



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

VANESSA CRISTINA PEREIRA MIRANDA

**ANÁLISE DE MODELOS PARA A LOCALIZAÇÃO DE
FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA
NA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES**

Bom Jesus da Lapa–BA
Junho de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA

Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa

Colegiado de Engenharia Elétrica

Vanessa Cristina Pereira Miranda

**ANÁLISE DE MODELOS PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA NA TEORIA DAS ONDAS
VIAJANTES**

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

Orientadora: Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira

Bom Jesus da Lapa-BA

Junho de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

M672

Miranda, Vanessa Cristina Pereira

Análise de modelos para localização de faltas em linhas de transmissão baseada na Teoria das Ondas Viajantes. / Vanessa Cristina Pereira Miranda. – 2025.

95f.: il.

Orientadora: Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira

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

1. Ondas Eletromagnéticas. 3. Linhas de Transmissão. I. Oliveira, Andressa Pereira. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 621.37

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

FOLHA DE APROVAÇÃO

VANESSA CRISTINA PEREIRA MIRANDA

ANÁLISE DE MODELOS PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA NA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

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

Bom Jesus da Lapa, 10 de Junho de 2025

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

Prof. Dr. Erick Baleeiro da Silva (UFOB)

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

Prof. Dr. Vinícius Coelho dos Santos (UFOB)

Dedico este trabalho a Deus, por me guiar e me fortalecer em todos os momentos, especialmente nos mais desafiadores. A Ele agradeço pela sabedoria, pela saúde e pela oportunidade de concluir mais uma etapa da minha vida.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por nunca ter soltado a minha mão, impulsionando-me sempre. Durante a trajetória na engenharia, há desafios que nos retraem e convidam o nosso interior a refletir se este é o caminho certo. Entretanto, as melhores coisas da vida são aquelas que nos confrontam e nos faz questionar, testando nossas forças e, principalmente, a nossa capacidade de se superar dia após dia. Deus colocou pessoas certas e na hora certa para solucionar o não solucionável, abrindo portas para novas etapas.

Por isso, agradeço também a minha família, em especial a minha mãe Mácia Cristina, que sempre viu o estudo como forma de crescimento e sempre lutou ao meu lado pelos meus sonhos. Independente da situação, ela com toda a sua fé acreditou que daria tudo certo no final e me ensinou a não esquecer que "Deus prepara tudo", que eu continuasse estudando porque "Deus não desampara ninguém". E é por isso que também agradeço a mim por não ter parado, por ter dado o meu melhor, por ter dormido tarde e acordado cedo, pela vontade de fazer a diferença e ser uma engenheira de qualidade, que motiva outras mulheres, porque "somente aquele que resistiu ao processo terá direito à vista mais fantástica". Esta conquista é o reflexo de muita dedicação, esforço e resiliência. Grandes coisas nunca vem da zona de conforto. Que este seja apenas o começo de uma trajetória repleta de realizações e superações.

Também gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos os professores que, ao longo desta jornada acadêmica, contribuíram de maneira fundamental para a minha formação. Vocês foram muito mais que transmissores de conhecimento; foram guias, mentores e exemplos de dedicação e sabedoria. "O professor é o norte que nos orienta, a base que sustenta nosso crescimento e a luz que ilumina o caminho do aprendizado". Agradeço a minha orientadora Andressa, dona de um coração enorme, por sempre me motivar, estar presente e com um sorriso no rosto, pronta a ajudar. Sem o seu comprometimento, paciência e inspiração, nada disso seria possível. Obrigada por acreditarem em mim.

Agradeço à Universidade por me permitir realizar vários sonhos durante a graduação, viagens, inúmeros projetos, pesquisa e conhecer amigos que sempre estarão marcados na minha vida.

Deus é bom o tempo todo, confie nEle e não desista dos seus sonhos. Todo dia é dia de vencer.

*“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos
dia após dia.”*

(Robert Collier)

Resumo

A localização precisa de faltas é essencial para a manutenção e para a eficiência dos sistemas de transmissão, e a utilização de técnicas avançadas de processamento digital de sinais tem se mostrado uma abordagem promissora para melhorar a precisão e a confiabilidade desses métodos. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar modelos para a localização de faltas em linhas de transmissão de dois terminais para todos os tipos de faltas, considerando sinais de tensão e de corrente, baseados na teoria das ondas viajantes, empregando o filtro *Differentiator-Smoother*, que é uma técnica de processamento digital de sinais que combina diferenciação e suavização, para realizar o janelamento dos sinais, visando aprimorar a detecção e a análise das ondas viajantes geradas durante as faltas. O trabalho também realiza uma análise comparativa de modelos de equações alternativas para localização de faltas, referenciados na literatura, que eliminam a necessidade de configurações baseadas em parâmetros elétricos da linha. Esses modelos foram avaliados qualitativamente, destacando suas vantagens e limitações, com o intuito de identificar quais deles apresentam maior eficiência e precisão na localização de faltas. É importante destacar que a capacidade de localizar faltas sem depender de parâmetros da linha, como a velocidade de propagação da onda, representa um avanço significativo na área de proteção e monitoramento de sistemas elétricos. Além disso, também foi realizada uma análise comparativa entre a utilização dos sinais de tensão e de corrente aplicados na localização de faltas, a fim de verificar quais deles oferecem maior precisão na estimativa do local de ocorrência. A modelagem de cenários da linha de transmissão foi realizada no *software* ATPDraw. Em seguida, esses sinais foram processados utilizando o filtro *Differentiator-Smoother* no *software* MATLAB[®] aplicando, por fim, aos modelos da literatura que independem dos parâmetros da linha e ao modelo clássico para dois terminais que depende da velocidade de propagação. A análise dos modelos baseados na teoria das ondas viajantes evidenciou que os métodos independentes dos parâmetros da linha apresentam boa precisão na localização de faltas em linhas curtas, enquanto o método clássico é preciso independente da extensão da linha. Além disso, dentre os tipos de sinais analisados, a tensão demonstrou melhor desempenho na estimativa do local de ocorrência da falta, ainda que com custo computacional ligeiramente superior ao da corrente. As simulações confirmaram que maiores frequências de amostragem, como 5 MHz, resultam em menor erro percentual. Além disso, o filtro *Differentiator-Smoother* demonstrou ser eficaz na detecção da frente de onda, possibilitando a aplicação dos modelos estudados com confiabilidade.

Palavras-chave: Linha de Transmissão; Teoria das Ondas Viajantes; Localização de Faltas; Filtro *Differentiator-Smoother*.

Abstract

Accurate fault location is essential for the maintenance and efficiency of transmission systems, and the use of advanced digital signal processing techniques has proven to be a promising approach to improve the accuracy and reliability of such methods. This work aims to analyze fault location models for two-terminal transmission lines under all types of faults, using voltage and current signals based on the traveling wave theory. The *Differentiator-Smoother* filter, a digital signal processing technique that combines differentiation and smoothing, was employed for signal windowing to enhance the detection and analysis of traveling waves generated during faults. Additionally, a comparative analysis was performed between classical models and alternative equations from the literature that do not rely on line electrical parameters. These models were qualitatively evaluated, highlighting their advantages and limitations, with the goal of identifying those that offer higher efficiency and accuracy in fault location. It is worth noting that the ability to locate faults without depending on line parameters, such as wave propagation velocity, represents a significant advancement in power system protection and monitoring. Furthermore, a comparative analysis was conducted between the use of voltage and current signals for fault location, to determine which provides greater accuracy in estimating the fault location. The modeling of transmission line scenarios was carried out using ATP-Draw software. The signals were then processed using the *Differentiator-Smoother* filter in MATLAB®, and applied to both the parameter-independent models from the literature and the classical two-terminal model dependent on propagation velocity. The analysis of traveling wave-based models showed that parameter-independent methods provide good accuracy for short transmission lines, while the classical model maintains high accuracy regardless of line length. Among the types of signals analyzed, voltage provided better performance in fault location, although with a slightly higher computational cost compared to current. The simulations confirmed that higher sampling frequencies, such as 5 MHz, result in lower percentage errors. Moreover, the *Differentiator-Smoother* filter proved effective in detecting the wave front, enabling reliable application of the studied models.

Keywords: Transmission Line; Travelling Wave Theory; Fault Location; Differentiator-Smoother Filter.

Lista de Figuras

1	Visão geral de um sistema de geração, transmissão e distribuição.	17
2	Modelo monofásico do sistema.	18
3	Evolução da capacidade instalada no SIN - Julho 2025/ Dezembro 2029. . .	24
4	Circuito equivalente de uma linha curta.	27
5	Circuito equivalente de uma linha média.	28
6	Circuito equivalente de uma linha longa.	28
7	Propagação de uma onda eletromagnética resultante de uma falta.	30
8	Ondas progressivas e regressivas.	30
9	Diagrama de reflexões de uma falta no ponto F de uma LT de comprimento ℓ . .	31
10	Localizador de Faltas Tipo A.	33
11	Localizador de Faltas Tipo D.	33
12	Processo de Filtragem do Filtro DS.	37
13	Configuração de torre típica da LT avaliada.	46
14	Modelagem da LT do sistema teste em uma linha idealmente transposta. .	47
15	Metodologia aplicada para localização de faltas.	53
16	Aplicação do filtro DS em sinais de tensão de falta AT.	54
17	Análise do erro percentual para os sinais de tensão e corrente para todos os tipos de frequência de amostragem.	58
18	Análise do erro percentual para os sinais de tensão e corrente para todos os tipos de frequência de amostragem.	58
19	Análise do erro percentual para os sinais de tensão e corrente para todos os tipos de frequência de amostragem.	59
20	Análise do erro percentual para os sinais de tensão e corrente para todos os ângulos de incidência para o método de Gilany et al. (2007).	60
21	Análise comparativa do erro percentual para os sinais de tensão e corrente para todos os ângulos de incidência entre o método clássico da TOV e o modelo de Gilany et al. (2007).	61

22	Análise do erro percentual para o sinal de corrente para todos os ângulos de incidência para o modelo de Lopes (2016).	62
23	Análise do erro percentual para o sinal de corrente dos três métodos. . . .	63
24	Análise comparativa do erro percentual para uma falta ACT, 30°, 30% da LT, considerando resistência de falta de 500 Ω para todas as frequências de amostragens.	63
25	Análise comparativa do erro percentual ao longo da LT para os três métodos.	64

Lista de Tabelas

1	Classificação dos métodos do tipo A, B, C e D para localização de faltas. .	32
2	Resumo dos métodos de localização de faltas.	43
3	Resumo dos métodos de processamento de sinais.	45
4	Parâmetros das fontes M e N.	47
5	Parâmetros utilizados no estudo	48
6	Resumo dos métodos alternativos baseados na TOV	52
7	Custo computacional médio para a falta AT.	66

Lista de abreviaturas, acrônimos e siglas

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
C	Capacitância
d	distância
DS	<i>Differentiator-Smoother</i>
G	Condutância
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
L	Indutância
l	Comprimento
LTs	Linhas de Transmissão
LCC	<i>Line and Cable Constants</i>
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
MODWT	Transformada Discreta de Wavelet com Sobreamostragem
ONS	Operador Nacional do Sistema
OVs	Ondas Viajantes
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
PDS	Processamento Digital de Sinais
R	Resistência
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TOV	Teoria das Ondas Viajantes
TEO	Operador de Energia de Teager
TDW	Transformada Discreta de Wavelet
V _p	Velocidade de Propagação
Y	Admitância

Lista de Símbolos

Δ	Letra grega delta maiúscula
δ	Letra grega delta minúscula
γ	Letra grega gama minúscula
λ	Letra grega lambda minúscula
Ω	Letra grega ômega
ζ	Letra grega zeta minúscula
\in	Pertence
Hz	Hertz
A	Ampere
V	Volt
W	Watt

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivo Geral	21
1.1.1	Objetivos Específicos	21
1.2	Justificativa	22
1.3	Organização da Monografia	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	O Sistema Elétrico Brasileiro	23
2.2	Modelagem de Linhas de Transmissão	25
2.3	Modelo de Linhas Aéreas	26
2.4	Teoria das Ondas Viajantes	29
2.5	Classificações de Métodos de Ondas Viajantes	32
2.6	Filtro <i>Differentiator-Smoother</i> (DS)	35
3	REVISÃO DA LITERATURA	40
3.1	Teoria das Ondas Viajantes	40
3.2	Técnicas de Processamento de Sinais	44
4	METODOLOGIA PROPOSTA	46
4.1	Sistema Teste Estudado	46
4.2	Considerações adotadas na análise	48
4.3	Metodologia proposta para localização de faltas	50
5	RESULTADOS	56
5.1	Estudo de Caso I: Análise de Sensibilidade para o Modelo Clássico da Teoria das Ondas Viajantes	57
5.1.1	Análise do Tipo de Falta e Ângulo de Incidência	57
5.1.2	Análise da Resistência de Falta	57

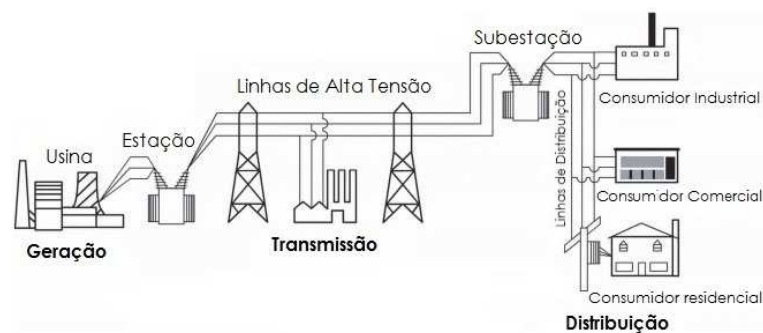
5.1.3	Análise da Frequência de Amostragem	59
5.2	Estudo de Caso II: Análise de Sensibilidade para os Modelos	60
5.2.1	Análise do Tipo de Falta e Ângulo de Incidência	60
5.2.2	Análise da Resistência de Falta	62
5.2.3	Análise da Frequência de Amostragem	64
5.3	Análise do Custo Computacional	66
5.4	Análise de Dispositivos Comercializados	67
6	CONCLUSÃO	68
6.1	Considerações Finais	68
6.2	Trabalhos Futuros	69
A	APÊNDICE	72
A.1	Código de Geração de Arquivos .atp com Faltas Envolvendo Terra via MATLAB®	72
A.2	Código de Geração de Arquivos .atp com Faltas sem Terra via MATLAB®	80
	REFERÊNCIAS	94

INTRODUÇÃO

As Linhas de Transmissão (LTs) realizam a função de conexão e de intermediação, varrendo o território brasileiro com longas redes elétricas, que necessitam de investimento para manter a qualidade e a confiabilidade do serviço. A importância das LTs em sistemas elétricos modernos está diretamente relacionada à sua capacidade de interligar diferentes regiões e fontes de geração, promovendo a confiabilidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP) (ZHANG; REHTANZ, 2016).

Dessa forma, as LTs podem ser definidas como o conjunto de condutores utilizados para transmitir sinais eletromagnéticos de um ponto (transmissor) a outro (receptor). Além disso, sua importância também se faz presente na condução de energia até as subestações elevadoras e abaixadoras, as quais fazem a conversão de tensão para os consumidores finais, como observado nas Figuras 1 e 2.

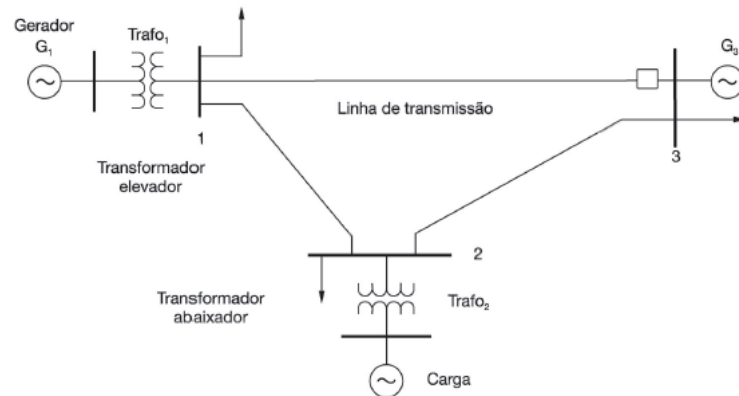
Figura 1 – Visão geral de um sistema de geração, transmissão e distribuição.



Fonte: BLUME, 2007.

Desde o surgimento da eletricidade, discute-se as formas de transmissão, em Corrente Contínua (CC) ou Corrente Alternada (CA), a fim de melhor atender às necessidades do sistema. Nesse contexto, foi percebido que era mais difícil o abastecimento de locais mais

Figura 2 – Modelo monofásico do sistema.



Fonte: Pinto, 2013.

distantes dos centros geradores de energia, sendo necessário adotar estratégias para atender à população. O problema era minimizado em locais mais próximos, pois o tamanho e o custo da linha eram reduzidos, bem como as tecnologias de controle e proteção adotadas para o suprimento eram menos complexas. Segundo Gungor et al. (2016), a implementação de sensores inteligentes e tecnologias digitais nas LTs tem transformado a monitoração e o controle desses sistemas, elevando a eficiência operacional.

No Sistema Interligado Nacional (SIN), a matriz energética brasileira é composta em sua grande parte por energia renovável, as quais são geradas, por exemplo, em locais distantes do centro de consumo. Oliveira e Souza (2020) destacam que a transmissão de energia em longas distâncias exige o uso de linhas de transmissão menos compactas, mas com tecnologias avançadas para garantir a eficiência e a confiabilidade do sistema.

O Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) (2024) publicou um documento intitulado "*Integração de energias renováveis ao sistema elétrico brasileiro*", que discute os desafios e oportunidades relacionados a integração de energias renováveis à rede elétrica. O estudo destaca que a expansão das fontes renováveis requer um planejamento cuidadoso da infraestrutura de transmissão para assegurar que a energia gerada seja eficientemente transportada para os centros de consumo, garantindo a confiabilidade do sistema elétrico. Dessa forma, as usinas hidrelétricas como a de Itaipu, produz energia que deve ser transportada tanto para o Paraguai, quanto para os estados sul e sudeste do Brasil. Outras formas de geração, como a Eólica, possui maior potencial no nordeste brasileiro e abastece estados com maiores demandas de consumo como o sudeste.

Segundo o Operador Nacional do Sistema (ONS), o sistema de transmissão nacional já soma mais de 170.000 km de extensão, comprimento este suficiente para dar quatro voltas ao planeta Terra (ONS, 2025). Nesse contexto, de acordo com Eletrobras (2025), por exemplo, a companhia opera uma vasta rede de linhas de transmissão em todo o Brasil, conectando a geração à distribuição e integrando o SIN. Só a Eletrobras Furnas possui

uma rede de transmissão de 15.000 km. Além disso, existem outros exemplos notáveis, como a LT de Belo Monte que abastece centros consumidores do Sudeste com cerca de 2.000 km de linha. Não obstante, a Eletrobras opera em vários níveis de tensão, de acordo com a necessidade de transporte de energia e distância, como 138 kV, 230 kV, 500 kV, 750 kV e 800 kV. Sendo esta última, primordial em *High Voltage Direct Current* (HVDC), ou seja, transmissão de energia elétrica em sistemas de corrente contínua de alta tensão. Como destacado por Arrillaga e Watson (2016), a transmissão de energia HVDC tem se mostrado uma solução eficiente para o transporte de energia em longas distâncias, reduzindo perdas e melhorando a estabilidade do sistema.

Entretanto, o uso de longas linhas de transmissão com intuito de interligar locais remotos no Brasil, além de encarecer a implementação da rede, é mais suscetível às interferências do clima como vendavais, vandalismo, queimadas, descargas atmosféricas, dentre outros (FILHO, 2020). Essas intempéries podem gerar distúrbios no sistema afetando a qualidade do serviço, podendo ocasionar faltas, que devem ser eliminadas no menor tempo possível.

De acordo com Cunha (2018), as faltas no SEP são causadas por curto-circuitos, classificados como permanentes ou transitórios, sendo os primeiros mais críticos devido ao potencial de danos aos equipamentos, levando mais tempo para reestabelecer o sistema ao normal funcionamento. Os últimos ocorrem por um curto período de tempo e geralmente são causados por situações momentâneas como descargas atmosféricas ou sobrecargas temporárias.

Para que um sistema de proteção seja eficaz é necessário que haja o dimensionamento correto, e que seja seguro, confiável, rápido, sensível a surtos e que haja coordenação entre a seletividade (LEME et al., 2013). Nesse contexto, quanto mais rápida a atuação, menores serão as perdas associadas aos consumidores, como a interrupção do serviço industrial, perda financeira, perda de sincronismo em máquinas e *blackout*.

Por outro lado, as linhas de transmissão se estendem, muitas vezes, por áreas de difícil acesso, o que dificulta a identificação de faltas no sistema. Segundo Silveira (2018), no caso da quebra de isoladores, por exemplo, a equipe de manutenção pode levar vários dias para localizar o problema e determinar a sua localização exata, resultando em tempos de resposta muito superiores aos observados em operações realizadas remotamente.

Assim, cresce a necessidade de criar estratégias mais eficientes na identificação e detecção de faltas nas linhas de transmissão de forma a reestabelecer o sistema com os limites mínimos de qualidade de energia. Os localizadores de faltas são usados para identificar a posição da falta com precisão e não apenas para indicar a área geral (definida por uma zona de proteção) onde ocorreu uma falta (SAHA, 2010).

Atualmente, os métodos de localização de faltas em LT são agrupados em três ca-

tegorias: métodos baseados em impedância, métodos baseados em inteligência artificial e métodos baseados em ondas viajantes (SAHA, 2010; MARTINS, 2021). O método baseado em impedância é de fácil implementação, apresenta menores custos, porém a medição é afetada por condições ambientais e em LT longas pode ser desafiador a localização baseada apenas na medição da impedância, ainda mais se a falta estiver muito distante ou o sinal estiver atenuado (OROZCO, 2017).

O método baseado em inteligência artificial apresenta resultados significativos na detecção das faltas, pois é capaz de identificar padrões complexos em grandes volumes de dados, melhorando a precisão no diagnóstico das faltas. Entretanto, segundo Lambert-Torres et al. (2010) a aplicação de sistemas inteligentes para diagnóstico de faltas exige grande esforço computacional, especialmente na manutenção e atualização da base de dados.

O método baseado na Teoria das Ondas Viajantes (TOV) tem ganhado destaque realizando uma análise detalhada sobre as ondas refletidas em ocasiões de faltas na rede, oferecendo um diagnóstico imediato e monitoramento contínuo do sistema. De acordo com Martins (2021), a localização de falta é realizada com base em frequências elevadas, sendo bastante sensível a pequenas mudanças nas características da linha, podendo detectar faltas que ainda não se tornaram graves. Além disso, é realizada uma análise das componentes de alta frequência presentes nos sinais de corrente, geradas pelas sucessivas reflexões das Ondas Viajantes (OVs) originadas após a ocorrência de faltas na linha de transmissão (LIMA et al., 2015). Entretanto, o método requer maior investimento para implementação e é suscetível a interferências ocasionadas por condições ambientais e pelos materiais dielétricos na rede, reduzindo a precisão. De acordo com França (2018), a proteção de linhas de transmissão baseada em OVs pode se tornar a mais rápida e se divide, de forma mais genérica, em esquemas de um ou dois terminais. De forma mais específica, Saha (2010) classifica as localizações de faltas baseadas na TOVs em cinco propostas (A, B, C, D e E), de acordo com o número de terminais de medição e com a necessidade de envio de pulsos elétricos na linha.

Entretanto, muitos métodos tradicionais de localização de faltas através das OVs dependem de parâmetros elétricos da linha. A imprecisão na velocidade de propagação da onda, por exemplo, pode acarretar erros já na pré-localização da falta e, por consequência, na localização precisa da mesma (SILVA, 2004). Além disso, é importante destacar que condições climáticas anormais em situações de frio extremo, podem causar congelamento de linhas de transmissão e cordas isolantes, aumentando a área de vento e afundamento dos condutores, principalmente em linhas longas (FILHO, 2020). Dessa forma, conclui-se que essa abordagem pode ser desafiadora, pois a velocidade de propagação não será sempre constante, sendo afetada pelos fatores mencionados acima.

Nesse sentido que o presente trabalho se destaca, pois os modelos mais modernos,

que não dependem desses parâmetros, são considerados mais robustos e confiáveis, pois eliminam a necessidade de ajustes constantes e reduzem os erros causados por estimativas imprecisas. Além disso, esses métodos são mais simples de implementar na prática, o que é uma grande vantagem para os operadores do sistema.

Em conjunto com técnicas de Processamento Digital de Sinais (PDS), é possível realizar a localização de faltas com precisão na LT. Para a realização deste trabalho será usado o filtro *Differentiator-Smoother* (DS), o qual de acordo com Ribeiro (2021), o filtro DS é eficiente porque facilita a medição das ondas, permitindo que se obtenha informações sobre a sua intensidade e direção de forma simples, sem necessidade de muitos ajustes. Isso torna a aplicação desse método mais fácil para os operadores de sistemas elétricos na hora de detectar e localizar faltas.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho pretende realizar a análise de modelos baseados na teoria das ondas viajantes que são independentes dos parâmetros elétricos da linha de transmissão para a localização de faltas em linhas de transmissão utilizando o filtro *Differentiator-Smoother*.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Modelar um sistema de transmissão de energia elétrica no *software ATPDraw*;
- Simular todos os tipos de faltas com a variação de parâmetros definidos em sistema de transmissão de energia elétrica para obter os sinais de tensão e corrente no *software ATPDraw* a partir de dois terminais de leitura;
- Aplicar o filtro DS para realizar o processamento dos sinais de tensões e correntes lidos no *software MATLAB*[®];
- Realizar a localização de faltas a partir dos sinais de tensão e corrente utilizando modelos baseados na teoria das ondas viajantes que são independentes dos parâmetros elétricos da linha;
- Analisar e comparar os resultados obtidos dos modelos estudados avaliando a precisão dos sinais de tensão e de corrente.

