimento e na aplicação de métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes, especialmente em estudos que envolvem diferentes arranjos físicos de condutores.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de um algoritmo de localização de faltas em linhas de transmissão baseado em ondas viajantes, utilizando a Transformada de Clarke e a Transformada Wavelet como ferramentas de processamento de sinais. Para isso, foram realizadas simulações no ambiente ATPDraw, considerando diferentes tipos de falta, posições ao longo da linha, valores de resistência de falta e duas configurações distintas de torre: autoportante em delta e estaiada monomastro.

Os resultados obtidos demonstraram que o método apresenta boa precisão na estimativa da distância da falta, com erros, na maioria dos casos, inferiores a 1%. Isso evidencia a eficiência da abordagem baseada em ondas viajantes, especialmente quando associada a técnicas de processamento capazes de destacar os transitórios de alta frequência.

A análise dos resultados permitiu verificar que o tipo de falta exerce influência no desempenho do algoritmo. De modo geral, as faltas trifásicas apresentaram os melhores resultados, com menor variabilidade do erro, enquanto as faltas monofásicas mostraram maior sensibilidade, principalmente em condições de alta resistência de falta. Esse comportamento está associado à menor intensidade dos transitórios gerados em faltas de alta impedância, o que dificulta a identificação precisa dos instantes de chegada das ondas viajantes.

Em relação à resistência de falta, observou-se que sua influência no erro foi, em geral, limitada, indicando que o método apresenta boa robustez frente a variações de impedância. No entanto, em alguns casos específicos, especialmente para faltas monofásicas, verificou-se aumento do erro para valores mais elevados de resistência.

A distância da falta ao longo da linha também se mostrou um fator relevante, sendo observado, de forma geral, um aumento do erro em regiões mais distantes do ponto de medição. Esse comportamento pode ser explicado pelos efeitos de atenuação e múltiplas reflexões das ondas viajantes, que dificultam a identificação precisa dos instantes de interesse.

A comparação entre as duas configurações de torre evidenciou que a geometria da linha de transmissão influencia diretamente o desempenho do algoritmo. A torre autoportante em delta apresentou resultados mais estáveis e menor sensibilidade às variações dos parâmetros analisados, enquanto a torre estaiada monomastro apresentou maior dispersão dos erros para cada caso, especialmente em maiores distâncias e em determinados tipos de falta.

Dessa forma, conclui-se que o método proposto é eficaz para a localização de faltas em linhas de transmissão, apresentando bons níveis de precisão e robustez. No entanto, seus resultados podem ser influenciados por fatores como o tipo de falta, a posição ao longo da linha e a configuração geométrica dos condutores, devendo esses aspectos ser considerados em aplicações práticas.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- **Avaliação de outras técnicas de processamento de sinais:** investigar o uso de diferentes famílias de wavelets, transformadas tempo-frequência e métodos complementares para melhorar a identificação dos instantes de chegada das ondas viajantes.
- **Aplicação em sistemas com ruídos e dados reais:** analisar o desempenho do algoritmo em sinais obtidos de sistemas reais ou em simulações com inclusão de ruídos, distorções e interferências, aproximando o estudo das condições práticas de operação.
- **Análise de diferentes configurações de linhas de transmissão:** avaliar o método em linhas não transpostas, linhas com diferentes geometrias de torre e sistemas com maior complexidade estrutural.
- **Estudo de sistemas com múltiplos terminais:** ampliar a aplicação do algoritmo para redes multiterminais, verificando sua robustez diante de diferentes caminhos de propagação e múltiplas reflexões das ondas viajantes.
- **Comparação com outros métodos de localização de faltas:** comparar os resultados obtidos com técnicas baseadas em impedância, métodos de dois terminais e algoritmos híbridos, a fim de avaliar vantagens e limitações da metodologia proposta.

6.2. PRODUÇÃO CIENTÍFICA DECORRENTE DO TRABALHO

Como resultado parcial dos estudos realizados neste Trabalho de Conclusão de Curso, obteve-se a seguinte produção científica:

- BASTOS, Guilherme Súcia; OLIVEIRA, Marcelo. Análise da Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando Ondas Viajantes e Transformada de Wavelet: Impacto da Variação de Parâmetros. In: Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica – CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 09 a 13 dez. 2024. [36]