1.2 Justificativa

A crescente complexidade do sistema elétrico de potência exige que os dispositivos de proteção operem com alta confiabilidade, seletividade, sensibilidade e rapidez na detecção e localização de distúrbios. Com o avanço da demanda energética e a necessidade de transmissão de eletricidade para longas distâncias, as linhas de transmissão tornam-se cada vez mais extensas e vulneráveis a faltas. Com isso, exige-se tecnologias mais avançadas para detectar as faltas com o menor tempo possível. Entretanto, os métodos convencionais de localização de faltas frequentemente dependem de parâmetros elétricos da linha, resultando em imprecisões nos resultados.

Portanto, este trabalho se justifica pela necessidade de avaliar modelos baseados na Teoria das Ondas Viajantes que independem dos parâmetros da linha, contribuindo para um diagnóstico mais preciso e eficiente. Além disso, a literatura sobre o uso de tais modelos ainda é limitada, o que representa uma lacuna a ser explorada para aprimorar as técnicas de monitoramento e proteção de sistemas elétricos. A pesquisa proposta ainda visa oferecer uma contribuição significativa ao setor elétrico ao analisar e comparar diferentes modelos de localização de faltas, utilizando o filtro *Differentiator-Smoother*. Por último, espera-se que os resultados obtidos sirvam de base para futuras aplicações práticas e estudos no campo da proteção e monitoramento de redes elétricas.

1.3 Organização da Monografia

Este trabalho está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

Capítulo 2 – Apresenta-se a fundamentação teórica do tema, abordando o sistema elétrico brasileiro, a modelagem da LT, a teoria das ondas viajantes e o filtro DS.

Capítulo 3 – É realizada a revisão da literatura, apresentando os principais conceitos e estudos relacionados ao tema.

Capítulo 4 – É apresentado o método proposto para localização de faltas em linhas de transmissão, fazendo uma análise comparativa acerca dos modelos estudados que independem dos parâmetros da linha.

Capítulo 5 – São apresentados e discutidos os resultados.

Capítulo 6 – São apresentadas as considerações finais e trabalhos futuros.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O Sistema Elétrico Brasileiro

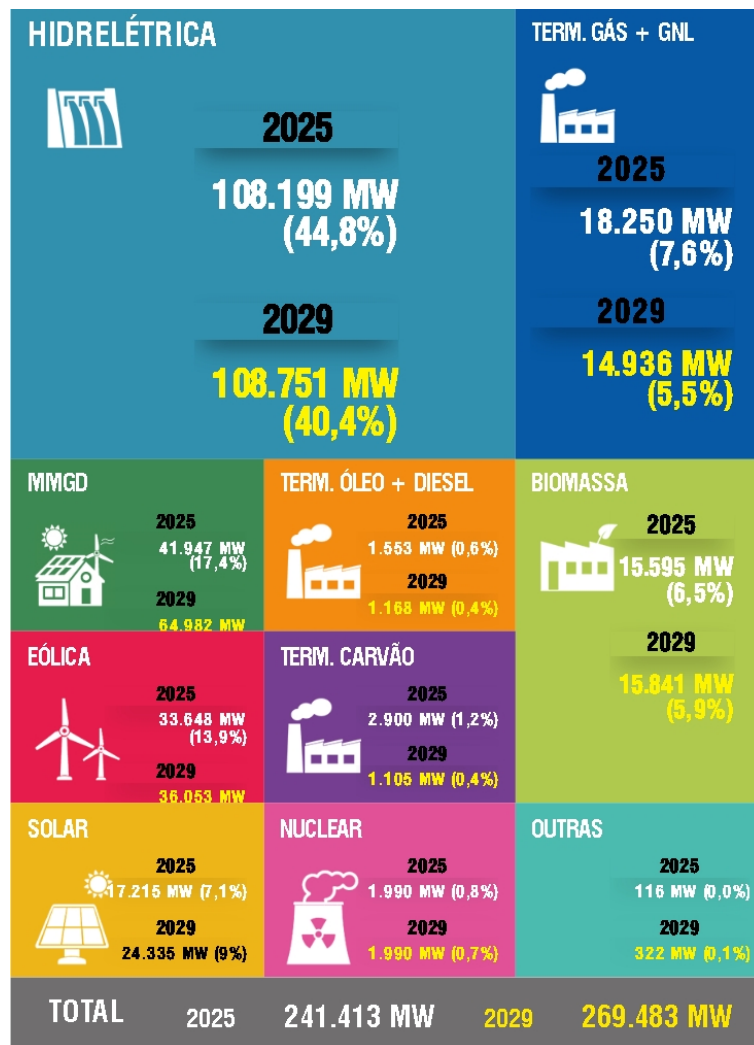
O setor elétrico brasileiro tem sua matriz fortemente baseada na geração hidrelétrica. No entanto, conforme ilustrado na Figura 3, observa-se uma tendência de crescimento na participação de outras fontes renováveis, como a energia eólica e solar, no horizonte até 2029. Essa diversificação é de suma importância, uma vez que o Brasil apresenta alta dependência das vazões hidrológicas, o que o torna vulnerável a períodos de estiagem, quando a baixa pluviosidade reduz significativamente a capacidade de geração das usinas hidrelétricas. É importante destacar que, a fim de compensar a carência hídrica, o uso das termelétricas tem crescido bastante neste período, contribuindo no aumento da tarifa, visto que as mesmas precisam de combustíveis fósseis para gerar eletricidade e esses insumos encontram-se em alta no mercado (MIRANDA et al., 2022).

Nesse cenário, a ampliação da potência instalada de energia eólica surge como uma alternativa estratégica para mitigar os impactos da sazonalidade hidrológica. Isso se deve ao fato de que os períodos de menor vazão dos rios frequentemente coincidem com a chamada "safra dos ventos", caracterizada por velocidades ideais para a geração eólica. Paralelamente, a energia solar fotovoltaica contribui para a diversificação da matriz ao proporcionar geração durante as horas diurnas, especialmente pela manhã e no início da tarde, períodos em que a produção eólica pode apresentar menor desempenho em determinadas regiões.

Portanto, a maior integração entre essas fontes renováveis viabiliza um aproveitamento energético mais eficiente, reduzindo a dependência da geração hidrelétrica e promovendo maior segurança energética ao país. As perspectivas para 2029 indicam que essa

complementaridade contribuirá significativamente para a sustentabilidade e a resiliência do SEP.

Figura 3 – Evolução da capacidade instalada no SIN - Julho 2025/ Dezembro 2029.



Fonte: PMO Julho, 2025.

Vale destacar a Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) no Brasil, que inclui principalmente a geração solar fotovoltaica, e tem mostrado um crescimento substancial. Segundo projeções do ONS, a capacidade instalada desse segmento deverá passar de 41.947 MW em 2025 para 64.982 MW em 2029. Para ilustrar a magnitude desse aumento, de acordo com Neoenergia (2025), a capacidade instalada de Belo Monte, uma das maiores usinas hidrelétricas do Brasil, é de 11.233 MW. Dessa forma, a projeção de crescimento da MMGD entre 2025 e 2029 equivale a praticamente mais de cinco vezes a capacidade de Belo Monte, evidenciando o enorme potencial descentralizado da geração distribuída (NEOENERGIA, 2025).

Por último, a redução da participação das fontes não renováveis, como as termelétricas a óleo, diesel e carvão, no sistema elétrico brasileiro está alinhada com o movimento

global em direção a uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Esse processo de transição energética se insere diretamente nos compromissos globais estabelecidos pela Agenda 2030 da ONU, que visa promover o uso de energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos. Em particular, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, que busca garantir o acesso universal à energia, aumentar a participação de energias renováveis e melhorar a eficiência energética, está em consonância com a redução das fontes não renováveis. A diminuição das termelétricas a óleo, diesel e carvão contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e o avanço em direção a uma matriz energética mais limpa. De acordo com o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) (2024), as 82 usinas movidas a combustíveis fósseis listadas no estudo emitiram 55,6 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente em 2021, destacando a necessidade de reduzir a dependência de fontes fósseis para alcançar uma matriz energética mais limpa (MINERAÇÃO, 2021).

2.2 Modelagem de Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão desempenham um papel crucial na infraestrutura do sistema elétrico, sendo responsáveis pelo transporte da energia elétrica gerada nas usinas até os centros de consumo. Essas linhas são compostas por condutores, torres ou postes, e outros componentes que possibilitam a condução da eletricidade em longas distâncias com o mínimo de perdas.

O estudo e a modelagem de linhas de transmissão são fundamentais para a análise do comportamento dinâmico dos sistemas de potência, permitindo a otimização do fornecimento de energia e a garantia da estabilidade do sistema. A representação matemática dessas linhas envolve a consideração de parâmetros como Resistência (R), Indutância (L), Capacitância (C) e Condutância (G), que variam conforme as características físicas e operacionais da linha (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

Uma linha de transmissão pode ser modelada de várias maneiras, dependendo dos parâmetros considerados para a representação do modelo, bem como através da análise dos efeitos de propagação de energia e de perdas associadas à mesma. A impedância de uma linha de transmissão é um parâmetro fundamental que combina a resistência e a reatância da linha, afetando a eficiência da transmissão. Já a capacitância diz respeito à capacidade de armazenar carga entre os condutores, o que pode influenciar a distribuição de tensão e a corrente ao longo da linha. Além disso, a resistência dos condutores determina as perdas de energia devido ao aquecimento, impactando a performance da linha. A modelagem precisa dos parâmetros das linhas de transmissão é crucial para a operação eficiente do sistema elétrico, permitindo a previsão de comportamentos durante condições anormais,

como faltas, e a otimização do fluxo de energia. Isso contribui para a redução de perdas e a prevenção de sobrecargas, garantindo a confiabilidade e a estabilidade do sistema (KUNDUR, 1994).

A modelagem das linhas de transmissão também considera os efeitos transitórios e dinâmicos, especialmente em sistemas de corrente alternada, como os fenômenos de onda viajante e efeitos de atraso devido à distância. A precisão na modelagem desses parâmetros e fenômenos é fundamental para assegurar a estabilidade e confiabilidade da rede elétrica, especialmente quando se busca integrar fontes de energia renovável, como solar e eólica, que exigem uma rede de transmissão robusta e eficiente.

2.3 Modelo de Linhas Aéreas

Linhas de transmissão aéreas são sistemas fundamentais para a transmissão de energia elétrica em alta e extra-alta tensão, permitindo o transporte eficiente de potência entre centros de geração e consumo (FILHO, 2020). Esses sistemas são modelados eletricamente como circuitos distribuídos, cujos parâmetros longitudinais (resistência e indutância) e transversais (capacitância e condutância) variam ao longo da extensão da linha (PAUL, 2008).

As LTs podem ser configuradas em circuito simples ou duplo, dependendo de fatores como a carga a ser transmitida, a confiabilidade requerida e as restrições ambientais e econômicas. Circuitos duplos oferecem maior confiabilidade e capacidade de transmissão, mas implicam custos mais elevados e maior complexidade de instalação (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2012).

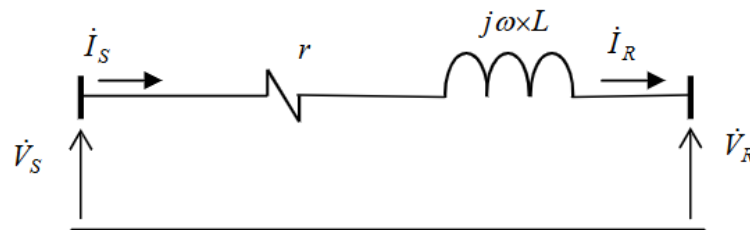
O modelo matemático de uma linha aérea pode ser abordado por meio da equação das linhas de transmissão, formulada a partir da relação entre os parâmetros distribuídos e a propagação da tensão e da corrente. Para linhas curtas (até 80 km), os efeitos capacitivos podem ser desprezados, enquanto para linhas médias (entre 80 e 250 km) e longas (acima de 250 km), esses efeitos se tornam significativos, exigindo a utilização do modelo pi ou das equações diferenciais completas para uma análise precisa (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

A modelagem de linhas de transmissão pode ser realizada utilizando parâmetros concentrados ou distribuídos, dependendo da extensão da linha e da frequência da análise. O modelo de parâmetros concentrados é adequado para linhas curtas, onde resistência, indutância e capacitância são representadas como elementos discretos em um circuito equivalente. Já para linhas médias e longas, os parâmetros distribuídos são mais apropriados, pois levam em consideração a variação contínua dos componentes elétricos ao longo da linha, resultando em um comportamento mais próximo da realidade. A escolha entre

esses modelos impacta diretamente a precisão da análise de transitórios, estabilidade e desempenho do sistema elétrico de potência (KUNDUR, 1994).

A Figura 4 ilustra a modelagem de uma linha de transmissão curta através dos parâmetros série: resistência e indutância. Para este modelo, é razoável desprezar as capacitâncias e Admitância (Y) para a terra, ficando o modelo apenas com uma impedância em série ($Y=0$). A impedância série da linha é representada pela Equação 1.

Figura 4 – Circuito equivalente de uma linha curta.



Fonte: (BORGES, 2005).

$$Z = R + j\omega L \quad (1)$$

Onde:

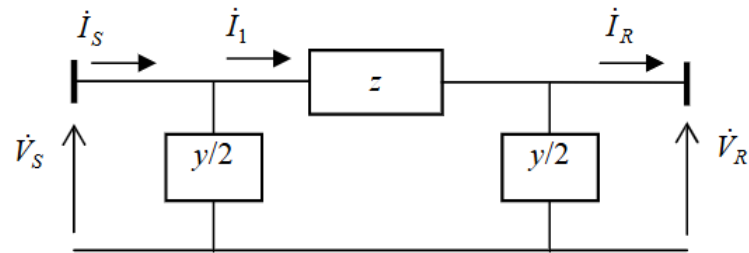
- R é a resistência elétrica da linha (Ω), responsável pelas perdas ôhmicas no condutor devido ao efeito Joule;
- L é a indutância (H), que modela o campo magnético ao redor da linha e a interação com outros condutores.

Este modelo é útil para análises simples de regime permanente, mas não é adequado para linhas médias ou longas, pois não considera variações espaciais dos parâmetros ao longo da linha. Dessa forma, na modelagem de linhas médias, a capacitância *shunt* (em paralelo) deve ser incluída nas extremidades do circuito, como observado na Figura 5 e através da Equação 2 de parâmetros concentrados pode-se analisar a influência da admitância e capacitância na LT.

$$Y = G + j\omega C \quad (2)$$

Onde:

- C é a capacitância (F), representando a capacidade da linha de armazenar energia elétrica entre os condutores e o solo;

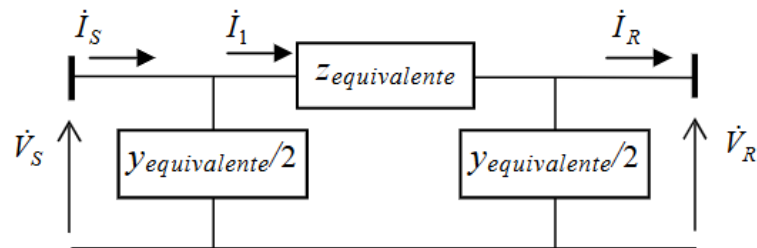
Figura 5 – Circuito equivalente de uma linha média.

Fonte: (BORGES, 2005).

- G é a condutância (S), que modela as perdas dielétricas do meio isolante.

Entretanto, geralmente as condutâncias dessas admitâncias são desprezadas, restando apenas as reatâncias capacitivas em derivação para representação do efeito capacitivo dos condutores (LOPES et al., 2018).

Em linhas longas, Figura 6, é observável a aplicação de equações diferenciais para modelagem da linha, baseada no modelo pi equivalente.

Figura 6 – Circuito equivalente de uma linha longa.

Fonte: (BORGES, 2005).

Do ponto de vista construtivo, as linhas aéreas são compostas por condutores elétricos nus, podendo ser de alumínio, alumínio com alma de aço, alumínio com alma de fibra ou compósito de carbono ou alumínio com alma liga de Zircônio. O estudo e inclusão dos isoladores também é imprescindível, que garantem a separação elétrica entre os condutores e as torres; as estruturas de suporte, que podem ser de aço galvanizado ou concreto, dimensionadas para suportar cargas mecânicas e esforços eletrodinâmicos; e cabos para-raios, instalados no topo das torres para proteção contra descargas atmosféricas (MATOS, 2015).

A modelagem e a simulação das linhas de transmissão são essenciais para a análise de transitórios eletromagnéticos, estabilidade do sistema e coordenação do isolamento. Ferramentas computacionais como MATLAB® e *Alternative Transients Program* (ATP) são amplamente utilizadas para estudar o comportamento dinâmico da linha sob diferentes condições operacionais, incluindo fenômenos como efeito corona, surtos de manobra e transitórios impulsivos.

Com o avanço da tecnologia, a integração de sensores inteligentes, sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) e inspeção com drones tem aprimorado o monitoramento das linhas, permitindo a identificação preditiva de faltas e reduzindo custos operacionais. Além disso, possibilitariam o uso de programas computacionais para apoiar os operadores na tarefa de determinar a seção defeituosa que deu origem aos desligamentos (RODRIGO; PAHWA; BOYER, 1996).

2.4 Teoria das Ondas Viajantes

Quando ocorre uma perturbação em uma linha de transmissão, seja por descargas atmosféricas, faltas como curtos-circuitos ou variações nas condições normais de operação, formam-se ondas eletromagnéticas conhecidas como ondas viajantes. De acordo com Costa et al. (2021), essas ondas são impulsos eletromagnéticos de alta frequência geradas devido à mudança abrupta da tensão ou corrente no ponto de falta.

As ondas viajantes se deslocam pela linha em alta velocidade, seguindo as propriedades físicas e elétricas do meio condutor. Esses impulsos se propagam a partir do ponto de falta em direção aos terminais da linha, tanto na corrente quanto na tensão, a uma determinada velocidade (v). Assim, quando ocorre uma falta em um cabo de energia, por exemplo, essas ondas de tensão e corrente com sinais de banda larga que cobrem uma ampla faixa de frequência irão viajar até encontrar um ponto de descontinuidade (GILANY; IBRAHIM; ELDIN, 2007).

Ao atingirem esse ponto de descontinuidade, uma parte dessas ondas é refletida de volta para o ponto de falta enquanto a outra parte é refratada. Esse processo se repete até que toda a energia seja dissipada (OLIVEIRA; SOUZA, 2020).

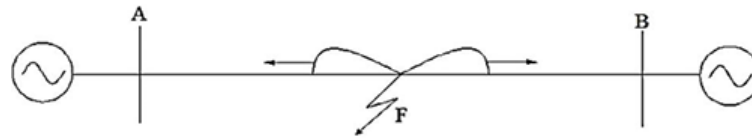
É importante destacar que essas ondas refletidas e refratadas são geradas de acordo com as leis de Kirchhoff e satisfazem as equações diferenciais da linha de transmissão. Elas também condizem com o princípio de conservação da energia, possuem as mesmas propriedades que as ondas incidentes e obedecem ao princípio da superposição, conforme Bewley (1931).

Em termos práticos, quando ocorre uma alteração repentina na corrente ou na tensão em uma extremidade da linha, essa modificação gera um sinal que se propaga ao longo do condutor. Por conseguinte, o terminal oposto não detecta imediatamente essa mudança, ele só a percebe após o sinal ter percorrido toda a extensão da linha.

Esse fenômeno implica que a extremidade remota não pode influenciar ou responder às condições do sistema até que o sinal perturbador chegue a ela e gere uma resposta. Essa resposta, que viaja de volta em direção à fonte original, é modelada pelas características

elétricas da linha – como impedância e capacitância distribuídas – e fornece informações essenciais para os mecanismos de proteção e controle da rede. A Figura 7 ilustra esse exemplo.

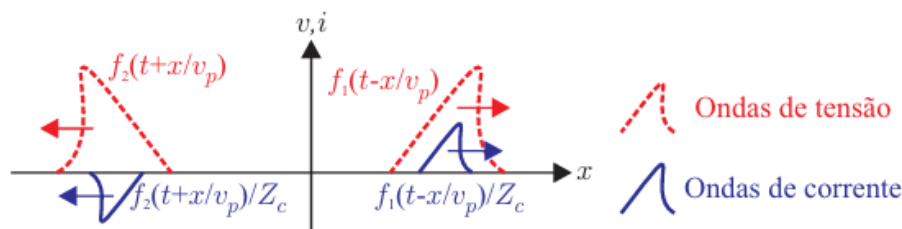
Figura 7 – Propagação de uma onda eletromagnética resultante de uma falta.



Fonte: Oliveira, 2022.

Analisando a Figura 8, de acordo com Leite (2020), considere que f_1 seja uma OV que se propaga no sentido do terminal A para o B (sentido positivo de x) e f_2 uma OV que viaja no sentido do terminal B para o A (sentido negativo de x), f_1 e f_2 serão denominadas, respectivamente, de ondas progressivas e ondas regressivas.

Figura 8 – Ondas progressivas e regressivas.



Fonte: Lopes, 2014.

Ao longo do percurso, essas ondas encontram diferentes pontos de descontinuidade no sistema, como variações na impedância da linha, conexões com outros elementos da rede ou terminais de equipamentos. Dependendo das características dessas descontinuidades, as ondas podem sofrer reflexão (parte da onda é refletida e volta) ou refração (parte da onda é refratada e continua a ser transmitida).

As reflexões podem ser provenientes da localização da falta, do terminal remoto ou de um ponto atrás do terminal local. Identificar com precisão a reflexão a partir da localização da falta representa um desafio para análises baseadas em OV em um terminal, especialmente em linhas de transmissão CA (CERQUEIRA, 2018).

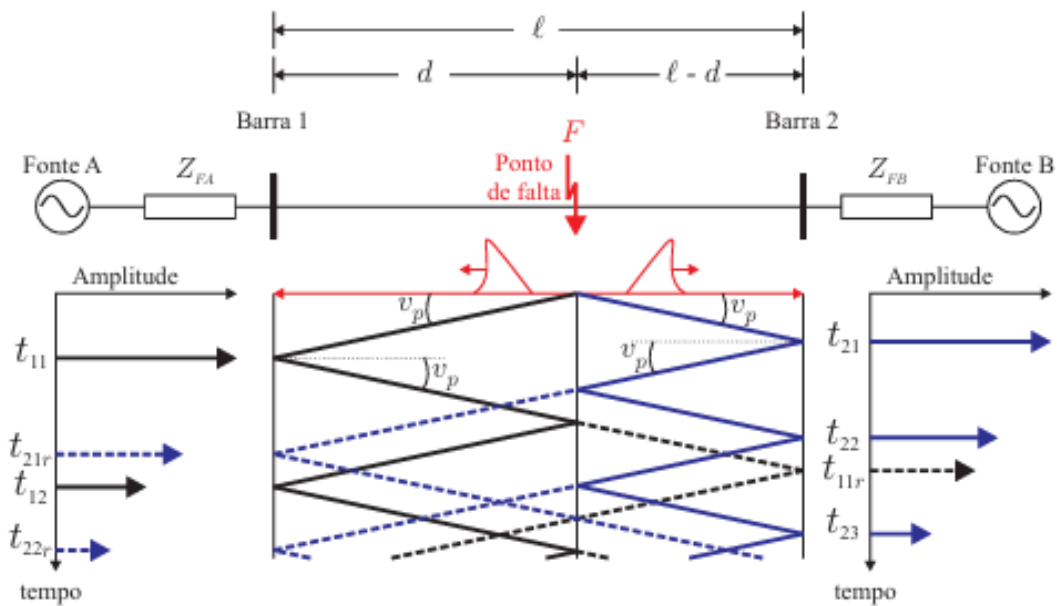
Com o tempo, essas interações fazem com que a perturbação inicial perca intensidade até que a linha atinja um novo estado de equilíbrio, conhecido como regime permanente.

Em muitas situações é necessário considerar a ocorrência de mais de uma onda sendo refletida e refratada. Dessa forma, alguns modelos gráficos foram elaborados a fim de facilitar o estudo e avaliar a localização da falta ao longo da linha. Para fornecer uma solução menos complexa, Bewley (1931) desenvolveu uma técnica gráfica conhecida como

Diagrama de Lattice ou diagrama espaço-tempo, a qual permite visualizar a posição da onda ao longo do tempo, incluindo suas porções refletida e refratada.

A Figura 9 ilustra uma falta ocorrida no ponto F de uma linha de transmissão de comprimento Comprimento (ℓ), localizada a uma distância (d) da Barra 1, considerando a mesma Velocidade de Propagação (V_p) para as ondas refletidas e refratadas.

Figura 9 – Diagrama de reflexões de uma falta no ponto F de uma LT de comprimento ℓ .



Fonte: Lopes, 2014.

Lopes (2014) aborda que nas laterais da própria figura, são ilustrados os instantes de chegada das ondas incidentes (t_{11} e t_{21}), refletidas (t_{12} , t_{22} e t_{23}) e refratadas no ponto de falta (t_{21r} , t_{22r} e t_{11r}) às barras 1 e 2.

De acordo com Silva (2004), as ondas viajantes em uma linha de transmissão podem sofrer três transformações distintas. Inicialmente, há uma redução na amplitude máxima da onda, fenômeno conhecido como atenuação. Além disso, a forma da onda é alterada: ela se torna mais alongada, suas irregularidades são suavizadas e a inclinação diminui. Por fim, os extremos das ondas de tensão e corrente começam a se assemelhar. Importa ressaltar que essa modificação na forma da onda e a uniformização dos extremos ocorrem de maneira concomitante e são classificadas em conjunto como distorções.

Os métodos OV em linhas de transmissão podem ser diferenciados de acordo com o número de dispositivos de medição necessários, com os métodos para processamento de OV e com a característica de propagação da onda (HUDOMALJ; TROST; ČAMPA, 2024).

2.5 Classificações de Métodos de Ondas Viajantes

De forma mais específica, os métodos de localização são classificados em quatro grupos principais desde a década de 1950: Tipos A, B, C e D. A principal diferença entre eles está na necessidade de emissão de sinais e no número de terminais monitorados (GALE et al., 1993). Segundo a norma IEEE (2004), na década de 1950, os localizadores de faltas de linhas aéreas foram classificados como Tipos A, B, C e D de acordo com seu modo de operação — cada tipo sendo associado a uma implementação ou projeto específico, e todos sendo baseados tanto em ondas de tensão quanto em ondas de corrente.

De acordo com Gale et al. (1993), conforme a Tabela 1, os métodos Tipos B e C precisam da emissão de sinais (pulsos elétricos), sendo que o Tipo B requer detecção em ambas as extremidades da linha, enquanto o Tipo C monitora apenas uma extremidade. Já os Tipos A e D não necessitam do envio de sinais adicionais, pois utilizam as próprias ondas geradas no momento da falta para localizar o problema. O método do tipo B ainda pode ser dividido em três subtipos: B1, B2 e B3. Os tipos B1 e B2 enviam um sinal para o outro lado do circuito ao detectar uma falta e analisam quando o sinal chega. O tipo B3, por sua vez, injeta um sinal a partir da falta e mede o tempo para identificar a reflexão do pulso.

Tabela 1 – Classificação dos métodos do tipo A, B, C e D para localização de faltas.

Tipo de Método	Usa Pulsos Elétricos	Um terminal	Dois terminais	Usa ondas refletidas
TIPO A		✓		✓
TIPO B	✓		✓	✓
TIPO C	✓	✓		✓
TIPO D			✓	

Fonte: GALE, 1993.

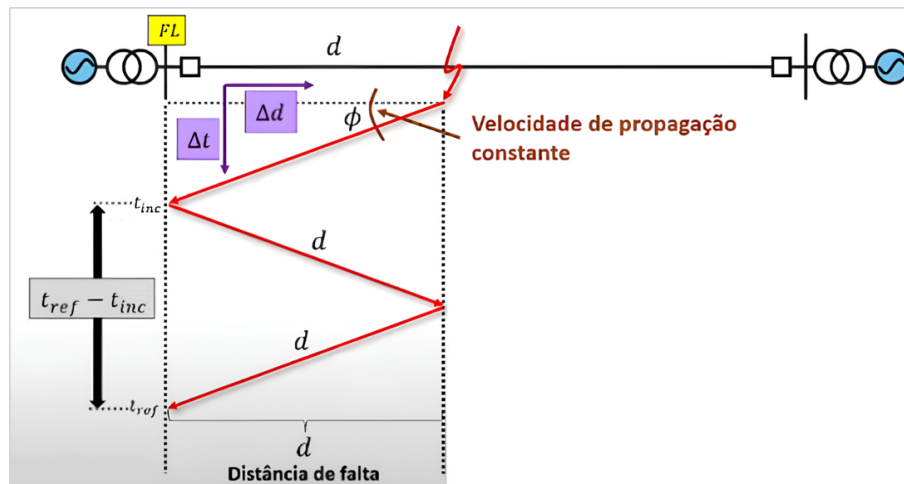
Por conseguinte, o método Tipo C funciona como um radar, enviando um pulso e analisando a reflexão para localizar a falta. No entanto, a instalação de unidades do Tipo C pode ser cara, pois requer equipamentos específicos que nem sempre estão disponíveis devido à evolução para tecnologias mais modernas, como micro-ondas e fibra óptica.

De acordo Saha (2010), a classificação inclui um novo modelo, o método tipo E, o qual utiliza terminação única e os transientes gerados na reenergização da linha pelo fechamento de um disjuntor, sendo eficaz para localizar faltas permanentes, inclusive em circuitos abertos, onde há pouca ou nenhuma corrente de falta.

Historicamente, para linhas aéreas, nas quais as faltas são mais propensas a ocorrer, os Tipos A e D têm sido preferidos devido a razões de simplicidade, o que os levou a serem frequentemente relatados como os métodos clássicos de localizações de faltas baseadas em OV de um ou dois terminais de leitura, respectivamente (LOPES et al., 2021).

O Método Tipo A, Figura 10, localiza faltas em apenas um dos terminais. Quando ocorre uma falta, como um curto-circuito, ela gera ondas elétricas que viajam pela linha em direções opostas que, ao atingirem as extremidades da linha ou outros obstáculos, retornam como um eco. Os sensores registram essas reflexões, e a análise desses sinais permite estimar onde a falta ocorreu. No entanto, esse método pode apresentar dificuldades se a falta desaparecer rapidamente ou se as reflexões das ondas forem fracas (SAHA, 2010).

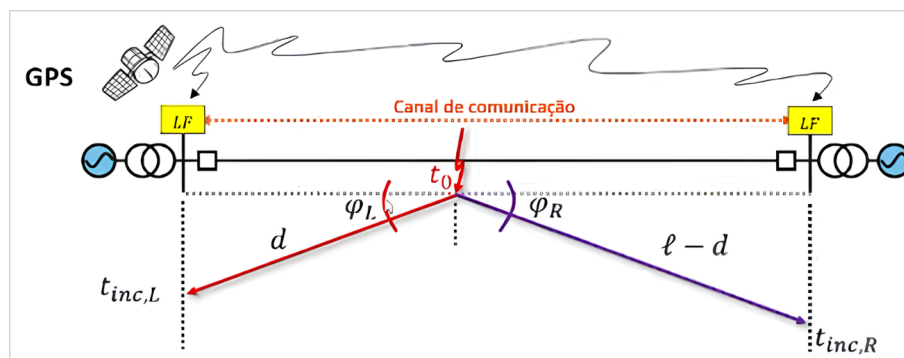
Figura 10 – Localizador de Faltas Tipo A.



Fonte: (Lopes, 2021).

Por outro lado, o Método Tipo D, Figura 11, utiliza medições em dois terminais da linha, tornando a localização mais precisa. Em vez de depender das reflexões das ondas, esse método compara o tempo que cada uma leva para chegar a cada extremidade da linha. Como as ondas viajam a uma velocidade constante, a diferença de tempo entre as medições permite calcular a posição exata da falta. Para isso, é necessário que os dois terminais estejam perfeitamente sincronizados no tempo, o que é feito utilizando sinais de *Global Positioning System* (GPS) (IEEE, 2004).

Figura 11 – Localizador de Faltas Tipo D.



Fonte: (Lopes, 2021).

Lopes et al. (2021) apresentaram equações que calculam a distância de ocorrência

da falta para os métodos Tipo A e Tipo D. Primeiramente, A pode ser representado pela Equação 3.

$$d = 0.5 \cdot (t_{Lr} - t_{Li}) \cdot v_{p1} \quad (3)$$

Onde:

- d é a distância da falta;
- t_{Lr} representa o tempo da onda refletida que retorna ao terminal de medição;
- t_{Li} é o tempo da onda incidente inicial;
- v_{p1} é a velocidade de propagação da onda na linha.

Neste método, a localização é determinada a partir do tempo que a onda refletida leva para retornar ao terminal. No entanto, a sua identificação correta é desafiadora, pois pode ser confundida com reflexões de outras descontinuidades do sistema, como barramentos adjacentes. Valores altamente precisos do tempo de chegada das ondas viajantes são necessários para uma estimativa precisa da localização da falta (MUZZAMMEL, 2019).

Por conseguinte, a Equação 4 representa o método Tipo D. Observe que ele compara o tempo de chegada das ondas nas duas extremidades e não depende das reflexões da falta, tornando a análise mais precisa e menos suscetível a interferências. Entretanto, o método depende da sincronização de dados de dois terminais que, ao adicionar GPS para aumentar a fidelidade da resposta, inclui uma complexidade extra, cujo método A não possui.

$$d = 0.5 \cdot [\ell + (t_{Ri} - t_{Li}) \cdot v_{p1}] \quad (4)$$

Onde:

- ℓ é o comprimento da linha;
- t_{Ri} é o tempo da onda incidente na outra extremidade da linha;
- t_{Li} é o tempo da onda incidente na primeira extremidade.

É importante destacar que qualquer erro na sincronização do tempo entre os dois terminais pode causar um erro significativo na estimativa da posição da falta. Se o tempo de chegada da onda for medido com um atraso de apenas 1 microsegundo, por exemplo, o erro na posição da falta pode ser de quase 300 metros. Por isso, para garantir precisão,

o ideal é que os dois terminais estejam bem sincronizados, caso contrário, esse erro de sincronização se transfere diretamente para o cálculo da distância.

A velocidade Vp_1 , geralmente, é aproximada pela Equação 5, em que L e C são a indutância e a capacitância da LT por unidade de comprimento, respectivamente (ZANETTA, 2020).

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

É possível ainda inferir da Equação 5 a influência do parâmetro l . Observe que com ele a localização se torna mais precisa, pois leva em consideração o comprimento total da linha entre os dois terminais. Isso é crucial, especialmente em linhas longas, onde a distância real da falta pode ser substancial. De acordo com IEEE (2004), o método D oferece grande precisão independentemente do comprimento da linha, sendo, portanto, bastante confiável quando aplicado a linhas longas.

Outro aspecto importante a ser considerado diz respeito à influência dos parâmetros distribuídos da linha na propagação das ondas. A indutância atua como um atrasador natural da corrente elétrica, pois, ao circular corrente por um condutor, forma-se um campo magnético ao seu redor. Qualquer variação na corrente implica em uma variação nesse campo. Isso causa uma resistência à mudança instantânea, retardando o avanço do sinal de corrente ao longo da linha. Por outro lado, a capacitância afeta mais diretamente os sinais de tensão, uma vez que o campo elétrico entre os condutores reage à presença de variações de potencial, caracterizando um maior acoplamento capacitivo nos modos de tensão.

Dessa forma, se a onda incidente tiver baixa amplitude, há a possibilidade de que, por conta dessas reações indutivas e capacitivas da linha, o sinal sofra atenuações ou distorções, dificultando sua detecção. Isso pode levar a imprecisões nas medições, especialmente se forem utilizados dispositivos comerciais com baixa sensibilidade ou frequência de amostragem limitada, os quais podem sequer identificar a ocorrência do evento.

2.6 Filtro *Differentiator-Smoother* (DS)

O Filtro *Differentiator-Smoother* é uma técnica de processamento de sinais que integra duas funções principais: a diferenciação e a suavização. Inicialmente, o filtro aplica um operador diferenciador ao sinal, o que permite detectar variações rápidas ou mudanças abruptas—essencial para identificar transições, bordas ou eventos pontuais no sinal. Esse filtro tem se mostrado promissor, principalmente porque cria padrões nos sinais de saída que facilitam a análise de OV, mantendo um ganho unitário (SCHWEITZER

et al., 2016).

De acordo com Martins et. al. (2024), o Filtro DS é composto por um filtro analógico de 3ª ordem *Butterworth* passa-baixas, que limita os sinais coletados a uma frequência de 400 kHz. Isso porque, como o processo de diferenciação tende a amplificar o ruído, o filtro inclui, em seguida, um estágio de suavização. Essa etapa utiliza métodos como filtros passa-baixa para reduzir as flutuações indesejadas, garantindo que o sinal processado mantenha as características relevantes sem ser sobrecarregado por ruído.

De acordo com Leme et al. (2013), o filtro diferencial é um método de processamento de sinais que avalia a variação de um sinal ao longo de uma janela de tempo predefinida. Ele atribui coeficientes específicos a cada amostra dentro desse intervalo, permitindo detectar alterações significativas na amplitude do sinal.

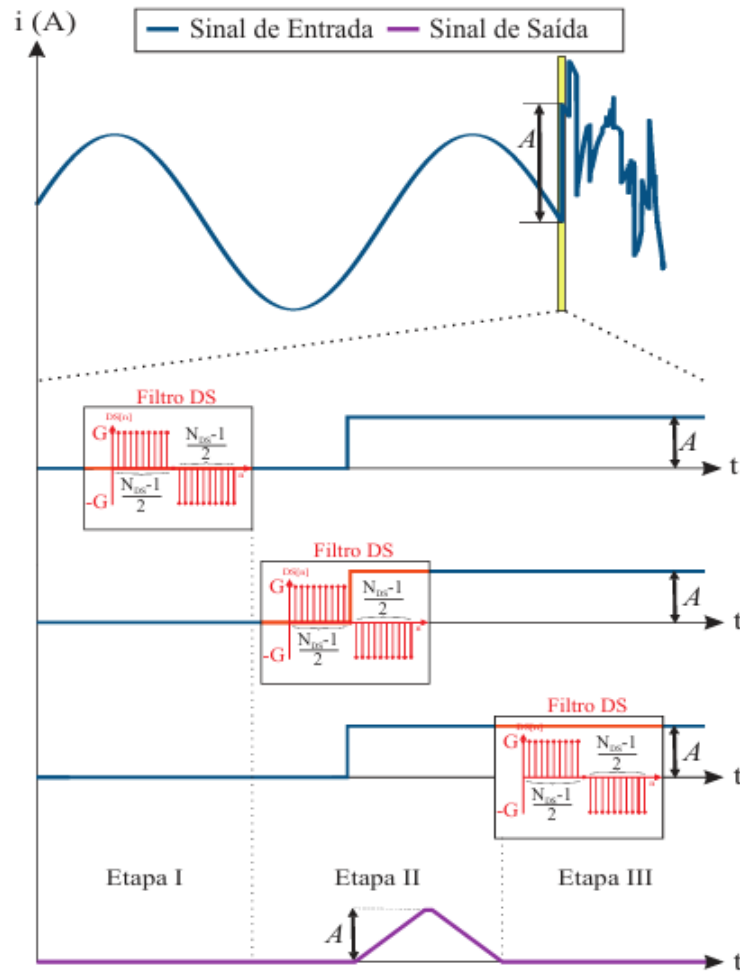
A saída do filtro consiste no produto interno das amostras do sinal e os coeficientes do filtro, de modo que sinais com pequenas variações apresentam saída praticamente nula (HUAMANI, 2019). Esse processo é especialmente útil para identificar eventos súbitos, como picos ou transições abruptas, sendo amplamente aplicado em sistemas de monitoramento, controle e aprimoramento de diagnóstico, onde a detecção rápida de variações é essencial para a tomada de decisões.

De acordo com o estudo de Ribeiro, Lopes e Costa (2018), evidenciado na Figura12, o filtro analisado funciona com uma taxa de amostragem de 1 MHz, ou seja, ele coleta um milhão de pontos por segundo, permitindo identificar oscilações em frequências estritamente menores que 500 kHz, conforme o critério de Nyquist. Além disso, ele trabalha com uma janela de 21 amostras para realizar suas análises. Isso significa que a cada instante, ele utiliza os 21 pontos mais recentes do sinal elétrico para gerar uma saída filtrada.

O funcionamento do filtro pode ser dividido em três etapas principais. Na primeira, antes de qualquer variação brusca no sinal, a saída do filtro permanece próxima de zero, pois ele está analisando apenas os componentes normais do sistema elétrico. Na segunda etapa, quando ocorre uma mudança repentina no sinal, conhecida como degrau, o filtro reage rapidamente e gera um pico na saída, indicando essa variação. Já na terceira etapa, quando o sinal estabiliza novamente, a saída do filtro retorna a valores próximos de zero. O filtro diferenciador responde a uma mudança de degrau ideal com uma saída em forma de triângulo, que responde a uma transição de rampa entre dois níveis com uma saída em forma de parábola (SCHWEITZER et al., 2016).

De acordo com Lopes et al. (2018), sabendo que a saída do filtro DS é o resultado do produto interno entre as amostras do sinal de entrada e os coeficientes do filtro, para cada estágio representado pelas Equações 6, 7 e 8, respectivamente, configuram a modelagem do filtro DS para as etapas I, II e III.

Figura 12 – Processo de Filtragem do Filtro DS.



Fonte: (Ribeiro et. al, 2019).

$$i_{DS} = \frac{NDS - 1}{2} G \cdot 0 + \frac{NDS - 1}{2} (-G) \cdot 0 = 0 \quad (6)$$

$$i_{DS} = \frac{NDS - 1}{2} G \cdot A + \frac{NDS - 1}{2} (-G) \cdot 0 = A \quad (7)$$

$$i_{DS} = \frac{NDS - 1}{2} G \cdot A + \frac{NDS - 1}{2} (-G) \cdot A = 0 \quad (8)$$

Onde:

- i_{DS} – Saída do filtro DS. Representa o resultado do processamento das amostras do sinal com os coeficientes do filtro;
- NDS – Número de amostras da janela. Define o tamanho da janela de amostragem utilizada pelo filtro;

- G – Coeficiente (ganho) do filtro aplicado às amostras do sinal para gerar o efeito diferenciador;
- A – Representa o valor do sinal em determinado instante, utilizado para ilustrar transições como degraus ou rampas.

Esse comportamento faz com que o filtro seja eficiente na identificação de mudanças rápidas nos sinais elétricos, sendo uma ferramenta importante para a proteção do sistema, pois permite detectar oscilações transitórias e outros eventos que podem comprometer a estabilidade da rede. Esta técnica de filtragem destacou-se por estar embarcada em um relé de proteção com funções aplicadas no domínio do tempo (RIBEIRO; LOPES; COSTA, 2018).

O filtro DS, entretanto, não é capaz de diferenciar uma perturbação ocasionada por ruído, alterações de carregamento, perda de um bloco gerador, dentre outros fatores. O seu objetivo é detectar variações abruptas no sistema, comparando um conjunto de amostras anteriores e posteriores a um instante central. Para classificar o tipo de evento, seria necessário combinar o DS com outras técnicas de classificação, como aquelas que conseguem comparar a forma, duração e frequência do sinal antes e depois do evento, permitindo distinguir melhor se foi uma falta, chaveamento ou descarga atmosférica. Portanto, o DS não foi desenvolvido para fazer diagnóstico ou classificação de eventos, mas sim para detectar quando algo muda repentinamente no sinal, sem se preocupar com o que causou essa mudança.

Outro ponto a ser considerado é que, atualmente, os dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) utilizados em subestações elétricas operam com taxas de amostragem que variam conforme a aplicação específica. Para funções básicas de proteção e monitoramento, é comum que os IEDs utilizem uma taxa de amostragem de 80 amostras por ciclo, o que corresponde a 4 kHz em sistemas de 50 Hz. Em aplicações que exigem maior resolução, como análise de qualidade de energia e registros de distúrbios, taxas de amostragem mais elevadas, como 256 amostras por ciclo (12,8 kHz), podem ser empregadas (STARCK; HAKALA-RANTA; STEFANKA, 2021).

Para dispositivos de 10KHz, por exemplo, significa que a cada 100 microsegundos, uma nova amostra é registrada. No entanto, para detectar corretamente a frente de onda que surge com a falta, é necessário ter uma resolução temporal muito mais alta, geralmente em torno de 1 a 5 MHz, ou seja, uma amostra a cada 0,2 a 1 microsegundo. Neste caso, se o filtro DS for aplicado a estes dispositivos comerciais de baixa frequência, a frente de onda pode nem ser registrada, perdendo sua característica de degrau. Isso compromete a aplicação do filtro e, por consequência, a estimativa da posição da falta.

Por outro lado, é possível aplicar este modelo, mesmo com taxas de amostragem

mais baixas em sistemas que não necessitam de localizações ultraprecisas, como em zonas rurais ou linhas com topologia conhecida. Entretanto, é preciso considerar uma margem de erro maior e um tempo superior para detecção da frente de onda. Além disso, existem locais onde o foco pode ser mais em saber o trecho afetado do que a posição exata em quilômetros, assim o uso do filtro DS com taxa menor também pode ser útil.

Por fim, outra realidade a ser considerada no método é que em linhas muito longas em que haja dispersão e múltiplas reflexões, pode tornar mais complexa a interpretação do sinal. Se, por exemplo, as reflexões forem de baixa amplitude, podem ser confundidas com a própria frente de onda ou mascarar o sinal principal.

REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Teoria das Ondas Viajantes

Nos últimos anos, diversas técnicas de análise de detecção de faltas foram desenvolvidas. A partir da década de 1950, métodos alternativos para localização de faltas utilizando OV's foram adotadas. Naquela época, os sistemas de ondas viajantes já forneciam melhor precisão sendo mais atraentes do que qualquer outro disponível (SAHA, 2010). Atualmente, com a evolução desta técnica, o método das OV's tornou-se o mais utilizado para localização de faltas em LT, principalmente nas linhas subterrâneas, sendo irrestrita e adequada para circuitos complexos (JIN et al., 2024).

De acordo com o número de terminais de medição, o método das OV's pode ser classificado como de um ou dois terminais. A análise por um único terminal não possui a necessidade de um sistema de comunicação e sincronização de dados. Entretanto, existe uma área de medição sem resposta, e a reflexão de ondas viajantes transitórias em múltiplas conexões pode dificultar a detecção das ondas refletidas. Dessa forma, os métodos de dois terminais tornaram-se mais difundidos por serem mais robustos e mais precisos, usando apenas os primeiros dados da frente de onda de ambas as extremidades (SAHA, 2010).

Schweitzer et al. (2016) determinou um método para localização de faltas em LT utilizando a análise das ondas sem a necessidade de configurar a velocidade de propagação ou sincronização entre os pontos da linha. A técnica se baseou na detecção dos tempos de reflexão e transmissão das ondas, o que permitiu calcular a posição da falta de forma mais simples e eficiente. No entanto, o método também apresentava limitações. A principal delas era a dependência da reflexão das ondas, que pode ser atenuada ou inexistente

em faltas específicas, como as sólidas trifásicas ou quando os condutores se rompem, impedindo que a onda refletida chegue ao ponto de medição. Essas condições, portanto, podem comprometer a precisão da localização da falta.

O trabalho de Lopes (2016), baseado em Liu, Duan e Cai (2011), propôs um novo algoritmo para localização de faltas à terra usando dois terminais. O método se destacou por operar com dados não sincronizados e por não exigir informações sobre os parâmetros da linha, como as velocidades de propagação e comprimento da linha, que geralmente são imprecisos nos métodos tradicionais. A abordagem dividiu as ondas em modos aéreo e terrestre, analisando apenas as ondas incidentes em cada extremidade da linha. Assim, permitiu uma localização mais simples e confiável, independentemente da sincronização de dados. Apesar dessas vantagens, o algoritmo ainda enfrentou dificuldades em situações de faltas próximas devido à necessidade de altas taxas de amostragem para capturar as ondas com precisão. Entretanto, da mesma forma que em Liu, Duan e Cai (2011), Lopes (2016) foi limitado a análises de faltas à terra. Além disso, o método assumiu que a velocidade dos sinais elétricos é constante em toda a linha: tanto a velocidade do modo aéreo quanto a do modo terra. Essa suposição é aceitável para o sinal aéreo, mas não para o sinal terrestre, que pode variar, principalmente em linhas longas, devido a maior perda e dispersão (LOPES et al., 2021). Dessa forma, embora o método funcione bem em linhas curtas, ele pode gerar erros significativos na localização de faltas em linhas muito extensas.

Lopes et al. (2018) desenvolveram um novo algoritmo para superar os desafios encontrados no trabalho de (LOPES, 2016). O método garante medições de ondas viajantes em ambos os terminais da linha – sem necessidade de ajustes ou sincronização de dados. Esse método calculou a posição da falta apenas pela diferença de tempo entre a primeira onda incidente e a onda refletida que retorna do ponto de falta, dispensando informações sobre parâmetros da linha, como comprimento e velocidade de propagação dos sinais. Testes em simulações com uma linha típica de 500 kV e 200 m demonstraram que o algoritmo é preciso e confiável, mesmo quando houve erros na sincronização dos dados ou incertezas nos parâmetros elétricos da linha.