REFERÊNCIAS

- [1] ANIEROBI, Patrick Ogechukwu; OTUU, Obinna Ogbonnia. Review of impedance-based fault location algorithm in electric power transmission line using computerized fault recorders. *International Journal Applied Science Research (INJASR)*, jun. 2021.
- [2] MORAES, Caio M. et al. Influences of electromagnetic interferences on two-terminal impedance-based fault location methods. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE)*, 2022. Anais [...]. 2022.
- [3] MISHRA, Saswati; GUPTA, Shubhrata; YADAV, Anamika; ABDELAZIZ, Almoataz Y. Traveling wave-based fault localization in FACTS-compensated transmission line via signal decomposition techniques. *Energies*, Basel, v. 16, n. 4, art. 1871, 2023.
- [4] NUNES, Erick Araujo; ANGÉLICO, Bruno Augusto; GOEDTEL, Alessandro. Diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos com aplicação de sistemas de informação e redes neurais artificiais em sinais submetidos à Transformação de Clarke. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA)*, 2022. Anais [...]. 2022.
- [5] SANTOS, Natália Ferreira Teles et al. *Simulation tutorial in ATPDraw software IEEE 4 nodes test feeder*. Palmas: IEEE Power & Energy Society Student Branch, Universidade Federal do Tocantins, 2021.
- [6] BENNER, Carl L.; RUSSELL, B. Don. Practical high-impedance fault detection on distribution feeders. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 3, p. 635-640, 1997.
- [7] PANAHI, Habib; ZAMANI, Reza; SANAYE-PASAND, Majid; MEHRJERDI, Hasan. Advances in transmission network fault location in modern power systems: review, outlook and future works. *IEEE Access*, 2021.
- [8] DENG, Feng et al. A single-ended fault location method for transmission line based on full waveform features extractions of traveling waves. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 38, n. 4, p. 2585-2598, ago. 2023.
- [9] MISHRA, Saswati; GUPTA, Shubhrata; YADAV, Anamika. Traveling-wave based fault location estimation in FACTS compensated transmission system: recent status, challenges and future research directions. *MethodsX*, v. 11, art. 102365, 2023.
- [10] ZHANG, Ming et al. A double-terminal traveling-wave-based method using novel noncontact sensors for fault location in transmission cable lines. *IEEE Access*, 2021.
- [11] GONZALEZ-SANCHEZ, V.; TORRES-GARCÍA, V.; GUILLEN, D. Fault location on transmission lines based on travelling waves using correlation and MODWT. 2022.

- [12] SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *SEL-T400L Time-Domain Line Protection*. Pullman: Schweitzer Engineering Laboratories, 2024. Folheto técnico.
- [13] SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *SEL-TWFL Dual Traveling-Wave Fault Locator and 12-Channel MHz Recorder*. Pullman: Schweitzer Engineering Laboratories, 2024. Folheto técnico.
- [14] GE VERNOVA. *Reason RPV311: Digital Fault Recorder with Fault Location and PMU*. Florianópolis: GE Vernova Grid Solutions, 2024. Folheto técnico.
- [15] MAO, Wang-Qing et al. Literature review of fault location research for HVDC transmission lines. In: *INTERNATIONAL POWER, ELECTRONICS AND MATERIALS ENGINEERING CONFERENCE*, 2015. p. 357-360.
- [16] BJÖRKLUND, Hans; HALLMANS, Daniel; GAHANE, Bhagwat; BUELL, Veeman. Control and protection for HVDC: an introduction to MACH. *Hitachi Review*, v. 72, n. 4, 2023.
- [17] ELGAMASY, Mahmoud M.; IZZULARAB, Mohamed A.; ZHANG, Xiao-Ping. Single-end based fault location method for VSC-HVDC transmission systems. *IEEE Access*, v. 10, p. 43129-43142, 2022.
- [18] MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- [19] RADOJEVIĆ, Zoran M.; TERZIJA, Vladimir V. New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TRANSIENTS (IPST)*, 2009.
- [20] IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. *Transient analysis of power systems: solution techniques, tools and applications*. Piscataway: IEEE, 2011.
- [21] HOU, Daqing. *High-impedance fault detection: field tests and dependability analysis*. Pullman: Schweitzer Engineering Laboratories, 2009.
- [22] HEDMAN, D. E. *Teoria das linhas de transmissão II*. Tradução de Felix A. Farret. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1978. v. 3.
- [23] IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. *Transient analysis of power systems: solution techniques, tools and applications*. Piscataway: IEEE, 2011.
- [24] ZHANG, Fan et al. Novel fault location method for power systems based on attention mechanism and double structure GRU neural network. *IEEE Access*, v. 8, 2020.
- [25] DE ANDRADE, L.; SENGER, E. C. Travelling wave based fault location analysis for transmission lines. *EPJ Web of Conferences*, v. 33, 2012.

- [26] SILVA, Murilo da. *Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada wavelet*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [27] CLARKE, Edith. *Circuit analysis of A-C power systems: symmetrical and related components*. New York: John Wiley & Sons, 1943. v. 1.
- [28] MATHWORKS. *Clarke Transform*. Natick, 2026. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/mcb/ref/clarketransform.htm>. Acesso em: 23 jun. 2026.
- [29] BEWLEY, L. V. Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, n. 2, p. 532-550, jun. 1931.
- [30] MATHWORKS. *Continuous Wavelet Transform and Scale-Based Analysis*. Natick, 2026. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/continuous-wavelet-transform-and-scale-based-analysis.html>. Acesso em: 23 jun. 2026.
- [31] MALLAT, Stephane G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 11, n. 7, p. 674-693, jul. 1989.
- [32] MATHWORKS. *About Wavelet Packet Analysis*. Natick, 2026. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ug/about-wavelet-packet-analysis.html>. Acesso em: 23 jun. 2026.
- [33] MATHWORKS. *Critically-Sampled Discrete Wavelet Transform*. Natick, 2026. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/discrete-wavelet-transform.html>. Acesso em: 23 jun. 2026.
- [34] ABUR, A.; MAGNAGO, F. H. Use of time delays between modal components in wavelet based fault location. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 22, n. 6, p. 397-403, 2000.
- [35] MACHADO, Vanderlei Guimarães et al. LT 500 kV Interligação Norte/Sul III – Trecho 2: solução estrutural com torre estaiada monomastro e feixe expandido. In: *SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SNPTEE)*, 2007, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: SNPTEE, 2007.
- [36] BASTOS, Guilherme Súcia; OLIVEIRA, Marcelo Escobar. Análise da localização de faltas em linhas de transmissão utilizando ondas viajantes e transformada de wavelet: impacto da variação de parâmetros. In: *CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA (CEEL)*, 2024, Uberlândia. Anais [...]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2024.