Naidu e Pradhan (2019) apresentaram uma nova técnica para identificar onde ocorre uma falta, utilizando medições de corrente feitas em ambos os terminais, sem precisar de dados sincronizados via GPS. O método comparou os instantes em que os primeiros picos das ondas viajantes chegaram aos dispositivos instalados em cada extremidade da linha. A partir dessa diferença de tempo, o algoritmo calculou duas possíveis posições para a falta e, com base na forma como o sinal se comporta, identificou corretamente qual dos dois pontos correspondeu à localização real da falta. A abordagem também não envolveu comprimento e velocidades de propagação dos sinais. Os testes foram realizados em simulações de uma linha típica de 220 kV, alcançando alta precisão

mesmo quando houve erros de sincronização e atrasos assimétricos no processamento dos dados. Entretanto, um desafio significativo dessa técnica é a necessidade de altas taxas de amostragem para capturar com exatidão os rápidos picos das ondas viajantes. Isso significa que, embora o método seja promissor em termos de simplicidade e robustez, sua implementação prática pode ser dificultada por limitações dos sistemas de medição e processamento dos sinais.

No artigo intitulado *Past, Present, and Future Trends of Traveling Wave-Based Fault Location Solutions* de (LOPES et al., 2021) foi verificada uma análise sobre métodos tradicionais e modernos de detecção de faltas em LT aéreas. No estudo foi relatado que os métodos de um e dois terminais são os mais utilizados, devido à precisão e ausência de necessidade de geração de pulsos para localizar a falta. Entretanto, retornando à literatura, perceberam que as técnicas mais utilizadas ainda são dependentes dos parâmetros da linha e esse fator contribui para a inserção de erros no resultado de localização da falta.

Oliveira, Moreira e Picanço (2023) investigam a aplicação das técnicas de Decomposição em Modos Variacionais (VMD) e Decomposição em Modos Empíricos (EMD), associadas ao Operador de Energia de Teager (TEO), para localização de faltas em linhas de transmissão com base na teoria das ondas viajantes. A modelagem e análise foram desenvolvidas para um sistema teste no MATLAB/Simulink[®], composto por uma linha de 200 km conectada a fontes equivalentes de Thévenin. Foram simuladas faltas em diferentes pontos da linha, variando o ângulo de incidência e a taxa de amostragem. Os resultados demonstraram que a VMD aplicada aos sinais de tensão apresentou a maior precisão, reduzindo o erro percentual médio para 0,009% com uma taxa de amostragem de 2 MHz, embora com maior custo computacional em relação ao EMD. A localização da falta foi determinada a partir da diferença de tempo entre as ondas nos terminais, utilizando a equação da teoria das ondas viajantes. O estudo foi importante para validar a precisão dos métodos propostos e demonstrar sua aplicabilidade prática. A pesquisa conclui que, enquanto a VMD oferece maior precisão, a EMD surge como uma alternativa viável para aplicações com restrições computacionais, permitindo um equilíbrio entre desempenho e viabilidade prática.

Assim, como forma de melhorar a visualização do estado da arte dos trabalhos citados acerca da Teoria das Ondas Viajantes, segue a Tabela 2 com o resumo descrito.

Tabela 2 – Resumo dos métodos de localização de faltas.

Autor	Objetivo	Principais Resultados
Schweitzer (2016)	Desenvolver método baseado na análise de ondas sem necessidade de velocidade de propagação ou sincronização.	Método mais simples e eficiente, mas dependente da reflexão, o que limita sua precisão em alguns tipos de faltas.
Lopes et al. (2016)	Propor algoritmo de dois terminais sem necessidade de sincronização e sem dependência dos parâmetros da linha.	Método funciona bem para faltas à terra, mas pode gerar erros em linhas longas devido à variação da velocidade do sinal.
Lopes et al. (2018)	Melhorar o algoritmo anterior, garantindo medições confiáveis sem ajustes ou sincronização de dados.	Algoritmo preciso e confiável mesmo com erros de sincronização, validado em simulações de 500 kV.
Naidu et al. (2019)	Desenvolver técnica baseada na comparação de picos de ondas sem necessidade de GPS.	Método alcançou alta precisão em testes, mas exige altas taxas de amostragem para capturar os sinais.
Lopes et al. (2021)	Revisão dos métodos tradicionais e modernos de localização de faltas em LT aéreas.	Técnicas mais utilizadas ainda dependem dos parâmetros da linha, inserindo erros nos resultados.
Oliveira et al. (2023)	Aplicação de EMD e VMD combinadas com TEO para localização de faltas.	VMD obteve maior precisão (erro médio de 0,009%) mas com maior custo computacional.

3.2 Técnicas de Processamento de Sinais

Sabendo que o fenômeno de propagação de OV's em LT's tem caráter transitório, para análise de frentes de onda induzidas por faltas, necessita-se de filtros capazes de eliminar componentes de baixa frequência.

Schweitzer et al. (2016) propuseram um método de localização de falta baseado em ondas viajantes utilizando apenas um terminal da linha. A técnica eliminou a necessidade de sincronização de tempo e comunicação entre terminais. Para identificar corretamente as reflexões provenientes da falta, os autores usaram eventos anteriores da rede (como energização e chaveamentos) como referência. O algoritmo aplicou o filtro *Differentiator-Smoother*, que suavizou e diferenciou o sinal de corrente, permitindo estimar com precisão o tempo de chegada da onda. O método localizou a falta com erro inferior a 200 metros e estimou o comprimento da linha com erro menor que 0,3%, sendo validado por dados reais de campo.

Skendzic et al. (2017) apresentaram uma nova lógica de proteção de linha no domínio do tempo baseada em ondas viajantes e quantidades incrementais. Utilizaram o filtro DS para extrair as ondas viajantes com precisão, determinando o tempo de chegada das perturbações em alta resolução. Implementaram os elementos diferenciais (TW87), direcionais (TW32), e de distância (TD21) com tempo de operação inferior a 1 ms, mostrando desempenho superior aos relés convencionais baseados em fasores. O método operou de forma segura e extremamente rápida para a maioria das faltas, e os testes demonstraram localização precisa mesmo em sistemas com diferentes tipos de faltas e pontos na onda.

Ribeiro (2021) propôs uma análise da aplicabilidade do filtro DS na identificação de faltas baseada no método das OV's. Os autores propuseram como objetivo identificar e analisar OV's incidentes e refletidas causadas por faltas, aplicando esse método em cenários reais. A pesquisa também foi validada por meio de simulações realizadas no software *ATPDraw*. Os resultados mostraram que o filtro DS é promissor para aplicações em proteção e localização de faltas, destacando-se pela capacidade de gerar uma saída triangular com ganho unitário, o que facilita a estimativa do instante de incidência das OV's. O trabalho também discutiu a importância do ajuste correto do ganho do filtro para garantir seu desempenho.

Martins, Lemos e Almeida (2024) avaliaram diferentes técnicas de localização de faltas em linhas de transmissão baseadas na teoria das ondas viajantes, comparando o desempenho do filtro *Differentiator-Smoother*, empregado em equipamentos comerciais como o relé SEL-T400L, com duas abordagens baseadas na Transformada Wavelet: a Transformada Discreta de Wavelet (TDW) e a Transformada Discreta de Wavelet com Sobreamostragem (MODWT). A metodologia incluiu a modelagem de uma linha de

transmissão no software *ATPDraw* e a simulação de curtos-circuitos para obtenção dos dados, processados posteriormente no MATLAB®. Os principais resultados mostraram que as três técnicas apresentaram desempenhos semelhantes, com erros de estimativa variando entre 5,97% e 9,84%, dependendo da posição da falta simulada. Apesar das semelhanças nos resultados, o estudo destaca que o filtro DS apresenta vantagem por fornecer saídas diretamente relacionadas à variação do sinal, enquanto as transformadas wavelet são mais dependentes da escolha da wavelet mãe. A conclusão ressalta que ambas as abordagens são eficazes para detecção de transitórios e localização de faltas, mas o filtro DS possui características que o tornam atrativo para aplicações práticas em sistemas de proteção no domínio do tempo.

A Tabela 3 apresenta o resumo comparativo entre os trabalhos analisados acerca das técnicas de processamento de sinais que auxiliam na localização precisa de faltas na LT.

Tabela 3 – Resumo dos métodos de processamento de sinais.

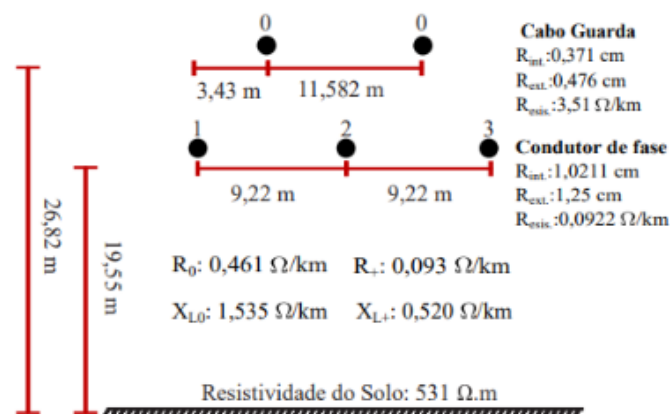
Autor	Objetivo	Principais Resultados
Schweitzer et al. (2016)	Utilizar DS em um método de localização de faltas por OVs com apenas um terminal.	Localizou faltas com erro inferior a 200 m e estimou o comprimento da linha com erro menor que 0,3%, validado em campo.
Skendzic et al. (2017)	Implementar proteção no domínio do tempo com base em OVs e quantidades incrementais.	Usou o DS para extrair OVs com precisão; relés TW87, TW32 e TD21 operaram em menos de 1 ms com alta confiabilidade.
Lopes et al. (2021)	Aplicar o filtro <i>Differentiator-Smoother</i> na identificação de ondas viajantes para localização de faltas.	O filtro gerou resposta triangular com ganho unitário e mostrou boa precisão na identificação do tempo de chegada das OVs.
Martins et al. (2024)	Comparar DS com técnicas baseadas em Transformada de Wavelet (TDW e MODWT) para localização de faltas.	DS foi mais robusto e mostrou resposta direta ao sinal, enquanto TDW e MODWT tiveram maior complexidade.

METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 Sistema Teste Estudado

Neste trabalho, realiza-se a localização de faltas em linhas de transmissão baseada na teoria das ondas viajantes, considerando modelos que independem dos parâmetros elétricos da linha (velocidade de propagação), adotando modelos da literatura e aplicando o filtro DS para a extração dos dados característicos do sinal e melhorar a estimativa do local de ocorrência da falta. O sistema teste estudado consiste em uma LT longa de 210 km, idealmente transposta, com resistividade do solo igual a $531 \Omega \cdot m$, operando com tensão de 230 kV e em 60 Hz. O sistema foi simulado considerando os dados do cabo (resistência e raio), da torre e da LT representados pela Figura 13.

Figura 13 – Configuração de torre típica da LT avaliada.



Fonte: (RIBEIRO et al., 2020).

A Tabela 4 representa os respectivos equivalentes de Thevenin para as fontes M e

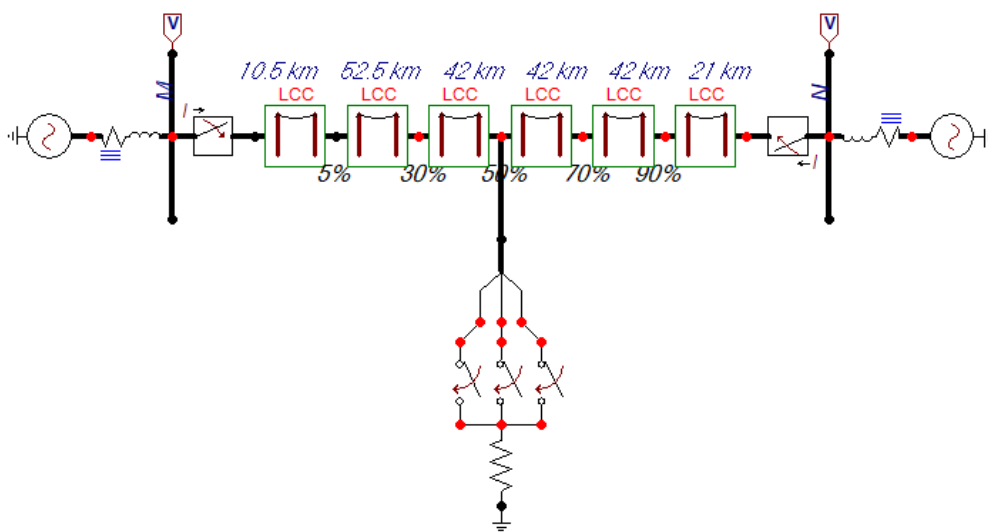
N adotados no contexto da análise de faltas. Cada fonte é modelada por uma tensão em pu e pelas impedâncias de sequência zero (Z_0) e sequência positiva (Z_1). É importante destacar que as fontes representam os terminais de envio e recepção da energia elétrica na linha de transmissão.

Tabela 4 – Parâmetros das fontes M e N.

Parâmetro	Fonte M	Fonte N
Tensão (\hat{V})	$1,02\angle 0^\circ$ pu	$0,98\angle 10^\circ$ pu
Impedância de sequência zero (Z_0)	$1,014 + j18,754 \Omega$	$1,127 + j20,838 \Omega$
Impedância de sequência positiva (Z_1)	$0,871 + j25,661 \Omega$	$0,968 + j28,513 \Omega$

A modelagem da linha de transmissão, ilustrada pela Figura 14, foi realizada com base em uma linha composta por sete seções equivalentes, possibilitando simular com maior fidelidade os efeitos da propagação de ondas. A linha possui 210 km de extensão total, sendo segmentada proporcionalmente para representar diferentes pontos de ocorrência de faltas, situadas a 5%, 30%, 50%, 70% e 90% do comprimento da mesma. Essa segmentação permite avaliar o desempenho do método proposto para localização de faltas em diferentes posições ao longo do trecho. Cada percentual indicado no modelo refere-se ao local de ocorrência de falta na LT. Isto é, 5% da LT corresponde aos primeiros 10,5 km de um total de 210 km de extensão da linha. Além disso, o sistema foi implementado no software *ATPDraw*, o que garante robustez na simulação das respostas do sistema diante de perturbações.

Figura 14 – Modelagem da LT do sistema teste em uma linha idealmente transposta.



Fonte: Autoria própria.

A aplicação da falta no sistema modelado é realizada por meio de um componente de conexão trifásico inserido entre dois blocos LCC da linha de transmissão. Essa estrutura

representa o ponto de inserção da falta, e foi configurada de forma a permitir a variação da localização por meio da troca do nó de conexão entre os trechos da linha. Em cada fase da conexão, foi incluído um dispositivo de chaveamento controlado, responsável por definir o instante de incidência da falta, diretamente associado ao ângulo de incidência utilizado no cenário. Além disso, em série com cada chave, foi inserida uma resistência variável, ajustável de acordo com os valores pré-estabelecidos de resistência de falta considerados nas simulações.

4.2 Considerações adotadas na análise

A análise do sistema teste consiste em obter sinais de corrente e de tensão em ambos os terminais (M e N) conforme identificados na Figura 2. De acordo com a Tabela 5, os parâmetros utilizados no estudo que influenciam na precisão da localização da falta em uma linha de transmissão de dois terminais são os locais de ocorrência da falta, o ângulo de incidência, a resistência da falta e a frequência de amostragem. Estes casos simulados são para todos os tipos de faltas, considerando A, B e C como as fases e T sendo o terra. No total, foram avaliados 2400 cenários que produziram os sinais de tensão e corrente, para ambos os terminais, para a extração dos dados característicos. Os cenários foram oriundos da análise combinatória das variáveis de estudo apresentadas na Tabela 5. Assim, utilizando os sinais de tensão ou os sinais de corrente para a localização de faltas, contabilizou-se 4800 simulações.

Variáveis de estudo	Valores
Locais de ocorrência	5%, 30%, 50%, 70% e 90%
Ângulo de incidência	0°, 30°, 60°, 90°
Resistência de falta	1 Ω , 50 Ω , 100 Ω , 500 Ω
Frequência de amostragem	200 kHz, 1 MHz, 5 MHz
Tipos de falta	AT, BT, CT, ABT, BCT, ACT, AB, BC, AC, ABC

Tabela 5 – Parâmetros utilizados no estudo

A simulação do sistema de potência foi conduzida por meio do *software* ATPDraw, sendo adotado o modelo de linha de transmissão proposto por J. Marti, amplamente utilizado devido à sua boa precisão na representação de sistemas com linhas transpostas. A linha de transmissão foi configurada com o uso do bloco *Line and Cable Constants* (LCC), no qual foram consideradas características como o efeito pelicular e o agrupamento automático de condutores. Dessa forma, para uma frequência de 1 kHz, a velocidade de propagação da onda é de 296.827 km/s. Os sinais simulados possuem duração total de 100

ms, correspondente a cinco ciclos de 20 ms em frequência de regime permanente de 60 Hz. A janela de dados considerada para análise foi composta por 40 ms antes da incidência da falta e 60 ms após, permitindo capturar o comportamento pré-falta e pós-falta.

Visando uma análise abrangente do desempenho dos modelos propostos, foram gerados 4.800 cenários distintos por meio da combinação automática de parâmetros no *software* ATPDraw a partir de um algoritmo programado no ambiente do MATLAB®. Para isso, foram desenvolvidas rotinas capazes de modificar arquivos .atp de forma automatizada, variando os principais parâmetros que influenciam o comportamento da linha de transmissão durante uma falta. Estes 4.800 cenários utilizaram análise combinatória da estatística para simular todos os cenários possíveis para os sinais de corrente e de tensão, considerando todas as variáveis de estudo indicadas na Tabela 5. Desta forma, combinando os diversos parâmetros entre si para os dois tipos de sinais, obteve-se esse total de cenários um banco de dados próprio.

Para viabilizar a geração em série desses arquivos, seguiu-se o modelo apresentado no trabalho de Vitor (2025), sendo utilizado um arquivo base do ATPDraw (.atp) com marcadores de referência para cada parâmetro. O código em MATLAB®, apresentado no Apêndice A deste trabalho, foi programado para localizar esses pontos no texto do arquivo, sobrescrever os valores de interesse (como local de falta, resistência e ângulo de incidência) e salvar cada nova versão como um arquivo independente. Os arquivos gerados foram organizados em diretórios específicos e executados, criando um banco de dados próprio.

Ao fim da execução, foram obtidos arquivos contendo os dados de saída de tensão e corrente nos dois terminais da linha. Esses dados foram posteriormente processados com o uso do filtro *Differentiator-Smoother* (DS), que permitiu extrair os instantes característicos de chegada das ondas viajantes e, assim, aplicar os modelos de localização baseados na Teoria das Ondas Viajantes.

Para análise dos resultados é imprescindível avaliar o erro percentual da localização de falta, comparando o valor real da distância com o valor simulado computacionalmente. De acordo com (SAHA, 2010), a Equação 9 calcula esse parâmetro para verificar a precisão do sistema.

$$\text{Erro (\%)} = \frac{d_{\text{DS}} - d_{\text{Exata}}}{\ell} \times 100\% \quad (9)$$

Onde:

- ℓ é o comprimento total da linha de transmissão.
- d_{DS} é a distancia estimada, calculada pela aplicação do filtro DS à TOVs.

- d_{Exata} é a distância exata da falta.

4.3 Metodologia proposta para localização de faltas

A detecção de faltas consistirá no monitoramento contínuo dos sinais de corrente e tensão medidos nos terminais durante a operação do sistema elétrico. Esses sinais são avaliados com base em uma característica de referência previamente estabelecida para condições normais de operação. No processo de classificação e localização das faltas, emprega-se a transformação de Clarke, Equação 10, para extrair e analisar informações características dos sinais de corrente e tensão (SCHWEITZER et al., 2014).

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

Em seguida, é feita a detecção da falta, a partir da análise desses sinais em comparação com os padrões normais de operação. Caso seja identificada alguma anormalidade, procede-se à classificação do tipo de falta.

Após a identificação do tipo de falta, aplica-se o filtro *Differentiator-Smoother* aos sinais coletados. Esse filtro tem a função de realçar os instantes em que ocorrem variações bruscas, como as causadas pelas ondas viajantes geradas pela falta. O filtro atua realizando a diferenciação e a suavização dos sinais, facilitando a identificação do instante em que as ondas chegam aos terminais da linha. É importante destacar que o filtro DS é aplicado antes da análise das OV. Sua aplicação foi realizada no MATLAB®, utilizando o janelamento padrão da função nativa da ferramenta.

Com os sinais já filtrados, passa-se para a identificação do tempo de chegada das ondas nos dois terminais. Essa etapa é fundamental, pois o cálculo da localização da falta se baseia na diferença desses tempos.

A estimativa da distância da falta em relação ao terminal monitorado é obtida por meio da teoria de ondas viajantes, utilizando-se o método de dois terminais, conforme descrito na Equação 11.

$$d = \frac{\ell + (t_{11} - t_{21}) \cdot v}{2} \quad (11)$$

Onde:

- v representa a velocidade de propagação da onda viajante na linha;

- ℓ é o comprimento da linha de transmissão;
- t_{11} é o instante em que a primeira onda gerada atinge o terminal M , em segundos;
- t_{21} é o instante em que a primeira onda gerada atinge o terminal N , em segundos.

Lopes et al. (2021) propuseram um trabalho que organizasse alguns modelos que não dependem de um ou outro parâmetro da linha. Neste trabalho, pretende-se realizar a análise dos modelos que independem da velocidade de propagação das ondas viajantes, verificando qual obtém melhor eficiência para o sistema teste que será aplicado para todos os tipos de faltas juntamente com o filtro DS. Os modelos são referenciados pelas Equações 12 e 13.

Gilany et al. (2007) introduziu um novo método para localizar faltas em sistemas de cabos envelhecidos a partir da Equação 12, baseado na transformada Wavelet. Uma das principais vantagens do esquema é sua capacidade de eliminar a influência das variações na velocidade de propagação das ondas viajantes durante o cálculo da localização das faltas. Nesse contexto, o comprimento do cabo é a única constante necessária no esquema proposto. O método se mantém eficaz, mesmo quando as faltas ocorrem muito próximas aos barramentos.

$$\tilde{d} = \frac{\ell}{2} \cdot \frac{(t_{Lr} - t_{Li})}{(t_{Lr} - t_{Li}) + (t_{Ri} - t_{Li})} \quad (12)$$

Onde:

- ℓ = comprimento total da linha de transmissão;
- t_{Li} = instante de chegada da onda incidente (OV_1) no terminal local;
- t_{Lr} = instante de chegada da onda refletida da falta no terminal local;
- t_{Ri} = instante de chegada da onda incidente no terminal remoto.

É importante destacar que a onda envolvida é a onda OV_1 viajante incidente e refletida de modo aéreo e OV_0 é a onda viajante no modo terra.

Lopes (2016) propuseram um método de dois terminais, o qual opera com dados não sincronizados e independe das velocidades de propagação da onda e do comprimento da linha, exposto pela Equação 13.

$$\tilde{d} = \ell \cdot \frac{(t_{Li0} - t_{Li})}{(t_{Li0} - t_{Li}) + (t_{Ri0} - t_{Ri})} \quad (13)$$

Onde:

- t_{Li} = onda OV_1 incidente no terminal local;

- t_{Li0} = onda OV_0 incidente no terminal local;
- t_{Ri} = onda OV_1 incidente no terminal remoto;
- t_{Ri0} = onda OV_0 incidente no terminal remoto.

A Tabela 6 apresenta o resumo dos métodos abordados que independem de parâmetros da linha, como forma de melhorar a comparação entre os mesmos, verificando os pontos principais da pesquisa.

Tabela 6 – Resumo dos métodos alternativos baseados na TOV

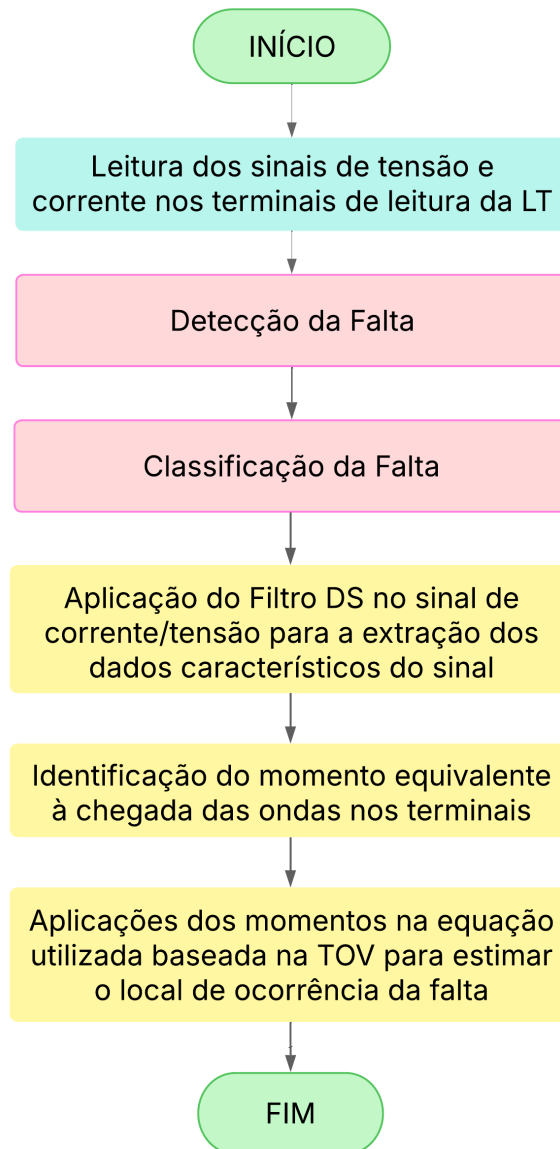
Autor	Formulação	Eq.	Resumo
Gilany et al. (2007)	$\tilde{d} = \frac{\ell}{2} \cdot \frac{(t_{Lr} - t_{Li})}{(t_{Lr} - t_{Li}) + (t_{Ri} - t_{Li})}$	[12]	Método que independe da velocidade de propagação das ondas viajantes.
Lopes (2016)	$\tilde{d} = \ell \cdot \frac{(t_{Li0} - t_{Li})}{(t_{Li0} - t_{Li}) + (t_{Ri0} - t_{Ri})}$	[13]	Método de dois terminais, sem sincronização e independente da velocidade de propagação.

A Figura 15 representa o passo a passo adotado na esquematização do trabalho. Dessa forma, de acordo com o fluxograma, conclui-se que a metodologia utilizada tem como objetivo realizar a localização de faltas em linhas de transmissão de forma precisa, utilizando dados de tensão e corrente obtidos nos dois terminais da linha.

O processo se inicia com a aquisição dos sinais de tensão e corrente nos terminais de medição da LT. Em seguida é feita a detecção da falta a partir da análise desses sinais em comparação com os padrões normais de operação. Caso seja identificada alguma anormalidade, procede-se à classificação do tipo de falta. Após a identificação da falta, aplica-se o filtro DS aos sinais coletados. Sua aplicação é realizada no *software* MATLAB[®], utilizando o janelamento padrão da função nativa da ferramenta. A Figura 16 ilustra a aplicação do filtro DS na localização da falta.

Por conseguinte, com os sinais já filtrados, passa-se à identificação do momento de chegada das ondas viajantes nos dois terminais de leitura da LT. Este momento é identificado a partir do instante correspondente ao módulo do valor máximo do vetor lido em cada terminal, ou seja, identifica-se o ponto de maior amplitude (pico) do sinal resultante da aplicação do filtro DS, que representa a chegada da frente de onda. A diferença entre os tempos de chegada obtidos nos terminais local e remoto é então utilizada para aplicar os modelos de localização.

Por fim, utiliza-se a Equação 4, a qual localiza a falta através do método Tipo D para calcular a distância da falta em relação aos terminais baseada no método clássico da TOV, a qual considera a velocidade de propagação da OV. Além disso, também são

Figura 15 – Metodologia aplicada para localização de faltas.

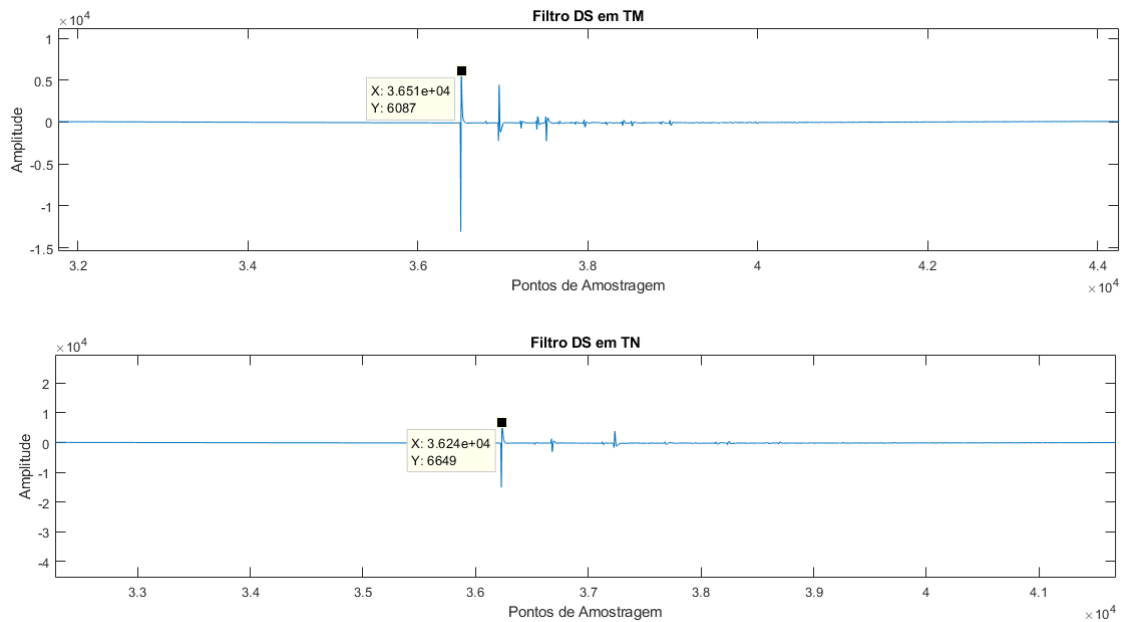
Fonte: Autoria própria.

aplicadas as Equações 12 e 13 que independem da velocidade de propagação da OV, permitindo estimar o ponto exato que ocorreu a falta. É importante destacar que, a velocidade de propagação de uma onda viajante ideal, é aproximadamente 300.000 km/s, que é a velocidade da luz, sendo a mesma uma onda eletromagnética.

A linha de transmissão em estudo possui comprimento total de:

$$L = 210 \times 10^3 \text{ m} \quad (14)$$

A velocidade de propagação da onda eletromagnética ao longo da linha é:

Figura 16 – Aplicação do filtro DS em sinais de tensão de falta AT.

Fonte: Autoria própria.

$$v = 296,827 \times 10^3 \text{ m/s} \quad (15)$$

Após o processamento dos sinais de tensão utilizando o filtro *Differentiator-Smoother*, que permite a identificação precisa da onda viajante, foram determinados os instantes de chegada a partir dos terminais M e N. Os momentos de chegada da onda viajante nos terminais de leitura para a Figura 16 são T_m (para o terminal M) e T_n (para o terminal N), os quais correspondem a $T_m = 0,03651$ e $T_n = 0,03624$.

Com isso, calcula-se a diferença de tempo entre as chegadas das ondas viajantes:

$$\Delta t = t_M - t_N = 0,03651 - 0,03624 = 0,000278 \text{ s} \quad (16)$$

Aplica-se, em seguida, a Equação 5 do modelo clássico da TOV para estimar a posição da falta a partir do terminal M. Substituindo os valores conhecidos em 14, 15 e 16 na Equação 5, obtém-se o resultado descrito 17.

$$d_M = \frac{210000 + 296827 \cdot 0,000278}{2} = 146258,9 \text{ m} \quad (17)$$

Portanto, a localização estimada da falta é:

$$d_M \approx 146,25 \text{ km} \quad (18)$$

Esse resultado pode ser comparado com a posição real da falta, situada a 70% do comprimento da linha:

$$d_{\text{real}} = 0,7 \cdot 210 = 147 \text{ km} \quad (19)$$

Por fim, pode-se calcular o erro percentual através da Equação 9, resultando em uma precisão de aproximadamente 99,64%.

$$\text{Erro \%} = \left(\frac{|147 - 146,25|}{210} \right) \cdot 100 \approx 0,357\% \quad (20)$$

Pode-se determinar a distância da falta em relação ao terminal N de forma análoga ao procedimento realizado para o terminal M.

RESULTADOS

Neste capítulo, o trabalho será dividido em dois estudos de caso. O estudo de caso I se dedicará à análise das variáveis informadas na Tabela 5, utilizando a equação clássica da TOV para Linhas de Transmissão com dois terminais. No *software* MATLAB® foi desenvolvido um algoritmo que faz a atualização do cenário base, a partir do sistema modelado conforme a Figura 14, que foi construído com *software* ATPDraw, em que as variáveis de simulação são alteradas, e, durante a execução, as substituições são realizadas automaticamente criando o banco de dados para estudo. Logo após, o algoritmo que utiliza o modelo da TOV a partir da análise de dois terminais foram utilizados para extração de dados característicos da linha, a fim de encontrar os momentos de chegada das OV's nos terminais.

Primeiramente, foi realizada uma análise comparativa entre os sinais de corrente e os sinais de tensão, de acordo com a Equação 4, a qual calcula o local de ocorrência da falta através do método Tipo D da TOV, verificando quais dados fornecem melhor precisão e maior confiabilidade na localização da falta.

O estudo de caso II realizará uma análise entre os modelos apresentados nas equações 12 e 13, as quais não dependem da velocidade de propagação da onda viajante. A metodologia da análise será análoga à do estudo de caso I.

5.1 Estudo de Caso I: Análise de Sensibilidade para o Modelo Clássico da Teoria das Ondas Viajantes

5.1.1 Análise do Tipo de Falta e Ângulo de Incidência

A Figura 17 apresenta uma análise comparativa do erro percentual na localização de faltas em função do ângulo de incidência da onda para uma frequência de amostragem de 1 MHz, considerando faltas aplicadas a 70% da extensão da linha de transmissão e uma resistência de falta de 100 Ω . Foram avaliadas as faltas AT (fase-terra), AC (fase-fase) e ACT (dupla fases-terra), além da falta trifásica ABC. Para cada tipo de falta, foram testados quatro ângulos de incidência da onda, 0°, 30°, 60° e 90°, utilizando tanto os sinais de tensão quanto de corrente como base de análise.

Observa-se que os erros mais baixos foram obtidos utilizando os sinais de tensão, independentemente do tipo de falta ou ângulo de incidência. Para todos os casos, os erros associados à tensão permaneceram próximos de 0,14%, enquanto os erros com os sinais de corrente ficaram em torno de 0,35%.

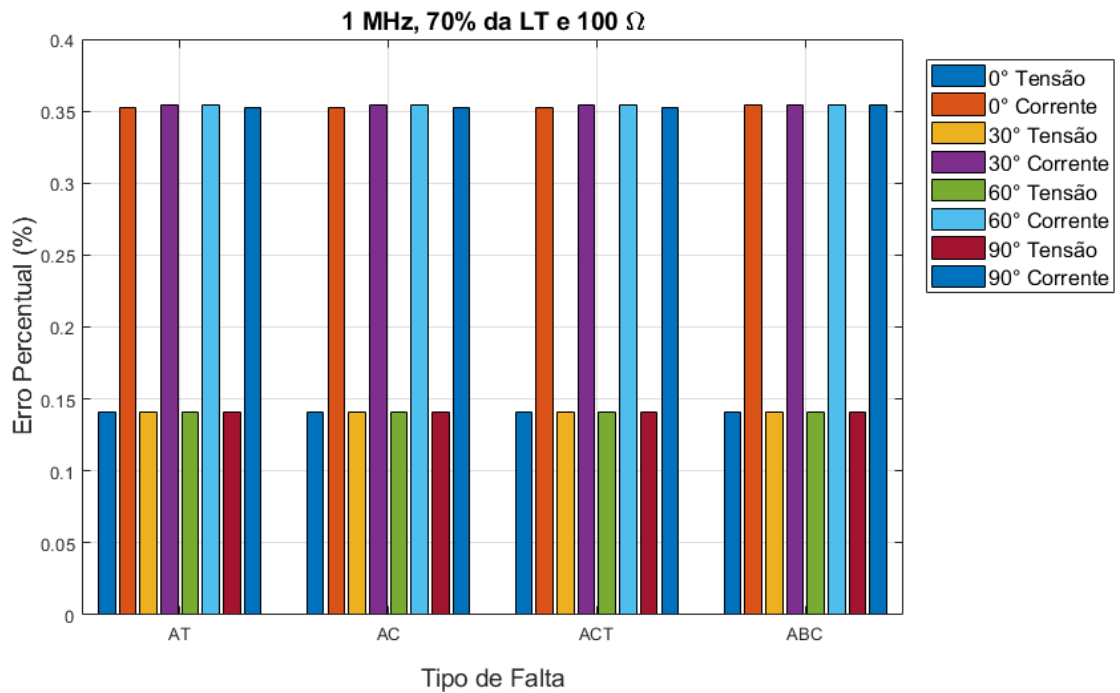
Além disso, é possível perceber que a variação no ângulo de incidência não impacta significativamente os valores de erro, o que demonstra a robustez do método proposto em diferentes condições de incidência da onda.

5.1.2 Análise da Resistência de Falta

A Figura 18 apresenta a variação do erro percentual na localização da falta para diferentes valores de resistência de falta (1 Ω , 50 Ω , 100 Ω e 500 Ω), considerando todos os tipos de falta (AT, AC, ACT e ABC), utilizando apenas o sinal de tensão e uma distância de 70% da linha de transmissão. Foram analisadas três frequências de amostragem distintas: 200 kHz, 1 MHz e 5 MHz. É importante destacar que, para essa análise, considerou-se apenas os dados de tensão, pois além de oferecerem melhor precisão como demonstrado anteriormente, possuem comportamento similar às análises com dados de corrente, porém com menor erro percentual.

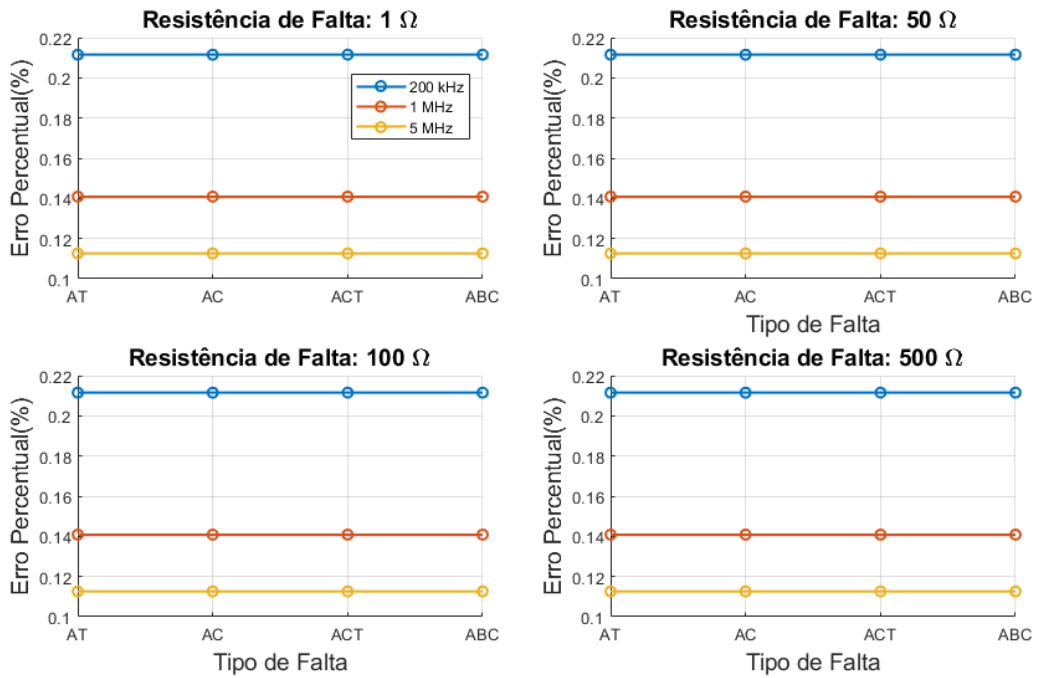
Observa-se que, independentemente do tipo de falta ou valor de resistência adotado, o erro de localização permanece praticamente constante para cada frequência, indicando que a resistência de falta não interfere significativamente na precisão da metodologia. Para 200 kHz, os erros ficam em torno de 0,21%, para 1 MHz em 0,14%, e para 5 MHz, em aproximadamente 0,12%. Esse comportamento demonstra que frequências mais altas proporcionam menor erro, reforçando a eficácia do uso de componentes de alta frequência no processo de localização.

Figura 17 – Análise do erro percentual para os sinais de tensão e corrente para todos os tipos de frequência de amostragem.



Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Análise do erro percentual para os sinais de tensão e corrente para todos os tipos de frequência de amostragem.

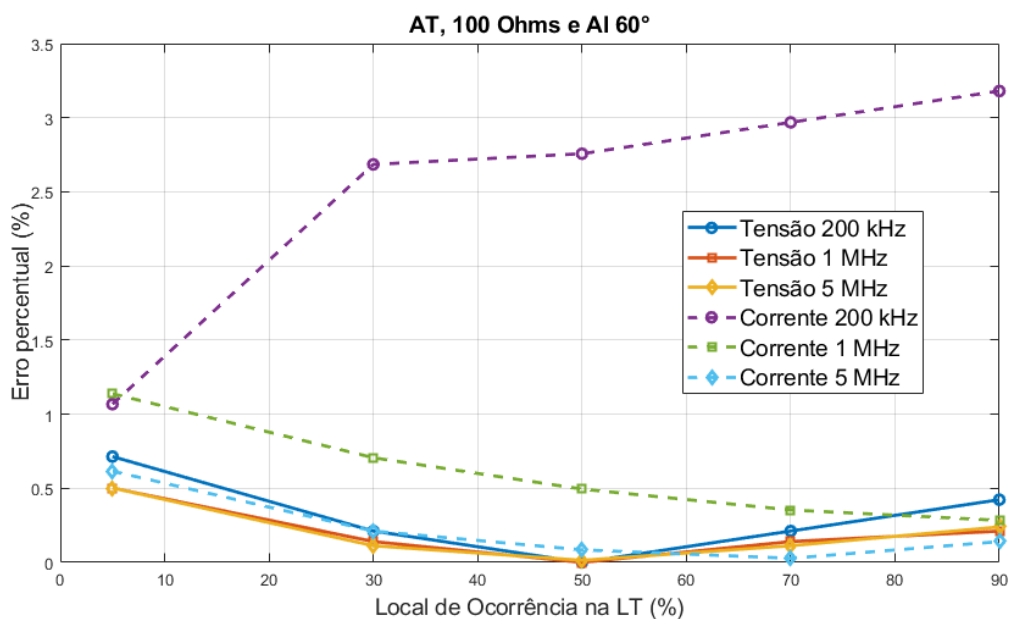


Fonte: Autoria própria.

5.1.3 Análise da Frequência de Amostragem

Ao analisar a Figura 19, observa-se que os maiores percentuais de erro ocorrem quando a falta se dá próxima às extremidades da linha de transmissão (ou seja, próximas aos terminais M e N). Em contrapartida, à medida que a localização da falta se aproxima da região central da LT (em torno de 50%), os erros percentuais diminuem consideravelmente para os sinais de tensão. A análise considerou dados de tensão e corrente para faltas AT, com resistência de falta igual a 100Ω e ângulo de incidência de 60° .

Figura 19 – Análise do erro percentual para os sinais de tensão e corrente para todos os tipos de frequência de amostragem.



Fonte: Autoria própria.

Outro ponto relevante diz respeito ao tipo de sinal utilizado. A Figura 19 mostra que os sinais de corrente resultam em erros percentuais significativamente maiores em comparação aos sinais de tensão, independentemente da frequência de amostragem. Isso indica que os métodos de localização de faltas utilizando os dados de tensão apresentam maior precisão.

Especificamente, nota-se que a maior precisão alcançada com dados de corrente é de aproximadamente 97%, enquanto os dados de tensão atingem até 99% de precisão, evidenciando uma vantagem na escolha do tipo de sinal.

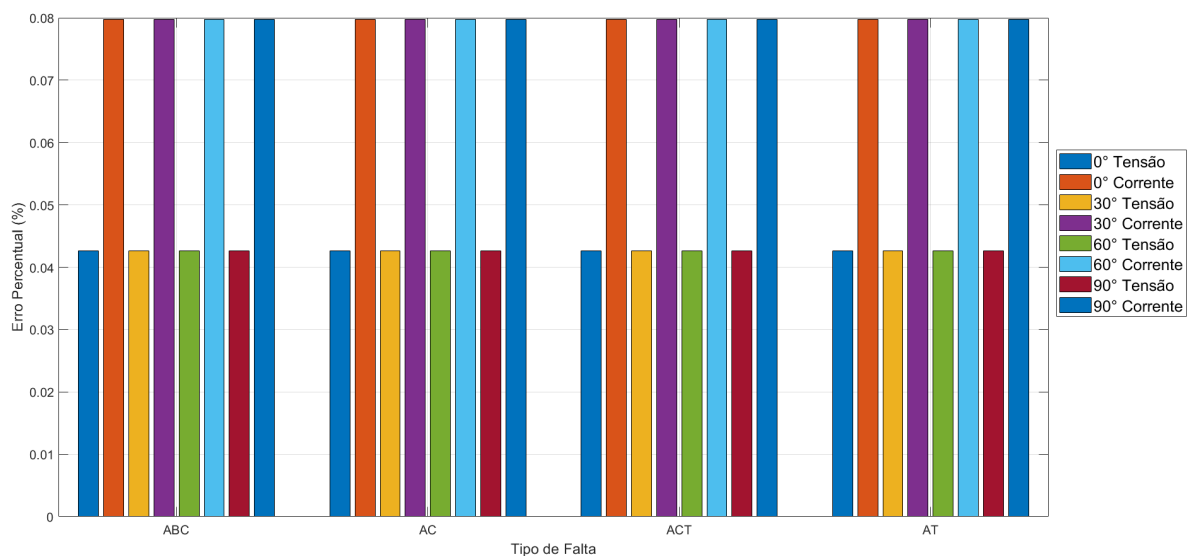
Adicionalmente, a análise mostra que frequências de amostragem mais altas (como 5 MHz) resultam em menores erros percentuais na estimativa da localização da falta, tanto para sinais de tensão quanto de corrente. Isso reforça a importância da utilização de taxas de amostragem elevadas para melhorar o desempenho dos algoritmos de localização.

5.2 Estudo de Caso II: Análise de Sensibilidade para os Modelos

5.2.1 Análise do Tipo de Falta e Ângulo de Incidência

Para a análise realizada, adotou-se a frequência de amostragem de 1 MHz, uma resistência de falta de 100Ω e o local de ocorrência da falta em 30% da extensão da linha de transmissão. Os resultados obtidos a partir do modelo de Gilany et al. (2007), conforme a Equação 12, apresentados na Figura 20, demonstram uma similaridade para os ângulos de incidência estudados nos erros percentuais, tanto para os sinais de tensão quanto para os sinais de corrente. Observou-se que o erro percentual para os sinais de tensão se mantém constante em aproximadamente 0,0426%, enquanto para os sinais de corrente, o erro foi de cerca de 0,0797%. Dessa forma, destaca-se que para sinais de tensão há melhores resultados, nessa situação, bem como observado no estudo de caso I para o método clássico da TOV. Esses valores permaneceram inalterados independentemente do tipo de falta e do tipo de ângulo de incidência, demonstrando a robustez do modelo.

Figura 20 – Análise do erro percentual para os sinais de tensão e corrente para todos os ângulos de incidência para o método de Gilany et al. (2007).

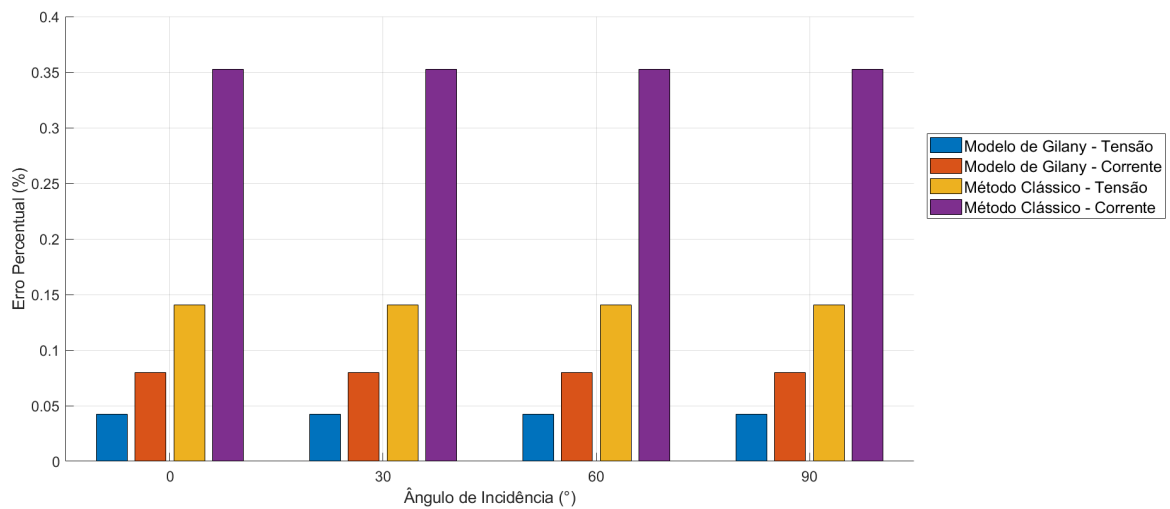


Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 apresenta uma comparação entre o modelo clássico da teoria das ondas viajantes e o modelo de Gilany et al. (2007) considerando os melhores cenários para cada modelo. Para Gilany et al. (2007) e para o método da TOV adotou-se a frequência de amostragem de 1 MHz, uma resistência de falta de 100Ω , porém para Gilany et al. (2007) o local de ocorrência da falta foi a 30% da extensão e para a TOV foi a 70% da LT. No

modelo clássico da TOV, os erros percentuais permanecem constantes com a variação próxima a 0,35% para a corrente e 0,14% para a tensão. Entretanto, o modelo de Gilany et al. (2007) apresenta menores erros em todas as condições analisadas, com valores em torno de 0,04% para tensão e 0,079% para corrente. Essa característica estável reforça a precisão do método, atribuída à sua independência da velocidade de propagação da onda, apresentando resultado superior ao método da TOV para o cenário apresentado.

Figura 21 – Análise comparativa do erro percentual para os sinais de tensão e corrente para todos os ângulos de incidência entre o método clássico da TOV e o modelo de Gilany et al. (2007).



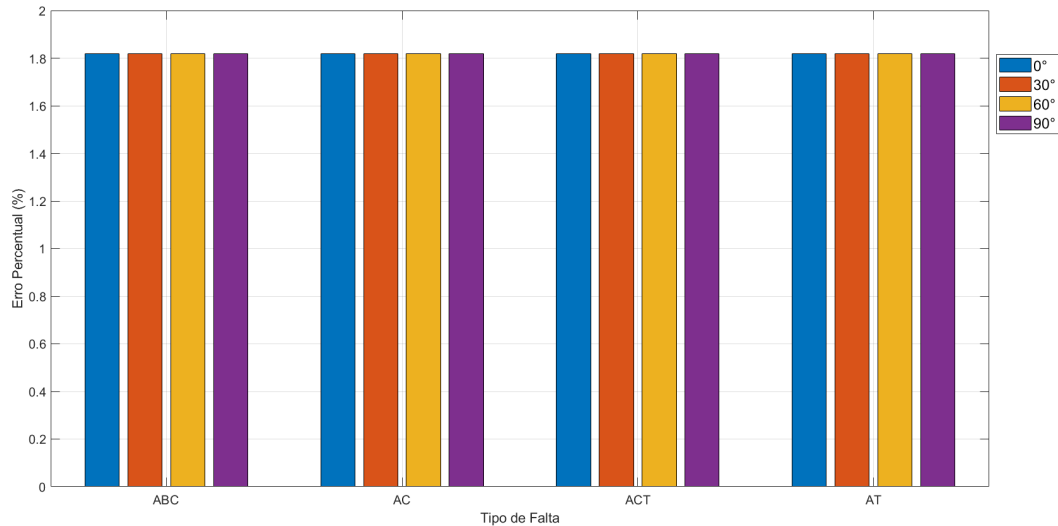
Fonte: Autoria própria.

Para as simulações que investigam a influência do ângulo de incidência na localização da falta a partir do modelo de Lopes (2016), percebeu-se melhores resultados em análises que utilizam os sinais de corrente, apresentando a limitação do modelo para os sinais de tensão. Além disso, o modelo do autor em seu artigo, afirma que as simulações foram realizadas avaliando apenas os sinais de corrente, pois, segundo Lopes (2016), os transformadores de corrente oferecem uma medição mais confiável em uma faixa ampla de frequências, distorcendo menos os sinais do que os transformadores de tensão capacitivos, que são mais sensíveis às mudanças de frequência. Assim, para garantir que os dados usados na simulação representem bem a realidade, o estudo só considerou os modos do sinal de corrente (modos terra e aéreo).

A Figura 22 demonstra que, assim como o método clássico da TOV e o modelo de Gilany et al. (2007), o erro percentual permanece constante em aproximadamente 1,8% no modelo de Lopes (2016). A análise foi reproduzida para as mesmas condições de frequência do modelo de Gilany et al. (2007) no início do estudo de caso II, adotando uma frequência de amostragem de 1 MHz, uma resistência de falta de 100 Ω e o local de

ocorrência da falta em 30% da extensão da linha de transmissão.

Figura 22 – Análise do erro percentual para o sinal de corrente para todos os ângulos de incidência para o modelo de Lopes (2016).



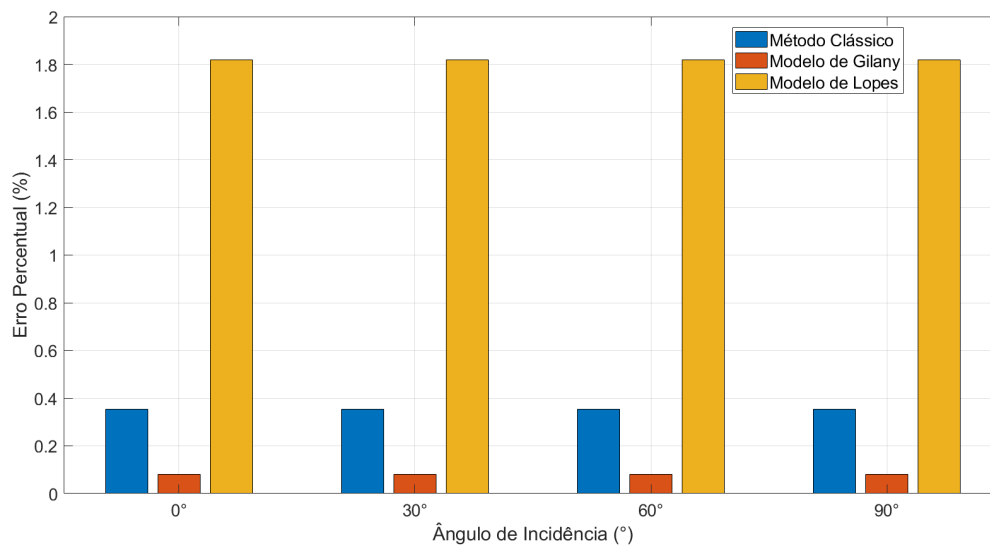
Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 ilustra uma análise comparativa entre os sinais de corrente do método clássico da teoria das ondas viajantes, modelo de Gilany et al. (2007) e modelo de Lopes (2016), considerando uma frequência de amostragem de 1 MHz, uma resistência de falta de 100 Ω e o local de ocorrência da falta em 30% para Lopes (2016) e Gilany et al. (2007), mas 70% para o método da TOV. As análises foram apenas para os sinais de corrente visto que o modelo de Lopes (2016) apresentou certa limitação aos sinais de tensão. A partir da ilustração, é possível observar que para todos os ângulos de incidência avaliados, o modelo proposto por Lopes (2016) apresenta maior erro percentual entre os três estudados.

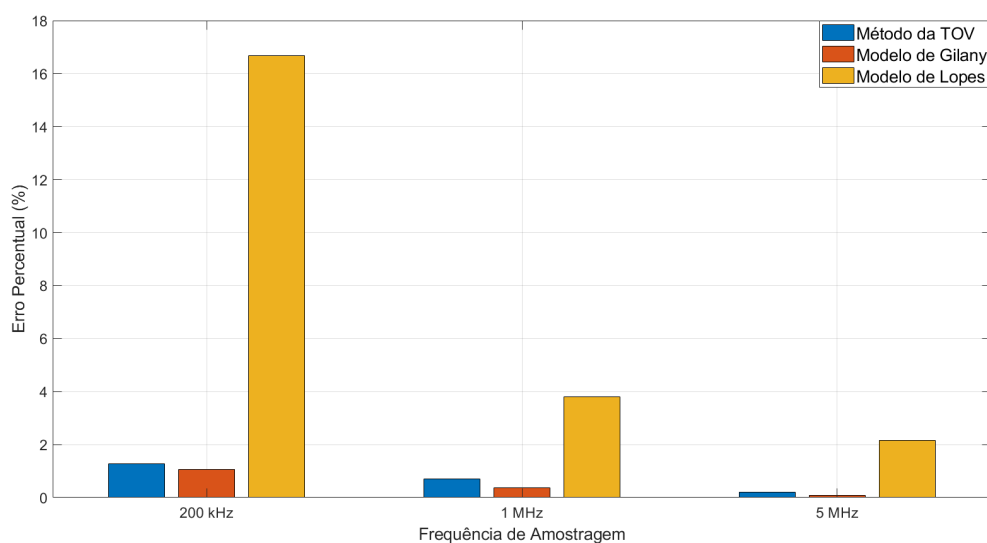
5.2.2 Análise da Resistência de Falta

A Figura 24 ilustra a análise comparativa entre os dois métodos que independem da velocidade de propagação das ondas viajantes e o método clássico da TOV. O sistema foi simulado para uma falta ACT, com um ângulo de incidência de 30°, considerando uma falta que ocorreu a 30% da extensão da LT, com uma resistência de falta igual a 500 Ω , para todas as frequências de amostragens. A análise também foi realizada para as resistências de falta de 1 Ω , 50 Ω e 100 Ω . Entretanto, para todas as variações o comportamento foi o mesmo do ilustrado na Figura 24.

De acordo com a Figura 24, é possível observar que os três métodos não possuem variações significativas para as diferentes resistências de falta, mantendo-se uniformes para todas as condições. Além disso, percebe-se que o erro percentual é reduzido com o

Figura 23 – Análise do erro percentual para o sinal de corrente dos três métodos.

Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Análise comparativa do erro percentual para uma falta ACT, 30°, 30% da LT, considerando resistência de falta de 500 Ω para todas as frequências de amostragens.

Fonte: Autoria própria.

aumento da frequência de amostragem. No método clássico, o erro é de aproximadamente 1,27%, 0,706% e 0,211% para as frequências de amostragens de 200 kHz, 1 MHz e 5 MHz respectivamente. De forma análoga, para o modelo de Gilany et al. (2007) os erros estão em torno de 1,07%, 0,35% e 0,079%, bem como para o modelo de Lopes (2016) são aproximadamente de 16,66%, 3,8% e 2,16%.

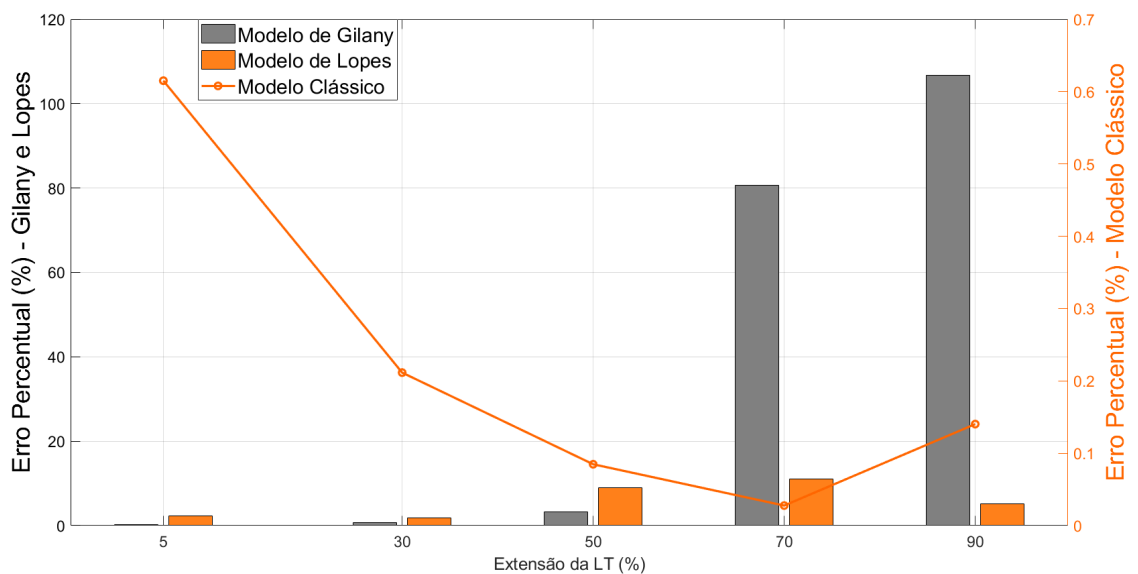
Desta forma, é possível observar que o método de Gilany et al. (2007) é o que apresenta menor erro percentual, embora seu resultado seja bastante próximo àqueles do

método clássico da teoria das ondas viajantes. O modelo de Lopes (2016) possui erros significativos para a frequência de 200 KHz, em comparação às demais técnicas, entretanto é reduzido com o aumento da resolução do filtro DS. Além disso, em seu trabalho, Lopes (2016) propôs um modelo que funciona utilizando dados não sincronizados e que não requer informações sobre os parâmetros da linha, de forma que sua precisão dependa exclusivamente das taxas de amostragem do sistema de aquisição de dados e da precisão dos detectores das OV. Esta análise da frequência de amostragem proposta pelo autor pode ser evidenciada na Figura 24.

5.2.3 Análise da Frequência de Amostragem

A Figura 25 representa a análise comparativa dos três modelos de equações que utilizam a TOV para o sinal de corrente para a localização de faltas ao longo da LT, considerando uma falta monofásica AT, ângulo de incidência de 60° , frequência de amostragem de 5 MHz e uma resistência de falta de 100Ω .

Figura 25 – Análise comparativa do erro percentual ao longo da LT para os três métodos.



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 25, é possível perceber diferenças bem marcantes entre os três modelos ao longo da linha de transmissão. O modelo clássico da TOV apresentou um desempenho bastante estável, mesmo com o aumento da distância da falta em relação à fonte. Os erros se mantiveram sempre abaixo de 1%. Isso mostra que, apesar de ser um modelo mais simples e que depende da velocidade de propagação da onda viajante, ele responde bem tanto para as faltas que ocorrem próximas à fonte (5%) quanto nas regiões mais distantes da linha, como 90%.

Por outro lado, o modelo de Gilany et al. (2007), que em diversas situações se destaca por ser mais elaborado e por não depender da velocidade de propagação da onda viajante, apresentou bons resultados apenas até cerca de 30% da extensão da linha. A partir desse ponto, os erros aumentam de forma acentuada, ultrapassando 100% quando a falta ocorre no final da linha (em 90%). Essa queda de desempenho pode ser entendida com base no próprio artigo de Gilany et al. (2007), no qual o autor propôs a localização da falta considerando cabos envelhecidos conectados em série. No estudo, a linha simulada era composta por dois trechos: o primeiro com 30 km e o segundo, conectado ao primeiro, com 40 km, totalizando uma extensão de 70 km (GILANY; IBRAHIM; ELDIN, 2007).

Já no caso do presente trabalho, a linha de transmissão considerada tem 210 km. Assim, os primeiros 30% da linha representam 63 km, um valor bastante próximo à configuração do modelo original de Gilany et al. (2007). Isso pode explicar por que os melhores resultados do modelo se concentram justamente nessa faixa inicial. Fora desse intervalo, especialmente a partir de 50% da linha (ou seja, a partir de aproximadamente 105 km), a precisão do modelo é reduzida consideravelmente.

Portanto, embora o modelo de Gilany et al. (2007) seja promissor e ofereça bons resultados em trechos mais curtos ou próximos à fonte, ele parece apresentar limitações importantes quando aplicado a linhas de transmissão mais longas, o que poderá ser melhor investigado em trabalhos futuros.

Ao observar o comportamento do modelo de Lopes (2016) no gráfico da Figura 25 gerado para a falta AT, é possível notar um aumento do erro percentual em torno de 70% da linha, seguido de uma redução no final da LT, aos 90%. Esse padrão de oscilação pode ser explicado pela forma como o modelo foi desenvolvido. O modelo de Lopes (2016) se baseia em uma análise de dois terminais o qual assume que as velocidades de propagação dos modos aéreo e terra são uniformes em toda a extensão da linha. Essa hipótese é geralmente válida para o modo aéreo, o qual, segundo os autores, apresentam baixa dispersão e pouca atenuação. Por outro lado, o modo terra, associado à componente simétrica zero das correntes e diretamente envolvido na falta monofásica à terra (AT) analisada aqui, apresenta características bem diferentes. As frentes de onda neste modo tendem a sofrer maior dispersão e atenuação, especialmente em linhas de transmissão longas, como a utilizada neste estudo (com 210 km).

Esse comportamento ajuda a explicar por que o erro aumenta tanto em 70% da linha: nesse ponto intermediário, as distorções acumuladas do modo terra afetam fortemente a estimativa da posição da falta. Portanto, embora o modelo de Lopes (2016) dispense a sincronização de tempo e funcione bem em linhas mais curtas, seu desempenho em linhas longas com faltas à terra para o algoritmo utilizado neste trabalho é limitado justamente por depender da uniformidade do modo terra. Já no final da linha (90%), a redução do erro pode estar associada a uma reflexão clara e mais visível, permitindo

sua detecção. Entretanto, esta característica poderá ser melhor investigada em trabalhos futuros.

Portanto, a Figura 25 mostra que o modelo clássico da teoria das ondas viajantes mesmo sendo mais simples, se mantém mais uniforme e preciso ao longo de toda a linha, independente da sua extensão. Por outro lado, os modelos de Gilany et al. (2007) e Lopes (2016), que possuem abordagens mais alternativas que independem da velocidade de propagação das OV's, apresentam melhores resultados em linhas de transmissão curtas, apresentando maiores erros percentuais a partir de 30% da LT deste trabalho. Isso reforça a ideia de que a escolha do modelo ideal depende não só da teoria envolvida, mas também da análise prática do comportamento em diferentes condições, pois dependendo da situação, os três métodos são promissores.

5.3 Análise do Custo Computacional

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

A Tabela 7 apresenta o custo computacional médio, em segundos, para a localização de faltas do tipo AT, considerando todos os ângulos de incidência, diferentes locais de ocorrência ao longo da linha e três frequências de amostragem distintas: 200 kHz, 1 MHz e 5 MHz.

Tabela 7 – Custo computacional médio para a falta AT.

Sinal	200 kHz	1 MHz	5 MHz
Tensão	0,00040 s	0,00112 s	0,01218 s
Corrente	0,00024 s	0,00094 s	0,00944 s

Os valores refletem o tempo médio necessário para o processamento do sinal de tensão e de corrente, sendo o tempo mais elevado observado para sinais de tensão com frequência de 5 MHz (0,01218 s), seguido por 1 MHz (0,00112 s) e 200 kHz (0,00040 s). Para sinais de corrente, o custo computacional é ligeiramente inferior, com tempos médios de 0,00944 s (5 MHz), 0,00094 s (1 MHz) e 0,00024 s (200 kHz).

Esses resultados indicam que o custo computacional está diretamente relacionado à frequência de amostragem, enquanto a variação no tipo de sinal (tensão ou corrente) também afeta o tempo de processamento, sendo a tensão geralmente mais custosa. No entanto, variações no tipo de falta ou no ângulo de incidência não apresentam influência significativa sobre o custo computacional médio.

5.4 Análise de Dispositivos Comercializados

O artigo de Lopes et al. (2021) apresenta uma pesquisa de campo com profissionais da área, na qual foram citados diversos dispositivos comerciais baseados na teoria das ondas viajantes utilizados em testes de laboratório e aplicações reais. Entre doze modelos mencionados no artigo, destacaram-se os seguintes: GE-RPV-311 (27,92%), SEL-T400L (21,63%), SEL-411L (14,42%) e Siemens TW800 (9,91%). Esses dispositivos estão entre os mais conhecidos no mercado e são projetados para aplicações que exigem alta resolução temporal, como a localização de faltas com base em OV's.

À medida que se aumenta a frequência de amostragem para ganhos de precisão, há um crescimento significativo nos custos associados a *hardware* e *software*. Entre os dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) mais citados em pesquisas e utilizados em campo, destacam-se:

- SEL-T400L – Relé de proteção ultra-rápido com amostragem a 1 MHz, projetado para linhas com detecção por onda viajante de um e dois terminais, aplicável em linhas aéreas e híbridas (Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), 2024a).
- SEL-T401L – Versão aprimorada do T400L, com detecção de OV's em linhas de um e dois terminais, com tempo de atuação de 1 a 5 ms na LT, também operando com 1 MHz. Atualmente, seu custo é de US\$ 19.542 (R\$ 95.700) (Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), 2024b).
- SEL-TWFL – Localizador de faltas por ondas viajantes dedicado, com capacidade de medir 6 correntes e 6 tensões a 1 MHz, apresenta armazenamento amplo para eventos transitórios. Indicado para linhas híbridas ou multiterminais (Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), 2024c).

A partir do avanço de novos algoritmos, esses dispositivos podem ser atualizados para oferecer ainda mais precisão e adaptar-se a diferentes necessidades das redes elétricas. A SEL também destaca a flexibilidade desses dispositivos para diferentes tipos de linha e sua capacidade de melhorar a proteção e a automação do sistema de transmissão. Portanto, a implementação desses equipamentos para localizar faltas por ondas viajantes é não só viável, mas também eficaz, proporcionando uma solução confiável e de alto desempenho.

CONCLUSÃO

6.1 Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo avaliar a sensibilidade de diferentes modelos de localização de faltas em linhas de transmissão baseados na teoria das ondas viajantes, aplicando o Filtro DS, observando a influência de parâmetros como tipo de falta, ângulo de incidência, resistência de falta, frequência de amostragem e posição da falta ao longo da linha. Foram investigados tanto o modelo clássico da TOV quanto os modelos alternativos propostos por Gilany et al. (2007) e por Lopes (2016), considerando sinais de tensão e corrente sob diferentes condições.

No primeiro estudo de caso, voltado exclusivamente para o modelo clássico da TOV, os resultados demonstraram que esse método apresenta desempenho superior em termos de estabilidade e precisão. A variação do ângulo de incidência e da resistência de falta mostrou-se pouco influente nos resultados, independente do tipo de sinal. Entretanto, os sinais de tensão apresentaram, em todas as situações, menores erros percentuais do que os sinais de corrente. A análise revelou ainda que o aumento da frequência de amostragem contribui diretamente para a redução do erro percentual, destacando a importância da resolução temporal no processo de localização. Com taxas de amostragem de 5 MHz, os erros ficaram abaixo de 0,12%, evidenciando a eficácia do método, mesmo dependendo da velocidade de propagação das ondas.

No segundo estudo de caso, foram comparados os três modelos sob condições análogas. O modelo de Gilany et al (2007). apresentou desempenho superior ao da TOV em trechos iniciais da linha para os cenários apresentados, especialmente até 30% de sua extensão. Entretanto, observou-se uma perda significativa de precisão a partir desse ponto,

com erros ultrapassando 100% no final da linha. Essa limitação pode estar relacionada à configuração original proposta por Gilany et al. (2007), que simulava uma linha total de 70 km, valor muito inferior à extensão de 210 km adotada neste trabalho. Com isso, percebe-se que o modelo de Gilany et al. (2007), embora eficiente, é mais adequado para linhas curtas para o algoritmo estudado.

Já o modelo de Lopes (2016) demonstrou um comportamento oscilatório, com maior erro em trechos intermediários da linha e uma melhora no final (em 90% da extensão). Esse padrão está relacionado à fixação dos valores das velocidades de propagação da onda tanto para o modo aéreo quanto para o modo terra, o qual sofre maior dispersão e atenuação ao longo da linha. A partir da análise da falta tipo AT (fase-terra), essa limitação do modelo ficou evidente.

Ao analisar a evolução do erro ao longo da linha, ficou evidente que o modelo clássico, apresentou resultados superiores para linhas longas. Já os modelos alternativos, embora independentes da velocidade de propagação, demonstraram limitações em aplicações com extensões maiores.

Outro aspecto relevante considerado foi o custo computacional envolvido nas simulações. Os resultados apontam que o tempo de processamento cresce com o aumento da frequência, sendo mais elevado para sinais de tensão com 5 MHz (0,01218 s). Em comparação, o custo computacional para sinais de corrente foi ligeiramente inferior, com 0,00944 s para a mesma frequência de amostragem. Esses dados mostram que, embora a adoção de frequências mais altas traga ganhos significativos de precisão na localização de faltas, também acarreta aumento no tempo de processamento e na exigência de recursos computacionais.

Portanto, a escolha do modelo mais adequado para localização de faltas deve levar em conta não apenas a precisão teórica, mas também fatores como extensão da linha, tipo de sinal disponível (tensão ou corrente), infraestrutura do sistema de medição, custo de implementação e viabilidade computacional. Em muitos casos, o modelo clássico ainda se mostra uma solução viável e eficaz, especialmente quando associado a altas taxas de amostragem e sinais de tensão. Já os modelos de Gilany et al. (2007) e Lopes (2016) podem ser vantajosos em contextos específicos, especialmente em linhas curtas ou em ambientes com limitações operacionais, desde que suas particularidades e demandas computacionais sejam bem compreendidas.

6.2 Trabalhos Futuros

A análise apresentada neste trabalho evidencia o potencial dos modelos baseados na Teoria das Ondas Viajantes na localização de faltas em linhas de transmissão, especial-

mente os métodos que não dependem dos parâmetros elétricos da linha, como a velocidade de propagação das ondas. No entanto, diversas possibilidades de aprofundamento podem ser exploradas em estudos futuros.

Inicialmente, sugere-se a aplicação desses modelos alternativos a diferentes topologias de rede e configurações de linhas de transmissão, incluindo LTs não transpostas, subterrâneas e com diferentes níveis de envelhecimento dos cabos. Essa abordagem pode avaliar a robustez dos métodos, especialmente o modelo de Gilany et al. (2007), frente a situações práticas mais complexas do que as simuladas neste trabalho (GILANY; IBRAHIM; ELDIN, 2007).

Além disso, é pertinente a integração de novas técnicas de Processamento Digital de Sinais, como transformadas Wavelet, decomposição em modos empíricos e algoritmos de inteligência artificial, que podem complementar o filtro *Differentiator-Smoother* utilizado neste estudo. Essas técnicas podem oferecer melhores formas de extração de características e classificação de eventos, aumentando a confiabilidade na identificação do momento de chegada da onda viajante para a simulação dos modelos.

Outro aspecto relevante é a análise da sensibilidade dos métodos quanto à qualidade dos dados de entrada. A presença de ruídos, a precisão dos sensores e o sincronismo entre terminais são fatores que podem impactar significativamente a exatidão da localização. Dessa forma, pode ser necessário avaliar um tratamento de dados de forma mais específica e minuciosa para análises futuras.

Também se recomenda investigar a necessidade de parametrização dos modelos, como valores de resistências, indutâncias, comprimentos e configurações de rede. Embora alguns métodos afirmem independência desses parâmetros, na prática, variações podem surgir devido a heterogeneidades nos sistemas físicos, tornando necessário o ajuste fino dos algoritmos para diferentes aplicações.

O trabalho de (LOPES et al., 2021) inclui seis modelos que independem de um ou outro parâmetro da linha. Neste estudo, foram avaliados dois modelos que independem da velocidade de propagação da onda, podendo ser analisado em pesquisas posteriores os outros quatro que, embora dependem da velocidade, apresentam outras alternativas ao método clássico da TOV.

Por fim, uma linha promissora para trabalhos futuros consiste na avaliação do desempenho computacional dos modelos em plataformas embarcadas ou integradas a dispositivos comerciais de proteção, como os IEDs de alta resolução (por exemplo, SEL-T401L, SEL-T400L e SEL-TWFL). Com o avanço dos relés digitais com amostragem em megahertz, torna-se essencial verificar se os algoritmos implementados podem operar em tempo real dentro das limitações de memória e processamento dos equipamentos. Verificar também a implementação real em dispositivos com frequências de amostragens inferiores

para concessionárias de pequeno porte, zonas rurais e locais remotos.

Estudos futuros poderão contribuir significativamente para o aprimoramento dos sistemas de localização de faltas, garantindo maior precisão, aplicabilidade prática e viabilidade econômica na operação dos sistemas elétricos de potência.



APÊNDICE

A.1 Código de Geração de Arquivos .atp com Faltas Envolvendo Terra via MATLAB®

```
1      %C DIGO PARA GERA O DE ARQUIVOS .ATP COM FALTAS ENVOLVENDO TERRA
2
3      % Limpa o console e define variáveis de controle de erro
4      clear;
5      clc;
6
7      % Muda o diretório atual para o especificado e armazena o caminho real
8
9      b=cd('C:\ATP'); %esse diretório deve conter uma pasta "Registros" e o arquivo .atp do
      sistema modelo
10     realpath = pwd;
11
12     % Define os parâmetros do sistema
13     locais = 5; angulos = 4; impedancias = 4; tipos = 6; % sistema escolhido
14
15     % Define os valores dos parâmetros
16     loc = {'10.5', '0063', '0105', '0147', '0189'};
17     ang = {'000', '030', '060', '090'};
18     imp = {'0001', '0050', '0100', '0500'};
19     tip = {'_AT', '_BT', '_CT', 'ABT', 'ACT', 'BCT'};
20
21     %, 'ABC', '_AB', '_AC', '_BC'};
22
23
24     % Define o arquivo do sistema modelo .atp na variável modelo_ATP
25     modelo_ATP = 'NomeDoArquivo.atp';
26
27     % Cria e abre um arquivo .bat para escrita, na pasta "Registros"
28     fd3 = fopen('Registros\simular_arquivos_atp.bat', 'w');
29
30     % Escreve comandos no arquivo .bat, que executado no prompt de comando
```

```

31 fprintf(fd3, 'ECHO OFF\n'); %desativa a exibição dos comandos que estão sendo
    executados no prompt de comando
32 fprintf(fd3, 'REM\n'); %permite comentários no arquivo .bat
33 fprintf(fd3, 'cd D:\\ATP\\atpmingw'); %define o diretório do arquivo tpbigG.exe
34
35 %os arquivos .ATP gerados posteriormente por esse código devem estar no
36 %mesmo diretório do programa tpbigG.exe (copiar os arquivos gerados para
37 %l )
38 %o programa tpbigG.exe executa arquivos .atp
39
40 % La os para percorrer todas as combinações de locais, ângulos, impedâncias e tipos
41 for i = 1:locais
42     for j = 1:angulos
43         for k = 1:impedancias
44             for l = 1:tipos
45
46                 % Cria o nome do arquivo ATP com base na combinação atual de
                    parâmetros
47                 arquivo_ATP = sprintf('Registros\\%sang%SZ%s%.atp', loc{i}, ang{j},
                    imp{k}, tip{l}); %cria arquivo ATP
48                 arquivo_1 = sprintf('%sang%SZ%s%.1', loc{i}, ang{j}, imp{k}, tip{l});
                    %cria arquivo models
49
50                 % Adiciona comandos ao arquivo .bat
51                 fprintf(fd3, 'tpbigG %sang%SZ%s%.atp\n', loc{i}, ang{j}, imp{k},
                    tip{l}); %executa o programa tpbigG com o arquivo .atp
52                 fprintf(fd3, 'REN MODELS.1 %s\n', arquivo_1); %renomeia o arquivo
                    MODELS.1 gerado
53                 fprintf(fd3, '@if exist *.dbg del *.dbg\n'); %exclui os arquivos .dbg
54                 fprintf(fd3, 'REM\n');
55
56                 fd1 = fopen(modelo_ATP, 'r'); %abre arquivo para leitura
57                 fd2 = fopen(arquivo_ATP, 'w'); %abre arquivo para escrita
58                 nL = 1;
59                 linha = fgets(fd1);
60                 fprintf(fd2, '%s', linha);
61
62
63                 while ~feof(fd1)
64                     nL = nL + 1;
65                     linha = fgets(fd1);
66                     fprintf(fd2, '%s', linha);
67                 end
68
69
70 % NGULO
71 %30, 60 e 90, 00
72 % Aqui altera a parametrização do ângulo
73
74 x=[48 48 48]; %000
75
76 defineang = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a variável para "false" em
    todos os casos
77
78 for z=1:angulos
79     if strcmp(ang{z}, ang{j})
80         defineang(z) = {'true'};
81     end
82 end

```

A.1. CÓDIGO DE GERAÇÃO DE ARQUIVOS .ATP COM FALTAS ENVOLVENDO TERRA VIA MATLAB[®]

```

83
84 verific000 = {'true', 'false', 'false', 'false'};
85 verific030 = {'false', 'true', 'false', 'false'};
86 verific060 = {'false', 'false', 'true', 'false'};
87 verific090 = {'false', 'false', 'false', 'true'};
88
89 if isequal(defineang, verific000) %verifica se as variáveis lógicas são exatamente
    iguais
90     x = [48 51 51]; % 000 (0,033 s) = 033 % código ascii para o número, vai de 48
        =0 at 57 = 9. São 3 valores porque o tempo tem 3 algarismos
91 elseif isequal(defineang, verific030)
92     x = [48 51 53]; % 030 (0,035 s) = 035
93 elseif isequal(defineang, verific060)
94     x = [48 51 54]; % 060 (0.036 s) = 036
95 elseif isequal(defineang, verific090)
96     x = [48 51 56]; % 090 (0,038 s) = 008
97 end
98
99 % A- 2481+130
100 % B- 2417
101 % C- 2581
102
103
104 %Calcular quantos bytes tem até a posição do ângulo de incidência no
105 %código .atp
106
107 % Define o caminho do arquivo
108 b=cd('C:\ATP');
109 arquivo = 'NomeDoArquivo.atp';
110
111 % Ler o conteúdo do arquivo
112 conteudo = fileread(arquivo);
113
114 % Define o caractere a ser buscado
115 AnguloIncidenciaSetado = '.045'; % Substitua pelo valor desejado
116
117 % Encontra TODAS as posições do caractere alvo
118 posicoes = strfind(conteudo, AnguloIncidenciaSetado);
119
120 if length(posicoes) < 3
121     fprintf('Menos de três ocorrências de "%s" foram encontradas no arquivo.\n',
        AnguloIncidenciaSetado);
122 else
123     % Converte a string completa para bytes assumindo codificação UTF-8
124     conteudo_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
125
126     % Obtém os bytes até a primeira, segunda e terceira ocorrências
127 BytesIncidenciaA = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(1)-2), 'UTF-8'));
128 BytesIncidenciaB = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(2)-2), 'UTF-8'));
129 BytesIncidenciaC = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(3)-2), 'UTF-8'));
130 % BytesTerra = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(4)-1), 'UTF-8'));
131 end
132
133
134
135
136 fseek(fd2, BytesIncidenciaA, 'bof'); %Move o ponteiro para o byte 2112
137 fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ângulo para fase A
138 fseek(fd2, BytesIncidenciaB, 'bof');

```

```

139 fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase B
140 fseek(fd2, BytesIncidenciaC, 'bof');
141 fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase C
142
143
144 %TIPO DE FALTA
145 %O valor num rico da fun o fseek indica a quantidade de caracteres at o
146 %valor a ser alterado
147 %Altera a parametriza o
148
149 x = [57 46 57 57 57]; %corresponde ao valor 9.999, que far a chave da falta abrir
150
151 definetip = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
152             'false', 'false'};
153
154 for z=1:tipos
155     if strcmp(tip{z}, tip{1})
156         definetip(z) = {'true'};
157     end
158 end
159
160 verifictipAT = {'true', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
161               'false', 'false', 'false'};
162 verifictipBT = {'false', 'true', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
163               'false', 'false', 'false'};
164 verifictipCT = {'false', 'false', 'true', 'false', 'false', 'false', 'false',
165               'false', 'false', 'false'};
166 verifictipABT = {'false', 'false', 'false', 'true', 'false', 'false', 'false',
167                'false', 'false', 'false'};
168 verifictipACT = {'false', 'false', 'false', 'false', 'true', 'false', 'false',
169                'false', 'false', 'false'};
170 verifictipBCT = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'true', 'false',
171                'false', 'false', 'false'};
172 % verifictipABC = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'true',
173                 'false', 'false', 'false'};
174 % verifictipAB = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
175                 'true', 'false', 'false'};
176 % verifictipAC = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
177                 'false', 'true', 'false'};
178 % verifictipBC = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
179                 'false', 'false', 'true'};
180
181 %Faltas com Terra
182
183 %fseek(fd2, (BytesTerra-1), 'bof'); %abre a chave da falta em B
184 %fwrite(fd2, x, 'char');
185
186
187 if isequal(definetip, verifictipAT)
188
189     % AT: Na defini o do tipo, a a o fseek/fwrite substitui o tempo de abertura
190     % da chave para as fases
191     % que n o queremos que operem para o tempo de 9.999 segundos
192     % A fun o fseek posiciona o cursor de acordo com a quantidade de
193     % caracteres anteriores (que o valor num rico na fun o)
194     %Quantidade de caracteres para a falta em:
195     %A - 2232; B - 2150; C - 2314
196
197     fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da falta em B

```

```

186     fwrite(fd2, x, 'char');
187     fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof'); %abre a chave da falta em C
188     fwrite(fd2, x, 'char');
189
190
191     elseif isequal(definetip, verifictipBT)
192         % BT
193         fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof');
194         fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase A
195         fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof');
196         fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase C
197
198
199     elseif isequal(definetip, verifictipCT)
200         % CT
201         fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof');
202         fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase A
203         fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da falta em B
204         fwrite(fd2, x, 'char');
205
206
207     elseif isequal(definetip, verifictipABT)
208         % ABT
209         fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof'); %abre a chave da falta em C
210         fwrite(fd2, x, 'char');
211
212
213     elseif isequal(definetip, verifictipACT)
214         % ACT
215         fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da falta em B
216         fwrite(fd2, x, 'char');
217
218
219     elseif isequal(definetip, verifictipBCT)
220         % BCT
221         fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof'); %abre a chave da falta em A
222         fwrite(fd2, x, 'char');
223
224
225     elseif isequal(definetip, verifictipABC)
226         % ABC
227         % n o faz nada
228
229     elseif isequal(definetip, verifictipAB)
230         % AB
231         fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof'); %abre a chave da falta em C
232         fwrite(fd2, x, 'char');
233
234         %Aqui irei abrir a chave conectada ao n XX0003XX0002 para
235         %desconectar o aterramento das faltas
236
237         fseek(fd2, 2661, 'bof');
238         fwrite(fd2, x, 'char');
239
240     elseif isequal(definetip, verifictipAC)
241         % AC
242
243         fseek(fd2, 2546, 'bof'); %abre a chave da falta em B
244         fwrite(fd2, x, 'char');

```

```

245
246     %Aqui irei abrir a chave conectada ao n   XX0003XX0002 para
247     %desconectar o aterramento das faltas
248
249     fseek(fd2, 2661, 'bof');
250     fwrite(fd2, x, 'char');
251
252 elseif isequal(definetip, verifictipBC)
253     % BC
254
255     fseek(fd2, 2629, 'bof'); %abre a chave da falta em A
256     fwrite(fd2, x, 'char');
257
258     %Aqui irei abrir a chave conectada ao n   XX0003XX0002 para
259     %desconectar o aterramento das faltas
260
261     fseek(fd2, 2661, 'bof');
262     fwrite(fd2, x, 'char');
263
264 end
265
266
267 x=[48 48 48]; %000
268
269 defineang = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a variavel para "false" em
    todos os casos
270
271 for z=1:angulos
272     if strcmp(ang{z}, ang{j})
273         defineang(z) = {'true'};
274     end
275 end
276
277
278 %IMPED NCIA
279 % Aqui altera a parametriza o da imped ncia
280 x = [46 48 48 48 49];
281
282 defineimp = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a variavel para "false" em
    todos os casos
283
284 for z=1:impedancias
285     if strcmp(imp{z}, imp{k})
286         defineimp(z) = {'true'};
287     end
288 end
289
290 %Calcular quantos bytes tem at a posi o do ngulo da imped ncia no
291 %c digo .atp
292
293 % Define o caminho do arquivo
294 b=cd('C:\ATP');
295 arquivo = 'NomeDoArquivo.atp';
296
297 % L o conte do do arquivo
298 conteudo = fileread(arquivo);
299
300 % Define o caractere a ser buscado
301 ImpedanciaSetado = '888'; % Substitua pelo valor desejado

```

A.1. CÓDIGO DE GERAÇÃO DE ARQUIVOS .ATP COM FALTAS ENVOLVENDO TERRA VIA MATLAB®

```

302
303 % Encontra TODAS as posições do caractere alvo
304 posicoes = strfind(conteudo, ImpedanciaSetado);
305 %posicoes = strfind(upper(conteudo), 'IMPEDANCIA'); % Ignora diferença entre
      maiúsculas e minúsculas
306
307
308 % Converte a string completa para bytes assumindo codificação UTF-8
309 conteudo_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
310
311 % Obtém os bytes da primeira, segunda e terceira ocorrências
312 BytesImpedancia = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(1)-3), 'UTF-8'));
313 % if isempty(posicoes) || posicoes(1) < 2
314 %     error('A variável posicoes está vazia ou tem um valor inválido.');
```

```

315 % end
316 %
317 % % Converter para string (se necessário) e garantir indexação válida
318 % BytesImpedancia = length(unicode2native(char(conteudo(1:posicoes(1)-2)), 'UTF-8'));
319
320
321
322 verificimp01 = {'true', 'false', 'false', 'false'};
323 verificimp50 = {'false', 'true', 'false', 'false'};
324 verificimp100 = {'false', 'false', 'true', 'false'};
325 verificimp500 = {'false', 'false', 'false', 'true'};
326
327 if isequal(defineimp, verificimp01)
328     x = [48 48 49]; % código ASCII para o número, vai de 48 = 0 até 57 = 9. São 3
      valores porque o tempo tem 3 algarismos
329         % imp = 001
330 elseif isequal(defineimp, verificimp50)
331     x = [48 53 48]; % imp = 050
332 elseif isequal(defineimp, verificimp100)
333     x = [49 48 48]; % imp = 100
334 elseif isequal(defineimp, verificimp500)
335     x = [53 48 48]; % imp = 500
336 end
337
338
339 %quantidade de caracteres da impedância da falta
340
341 fseek(fd2, BytesImpedancia, 'bof');
342 fwrite(fd2, x, 'char');
```

```

343
344
345 %LOCAIS
346 % Aqui altera a parametrização do local
347 x = [46 48 48 48 49];
348
349 defineloc = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a variável para
      "false" em todos os casos
350
351 for z=1:locais
352     if strcmp(loc{z}, loc{i})
353         defineloc(z) = {'true'};
354     end
355 end
356
357 verificlocA = {'true', 'false', 'false', 'false', 'false'};
```

```

358 verificlocB = {'false', 'true', 'false', 'false', 'false'};
359 verificlocC = {'false', 'false', 'true', 'false', 'false'};
360 verificlocD = {'false', 'false', 'false', 'true', 'false'};
361 verificlocE = {'false', 'false', 'false', 'false', 'true'};
362
363
364 if isequal(defineloc, verificlocA)
365     x = [49 48 46 53]; % '10.5'
366 elseif isequal(defineloc, verificlocB)
367     x = [48 48 54 51]; % '0063'
368 elseif isequal(defineloc, verificlocC)
369     x = [48 49 48 53]; % '0105'
370 elseif isequal(defineloc, verificlocD)
371     x = [48 49 52 55]; % '0147'
372 elseif isequal(defineloc, verificlocE)
373     x = [48 49 56 57]; % '0189'
374 end
375
376
377
378 %Calcular quantos bytes tem at a posi o do local da falta no c digo .atp
379
380 % Define o caminho do arquivo
381 b=cd('C:\ATP');
382 arquivo = 'NomeDoArquivo.atp';
383
384 % L o conte do do arquivo
385 conteudo = fileread(arquivo);
386
387 % Define o caractere a ser buscado
388 LocalASetado = 'B10.5A'; % Substitua pelo valor desejado
389 LocalBSetado = 'B10.5B';
390 LocalCSetado = 'B10.5C';
391
392 % Encontra TODAS as posi es do caractere alvo
393 posicaoLocalA = strfind(conteudo, LocalASetado);
394 posicaoLocalB = strfind(conteudo, LocalBSetado);
395 posicaoLocalC = strfind(conteudo, LocalCSetado);
396
397 % if length(posicoes) < 3
398 % fprintf('Menos de tr s ocorr ncias de "%s" foram encontradas no arquivo.\n',
399 % AnguloIncidenciaSetado);
400 % else
401 % Converte a string completa para bytes assumindo codifica o UTF-8
402 posicaoLocalA_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
403 posicaoLocalB_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
404 posicaoLocalC_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
405
406 % Obt m os bytes at a primeira, segunda e terceira ocorr ncias
407 BytesIncidenciaA = length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalA-2)), 'UTF-8'));
408 BytesIncidenciaB = length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalB-2)), 'UTF-8'));
409 BytesIncidenciaC = length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalC-2)), 'UTF-8'));
410
411
412 % Os valores num ricos do fseek indicam as posi es dos dados que precisam ser
413 % alterados.
414 %que s o as 3 fases do local do curto-circuito, onde a chave de curto se prende

```

```

415 fseek(fd2, BytesIncidenciaA, 'bof'); %faltaB
416 fwrite(fd2, x, 'char');
417 fseek(fd2, BytesIncidenciaB, 'bof'); %faltaA
418 fwrite(fd2, x, 'char');
419 fseek(fd2, BytesIncidenciaC, 'bof'); %faltaC
420 fwrite(fd2, x, 'char');
421
422 fclose(fd1);
423 fclose(fd2);
424     end
425 end
426 end
427 end
428
429 % Escreve comandos no arquivo .bat
430 % fileID = fopen('Registros\simular_arquivos_atp.bat', 'a');
431 % fprintf(fileID, '@if exist Models.1 del Models.1\r\n');
432 % fprintf(fileID, '@if exist Graphics del Graphics\r\n');
433 % fprintf(fileID, '@if exist *.aux del *.aux\r\n');
434 % fprintf(fileID, '@if exist *.bin del *.bin\r\n');
435 % fprintf(fileID, '@if exist *.tmp del *.tmp\r\n');
436 % fprintf(fileID, '@if exist *.dbg del *.dbg\r\n');
437 % fprintf(fileID, '@if exist *.lis del *.lis\r\n');
438 % fprintf(fileID, '@if exist *.pch del *.pch\r\n');
439 % fprintf(fileID, '@if exist *.atp del *.atp\r\n');
440 % fprintf(fileID, '@if exist *.bak del *.bak\r\n');
441 % fprintf(fileID, '@if exist *.pl4 del *.pl4\r\n');
442 % fprintf(fileID, '@if exist *.mdl del *.mdl\r\n');
443 % fprintf(fileID, '@if exist *.pl4 del *.pl4\r\n');
444 % fprintf(fileID, '@if exist *.atp del *.atp\r\n');
445 % fclose(fileID);
446 fclose(fd3);

```

A.2 Código de Geração de Arquivos .atp com Falhas sem Terra via MATLAB®

```

1 %C DIGO PARA GERA O DE ARQUIVOS .ATP COM FALTAS SEM TERRA
2
3 % Limpa o console e define variáveis de controle de erro
4 clear;
5 clc;
6
7 % Muda o diretório atual para o especificado e armazena o caminho real
8
9 b=cd('C:\ATP'); %esse diretório deve conter uma pasta "Registros" e o arquivo .atp do
   sistema modelo
10 realpath = pwd;
11
12 % Define os parâmetros do sistema
13 locais = 5; angulos = 4; impedancias = 4; tipos = 4; % sistema escolhido
14
15 % Define os valores dos parâmetros
16 loc = {'10.5', '0063', '0105', '0147', '0189'};
17 ang = {'000', '030', '060', '090'};

```

```

18 imp = {'0001', '0050', '0100', '0500'};
19 tip = {'ABC', '_AB', '_AC', '_BC'};
20 %tip = {'_AT', '_BT', '_CT', 'ABT', 'ACT', 'BCT'};
21
22
23
24 % Define o arquivo do sistema modelo .atp na variavel modelo_ATP
25 modelo_ATP = 'NomeDoArquivo.atp';
26
27 % Cria e abre um arquivo .bat para escrita, na pasta "Registros"
28 fd3 = fopen('Registros\\simular_arquivos_atp.bat', 'w');
29
30 % Escreve comandos no arquivo .bat, que executado no prompt de comando
31 fprintf(fd3, 'ECHO OFF\n'); %desativa a exibição dos comandos que estão sendo
    executados no prompt de comando
32 fprintf(fd3, 'REM\n'); %permite comentários no arquivo .bat
33 fprintf(fd3, 'cd D:\\ATP\\atpmingw'); %define o diretório do arquivo tpbigG.exe
34
35 %os arquivos .ATP gerados posteriormente por esse código devem estar no
36 %mesmo diretório do programa tpbigG.exe (copiar os arquivos gerados para
37 %l )
38 %o programa tpbigG.exe executa arquivos .atp
39
40 % La os para percorrer todas as combinações de locais, ângulos, impedâncias e tipos
41 for i = 1:locais
42     for j = 1:angulos
43         for k = 1:impedancias
44             for l = 1:tipos
45
46                 % Cria o nome do arquivo ATP com base na combinação atual de
                    parâmetros
47                 arquivo_ATP = sprintf('Registros\\%sang%SZ%s%.atp', loc{i}, ang{j},
                    imp{k}, tip{l}); %cria arquivo ATP
48                 arquivo_1 = sprintf('%sang%SZ%s%.1', loc{i}, ang{j}, imp{k}, tip{l});
                    %cria arquivo models
49
50                 % Adiciona comandos ao arquivo .bat
51                 fprintf(fd3, 'tpbigG %sang%SZ%s%.atp\n', loc{i}, ang{j}, imp{k},
                    tip{l}); %executa o programa tpbigG com o arquivo .atp
52                 fprintf(fd3, 'REN MODELS.1 %s\n', arquivo_1); %renomeia o arquivo
                    MODELS.1 gerado
53                 fprintf(fd3, '@if exist *.dbg del *.dbg\n'); %exclui os arquivos .dbg
54                 fprintf(fd3, 'REM\n');
55
56                 fd1 = fopen(modelo_ATP, 'r'); %abre arquivo para leitura
57                 fd2 = fopen(arquivo_ATP, 'w'); %abre arquivo para escrita
58                 nL = 1;
59                 linha = fgets(fd1);
60                 fprintf(fd2, '%s', linha);
61
62
63                 while ~feof(fd1)
64                     nL = nL + 1;
65                     linha = fgets(fd1);
66                     fprintf(fd2, '%s', linha);
67                 end
68
69
70 % NGULO

```

```

71 %30, 60 e 90, 00
72 % Aqui altera a parametriza o do ngulo
73
74 x=[48 48 48]; %000
75
76 defineang = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a vari vel para "false" em
    todos os casos
77
78 for z=1:angulos
79     if strcmp(ang{z}, ang{j})
80         defineang(z) = {'true'};
81     end
82 end
83
84 verific000 = {'true', 'false', 'false', 'false'};
85 verific030 = {'false', 'true', 'false', 'false'};
86 verific060 = {'false', 'false', 'true', 'false'};
87 verific090 = {'false', 'false', 'false', 'true'};
88
89 if isequal(defineang, verific000) %verifica se as vari veis l gicas s o exatamente
    iguais
90     x = [48 51 51]; % 000 (0,033 s) = 033 % c digo ascii para o n mero , vai de 48
        =0 at 57 = 9. S o 3 valores porque o tempo tem 3 algarismos
91 elseif isequal(defineang, verific030)
92     x = [48 51 53]; % 030 (0,035 s) = 035
93 elseif isequal(defineang, verific060)
94     x = [48 51 54]; % 060 (0.036 s) = 036
95 elseif isequal(defineang, verific090)
96     x = [48 51 56]; % 090 (0,038 s) = 008
97 end
98
99 % A- 2481+130
100 % B- 2417
101 % C- 2581
102
103
104 %Calcular quantos bytes tem at a posi o do ngulo de incid ncia no
105 %c digo .atp
106
107 % Define o caminho do arquivo
108 b=cd('C:\ATP');
109 arquivo = 'NomeDoArquivo.atp';
110
111 % L o conte do do arquivo
112 conteudo = fileread(arquivo);
113
114 % Define o caractere a ser buscado
115 AnguloIncidenciaSetado = '.045'; % Substitua pelo valor desejado
116
117 % Encontra TODAS as posi es do caractere alvo
118 posicoes = strfind(conteudo, AnguloIncidenciaSetado);
119
120 if length(posicoes) < 7
121     fprintf('Menos de tr s ocorr ncias de "%s" foram encontradas no arquivo.\n',
        AnguloIncidenciaSetado);
122 else
123     % Converte a string completa para bytes assumindo codifica o UTF-8
124     conteudo_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
125

```

```

126     %No c digo ATP, neces rio que as chaves estejam em ordem de 01 a 07
127
128     % Obt m os bytes de cada uma das 7 ocorr ncias
129     BytesIncidenciaC1 = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(1)-2), 'UTF-8'));
130     BytesIncidenciaC2 = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(2)-2), 'UTF-8'));
131     BytesIncidenciaC3 = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(3)-2), 'UTF-8'));
132     BytesIncidenciaC4 = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(4)-2), 'UTF-8'));
133     BytesIncidenciaC5 = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(5)-2), 'UTF-8'));
134     BytesIncidenciaC6 = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(6)-2), 'UTF-8'));
135     BytesIncidenciaC7 = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(7)-2), 'UTF-8'));
136 end
137
138
139 %se falta AB
140 fseek(fd2, BytesIncidenciaC1, 'bof'); %Chave C1
141 fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo de 0.045 para valor definido em X
142 fseek(fd2, BytesIncidenciaC2, 'bof'); %Chave C2
143 fwrite(fd2, x, 'char');
144 fseek(fd2, BytesIncidenciaC3, 'bof'); %Chave C3
145 fwrite(fd2, x, 'char');
146 fseek(fd2, BytesIncidenciaC4, 'bof'); %Chave C4
147 fwrite(fd2, x, 'char');
148 fseek(fd2, BytesIncidenciaC5, 'bof'); %Chave C5
149 fwrite(fd2, x, 'char');
150 fseek(fd2, BytesIncidenciaC6, 'bof'); %Chave C6
151 fwrite(fd2, x, 'char');
152 fseek(fd2, BytesIncidenciaC7, 'bof'); %Chave C7
153 fwrite(fd2, x, 'char');
154
155 %TIPO DE FALTA
156 %O valor num rico da fun o fseek indica a quantidade de caracteres at o
157 %valor a ser alterado
158 %Altera a parametriza o
159
160 x = [57 46 57 57 57]; %corresponde ao valor 9.999, que far a chave da falta abrir
161
162 definetip = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
163             'false', 'false'};
164
165 for z=1:tipos
166     if strcmp(tip{z}, tip{1})
167         definetip(z) = {'true'};
168     end
169 end
170
171 verifictipABC = {'true', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
172                 'false', 'false', 'false'};
173 verifictipAB = {'false', 'true', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false',
174                 'false', 'false', 'false'};
175 verifictipAC = {'false', 'false', 'true', 'false', 'false', 'false', 'false',
176                 'false', 'false', 'false'};
177 verifictipBC = {'false', 'false', 'false', 'true', 'false', 'false', 'false', 'false',
178                 'false', 'false'};
179
180 %Faltas com Terra
181
182 %fseek(fd2, (BytesTerra-1), 'bof'); %abre a chave da falta em B
183 %fwrite(fd2, x, 'char');

```

```

180
181
182 %Falta AB - Abre chaves C3, C4, C6, C7
183 %Falta BC - Abre chaves C1, C4, C5, C7
184 %Falta AC - Abre chaves C2, C5, C6, C7
185 %Falta ABC - Abre chaves C2, C5, C6, C7
186
187 % if isequal(definetip, verifictipAT)
188
189     %Na defini o do tipo, a a o fseek/fwrite substitui o tempo de abertura da
        chave para as fases
190     % que n o queremos que operem para o tempo de 9.999 segundos
191     % A fun o fseek posiciona o cursor de acordo com a quantidade de
192     % caracteres anteriores (que o valor num rico na fun o)
193
194 %     % AT
195 %
196 %     fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da falta em B
197 %     fwrite(fd2, x, 'char');
198 %     fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof'); %abre a chave da falta em C
199 %     fwrite(fd2, x, 'char');
200 %
201 %
202 % elseif isequal(definetip, verifictipBT)
203 %     % BT
204 %     fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof');
205 %     fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase A
206 %     fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof');
207 %     fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase C
208 %
209 %
210 % elseif isequal(definetip, verifictipCT)
211 %     % CT
212 %     fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof');
213 %     fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase A
214 %     fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da falta em B
215 %     fwrite(fd2, x, 'char');
216 %
217 %
218 % elseif isequal(definetip, verifictipABT)
219 %     % ABT
220 %     fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof'); %abre a chave da falta em C
221 %     fwrite(fd2, x, 'char');
222 %
223 %
224 % elseif isequal(definetip, verifictipACT)
225 %     % ACT
226 %     fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da falta em B
227 %     fwrite(fd2, x, 'char');
228 %
229 %
230 % elseif isequal(definetip, verifictipBCT)
231 %     % BCT
232 %     fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof'); %abre a chave da falta em A
233 %     fwrite(fd2, x, 'char');
234 %
235 %
236 % ABC
237 if isequal(definetip, verifictipABC)

```

```
238      %Falta ABC - Abre chaves C2, C5, C6, C7
239      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC2-2), 'bof');
240      fwrite(fd2, x, 'char');
241      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC5-2), 'bof');
242      fwrite(fd2, x, 'char');
243      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC6-2), 'bof');
244      fwrite(fd2, x, 'char');
245      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC7-2), 'bof');
246      fwrite(fd2, x, 'char');
247
248      elseif isequal(definetip, verifictipAB)
249      %Falta AB - Abre chaves C3, C4, C6, C7
250
251      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC3-2), 'bof');
252      fwrite(fd2, x, 'char');
253      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC4-2), 'bof');
254      fwrite(fd2, x, 'char');
255      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC6-2), 'bof');
256      fwrite(fd2, x, 'char');
257      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC7-2), 'bof');
258      fwrite(fd2, x, 'char');
259
260
261
262      elseif isequal(definetip, verifictipAC)
263
264      %Falta AC - Abre chaves C2, C5, C6, C7
265
266      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC2-2), 'bof');
267      fwrite(fd2, x, 'char');
268      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC5-2), 'bof');
269      fwrite(fd2, x, 'char');
270      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC6-2), 'bof');
271      fwrite(fd2, x, 'char');
272      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC7-2), 'bof');
273      fwrite(fd2, x, 'char');
274
275
276      elseif isequal(definetip, verifictipBC)
277      % BC
278      %Falta BC - Abre chaves C1, C4, C5, C7
279
280      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC1-2), 'bof');
281      fwrite(fd2, x, 'char');
282      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC4-2), 'bof');
283      fwrite(fd2, x, 'char');
284      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC5-2), 'bof');
285      fwrite(fd2, x, 'char');
286      fseek(fd2, (BytesIncidenciaC7-2), 'bof');
287      fwrite(fd2, x, 'char');
288
289      end
290
291
292      x=[48 48 48]; %000
293
294      defineang = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a vari vel para "false" em
                todos os casos
295
```

```

296 for z=1:angulos
297     if strcmp(ang{z}, ang{j})
298         defineang(z) = {'true'};
299     end
300 end
301
302
303 %IMPED NCIA
304 % Aqui altera a parametriza o da imped ncia
305 x = [46 48 48 48 49];
306
307 defineimp = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a vari vel para "false" em
        todos os casos
308
309 for z=1:impedancias
310     if strcmp(imp{z}, imp{k})
311         defineimp(z) = {'true'};
312     end
313 end
314
315 %Calcular quantos bytes tem at a posi o do das imped ncias no
316 %c digo .atp
317
318 % Define o caminho do arquivo
319 b=cd('C:\ATP');
320 arquivo = 'NomeDoArquivo.atp';
321
322 % L o conte do do arquivo
323 conteudo = fileread(arquivo);
324
325 % Define o caractere a ser buscado
326 ImpedanciaSetado = '888'; % Substitua pelo valor desejado
327
328 % Encontra TODAS as posi es do caractere alvo
329 posicoes = strfind(conteudo, ImpedanciaSetado);
330
331 if length(posicoes) < 3
332     fprintf('Menos de tr s ocorr ncias de "%s" foram encontradas no arquivo.\n',
        ImpedanciaSetado);
333 else
334     % Converte a string completa para bytes assumindo codifica o UTF-8
335     conteudo_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
336
337     % Obt m os bytes de cada uma das 7 ocorr ncias
338     BytesImpedanciaAB = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(1)-3), 'UTF-8'));
339     BytesImpedanciaBC = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(2)-3), 'UTF-8'));
340     BytesImpedanciaCA = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(3)-3), 'UTF-8'));
341
342 end
343
344
345 verificimp01 = {'true', 'false', 'false', 'false'};
346 verificimp50 = {'false', 'true', 'false', 'false'};
347 verificimp100 = {'false', 'false', 'true', 'false'};
348 verificimp500 = {'false', 'false', 'false', 'true'};
349
350 if isequal(defineimp, verificimp01)
351     x = [48 48 49]; % c digo ascii para o n mero, vai de 48 =0 at 57 = 9. S o 3
        valores porque o tempo tem 3 Algarismos

```

```
352                                     % imp = 001
353 elseif isequal(defineimp, verificimp50)
354     x = [48 53 48]; % imp = 050
355 elseif isequal(defineimp, verificimp100)
356     x = [49 48 48]; % imp = 100
357 elseif isequal(defineimp, verificimp500)
358     x = [53 48 48]; % imp = 500
359 end
360
361
362 %quantidade de caracteres da imped ncia da falta
363
364 fseek(fd2,BytesImpedanciaAB, 'bof');
365 fwrite(fd2, x, 'char');
366 fseek(fd2,BytesImpedanciaBC, 'bof');
367 fwrite(fd2, x, 'char');
368 fseek(fd2,BytesImpedanciaCA, 'bof');
369 fwrite(fd2, x, 'char');
370
371
372 %LOCAIS
373 % Aqui altera a parametriza o do local
374 x = [46 48 48 48 49];
375
376 defineloc = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a vari vel para
    "false" em todos os casos
377
378 for z=1:locais
379     if strcmp(loc{z}, loc{i})
380         defineloc(z) = {'true'};
381     end
382 end
383
384 verificlocA = {'true', 'false', 'false', 'false', 'false'};
385 verificlocB = {'false', 'true', 'false', 'false', 'false'};
386 verificlocC = {'false', 'false', 'true', 'false', 'false'};
387 verificlocD = {'false', 'false', 'false', 'true', 'false'};
388 verificlocE = {'false', 'false', 'false', 'false', 'true'};
389
390
391 if isequal(defineloc, verificlocA)
392     x = [49 48 46 53]; % '10.5'
393 elseif isequal(defineloc, verificlocB)
394     x = [48 48 54 51]; % '0063'
395 elseif isequal(defineloc, verificlocC)
396     x = [48 49 48 53]; % '0105'
397 elseif isequal(defineloc, verificlocD)
398     x = [48 49 52 55]; % '0147'
399 elseif isequal(defineloc, verificlocE)
400     x = [48 49 56 57]; % '0189'
401 end
402
403
404
405 %Calcular quantos bytes tem at a posi o do local da falta no c digo .atp
406
407 % Define o caminho do arquivo
408 b=cd('C:\ATP');
409 arquivo = 'NomeDoArquivo.atp';
```

```

410
411 % L o conte do do arquivo
412 conteudo = fileread(arquivo);
413
414 % Define o caractere a ser buscado
415 LocalASetado = 'B10.5A'; % Substitua pelo valor desejado
416 LocalBSetado = 'B10.5B';
417 LocalCSetado = 'B10.5C';
418
419 % Encontra TODAS as posi es do caractere alvo
420 posicaoLocalA = strfind(conteudo, LocalASetado);
421 posicaoLocalB = strfind(conteudo, LocalBSetado);
422 posicaoLocalC = strfind(conteudo, LocalCSetado);
423
424 % if length(posicoes) < 3
425 %     fprintf('Menos de tr s ocorr ncias de "%s" foram encontradas no arquivo.\n',
426 %         AnguloIncidenciaSetado);
427 % else
428 %     Converte a string completa para bytes assumindo codifica o UTF-8
429     posicaoLocalA_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
430     posicaoLocalB_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
431     posicaoLocalC_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
432
433 % Obt m os bytes at a primeira, segunda e terceira ocorr ncias
434 BytesIncidenciaA = length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalA-2)), 'UTF-8'));
435 BytesIncidenciaB = length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalB-2)), 'UTF-8'));
436 BytesIncidenciaC = length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalC-2)), 'UTF-8'));
437
438
439 % Os valores num ricos do fseek indicam as posi es dos dados que precisam ser
440 % alterados.
441 % que s o as 3 fases do local do curto-circuito, onde a chave de curto se prende
442
443 fseek(fd2, BytesIncidenciaA, 'bof'); %faltaB
444 fwrite(fd2, x, 'char');
445 fseek(fd2, BytesIncidenciaB, 'bof'); %faltaA
446 fwrite(fd2, x, 'char');
447 fseek(fd2, BytesIncidenciaC, 'bof'); %faltaC
448 fwrite(fd2, x, 'char');
449
450 fclose(fd1);
451 fclose(fd2);
452     end
453     end
454 end
455
456 % Escreve comandos no arquivo .bat
457 % fileID = fopen('Registros\simular_arquivos_atp.bat', 'a');
458 % fprintf(fileID, '@if exist Models.1 del Models.1\r\n');
459 % %fprintf(fileID, '@if exist Graphics del Graphics\r\n');
460 % fprintf(fileID, '@if exist *.aux del *.aux\r\n');
461 % fprintf(fileID, '@if exist *.bin del *.bin\r\n');
462 % fprintf(fileID, '@if exist *.tmp del *.tmp\r\n');
463 % fprintf(fileID, '@if exist *.dbg del *.dbg\r\n');
464 % fprintf(fileID, '@if exist *.lis del *.lis\r\n');
465 % fprintf(fileID, '@if exist *.pch del *.pch\r\n');
466 % %fprintf(fileID, '@if exist *.atp del *.atp\r\n');

```

```
467 % fprintf(fileID, '@if exist *.bak del *.bak\r\n');
468 % fprintf(fileID, '@if exist *.pl4 del *.pl4\r\n');
469 % fprintf(fileID, '@if exist *.mdl del *.mdl\r\n');
470 % fprintf(fileID, '@if exist *.pl4 del *.pl4\r\n');
471 % fprintf(fileID, '@if exist *.atp del *.atp\r\n');
472 % fclose(fileID);
473 fclose(fd3);
```

Referências Bibliográficas

- ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. *Flexible Power Transmission: The HVDC Options*. [S.l.]: Wiley, 2016.
- BEWLEY, L. V. Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, n. 2, June 1931. Citado na página 30.
- BORGES, C. L. T. *Análise de sistemas de potência*. Rio de Janeiro: EE-UFRJ, Departamento de Eletrotécnica, 2005.
- CERQUEIRA, M. V. d. S. Trabalho de Graduação (Engenheiro Eletricista), *Avaliação de métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes*. Distrito Federal: [s.n.], 2018. 74 p.
- COSTA, F. B. et al. Comparação de métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes em linhas de transmissão de sistemas lcc-hvdc. In: *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*. [S.l.: s.n.], 2021. Acesso em: [08 de fevereiro de 2025].
- CUNHA, L. S. *Estudo do comportamento de um sistema de distribuição de energia elétrica*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2018.
- Eletrobras. *Transmissão de Energia*. 2025. Acessado em: 17 mar. 2025. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Transmissao-de-Energia.aspx>>.
- FILHO, J. M. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. 437 p. E-book. Acesso em: 02 mar. 2025. ISBN 9788521637219. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637219/>>.
- FRANÇA, R. L. d. S. *Proteção de Linhas de Transmissão de Corrente Alternada Baseada em Ondas Viajantes Utilizando Um Terminal*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/24975/1/RafaelLucasDaSilvaFranca_DISSERT.pdf>.
- GALE, P. F. et al. Fault location based on travelling waves. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.]: IEEE, 1993. p. 54–59.
- GILANY, M.; IBRAHIM, D. K.; ELDIN, E. S. T. Esquema de localização de falhas baseado em ondas viajantes para sistema de cabos subterrâneos multiterminais. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, p. 82–89, 2007.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. Stamford: Cengage Learning, 2012.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1994.

GUNGOR, V. C. et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 13, n. 4, p. 2218–2227, 2016.

HUAMANI, M. *Implementação de algoritmos de proteção no domínio do tempo via Models-atp permitindo teste de software-in-the-loop*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2019.

HUDOMALJ, M.; TROST, A.; ČAMPA, A. Traveling wave method for event localization and characterization of power transmission lines. *Electric Power Systems Research*, v. 202, p. 110382, 2024. Available online: 11 April 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110382>>.

IEEE. *IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines*. [S.l.]: IEEE, 2004. <<https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9865>>. Status: superseded, DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.96207.

Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). *Integração de energias renováveis ao sistema elétrico brasileiro*. São Paulo: IEMA, 2024. Acesso em: 2 mar. 2025. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2024/08/notas_integracao_energia_renovavelIEMA.pdf>.

JIN, W. et al. Two-terminal traveling wave fault location approach based on frequency dependent electrical parameters of hvac cable transmission lines. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, PR China, v. 19, n. 4, p. 1467–1475, 2024. Received 12 December 2023, Revised 17 June 2024, Accepted 21 June 2024, Available online 1 July 2024, Version of Record 1 July 2024.

KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.

LAMBERT-TORRES, G. et al. Uma visão geral sobre a aplicação de sistemas inteligentes para diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos. *Controle Automação*, v. 21, n. 6, p. 581–594, 2010. ISSN 1807-8664. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ca/a/qxNMrmZzDQnR7JCJ7ThZBSc/>>.

LEITE, E. J. S. *Método Generalizado de Localização de Falhas Baseado na Teoria de Ondas Viajantes para Linhas de Transmissão Não-Homogêneas*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Distrito Federal, Brasil, 2020. Xvi, 90p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Doutor, Tese de Doutorado, 2020).

LEME, D. M. et al. *Sistema de proteção da rede de distribuição de energia elétrica*. Dissertação (Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica)) — Universidade São Francisco, Itatiba, 2013.

LIMA, J. R. et al. Localizador de faltas baseado na teoria das ondas viajantes e na transformada wavelet com dados apenas do terminal local. In: *XVI ERIAC*. [s.n.],

2015. Disponível em: <https://lapse.unb.br/publications/international_conferences/%5B2015%5D%20ERiac%20-%20Raimundo%20-%20Localizador%20de%20Faltas%20TW%20por%20Um%20Terminal.pdf>.

LIU, B.; DUAN, S.; CAI, T. Photovoltaic dc building module based bipv system - concept and design considerations. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, v. 26, n. 5, p. 1418–1429, May 2011. ISSN 0885-8993.

LOPES, F. et al. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 2, p. 873–880, 2018.

LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2014. Área de Concentração: Processamento da Energia. Orientadores: Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D., e Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

LOPES, F. V. Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 5, p. 2296–2304, 2016.

LOPES, F. V. et al. Past, present, and future trends of traveling wave-based fault location solutions. In: FEDERAL UNIVERSITY OF PARAÍBA (UFPB), FEDERAL RURAL UNIVERSITY OF PERNAMBUCO (UFRPE), UNIVERSITY OF BRASÍLIA (UNB), CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). *6th Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS 2021)*. [S.l.], 2021. Email: felipelopes@cear.ufpb.br.

MARTINS, A. L. D. *Proteção baseada em ondas viajantes*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Cidade, 2021. Copyright ©2021.

MARTINS, J. F. S.; LEMOS, R. P.; ALMEIDA, M. L. S. de. Filtro differentiator-smoother e transformada wavelet aplicados à localização de faltas. In: *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*. Brasil: [s.n.], 2024.

MATTOS, C. E. L. *Metodologia de Ensaio de Fluência em Cabos de Transmissão de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2015. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

MINERAÇÃO, O. da. *Emissões de gases de efeito estufa de usinas movidas a carvão crescem 57% e apontam retrocesso brasileiro*. 2021. <<https://observatoriodaminerao.com.br/emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-de-usinas-movidas-a-carvao-crescem-57-e-apontam-retrocesso-brasil>>. Acesso em: 23 fev. 2025.

MIRANDA, V. C. P. et al. Análise de dados na flutuação horária da velocidade do vento na região nordeste. *CBA2022*, v. 3, n. 1, 2022. Publicado em: 19 outubro 2022.

- MUZZAMMEL, R. Método baseado em ondas viajantes para estimativa de faltas em sistema de transmissão hvdc. *Energias*, v. 12, n. 19, p. 3614, 2019. Submissão recebida: 28 ago. 2019; Revisado: 15 set. 2019; Aceito: 18 set. 2019; Publicado: 21 set. 2019.
- NAIDU, O.; PRADHAN, A. K. A traveling wave-based fault location method using unsynchronized current measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 2, p. 505–513, 2019.
- NEOENERGIA. *Belo Monte*. 2025. <<https://www.neoenergia.com/energia-hidrica/belo-monte>>. Acesso em: 23 fev. 2025.
- OLIVEIRA, A.; MOREIRA, F.; PICANÇO, A. Accuracy analysis using the emd and vmd for two-terminal transmission line fault location based on traveling wave theory. *Electric Power Systems Research*, v. 224, n. 3, p. 109667, 2023. Publicado em: Novembro 2023.
- OLIVEIRA, L. F.; SOUZA, A. N. Técnicas de manutenção preditiva aplicadas a linhas de transmissão. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2020.
- ONS. *O Sistema em Números*. 2025. Acesso em: [insira a data de acesso]. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>.
- OROZCO, A. R. herrera. *Localização de faltas incipientes em sistemas de distribuição de energia elétrica com cabos subterrâneos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2017. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
- PAUL, C. R. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2008.
- RIBEIRO, F. L. W. N. E. L. J. J. P. Aplicação do filtro differentiator-smoother durante a análise de ondas viajantes em linhas de transmissão. *SBA - Sociedade Brasileira de Automática*, 2021. Acesso em: 23 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.sba.org.br/index.php/cba/article/view/956/896>>.
- RIBEIRO, L. M. A. et al. Modelagem de linhas de transmissão em programas emtp: Um estudo sobre a propagação de ondas viajantes. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, v. 1, n. 1, p. Artigo e2449, 2020. Publicado em 15 de fevereiro de 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2449>>.
- RIBEIRO, L. R.; LOPES, F. V.; COSTA, F. B. *Modelagem de Linhas de Transmissão em Programas EMTP: Um Estudo sobre a Propagação de Ondas Viajantes*. 2018. Acesso em: 23 fev. 2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/345881701_Modelagem_de_Linhas_de_Transmissao_em_Programas_EMTP_Um_Estudo_sobre_a_Propagacao_de_Ondas_Viajantes>.
- RODRIGO, P. D.; PAHWA, A.; BOYER, J. E. Location of outages in distribution systems based on statistical hypotheses testing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 1, p. 546–551, Jan 1996.
- SAHA, M. M. *Fault Location on Power Networks*. 1st. ed. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1447125259.

- SCHWEITZER, E. et al. Locating faults by the traveling waves they launch. In: *67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 95–110.
- SCHWEITZER, E. et al. Accurate single-end fault location and line-length estimation using traveling waves. In: *13th International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 2016.
- Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). *SEL-T400L Time-Domain Line Protection, Automation, and Control System*. [S.l.], 2024. Acesso em junho de 2025. Disponível em: <<https://selinc.com/products/t400l/>>.
- Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). *SEL-T401L Ultra-High-Speed Line Relay*. [S.l.], 2024. Acesso em junho de 2025. Disponível em: <<https://selinc.com/products/t401l/>>.
- Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). *SEL-TWFL Traveling-Wave Fault Locator*. [S.l.], 2024. Acesso em junho de 2025. Disponível em: <<https://selinc.com/products/twfl/>>.
- SILVA, M. d. *Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando ondas viajantes e transformada wavelet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2004. Acesso em: 23 fev. 2025. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-14012005-094447/publico/Dissertacao_Murilo_Definitiva_.pdf>.
- SILVEIRA, E. G. *Desafios na manutenção e localização de faltas em linhas de transmissão de energia*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- SKENDZIC, V. et al. New time-domain line protection principles and implementation. In: *8th Annual Protection, Automation and Control World Conference*. Wroclaw, Poland: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2017. Originally presented at the 13th International Conference on Developments in Power System Protection, March 2016.
- STARCK, J.; HAKALA-RANTA, A.; STEFANKA, M. *Switchgear Optimization Using IEC 61850-9-2 and Non-Conventional Measurements*. 2021. <<https://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/relays/testing-protection-ieds/>>. Acesso em: 15 maio 2025.
- VITOR, B. C. *Análise da influência dos dispositivos de medição na localização de faltas em linhas de transmissão utilizando filtro DS e Teoria das Ondas Viajantes*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Oeste da Bahia, Bom Jesus da Lapa–BA, 2025. Orientadora: Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira.
- ZHANG, X. P.; REHTANZ, C. *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*. [S.l.]: Springer, 2016.

CorujaT_EX



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